



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Марко Стојановић

**УТИЦАЈ ДРОБЉЕНЕ РЕЦИКЛИРАНЕ
ГУМЕ НА ОТПОРНОСТ БЕТОНА НА
ДЕЈСТВО МРАЗА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2025.

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Марко Стојановић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција):	др Слободан Шупић, доцент, Департман за грађевинарство и геодезију
Наслов рада:	Утицај дробљене рециклиране гуме на отпорност бетона на дејство мрза
Језик и писмо рада:	Српски
Физички опис рада:	Унети број: Страница: 376 Поглавља 8 Референци 142 Табела 173 Слика 122 Графикона 0 Прилога 17
Научна област:	Грађевинско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Теорија и технологија бетона
Кључне речи / предметна одредница:	Дробљена гума, добијање рециклираног ситног агрегата, чврстоћа при притиску, водонепропустност, отпорност бетона на дејство мрза без и уз присуство соли, скупљање, коефицијент миграције хлорида и статички модул еластичности
Апстракт на језику рада:	У дисертацији су приказани резултати сопственог експерименталног истраживања могућности примене дробљене гуме, добијене рециклирањем аутомобилских гума, као замене дела ситног агрегата у бетонским мешавинама, на којима ће бити истражена трајност очврслог бетона на дејство мрза без и уз присуство соли за одмрзавање. Истраживање је засновано на компаративној анализи 20 врста бетона, референтни бетон, бетон са хемијским додатком аерантом, и три врсте бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом која је варирана у корацима од 2.5%, 5% и 7.5%. На очврслном бетону испитивани су упијање воде, скупљање при сушењу, чврстоћа при притиску, водонепропустљивост, отпорност на дејство мрза без и уз присуство соли за одмрзавање, карактеризација ваздушних пора, коефицијент миграције хлорида и статички модул еластичности. Истакнуто је да се применом дробљене гуме као замене дела ситног агрегата могу добити конструкцијски бетони, односно бетони са задовољавајућим физичким и механичким карактеристикама.

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и дозвола за објављивање личних података;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају у институцији у штампаном и електронском облику и не коришће се са радом.

Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	28.02.2024.
Датум одбране: (Попуњава накнадно институција)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Ксенија Јанковић, научни саветник, Институт ИМС, Београд Члан: проф. др Иван Лукић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: проф. др Ненад Ристић, ванредни професор, Универзитет у Нишу, Грађевинско – архитектонски факултет Члан: др Драган Бојовић, научни сарадник, Институт ИМС, Београд
Напомена:	

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING AND GEODESY**

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Marko Stojanovic
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	Dr Slobodan Šupić, Asistent Professor, Department of Civil Engineering and Geodesy, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad
Thesis title in English:	The influence of crushed recycled rubber on the frost resistance of concrete
Language and script:	Serbian
Physical description:	Number of: Pages 376 Chapters 8 References 142 Tables 173 Illustrations 122 Graphs 0 Appendices 17
Scientific field:	Civil Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Theory and Technology of Concrete Crushed Recycled Rubber, Concrete, Physical and Mechanical Properties
Subject, Key words:	Crumb rubber, production of recycled fine aggregate, compressive strength, water impermeability, frost resistance of concrete without and with the presence of salt, shrinkage, chloride migration coefficient and static modulus of elasticity
Abstract in English:	The dissertation describes the findings of an own experimental investigation exploring the feasibility of employing rubber crumbs derived from recycled vehicle tires as a partial volumetric replacement for fine aggregate in concrete mixtures. The durability of the hardened concrete against frost, both with and without the presence of de-icing salts, was thoroughly examined. The research is founded on a comparative analysis of 20 different concrete types, including reference concrete, concrete with a chemical air-entraining admixture, and three variations of concrete where fine aggregate was partially replaced with crumb rubber in increments of 2.5%, 5%, and 7.5% by volume. The hardened concrete was tested for various properties, including water absorption, drying shrinkage, compressive strength, water impermeability, frost resistance with and without de-icing salt, air pore characterization, chloride migration coefficient, and static modulus of elasticity. The study revealed that incorporating rubber crumbs as a partial replacement for fine aggregate in concrete can yield a material with acceptable physical and mechanical properties, making it suitable for structural applications.

² The author of the doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authorship,

5B – Statement that the printed and e-version of the doctoral dissertation are identical and authorization to use personal data,

5r – Copyright statement.

The paper and e-versions of Statements are held at the institution and are not included into the printed thesis.

Date of endorsement by the scientific board:	28.02.2024.
Date of defence: (Filled in by the institution)	
Thesis defence board: (title, first name, last name, position, institution)	Chair: Dr Ksenija Janković, Principal Research Fellow, IMS Institute, Belgrade Member: Prof. Dr Ivan Lukić, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: Prof. Dr Nenad Ristić, Associate Professor, University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture Member: Dr Dragan Bojović, Research Associate, IMS Institute, Belgrade
Note:	

ЗАХВАЛНОСТ

Највећу захвалност дугујем својим сарадницима и колегама, др Ксенији Јанковић и Љиљани Лончар, за свакодневну посвећеност и несебичност у давању добронамерних савета и преносу новостеченог знања. Велико хвала!

Велику захвалност дугујем колеги и руководиоцу, сада директору, др Драгану Бојовићу, на несебичности приликом давања колегијалних савета у вези са израдом тезе.

Велику захвалност дугујем проф. др Миријани Малешев на добронамерним и конструктивним саветима; била је моја несуђена менторка. Заједно смо започели израду тезе, али завршавам је са њеним сарадником, доц. др Слободаном Шупићем.

Најискреније се захваљујем доценту Слободану Шупићу на свесрдној подршци и храбрости у вези са одређеним одлукама у вези са мојом тезом.

Захвалност дугујем колегама Александру Филиповићу, Милану Петковићу, Емиру Алијевићу и Филипу Милинковићу за несебичну помоћ у извођењу експеримента. Специјално хвала мојим колегиницама, Лани Антић Аранђеловић и Ивани Ракић, за сву позитивну енергију и помоћ.

Хвала свим колегама из Лабораторије за бетон Института ИМС који су на било који начин допринели обликовању и завршетку ове тезе, а нису претходно поменути.

За значајну материјалну помоћ у виду цемента, захвалност упућујем компанији "Lafarge BFC". Захваљујем се и компанији "Хидробаза" за целокупну количину агрегата. За хемијске додатке бетонима, хвала компанији "Sika Srbija" и компанији „ECO – Recycling“ из Новог Сада на несебичну помоћ дробљене гуме без које ова докторска дисертација не би била урађена.

Посебну захвалност дугујем својим родитељима, оцу Стевану и мајци Невенки, што су увек веровали у мене и мог брата.

Највећу захвалност од свега дугујем својој породици: супрузи Весни, синовима Немањи и Лазару, и ћерки Дуњи, за сво чекање и непроведено заједничко време. Ово припада вама. Мени је остао лакши део.

РЕЗИМЕ

У раду је анализирана могућност примене бетона са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата са дробљеном рециклираном гумом (CRC – 2.5%, CRC – 5% и CRC – 7.5%), примењеним водоцементним односима $W/C = 0.55, 0.50, 0.45$ и 0.40 у односу на обичан (референтни) бетон (ОРС) и бетон са хемијским додатком аеранта (АЕР), са аспекта примене у свежем бетону који је праћен кроз време од 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину и добијених физичко-механичких својстава очврслог бетона. Дат је преглед и анализа актуелних истраживања из области примене зрна дробљене рециклиране гуме, различитих величина, на основу чега је формирана база података помоћу које је дефинисан програм сопственог експерименталног истраживања. Истраживање утицаја запреминске замене ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом је засновано на компаративној анализи 20 бетонских мешавина у којима је вариран запремински садржај дробљене гуме у вредностима од 2.5%, 5% и 7.5% којим је замењен део ситне фракције агрегата. Извршена су испитивања свежег и очврслог бетона. Код свих бетона праћено је понашање свеже бетонске мешавине кроз време (након 10, 30 и 60 минута) од момента додавања воде у бетонску мешавину. Извршена су испитивања свежег бетона: конзистенција методом слегања, садржај ваздуха и запреминска маса. На очврслном бетону извршена су испитивања: запреминска маса, чврстоћа при притиску, водонепропустљивост, отпорност бетона на дејство мраза, отпорност бетона на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање, карактеризациј ваздушних пора у очврслном бетону, динамички модул еластичности након циклуса замрзавања/одмрзавања, коефицијент миграције хлорида, статички модул еластичности и скупљање услед сушења. Укупан број узорака који је испитан износи 650, а за њихову израду било је потребно направити сса 2.5 m^3 бетона. Анализирани су бетони са различитим процентом запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), те са различитим водоцементним односима ($W/C = 0.55, 0.50, 0.45$ и 0.40). На основу компаративне анализе закључено је да запреминска замена ситног агрегата дробљеном гумом битно утиче на својства бетона у свежем и очврслном стању у односу на обичан (референтни) бетон. Показано је да се заменом ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом (CRC) у количини до 7.5% могу добити конструкцијски бетони, односно бетони са задовољавајућим физичким и механичким карактеристикама.

Кључне речи: дробљена рециклирана гума, бетон, физичка и механичка својства.

ABSTRACT

This study analyzes the application of concrete with 2.5%, 5%, and 7.5% volumetric replacement of fine aggregate with crushed recycled rubber (CRC – 2.5%, CRC – 5%, and CRC – 7.5%), with varied water-cement ratios $W/C = 0.55, 0.50, 0.45$, and 0.40 , compared to ordinary (reference) concrete (OPC) and concrete with a chemical air-entraining admixture (AER). The fresh concrete properties were monitored over 10, 30, and 60 minutes from the moment of water addition to the concrete mixture, and the obtained physical and mechanical properties of hardened concrete were analyzed. A review and analysis of state of the art in the field of applying different grain sizes of crushed recycled rubber were provided, forming a database that defined the program of an own experimental research. The investigation into the effect of volumetric replacement of fine aggregate with crushed recycled rubber was based on a comparative analysis of 20 concrete mixtures, varying the volumetric content of crushed rubber in values of 2.5%, 5%, and 7.5%, as fine aggregate replacement. Tests were conducted on both fresh and hardened concrete. The behavior of the fresh concrete mixture was monitored over time (after 10, 30, and 60 minutes) from the moment of water addition to the concrete mixture. Tests on fresh concrete included: slump consistency, air content, and bulk density. Tests on hardened concrete included: bulk density, compressive strength, water impermeability, frost resistance, frost resistance in the presence of de-icing salts, air void characterization in hardened concrete, dynamic modulus of elasticity after freeze-thaw cycles, chloride migration coefficient, static modulus of elasticity, and drying shrinkage. A total of 650 samples were tested, requiring approximately 2.5 m^3 of concrete. Concretes with different volumetric replacements of fine aggregate with crushed rubber (CRC) were analyzed, with varying water-cement ratios ($W/C = 0.55, 0.50, 0.45$, and 0.40). Based on comparative analysis, it was concluded that the volumetric replacement of fine aggregate with crushed rubber significantly affects the properties of concrete in both fresh and hardened states compared to ordinary (reference) concrete. It was shown that the application of crushed recycled rubber (CRC), as fine aggregate replacement, in amounts up to 7.5%, can provide structural concretes, i.e., concretes with satisfactory physical and mechanical characteristics.

Keywords: crushed recycled rubber, concrete, physical and mechanical properties.

САДРЖАЈ

I	УВОДНА РАЗМАТРАЊА	2
1.	УВОД.....	3
2.	ПОТРЕБА ЗА ИСТРАЖИВАЊЕМ	4
3.	ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА.....	10
4.	ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА	10
5.	ПРИМЕНЉИВОСТ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА.....	10
6.	ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	11
7.	КРАТАК ПРИКАЗ САДРЖАЈА РАДА	12
II	СВОЈСТАВА ДРОБЉЕНЕ РЕЦИКЛИРАНЕ ГУМЕ	14
1.	БЕТОНИ СА СИТНОМ ДРОБЉЕНОМ ГУМОМ (CRC).....	15
III	ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА БЕТОНА	20
1.	СВОЈСТАВА СВЕЖЕГ БЕТОНА СА ДРОБЉЕНОМ ГРАНУЛИСАНОМ ГУМОМ (CRC)	21
1.1.	Конзистенција бетона	21
1.2.	Запреминска маса.....	24
2.	СВОЈСТАВА ОЧВРСЛОГ БЕТОНА СА ДРОБЉЕНОМ ГРАНУЛИСАНОМ ГУМОМ (CRC).....	26
2.1.	Упијање воде	26
2.2.	Чврстоћа при притиску.....	29
2.3.	Водонепропустљивост бетона	30
2.4.	Отпорност бетона на замрзавање и одмрзавање.....	31
2.5.	Отпорност на хлоридне јоне.....	33
3.	ЗАКЉУЧЦИ ИЗВЕДЕНИ НА ОСНОВУ РЕЛЕВАНТНИХ ИСТРАЖИВАЊА.....	37
3.1.	Свеж бетон	37
3.1.1.	Конзистенција.....	37
3.1.2.	Запреминска маса и садржај ваздуха.....	37
3.2.	Очврсли бетон	37
3.1.3.	Упијање воде	37
3.1.4.	Чврстоћа при притиску	38
3.1.5.	Водонепропустљивост	38
3.1.6.	Отпорност на замрзавање и одмрзавање.....	38
3.1.7.	Отпорност на продор хлоридних јона	38
4.	ОПРАВДАНОСТ ИСТРАЖИВАЊА.....	44
IV	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ	46
1.	УВОД.....	47
2.	ПЛАН И ПРОГРАМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА	47
2.1.	Свеж бетон	49
2.2.	Очврсли бетон	50
3.	ПОДАЦИ О КОМПОНЕНТНИМ МАТЕРИЈАЛИМА.....	54
3.1.	Цемент	54
3.2.	Агрегат.....	54
3.3.	Дробљена рециклирана гума (CR).....	56
3.4.	Хемијски додаци	58

3.4.1. Суперпластификатор „Sika ViscoCrete 4077“	58
3.4.2. Аерант „Sika Control AER 100 RS“	58
3.5. Вода	59
4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ САСТАВА БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА	59
4.1. Пример одређивања састава обичног (референтног) бетона са природним речним агрегатом (P-1).....	60
4.2. Пример одређивања састава бетона са природним речним агрегатом и хемијским додатком аеранта (P-8)	62
4.3. Пример одређивања састава бетона са 5% запреминском заменом природног ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом (P-14)	64
4.4. Пројектовани састав бетонских мешавина	66
5. ИЗРАДА БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА, УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊЕ И НЕГА УЗОРАКА	68
6. ПОСТУПЦИ И ТОК ИСПИТИВАЊА.....	69
6.1. Свеж бетон	69
6.1.1. Конзистенција.....	69
6.1.2. Запреминска маса	69
6.1.3. Садржај ваздуха	70
6.2. Очврсли бетон	71
6.2.1. Запреминска маса	71
6.2.2. Чврстоћа при притску.....	71
6.2.3. Водонепропустљивост бетона	72
6.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза	73
6.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање).....	74
6.2.6. Карактеризација ваздушних пора у очврслем бетону	75
6.2.7. Динамички модул еластичности (мерење брзине проласка ултразвучног импулса).....	76
6.2.8. Статички модул еластичности при притиску	77
6.2.9. Коефицијент миграције хлорида	78
6.2.10. Скупљање бетона при сушењу	79
7. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА	81
7.1. Свеж бетон	81
7.1.1. Конзистенција.....	81
7.1.2. Запреминска маса	82
7.1.3. Садржај ваздуха	83
7.2. Очврсли бетон	84
7.2.1. Запреминска маса	84
7.2.2. Чврстоћа при притиску	85
7.2.3. Водонепропустљивост бетона	86
7.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза	87
7.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	88
7.2.6. Карактеристике ваздушних пора у очврслем бетону	89
7.2.7. Динамички модул еластичности (мерењем брзине проласка ултразвучног импулса)	90
7.2.8. Статички модул еластичности	91
7.2.9. Коефицијент миграције хлорида.....	92
7.2.10. Скупљање бетона при сушењу	93
V АНАЛИЗА И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА.....	96
1. БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $w/c=0.55$	97
1.1. Свеж бетон	98
1.1.1. Конзистенција слегањем	98
1.1.2. Запреминска маса	100

1.1.3.	Садржај ваздуха	101
1.2.	Очврсли бетон	103
1.2.1.	Запреминска маса	103
1.2.2.	Чврстоћа при притиску	104
1.2.3.	Водонепропустљивост бетона	106
1.2.4.	Отпорност бетона на дејство мраза	109
1.2.5.	Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	112
1.2.6.	Карактеризација ваздушних пора у очврслном бетону	115
1.2.7.	Динамички модул еластичности	116
1.2.8.	Статички модул еластичности	118
1.2.9.	Коефицијент миграције хлорида	120
1.2.10.	Скупљање при сушењу	122
2.	БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $W/C=0.50$	124
2.1.	Свеж бетон	125
2.1.1.	Конзистенција слегањем	125
2.1.2.	Запреминска маса	127
2.1.3.	Садржај ваздуха	128
2.2.	Очврсли бетон	130
2.2.1.	Запреминска маса	130
2.2.2.	Чврстоћа при притиску	131
2.2.3.	Водонепропустљивост бетона	133
2.2.4.	Отпорност бетона на дејство мраза	136
2.2.5.	Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	139
2.2.6.	Карактеристика ваздушних пора у очврслном бетону	141
2.2.7.	Динамички модул еластичности	142
2.2.8.	Статички модул еластичности	145
2.2.9.	Коефицијент миграције хлорида	147
2.2.10.	Скупљање при сушењу	149
3.	БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $W/C=0.45$	152
3.1.	Свеж бетон	153
3.1.1.	Конзистенција слегањем	153
3.1.2.	Запреминска маса	155
3.1.3.	Садржај ваздуха	156
3.2.	Очврсли бетон	158
3.2.1.	Запреминска маса	158
3.2.2.	Чврстоћа при притиску	159
3.2.3.	Водонепропустљивост бетона	161
3.2.4.	Отпорност бетона на дејство мраза	164
3.2.5.	Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	167
3.2.6.	Карактеристика ваздушних пора у очврслном бетону	169
3.2.7.	Динамички модул еластичности	170
3.2.8.	Статички модул еластичности	173
3.2.9.	Коефицијент миграције хлорида	175
3.2.10.	Скупљање при сушењу	177
4.	БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $W/C=0.40$	180
4.1.	Свеж бетон	181
4.1.1.	Конзистенција слегањем	181
4.1.2.	Запреминска маса	183
4.1.3.	Садржај ваздуха	184
4.2.	Очврсли бетон	186
4.2.1.	Запреминска маса	186

4.2.2.	Чврстоћа при притиску	187
4.2.3.	Водонепропустљивост бетона	189
4.3.4.	Отпорност бетона на дејство мраза	192
4.3.5.	Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	195
4.3.6.	Карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону	197
4.2.7.	Динамички модул еластичности	198
4.3.8.	Статички модул еластичности	201
4.3.9.	Коефицијент миграције хлорида	203
4.3.10.	Скупљање при сушењу	205
5.	КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА	208
5.1.	<i>Свеж бетон</i>	208
5.1.1.	Конзистенција	208
5.1.2.	Запреминска маса	209
5.1.3.	Садржај ваздуха	211
5.2.	<i>Очврсли бетон</i>	213
5.2.1.	Запреминска маса	213
5.2.2.	Чврстоћа при притиску	214
5.2.3.	Водонепропустљивост бетона	216
5.2.4.	Отпорност бетона на дејство мраза	219
5.2.5.	Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	222
5.2.6.	Карактеристике ваздушних пора у очврслом бетону	224
5.2.7.	Динамички модул еластичности	226
5.2.8.	Статички модул еластичности	228
5.2.9.	Коефицијент миграције хлорида	230
5.2.10.	Скупљање бетона при сушењу	232
VI	ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА	234
1.	УВОД	235
2.	ПРИМЕНА ДРОБЉЕНЕ ГУМЕ У БЕТОНСКИМ МЕШАВИНАМА	236
2.1.	<i>Свеж бетон</i>	236
2.1.1.	Конзистенција	236
2.1.2.	Запреминска маса	236
2.1.3.	Садржај ваздуха	236
2.2.	<i>Очврсли бетон</i>	237
2.2.1.	Запреминска маса	237
2.2.2.	Чврстоћа при притиску	237
2.2.3.	Водонепропустљивост бетона	237
2.2.4.	Отпорност бетона на дејство мраза	238
2.2.5.	Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	238
2.2.6.	Карактеристике ваздушних пора у очврслом бетону	239
2.2.7.	Динамички модул еластичности	240
2.2.8.	Статички модул еластичности	240
2.2.9.	Коефицијент миграције хлорида	241
2.2.10.	Скупљање бетона при сушењу	241
2.2.11.	Смернице за примену у бетону	241
3.	ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА	242
VII	ЛИТЕРАТУРА	245
	ЛИТЕРАТУРА	246
VIII	ПРИЛОЗИ	255

ПРИЛОГ 1: Одређивање хемијско-физичко-механичких својстава цемента	260
ПРИЛОГ 2: Одређивање својстава агрегата, природног фракционисаног каменог агрегата.....	262
ПРИЛОГ 3: Одређивање својстава дробљене рециклиране гуме	264
ПРИЛОГ 4: Одређивање битних карактеристика хемијских додатака	265
A. Хемијски додаток суперпластификатор: „Sika ViscoCrete 4077“	265
B. Хемијски додаток - аерант: „Sika Control AER 100 RS“	265
ПРИЛОГ 5: Одређивање гранулометријског састава мешавине агрегата	267
A. Обични (референтни) бетони P-1 до P-4	267
B. Бетони са хемијским додатком аеранта P-5 до P-8	268
C. Бетоне са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом P-9 до P-12.....	269
D. Бетони са 5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом P-13 до P-16	270
E. Бетони са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом P-17 до P-20	271
ПРИЛОГ 6: Одређивање конзистенције методом слегања.....	272
ПРИЛОГ 7: Одређивање запреминске масе свежег бетона	273
ПРИЛОГ 8: Одређивање садржаја ваздуха свежег бетона	275
ПРИЛОГ 9: Одређивање запреминске масе очврслог бетона и чврстоће при притиску очврслог бетона.....	277
ПРИЛОГ 10: Одређивање дубине продирања воде под притиском.....	283
ПРИЛОГ 11: Одређивање динамичког модула еластичности бетона	288
ПРИЛОГ 12: Одређивање скупљања при сушењу бетона.....	308
ПРИЛОГ 13: Испитивање отпорности бетона на дејство мраза деструктивним испитивањем	313
ПРИЛОГ 14: Одређивање отпорности бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)	334
ПРИЛОГ 15: Карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону	339
15.1.1. Садржај ваздуха (A):	339
15.1.2. Фактор размака између пора (Средња раздаљина између пора) (L):.....	339
15.1.3. Специфична површина пора (C):.....	340
15.1.4. Запремина пора (V_p):	340
15.1.5. Укупна површина поре по јединици запремине (P):	340
ПРИЛОГ 16: Одређивање статичког модула еластичности	361
ПРИЛОГ 17: Одређивање коефицијента миграције хлорида	367
A. Обични (референтни) бетони	367
B. Бетони са хемијским додатком аеранта.....	369
C. Бетони са додатком 2.5% дробљене гуме.....	371
D. Бетони са додатком 5% дробљене гуме.....	373
E. Бетони са додатком 7.5% дробљене гуме.....	375

Списак слика

Слика I-1- Изглед сферичних пора ваздуха у цементном камену које ствара аерант	6
Слика I-2 - Изглед Sika Aer Solid.....	7
Слика I-3 - Изглед отпада искоришћених аутомобилских гума и дробљене гранулисане гуме	7
Слика II-1 - Изглед дробљене гуме фракције 0-1 mm, „ECO Recycling“ – Нови Сад.....	17
Слика II-2 - Дијаграм гранулометријског састав дробљене гуме „ECO Recycling“ – Нови Сад.....	18
Слика III-1 – Утицај CR на запреминску масу и садржај ваздуха свежег бетона	24
Слика III-2 – Дубина продирања воде под притиском у бетон са додатком гуме	31
Слика III-3 – Дубина продирања хлоридних јона у CRC у зависности од садржаја CR и дужини изложености хлоридима	34
Слика III-4 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на конзистенцију бетона.....	39
Слика III-5 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на запреминску масу и садржај ваздуха свежег бетона.....	40
Слика III-6 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на упијање воде.....	41
Слика III-7 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на чврстоћу при притиску и водонепропустности бетона.....	42
Слика III-8 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на отпорност бетона на дејство мраза и отпорност бетона на хлоридне јоне	43
Слика IV-1 – Изглед фракција речног агрегата.....	54
Слика IV-2 – Графички приказ гранулометријског састава фракционисаног природног агрегата.....	55
Слика IV-3– Изглед и величине зрна дробљене рециклиране гуме (фракције 0/1mm), а) и б) макро приказ, в) Дигитални микроскоп Dino Lite - увећање 60x, г) Дигитални микроскоп Dino Lite - увећање 200x...	57
Слика IV-4 – Графички приказ гранулометријског састава дробљене рециклиране гуме.....	58
Слика IV-5 - Гранулометријска крива мешавине агрегата и референтне криве (P-1)	61
Слика IV-6 - Гранулометријска крива мешавине агрегата и референтне криве (P-8)	63
Слика IV-7 - Гранулометријска крива мешавине агрегата и референтне криве (P-13)	66
Слика IV-8 – Припрема калупа за израду узорака	68
Слика IV-9 – Неговање узорака у води	68
Слика IV-10 - Мерење конзистенције (методом слијегања) за бетоне P-1, P-3, P-7 и P-10.....	69
Слика IV-11 - Поступак мерења запреминске масе бетона.....	70
Слика IV-12 – Одређивање садржаја ваздуха у свежем бетону помоћу порозиметра Testing – Немачка	70
Слика IV-13 - Мерење димензија бетонских узорака и мерење масе узорка у водом засићеном стању.....	71
Слика IV-14 - Одређивање чврстоће бетона при притиску.....	72
Слика IV-15 Шематски приказ постављања узорака за испитивање водонепропустљивости бетона	72
Слика IV-16 – Апаратура за испитивање, цепање узорак и мерење дубине продирање воде	73

Слика IV-17 а) Узорци бетона у комори за испитивање отпорности бетона на мраз, б) Режим испитивања једног циклуса замрзавања и одмрзавања.....	74
Слика IV-18 - Дигитална клима комора „Schleibinger Gerate“.....	75
Слика IV-19 – Узорци припремљени за испитивање.....	75
Слика IV-20 - а) Површина узорка припремљена за карактеризацију пора, б) уређај за карактеризацију пора.....	76
Слика IV-21 – Ултразвучни апарат високих перформанси, произвођача „Impact Test Equipment“ – Engleska.....	77
Слика IV-22 – Дигитално кљунасто мерило дужине „MIB“ – Немачка опсега до 300 (mm).....	78
Слика IV-23 – Дигитална хидраулична преса 3000 (kN).....	78
Слика IV-24 – Индуктивни претварач (екстензометар), осетљивости 0.02(μm).....	78
Слика IV-25 – Дигитално кљунасто мерило дужине „MIB“ – Немачка, мерног опсега до 150 mm.....	79
Слика IV-26 – Уређај за наношење напона „Proove'it“, произвођача „Germann Instruments“ – Немачка, опсег напона од 5 до 60 V.....	79
Слика IV-27 – Изглед преломних површина након наношења индикатора боје.....	79
Слика IV-28 – Мерење скупљања при сушењу бетона.....	80
Слика V-1 – Конзистенција методом слегања бетони w/c=0.55.....	98
Слика V-2 – Запреминска маса бетони w/c=0.55.....	100
Слика V-3 – Садржај ваздуха бетони w/c=0.55.....	101
Слика V-4 – Запреминска маса очврслог бетона w/c=0.55.....	103
Слика V-5 – Чврстоћа при притиску бетони w/c=0.55.....	104
Слика V-6 –Вредности дубине продора воде бетони w/c=0.55.....	106
Слика V-7 – Вредности упијања воде бетони w/c=0.55.....	108
Слика V-8 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетони w/c=0.55.....	109
Слика V-9 – Однос чврстоћа узорака након дејства мраза и еталонских узорака w/c=0.55.....	110
Слика V-10 – Количина ољуштеног материјала бетони w/c=0.55.....	112
Слика V-11 - Вредности садржаја ваздуха бетони, w/c=0.55.....	115
Слика V-12 – Динамички модул еластичности бетони w/c=0.55.....	116
Слика V-13 – Статички модул еластичности бетони w/c=0.55.....	118
Слика V-14 – коефицијент миграције хлорида w/c=0.55.....	120
Слика V-15 – Скупљање при сушењу бетони w/c=0.55.....	122
Слика V-16 – Коначне вредности скупљања при сушењу бетона w/c=0,55 након 3 месеца испитивања.....	122
Слика V-17 – Конзистенција методом слегања бетони w/c=0.50.....	125
Слика V-18 – Запреминска маса бетони w/c=0.50.....	127
Слика V-19 – Садржај ваздуха бетони w/c=0.50.....	128
Слика V-20 – Запреминска маса очврслог бетона w/c=0.50.....	130

Слика V-21- Чврстоћа при притиску бетона $w/c=0.50$	131
Слика V-22 - Вредности дубине продора воде бетона $w/c=0.50$	133
Слика V-23 - Вредности упијања воде бетона $w/c=0.50$	135
Слика V-24 - Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетона $w/c=0.50$	136
Слика V-25 - Однос чврстоћа узорака након дејства мраза и еталонских узорака $w/c=0.50$	137
Слика V-26 - Количина ољуштеног материјала бетони $w/c=0.50$	139
Слика V-27 - Вредности садржаја ваздуха бетони $w/c=0.50$	141
Слика V-28 - Динамички модул еластичности бетони $w/c=0.50$	142
Слика V-29 - Статички модул еластичности бетони $w/c=0.50$	145
Слика V-30 - Коефицијент миграције хлорида бетони $w/c=0.50$	147
Слика V-31 - Скупљање при сушењу бетони $w/c=0.50$	149
Слика V-32 - Коначне вредности скупљања при сушењу бетона $w/c=0.50$ након 3 месеца испитивања	150
Слика V-33 - Конзистенција методом слегања бетони $w/c=0.45$	153
Слика V-34 - Запреминска маса бетони $w/c=0.45$	155
Слика V-35 - Садржај ваздуха бетони $w/c=0.45$	156
Слика V-36 - Запреминска маса очврслог бетона $w/c=0.45$	158
Слика V-37 - Чврстоћа при притиску бетона $w/c=0.45$	159
Слика V-38 - Вредности дубине продора воде бетона $w/c=0.45$	161
Слика V-39 - Вредности упијања воде бетони $w/c=0.45$	163
Слика V-40 - Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетона $w/c=0.45$	164
Слика V-41 - Однос чврстоћа узорака након дејства мраза и еталонских узорака $w/c=0.45$	165
Слика V-42 - Количина ољуштеног материјала бетони $w/c=0.45$	167
Слика V-43 - Вредности садржаја ваздуха бетони $w/c=0.45$	169
Слика V-44 - Динамички модул еластичности бетони $w/c=0.45$	170
Слика V-45 - Статички модул еластичности бетони $w/c=0.45$	173
Слика V-46 - Коефицијент миграције хлорида бетони $w/c=0.45$	175
Слика V-47 - Скупљање при сушењу бетона $w/c=0.45$	177
Слика V-48 - Коначне вредности скупљања при сушењу бетона $w/c=0.45$ након 3 месеца испитивања	178
Слика V-49 - Конзистенција методом слегања бетони $w/c=0.40$	181
Слика V-50 - Запреминска маса бетони $w/c=0.40$	183
Слика V-51 - Садржај ваздуха бетони $w/c=0.40$	184
Слика V-52 - Запреминска маса очврслог бетона $w/c=0.40$	186
Слика V-53 - Чврстоћа при притиску бетона $w/c=0.40$	187
Слика V-54 - Вредности дубине продора воде бетона $w/c=0.40$	189

Слика V-55 - Вредности упијања воде бетони $w/c=0.40$	191
Слика V-56 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетона $w/c=0.40$	192
Слика V-57 – Однос чврстоћа узорака након дејства мраза и еталонских узорака бетона $w/c=0.40$	193
Слика V-58 – Количина ољуштеног материјала бетони $w/c=0.40$	195
Слика V-59 - Вредности садржаја ваздуха бетони $w/c=0.40$	197
Слика V-60 – Динамички модул еластичности бетони $w/c=0.40$	198
Слика V-61 – Статички модул еластичности бетони $w/c=0.40$	201
Слика V-62 – Коефицијент миграције хлорида бетони $w/c=0.40$	203
Слика V-63 – Скупљање при сушењу бетона $w/c=0.40$	205
Слика V-64 – Коначне вредности скупљања при сушењу бетона $w/c=0.40$ након 3 месеца испитивања	206
Слика V-65 - Конзистенција испитиваних врста бетона	208
Слика V-66 – Запреминска маса свежег бетона испитиваних врста бетона	209
Слика V-67 – Садржај ваздуха свежег бетона испитиваних врста бетона	211
Слика V-68 – Запреминска маса очврслог бетона испитиваних врста бетона	213
Слика V-69 - Чврстоћа при притиску бетона	214
Слика V-70 – Највећа дубина продора воде под притиском у бетон	216
Слика V-71 – Упијање воде под притиском у бетон	217
Слика V-72 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза	219
Слика V-73 – <i>Odnos čvrstoća uzoraka nakon dejstva mraza i etalonskih uzoraka za svih vrsta betona</i>	220
Слика V-74 – Количина ољуштеног материјала свих врста бетона	222
Слика V-75 – Количина ољуштеног материјала свих врста бетона	224
Слика V-76 – Динамички модул еластичности свих врста бетона	226
Слика V-77 – Статички модул еластичности за све врсте бетона	228
Слика V-78 – Коефицијент миграције за све врсте бетона	230
Слика V-79 - Коначне вредности скупљања при сушењу свих врста бетона након 91 дана испитивања	232
Слика VIII-1 - Прибор за мерење конзистенције бетона Абрамсов конус са илустрацијом поступка мерења	272
Слика VIII-2 - Поступак мерења запреминске масе свежег бетона	273

Списак табела

Табела II-1 - Хемијска својстава дробљене гуме фракције 0-1 mm, „ECO Recycling“ – Нови Сад.....	18
Табела II-2 - Типичан приказ хемијског састава CR.....	19
Табела III-1 - Табеларни приказ резиме истраживачких студија спроведених о обрадивости CRC-а (1).	22
Табела III-2 (наставак) - Табеларни приказ резиме истраживачких студија спроведених о обрадивости CRC-а (2).....	23
Табела III-3 - Утицај количине CR на запреминску масу CRC (1).....	25
Табела III-4 (наставак) - Утицај количине CR на запреминску масу CRC (2).....	26
Табела III-5 - Резултати истраживачких студија о упијању воде CRC (1)	27
Табела III-6 - Резултати истраживачких студија о упијању воде CRC (2).....	28
Табела III-7 - Резултати истраживачких студија о упијању воде CRC (3)	29
Табела III-8 - Резултати водопропустности, отпорности на замрзавање-одмрзавање и отпорности на хлоридне јоне код бетонских мешавинама CRC са CR агрегатом (1).....	35
Табела III-9 - (наставак) Резултати водопропустности, отпорности на замрзавање-одмрзавање и отпорности на хлоридне јоне код бетонских мешавинама CRC са CR агрегатом (2).....	36
Табела IV-1 - Ознаке и основни параметри за одабране бетонске мешавине	49
Табела IV-2 - Спецификација узорака и испитивања на свежем и очврслом бетону (1)	51
Табела IV-3 - Спецификација узорака и испитивања на свежем и очврслом бетону (2)	52
Табела IV-4 - Спецификација узорака и испитивања на свежем и очврслом бетону (3)	53
Табела IV-5 - Резултати испитивања природног фракционисаног каменог агрегата.....	56
Табела IV-6. Osnovni podaci o primenjenom superplastifikatoru	58
Табела IV-7. Основни подаци о примењеном аеранту.....	59
Табела IV-8. Обележавање бетонских мешавина	60
Табела IV-9. Количине компонентних материјала у kg по 1m ³ бетона.....	67
Табели IV-10. Конзистенција методом слегања.....	81
Табела IV-11. Запреминска маса свежег бетона.....	82
Табела IV-12. Садржај ваздуха у свежем бетону	83
Табела IV-13 - Резултати испитивања запреминске масе очврслог бетона	84
Табела IV-14. Резултати испитивања чврстоће бетона при притиску.....	85
Табела IV-15 - Највеће дубине продирања воде под притиском.....	86
Табела IV-16 - Резултати испитивања бетона на дејство мраза.....	87
Табела IV-17 - Резултати испитивања бетона на дејство мраза уз присуство 3% NaCl.....	88
Табела IV-18 - Резултати карактеристика ваздушних пора у очврслом	89
Табела IV-19 - Резултати динамичког модула еластичности.....	90
Табела IV-20 - Статички модул еластичности	91

Табела IV-21 - Коефицијент миграције хлорида	92
Табела IV-22 - Скупљање при сушењу бетонских узоракa [mm/m] - Обичан (референтни) бетон	93
Табела IV-23 - Скупљање при сушењу бетонских узоракa [mm/m] - Бетони са додатком аеранта ..	94
Табела IV-24 Скупљање при сушењу бетонских узоракa [mm/m] - Бетони са додатком 2.5 % гуме	94
Табела IV-25 - Скупљање при сушењу бетонских узоракa [mm/m] - Бетони са додатком 5.0 % гуме	95
Табела IV-26 - Скупљање при сушењу бетонских изорака [mm/m] - Бетони са додатком 7.5 % гуме	95
Табела VIII-1. Хемијска својства употребљеног цемента	260
Табела VIII-2. Физичка својства употребљеног цемента	260
Табела VIII-3. Механичка својства употребљеног цемента	260
Табела VIII-4. Хемијски састав цемента (%).....	261
Табела VIII-5. Минералoшки састав цемента*) (%).....	261
Табела VIII-6. Гранулометријски састав фракционисаног природног каментог агрегата 0/4 mm ..	262
Табела VIII-7. Гранулометријски састав фракционисаног природног каментог агрегата 4/8.....	262
Табела VIII-8. Гранулометријски састав фракционисаног природног каментог агрегата 8/16.....	262
Табела VIII-9. Физичка својства речног агрегата	263
Табела VIII-10. Гранулометријски састав дробљене рециклиране гуме, фракције 0/1 mm.....	264
Табела VIII-11. Хемијски састав дробљене рециклиране гуме фракције 0/1 mm.....	264
Табела VIII-12. Елементи у траговима у дробљеној рециклираној гуми.....	264
Табела VIII-13. Запреминска маса дробљене рециклиране гуме, фракције 0/1 mm.....	264
Табела VIII-14. Резултати испитивања утицаја хемијског додатка бетону на битне карактеристике цементне пасте и малтера.....	265
Табела VIII-15. Испитивање утицаја хемијског додатка бетону на битне карактеристике цементне пасте и малтера	266
Табела VIII-16. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне P1 до P-4.....	267
Табела VIII-17. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне P-5 до P-8.....	268
Табела VIII-18. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне P-9 до P-12.....	269
Табела VIII-19. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне P-13 до P-16.....	270
Табела VIII-20. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне P-17 до P-20.....	271
Табела VIII-21. Конзистенција методом слегања, запреминска маса, садржај ваздуха	272
Табела VIII-22. Одређивање запреминске масе обичних (референтних) бетона	273
Табела VIII-23 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са хемијским додатком аеранта.....	274
Табела VIII-24 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 2.5% дробљеном рециклираном гумом	274

Табела VIII-25 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 5% дробљеном рециклираном гумом	274
Табела VIII-26 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 7.5% дробљеном рециклираном гумом	274
Табела VIII-27 - Одређивање садржаја ваздуха обичних (референтних) бетона.....	275
Табела VIII-28 - Одређивање садржаја ваздуха свежег бетона код бетона са хемијским додатком аеранта.....	275
Табела VIII-29 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 2.5% дробљеном рециклираном гумом	275
Табела VIII-30 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 5% дробљеном рециклираном гумом	276
Табела VIII-31 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 7.5% дробљеном рециклираном гумом	276
Табела VIII-32. Чврстоћа при притиску обичног (референтног) бетона	278
Табела VIII-33 - Чврстоћа при притиску бетона са додатком хемијског додатка аеранта	279
Табела VIII-34 - Чврстоћа при притиску бетона са запреминском заменом 2.5% ситног агрегата дробљеном гумом.....	280
Табела VIII-35 - Чврстоћа при притиску бетона са запреминском заменом 5.0% ситног агрегата дробљеном гумом.....	281
Табела VIII-36 - Чврстоћа при притиску бетона са запреминском заменом 7.5% ситног агрегата дробљеном гумом.....	282
Табела VIII-37 - Обичан (референтни) бетон - Одређивање дубине продора воде под притиском.....	283
Табела VIII-38 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са хемијским додатком аеранта.....	284
Табела VIII-39 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са додатком 2.5 % гуме.....	285
Табела VIII-40 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са додатком 5% гуме...	286
Табела VIII-41 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са додатком 7.5 %.....	287
Табела VIII-42. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-1)	288
Табела VIII-43. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-2)	289
Табела VIII-44. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-3)	290
Табела VIII-45. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-4)	291
Табела VIII-46. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-5).....	292
Табела VIII-47. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула – бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-6).....	293

Табела VIII-48. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-7).....	294
Табела VIII-49. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-8).....	295
Табела VIII-50. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-9).....	296
Табела VIII-51. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-10)	297
Табела VIII-52. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-11)	298
Табела VIII-53. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-12)	299
Табела VIII-54. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-13).....	300
Табела VIII-55. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-14).....	301
Табела VIII-56. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-15).....	302
Табела VIII-57. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-16).....	303
Табела VIII-58 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-17)	304
Табела VIII-59 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-18)	305
Табела VIII-60 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-19)	306
Табела VIII-61 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-20)	307
Табела VIII-62 - Скупљање обичног (референтног) бетона.....	308
Табела VIII-63 - Скупљање бетона са додатком хемијског додатка аеранта.....	309
Табела VIII-64 - Скупљање бетона са додатком 2.5 % гуме.....	310
Табела VIII-65 - Скупљање бетона са додатком 5 % гуме.....	311
Табела VIII-66 - Скупљање бетона са додатком 7.5 % гуме.....	312
Табела VIII-67 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-1).....	314
Табела VIII-68 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-2).....	315
Табела VIII-69 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-3).....	316
Табела VIII-70 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-4).....	317
Табела VIII-71 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-5).....	318
Табела VIII-72 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-6).....	319

Табела VIII-73 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-7)	320
Табела VIII-74 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-8)	321
Табела VIII-75 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-9)	322
Табела VIII-76 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-10)	323
Табела VIII-77 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-11)	324
Табела VIII-78 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-12)	325
Табела VIII-79 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-13)	326
Табела VIII-80 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-14)	327
Табела VIII-81 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-15)	328
Табела VIII-82 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-16)	329
Табела VIII-83 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-17)	330
Табела VIII-84 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-18)	331
Табела VIII-85 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-19)	332
Табела VIII-86 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-20)	333
Табела VIII-87 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање - обичног (референтног) бетона	334
Табела VIII-88 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање - бетони са хемијским додатком аеранта	335
Табела VIII-89 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање - бетони са додатком 2.5% дробљене гуме	336
Табела VIII-90 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање - бетони са додатком 5% дробљене гуме	337
Табела VIII-91 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање - бетони са додатком 7.5% дробљене гуме	338
Табела VIII-92 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Обичан (референтни) бетон – (P-1)	341
Табела VIII-93 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Обичан (референтни) бетон – (P-2)	342
Табела VIII-94 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Обичан (референтни) бетон – (P-3)	343
Табела VIII-95 - Određivanje rasporeda vazdušnih pora u očvrsлом betonu – Običan (referentni) beton – (P-4)	344
Табела VIII-96. Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (P-5)	345
Табела VIII-97 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (P-6)	346
Табела VIII-98 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (P-7)	347

Табела VIII-99 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (P-8)	348
Табела VIII-100 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-9)	349
Табела VIII-101 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-10)	350
Табела VIII-102 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-11)	351
Табела VIII-103 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-12)	352
Табела VIII-104 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-13)	353
Табела VIII-105 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-14)	354
Табела VIII-106 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-15)	355
Табела VIII-107 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-16)	356
Табела VIII-108 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-17)	357
Табела VIII-109 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-18)	358
Табела VIII-110 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-19)	359
Табела VIII-111 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-20)	360
Табела VIII-112 - Одређивање статичког модула еластичности – Обични (референтни) бетони	362
Табела VIII-113 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са хемијским додатком аерантом	363
Табела VIII-114 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са додатком 2.5% дробљене гуме	364
Табела VIII-115 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са додатком 5% дробљене гуме	365
Табела VIII-116 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са додатком 7.5% дробљене гуме	366
Табела VIII-117 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-1)	367
Табела VIII-118 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-2)	367
Табела VIII-119 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-3)	368

Табела VIII-120 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-4)	368
Табела VIII-121 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-5)	369
Табела VIII-122 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-6)	369
Табела VIII-123 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-7)	370
Табела VIII-124 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-8)	370
Табела VIII-125 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-9)	371
Табела VIII-126 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-10)	371
Табела VIII-127 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-11)	372
Табела VIII-128 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-12)	372
Табела VIII-129 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-13)	373
Табела VIII-130 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-14)	373
Табела VIII-131 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-15)	374
Табела VIII-132 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-16)	374
Табела VIII-133 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-17)	375
Табела VIII-134 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-18)	375
Табела VIII-135 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-19)	376
Табела VIII-136 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-20)	376

I УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1. УВОД

Међу материјалима који су кроз историју коришћени, или се данас користе у грађевинарству, бетону припада једна од најзначајнијих улога. По функционалности, једноставности примене, економичности и конструкцијским диметима знатно надмашује упоредиве могућности других материјала.

Бетон данашњих својстава и савременог начина производње и примене – релативно је нов материјал, али му је историја, готово невероватно дуга и занимљива. Често се са правом тврди да су га људи открили тек у XIX веку, док са друге стране, археолошка истраживања недвосмислено показују да је био познат и широко примењиван у Римском Царству.

На основу податка о грађевинарству Римског Царства, носећих конструкција и материјала од којих су саграђене, у науци је постављен темељ проучавања до данас сачуваних објеката или њихових остатака, али и писана документа, посебно великог римског градитеља Витрувија, који је писао у I. веку п.н.е. Он је у својем делу „De Architectura“ описујући природни цемент који се копао на падинама Везува, говорио о „чудном праху који везује камење тако да се њиме могу изградити зидови и у самоме мору“ . Он даље описује бетон, тј. вештачки камен, који су Римљани производили и користили под називом „опус сигнинун“. Тако се сазнаје да су Римљани врло организовано пекли креч и користили кречни малтер за зидање многих камених грађевина. Приметили су међутим, да се такав кречни малтер не стврдњава под водом, али су знали да су стари Хебреји тај проблем на својим подводним грађевинама решили додавањем млевене опеке кречном малтеру чиме су постигли очвршћавање под водом.

По узору на њих и Римљани су производили хидрауличка везива (она која се стврдњавају под водом) додавањем брашна од млевене опеке произведене од печене глине, кречном малтеру. Међутим, око 200 год. п.н.е. технологија производње бетона бележи значајан напредак. Римљани су у то време највероватније на темељу случајног открића, установили да бетон има још боља својства ако се у њега дода још и вулкански пепео. Активни силицијум и спојеви алуминијума из вулканског пепела и печене глине у комбинацији са кречом дају „пуцолански цемент“, који је и са данашњег гледишта био врло квалитетан и трајан. Он је добио назив према месту Путеоли (данас Pozzuoli) на падинама Везува у близини у којој се копао поменути вулкански пепео.

Шкотски зидар Joseph Aspdin је 1824. године патентирао материјал који је у очврслом стању бојом одговарао боји врло доброг грађевинског камена из околине града Портланда, па је материјалу дао назив „портланд цемент“ који се и данас производи.

Први проналазач цемента који је по својим својствима одговарао данашњем портланд цементу јесте енглески индустријалац Isaac Charles Johnson. Французи

Coineraux и Lebran саградили су прву познату стамбену зграду од бетона 1837. године.

Баштован из Француске Joseph Monier, се сматра оцем армираног бетона, које је 1849. године у своје посуде за цвеће уграђивао челичну жицу унутар бетона.

Такође је познато да је у Француској, Joseph Louis Lambot већ 1848. године направио лађу са арматуром од челичне мреже у цементном малтеру дебелом неколико центиметара који је тек 1855. године изложио на светској изложби у Паризу [1].

У данашње време сматра се да је бетон најчешће коришћени конструкцијски материјал на свету, са просечном производњом од преко десет милијарди тона годишње [2] како због своје трајности и великих могућности примене, тако и због једноставности производње и доступности компонентних материјала.

Бетон се сматра једним од најраспрострањенијих и најзахтевнијих инжењерских материјала које човечанство користи. Велики број инжењера бетон дефинише као материјал састављен од цемента, песка, речног или дробљеног агрегата и воде (уз могућност примене додатака бетонима), са запреминском масом од око 2400kg/m^3 и чврстоћама већим од 15МПа. Поред захтеване чврстоће бетона, инжењери се често сусрећу и са захтевима за трајношћу бетона. Трајност бетона је дефинисана као способност бетона да у одређеном временском периоду издржи штетне ефекте околине без погоршања својстава. Трајност бетона обухвата отпорност на дејство мраза, водонепропустљивост, отпорност на карбонизацију, корозију под напоном, хемијску агресију итд. [3]

2. ПОТРЕБА ЗА ИСТРАЖИВАЊЕМ

Изградња грађевинских објекта се у данашње време због кратких рокова обавља у свим временским условима, што технологију израде конструкцијских елемената заједно са процесом производње бетона чини захтевним. У данашње време приликом изградње објеката припремни радови готово и да не постоје, па се пројектовање одвија упоредно са извођењем радова, а извођење радова препушта искуству извођача радова. У таквим условима је тешко извођачу радова да предвиди све неповољне ситуације које могу настати у току грађења објекта.

Једна од ситуација је уградња, израда и нега бетонског елемента, који поред основних механичких карактеристика очврслог бетона (чврстоћа при притиску, чврстоћа на затезање, итд.) мора да задовољи и захтеване услове за трајност бетона у току експлатационог века бетонске конструкције. Саобраћајни инфраструктурни пројекти који се изводе у нашој земљи садрже велики број објеката од армираног и претходно напрегнутог бетона (надвожњаци, мостови, тунели, АБ зидови заштитне косине, цевоводи, бетонске коловозе наплатних станица, итд.), од којих се захтева да истовремено испуне и услове за механичка својства и услове трајности бетона

(водонепропустљивост, отпорност на дејство мраза, чврстоћа на затезање савијањем, чврстоћа на затезање цепањем, хабање брушењем, итд.).

Најчешће захтевани услови за трајност бетонских елемената су:

- Водонепропустљивост бетона;
- Отпорност бетона на дејство мраза;
- Отпорност површине бетона према дејству мраза и соли за одмрзавање.

Уколико ће конструкцијски бетонски елемент у току експлатације бити изложен дејству мраза, он се мора штитити аерирањем (аерирани бетон). Додавањем аеранта добијамо бетон који има садржај ваздуха у свежем бетону од 3-5 % за бетоне са највећим зрном агрегата $D_{\max}=32 \text{ mm}$ и 5-7 % за бетоне са највећим зрном агрегата $D_{\max}=16 \text{ mm}$.

Према SRPS EN 206, Табела F.1. и SRPS U.M1.206:2022, Табела B.1., за бетоне који ће бити изложени дејству мраза (XF1 и XF3) и/или мраза и соли за одмрзавање (XF2 и XF4), препоручене су граничне вредности за:

- минимална количина цемента,
- максимални водоцементни фактор,
- минимална класа чврстоће при притиску,
- садржај ваздуха у свежем бетону (у зависности од највећег зрна агрегата),
- испуњен услов за одговарајућу класу отпорности на дејство мраза (M1 или M2) и/или класу отпорности на дејство мраза и соли за одмрзавање (MC1 или MC2).

Вештачким увлачењем ваздуха у бетонску мешавину постиже се да бетон буде отпоран на дејство мраза и/или мраза и соли за одмрзавање, међутим повећање порозности цементног камена има и негативне ефекте, као што су:

- повећање количине цемента у односу на бетоне без аерирања,
- значајно смањење чврстоће бетона при притиску (нпр. за 1% повећања садржаја увученог ваздуха у бетону, чврстоћа бетона при притиску ће се смањити за око 5.5%),
- смањење производног капацитета фабрике бетона услед продуженог мешања сваког мешунга,
- повећање учесталости контроле садржаја ваздуха свежег бетона,
- неконстантност садржаја ваздуха од момента производње до места уградње у условима справљања бетона када је спољна температура ваздуха већа од $+30^{\circ}\text{C}$ или мања од $+5^{\circ}\text{C}$ и
- скупљи 1m^3 бетона.

С обзиром на стратешки значај изградње и одржавања саобраћајница и пратеће путне инфраструктуре за сваку државу, оправдана је потреба за развојем бетона са захтеваном трајношћу у оквиру класа изложености XF1–XF4. Истовремено,

неопходно је обезбедити поузданију и једноставнију технологију производње, као и превазићи уочене недостатке бетона са хемијским додатком аеранта.

У савременој технологији бетона и научници у оквиру истраживања и инжењери у пракси, покушавају уз више или мање успеха да на различите начине реше проблем добијања бетона отпорних на дејство мраза. Могућности су многобројне јер је бетон композитни материјал и пружа могућности за проналажење решења и у оквиру цементне матрице и у оквиру агрегата, односно на микроструктурном и на макроструктурном нивоу. Посебно су оправдана истраживања мотивисана и идејом да се, поред решења добијања бетона отпорних на дејство мраза, постигне и повећа одрживост у производњи бетона.

Материјали и производи за повећање отпорности на дејство мраза

Да би бетон заштитили од дејстава мраза и соли за одмрзавање површине бетона, у пракси је уобичајена примена хемијског додатка аеранта. Приликом његовог додавања, стварају се мехурићи ваздуха величине до 300 μm који остају заробљени у цементном камену (Слика I-1).



Слика I-1- Изглед сферичних пора ваздуха у цементном камену које ствара аерант

Услед замрзавања бетона долази до ширења леда унутар бетона за око 9%, које изазива затезање у структури бетона услед чега долази до појава прслина а касније и до деградације структуре бетона и пада чврстоћа. Равномерним распоредом сферичних пора које се стварају услед додавања хемијског додатка аеранта, добија се резервна запремина у оквиру које лед може да се шири, чиме се ови напони затезања смањују и бетон постаје отпорнији на дејство мраза и соли за одмрзавање.

Развојем нових технологија и материјала многи истраживачи у свету покушавају да побољшају својстава како свежег, тако и очврслог бетона. Један од новијих материјала је комерцијални производ „Sika Aer Solid“ компаније Sika из Швајцарске. Према дефиницији произвођача, „Sika Aer Solid“ је концентрована

паста за увлачење ваздуха која се састоји од воде и великог броја равномерно распоређених еластичних синтетичких микро шупљих сфера специфичних димензија које делују као ваздушне поре. Додатак бетону повећава отпорност на замрзавање и одмрзавање са или без средстава за одмрзавање бетона. Додатак за бетон не садржи силицијум диоксид. Концентрирана паста „Sika Aer Solid“ приказана је на Слици I-2.



Слика I-2 - Изглед Sika Aer Solid

Како бисмо побољшали циркуларну економију и одрживи развој, неопходна је све чешћа примена рециклираних материјала. Један од великих изазова у аутомобилској индустрији јесте одлагање отпадног материјала, међу којима су и искоришћене аутомобилске гуме. Уситњавањем овог материјала добијају се гранулисана гумена зрна, која налазе широку примену.

Бројна истраживања широм света бавила су се употребом дробљене гранулисане гуме у бетону, с циљем да се утврди њен утицај на побољшање трајности бетона изложеног мразу и соли за одмрзавање.

Отпад искоришћених аутомобилских гума и дробљена гранулисана гума приказани су на Слици I-3.



Слика I-3 - Изглед отпада искоришћених аутомобилских гума и дробљене гранулисане гуме

Теоријске основе са описом проблема

Предмет овог истраживања су обични бетони, класе чврстоће до C55/65 који су у току експлатације изложени мразу и/или комбинованом дејству мраза и соли за одмрзавање. Традиционална метода за добијање трајних бетона када су у питању класе изложености XF1, XF3 и/или XF2, XF4 се заснива на примени хемијских додатака за вештачко увлачење ваздуха у бетонску мешавину (аерирање цементне матрице). Међутим, пракса је показала да ова метода за последицу има и горе набројане негативне ефекте. У циљу проналажења бољих и савременијих решења, у свету се спроводе различита истраживања. Нека од њих се базирају на увођењу у структуру цементног камена мекших ситнозрних материјала, који би могли да компензују унутрашња напрезања изазвана ширењем леда у капиларним порама цементног камена. Материјали који би могли да обезбеде смањење унутрашњих напрезања у цементном камену изазаваних ширењем леда, су на пример: додатак са комерцијалног назива "Sika Aer Solid" произвођача Sika Швајцарска, али и гранулисана гума, која се добија рециклирањем старих аутомобилских гума.

Отпорност бетона на дејство мраза, након циклуса замрзавања и одмрзавања, често је одлучујуће својство које одређује погодност бетона за употребу. Према нашим прописима једно од захтевнијих својстава које треба бетон да испуни, је отпорност на дејство мраза и површинско дејство мраза и соли за одмрзавање. Наведени захтеви за квалитет бетона су директно повезани са географским положајем Србије у умерено континенталној клими. Од географских одредница које карактеришу битне синоптичке ситуације значајне за време и климу Србије треба споменути Алпе, Средоземно море и Ђеновски залив, Панонску низију, долину Мораве, Карпате и Родопске планине, као и брдовито планински део са котлинама и висоравнима. Преовлађујући меридионални положај котлина река и равничарски предео на северу земље, омогућују дубоко продирање поларних ваздушних маса на југ. Последица описаног географског положаја је велика температурна разлика између зиме и лета, температура лети достиже преко +30 °C, а зими често пада испод -10 °C, уз честе промене температуре преко 0 °C. У нашим условима, број прелазних циклуса испод 0 °C, односно циклуса замрзавања и одмрзавања годишње је око 100.

Детериорација бетона услед дејства мраза, се одвија на два нивоа: унутрашњем (деградација структуре) и спољашњем (површинско љуштење), најчешће уз учешће средстава за одмрзавање.

У анализираним прегледним радовима [4], [5] и [6] приказан је велики број теорија о механизмима деградације бетона услед дејства мраза, при чему је основни механизам деструктивног дејства мраза објашњен „теоријом затвореног суда“. Односи се на чињеницу да је специфична запремина леда већа за око 9,3% од запремине воде, а повећање притиска одговара фазном прелазу воде у лед у

затвореној посуди. Предуслов је довољна количина воде која треба да испуни више од 91,7% запремине суда. Већ на температури од - 1 °C, притисак достиже вредност од око 10 МПа. Ово повећање притиска је довољно високо да оштети материјале, посебно оне са порозним структурама, који имају ниску затезну чврстоћу. Међународно признат као пионир истраживања деградација материјала који су изложени дејству мраза је Pauers, који је 1945. приметио да је примарни узрок деградација материјала који су изложени дејству мраза хидраулички притисак [7], који се повећава током процеса формирања леда када се вода „изгура“ из пора где је дошло до смрзавања. Замрзнута вода повећава запремину, узрокујући да се незамрзнута вода потискује дубоко у отворене поре. Услов за настанак критичног притиска је да је прекорачен гранични степен засићености пора водом. Да би се елиминисала могућност описаног разарања структуре цементног камена, једно од решења је да се у цементну матрицу бетона аерирањем уведу додатне поре одговарајуће величине и дистрибуције. Додатне поре су својеврсни „тампон“ у који се убризгава вода коју лед истискује у правцу његовог напредовања. Треба напоменути да постоје две врсте притиска у бетону када се вода замрзне у порам:

- Надпритисак, узрокован повећањем запремине воде када се замрзава за око 9,3%;
- Негативан притисак, узрокован површинским силама и последичном миграцијом влаге у материјалу.

Хидраулички притисак у систему пора, уопштено гледано, је функција [6] брзине формирања леда, брзине пада температуре, врсте, система и облика пора, као и повезаног порног отпора на проток воде. Напони у бетону изазвани повећањем запремине воде која се замрзава, праћени су концентрацијама напона изазваних хетерогеношћу бетона. Настају при било којој промени температуре, јер агрегат и цементни камен, тј. саставни делови бетона, имају различите термичке особине [6]. Брзи циклуси замрзавања и одмрзавања који се наизменично понављају су најразорнији за структуру бетона [7]. Оштећења од смрзавања у порозним грађевинским материјалима, посебно у бетону, веома су важно питање које утиче на трајност конструкције у хладним климатским условима. Због тога је од великог значаја разумети понашање бетонских конструкција при спајању и одређивању. Међутим, процеси замрзавања и одмрзавања бетона обухватају веома компликоване физичке и хемијске појаве, и као такви, механизми одговорни за деловање мраза још увек нису у потпуности решени. [8].

3. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет овог истраживања су бетони у којима се ради повећања отпорности на дејство мраза, део ситног агрегата замењује дробљеном рециклираном гумом. Дробљена рециклирана гума би требало да компензује напоне који се генеришу приликом ширења леда у порном простору цементног камена, слично као мехурићи ваздуха у аерираном бетону.

Могућност примене дробљене рециклиране гуме и њен утицај на својства свежег и очврслог бетона ће се проверити на основу резултата добијених у сопственом експерименталном истраживању. У бетонским мешавинама ће се варирати: водо-цементни однос, врста материјала помоћу кога ће се остварити компензациони ефекат (аерант или дробљена рециклирана гума) и количина дробљене рециклиране гуме.

Одабране бетонске мешавине су подељене у три групе:

- 1) Обичан бетон (без увученог ваздуха),
- 2) Аериран бетон и
- 3) Бетон са додатком дробљене рециклиране гуме.

4. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Главни циљ овог истраживачког рада је да се применом дробљене рециклиране гуме уместо дела ситног агрегата обезбеди добијање бетона задовољавајуће трајности када су у питању класе изложености XF (1-4). Могућност примене дробљене гуме ће се проверити испитивањем и упоређењем својстава свежег и очврслог бетона. Посебна пажња ће се посветити испитивању својстава који указују на трајност очврслог бетона:

- Отпорност бетона према дејство мраза,
- Отпорност бетонске површине на дејство мраза и соли за одмрзавање и
- Водонепропустљивост.

Поред наведеног, један од циљева дисертације је да се добије бетон задовољавајуће трајности применом рециклираног материјала без или уз минорно ремећење основних перформанси конструкцијског бетона.

5. ПРИМЕНЉИВОСТ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА

Резултати експерименталног истраживања предметне докторске дисертације ће дефинисати могућност примене дробљене гуме, настале у процесу рециклаже аутомобилских гума у бетонским композитима, чиме ће се обезбедити одрживо управљање овом врстом отпада, заштита животне средине и дати нова употребна

вредност овом производу у складу са принципима одрживог развоја у грађевинарству.

С друге стране, коришћењем дробљене рециклиране гуме као замене за део ситног природног агрегата, ограничава се тренд прекомерне потрошње необновљивих природних ресурса агрегата, а истовремено регулише проблем одлагање искоришћених аутомобилских гума, чиме се омогућава стварање услова за одрживи развој у овом сегменту привреде.

6. ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА

Основне хипотезе на којима базира сопствено истраживање су:

Хипотеза 1: Супституцијом ситне фракције агрегата дробљеном рециклираном гумом, могуће је да се добије бетон који је отпоран на дејство мраза и комбиновано дејство мраза и соли у истој или већој мери у односу на аерирани бетон и

Хипотеза 2: Примена гранулисане гуме неће значајно утицати на најважнија својства очврслог бетона: чврстоћу при притиску и модул еластичности.

Бенефити које се добијају :

- 1) Применом рециклираног материјала доприноси се смањењу коришћења природног агрегата и смањењу емисије CO₂.
- 2) Доприноси се добијању трајнијих конструкција које у свом планираном експлатационом веку неће захтевати додатна инвестициона улагања.
- 3) Елиминисањем недостатака аерираног бетона коришћењем материјала који би штитио бетон од дејства мраза, а да се при томе, знатно не повећава садржај увученог ваздуха у бетону, снижава се јединична цена бетона.

Како би се провериле дефинисане хипотезе, спровешће се следеће активности:

- 1) Систематизација доступних података о основним физичко-механичким карактеристикама бетона који су отпорни на дејство мраза; дефинисање међусобне зависности различитих карактеристика бетона отпорних на дејство мраза и упоредна анализа аерираног бетона и бетона који је справљен са различитим процентуалним учешћем дробљене гуме као замене у ситном агрегату.
- 2) Експериментално испитивање основних физичко-механичких својстава и испитивање трајности бетона која су у функцији:
 - водоцементног фактора,
 - садржаја ваздуха у бетону и
 - количине дробљене рециклиране гуме.

- 3) Анализа прикупљених података и резултата и добијање оптималне количине дробљене рециклиране гуме у циљу добијања бетона отпорних на дејство мраза и соли за одмрзавање, као и о могућности примене нових материјала којима се постиже отпорност на дејство мраза.

7. КРАТАК ПРИКАЗ САДРЖАЈА РАДА

У првом поглављу дефинисани су предмет и циљ истраживања, као и потреба за његовим спровођењем и применљивост добијених резултата. Такође, наведене су уведене хипотезе и приказан је кратак садржај дисертације.

Друго поглавље односи се на својства дробљене рециклиране гуме. У њему су дефинисана физичка и хемијска својства дробљене гранулисане гуме.

У трећем поглављу дат је преглед стања у области истраживања бетона са применом дробљене гуме. Приказан је преглед доступних експерименталних истраживања и упоредна анализа резултата других аутора. Посебан акценат стављен је на ситнију величину дробљене гуме, која је примењена у експерименталном истраживању ове докторске дисертације.

Четврто поглавље односи се на план и програм експерименталног истраживања. У њему су дефинисани план испитивања компонентних материјала бетона, поступак пројектовања мешавина, редослед њихове израде, као и план и распоред испитивања узорака. Такође, објашњени су варирани параметри, укључујући четири водоцементна фактора, материјал за компензацију унутрашњих напрезања (аерант и дробљена рециклирана гума), као и три количине дробљене рециклиране гуме за делимичну замену ситног агрегата. Описани су пројектовани састави бетонских мешавина, као и методе испитивања одабраних својстава свежег бетона (конзистенција методом слегања, запреминска маса, садржај ваздуха) и очврслог бетона (запреминска маса, чврстоћа при притиску, водонепропустљивост, отпорност на дејство мраза, отпорност на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање, карактеристике ваздушних пора, динамички модул еластичности након излагања циклусима замрзавања/одмрзавања, статички модул еластичности, коефицијент миграције хлорида, скупљање при сушењу). На крају, приказане су фазе сопственог експерименталног истраживања, које обухватају справљање бетонских мешавина, израду узорака, карактеристике опреме и резултате испитивања одабраних својстава свежег и очврслог бетона.

У петом поглављу анализирани су резултати сопственог експерименталног истраживања. Приказани су закључци појединачних и упоредних анализа свих резултата испитивања, до којих се дошло одговарајућом статистичком обрадом података, након чега следи дискусија добијених резултата.

У шестом поглављу изложени су закључци и правац даљег истраживања, на основу испитиваних својстава бетона код којих је извршена запреминска замена ситне фракције агрегата са 2.5%, 5% и 7.5% дробљеном гумом. Сумирани су најважнији резултати на основу којих су изведени закључци, дате су смернице за примену дробљене рециклиране гуме у бетону, као и препоруке за даља истраживања.

У седмом поглављу дат је шири списак коришћене литературе и референци, као и називи стандарда примењених у оквиру експерименталног дела дисертације.

У осмом поглављу табеларно или у виду дијаграма приказани су резултати експерименталних испитивања – измерене величине и израчунате вредности својстава одабраних за анализу.

II СВОЈСТАВА ДРОБЉЕНЕ РЕЦИКЛИРАНЕ ГУМЕ

1. БЕТОНИ СА СИТНОМ ДРОБЉЕНОМ ГУМОМ (CRC)

Ситно уситњена гума (CR) која се добија дробљењем коришћених пнеуматских гума, један је од отпадних материјала који се може користити у бетону, као делимична или потпуна замена крупног или ситног агрегата или оба [9].

Према Европском удружењу произвођача гума и гуме (ETRMA), светска производња гума износила је 5,1 милион тона у 2018. [10]. Са еколошке перспективе, употреба (CR) у бетону је корисна, јер води очувању минералних ресурса, односно агрегата и на тај начин минимизира потребу за новим депонијама потребним за одлагање отпадних гума, чиме се решавају повезани проблеми животне средине [11].

Бетон је крт материјал који када достигне максималну носивост долази до лома конструкције. Стога, дуктилност CR честица може да буде искоришћена за смањење кртости бетона [12]. Такође, у истраживачким радовима приказано је неколико предности бетона са рециклираном гумом (CRC), као што су побољшање његовог капацитета деформације, апсорпције енергије, капацитета влажења и отпорности на циклично замрзавање и одмрзавање, смањење водопропустности, продора хлорида и топлотног ширења [13, 14]. Међутим, смањење чврстоће при притиску CRC-а у поређењу са обичним бетоном је највећи недостатак који је установљен код овог материјала. Овај недостатак се, међутим, може превазићи повећањем количине цемента, смањењем водоцементног односа и употребом одговарајућих хемијских и минералних додатака [14]. Примећено је смањење чврстоће на затезање савијањем због повећања количине CR у бетону. Ово смањење је приписано стварању прслина на граници између честица CR и цементног малтера. Формирање прслина је последица слабе везе између хидрофобних CR честица и цементног малтера, и концентрације напона у међуфазној прелазној зони (ITZ) услед нагле промене флексибилности [12], [15], [16], [17], [18].

Поједини истраживачи су у својим радовима показали утицај CR на отпорност бетона на абразију. Уочено је да је додавање CR бетону негативно утицало на отпорност на хабање због замене природних агрегата који се сматрају главним фактором отпорности бетона на хабање [19-21]. Међутим, неколико других истраживача су објавили позитиван утицај на отпорност бетона на абразију услед употребе CR. Побољшање отпорности на абразију CRC-а се приписује употреби CR честица које делују ограничавајуће на друге честице због своје високе флексибилности [22-27].

Додавање CR, до одређене количине, може значајно побољшати отпорност на удар и енергију апсорпције бетона уз задржавање других механичких својстава [20], [28-35]. Такав бетон се може користити на путевима и баријерама мостова или на

обалама река како би се смањила оштећења услед судара возила и бродова. Chen и др. [36] је установио да је употреба CR агрегата у самозбијајућем бетону (SCC) побољшала његову дуктилност и отпорност на замор.

У појединим научним радовима су приказана својства CRC-а која су побољшана због употребе CR, као што су водонепропустљивост, отпорност на продирање хлорида, отпорност бетона који је изложен киселинама, отпорност бетона на замрзавање-одмрзавање, дубина карбонизације, електрична отпорност и корозија арматуре [21], [23],[37],[38],[39].

Поред тога, топлотна проводљивост CRC је мања од оне код нормалног бетона, што се може објаснити повољнијим термоизолационим својствима гуме и повећаном количином заробљеног ваздуха [20], [40], [41], [42], [43].

Значајно побољшање у капацитету апсорпције звука примећено је након замене неких природних агрегата CR. Развијени материјал је погодан за примену у блоковима као материјал за звучну изолацију [35],[43], [44], [45] .

Резултати испитивања показују да је скупљање CRC при сушењу веће од нормалног бетона. Међутим, разлика је била безначајна у CRC са употребом у проценту мањем од 25% CR. Већа замена CR довела је до прекомерног скупљања приликом сушења услед повећања ваздушних шупљина кроз које испарава воде из бетонске мешавине [18], [46], [47].

2. ФИЗИЧКА И ХЕМИЈСКА СВОЈСТАВА ДРОБЉЕНЕ ГУМЕ (CR)

ЦР се производи на неколико начина, међутим, амбијенталне и криогене методе су најчешће. У амбијенталној методи, CR се производи од отпадних гума кроз различите нивое механичких процеса на температури не вишој од температуре деградације гуме (120°C). Први ниво обраде је сечење гума помоћу дробилица за производњу струготина од гума величине од 70 до 100 mm. Након тога, гума која је величине чипса се смањује на мање од 10 mm у гранулатору. Коначно, материјал се убацује у млин за производњу финих честица. Током сваког нивоа обраде, CR се класификује, а челичне жице и влакна се одвајају помоћу магнетних сепаратора. У криогеној методи, гумени чипс се излаже веома ниској температури (<-80 ° C) да би постао крт. Затим се дроби помоћу великих чекића до потребне величине ситне дробљене гуме. CR произведен криогеном методом има малу количину челика и влакана и правилног је облика [48, 49].

Честице дробљене гуме CR имају оштроивични облик, док је њихова површинска текстура глатка и непропусна [32, 45]. Запреминска маса без шупљина и пора CR честица је у опсегу од 1050-1150kg/m³ [19, 39, 50]. Према аутору Li и др. [30], насипна запреминска маса дробљене гуме CR се креће од 260 до 460 kg/m³. Неколико истраживача је известило да је температура топљења CR око 170°C [9, 51,

52]. Међутим, Saberian и др. [53] пријавили су већу температуру топљења која износи 286 °C. Дробљена гума CR се сматра хидрофобним материјалом са великим контактним углом са водом који се креће између 90° и 122° [30], [54], [55], [56]. Каевунгуен и др. [57] су установили да је CR токсичан материјал који може да штети животној средини јер садржи стирен, па је оправдано њено „заробљавање“ у бетону.

Хемијски састав CR може да варира у зависности од извора основног материјала и у зависности од процеса производње гума. Природна и синтетичка гума представљају скоро 40% CR. Промене ових количина директно утичу на флексибилност CR [58]. Ganjian и др. [59] су установили да је једина разлика између аутомобилских и камионских гума врста гуме. Гуме за путничка возила садрже мање природне, а више синтетичке гуме, док гуме за камионе садрже већу количину природне гуме. Типичан хемијски састав дробљене гуме (CR) приказан је у Табели II-1.

Ситно дробљена гума (CR) која је добијена је из процеса рециклаже отпадних гума дробљењем искоришћених аутомобилских гума, донирана је за потребе израде експерименталног дела докторске дисертације од фабрике за рециклажу гума „ECO-RECYCLING“, из Новог Сада.

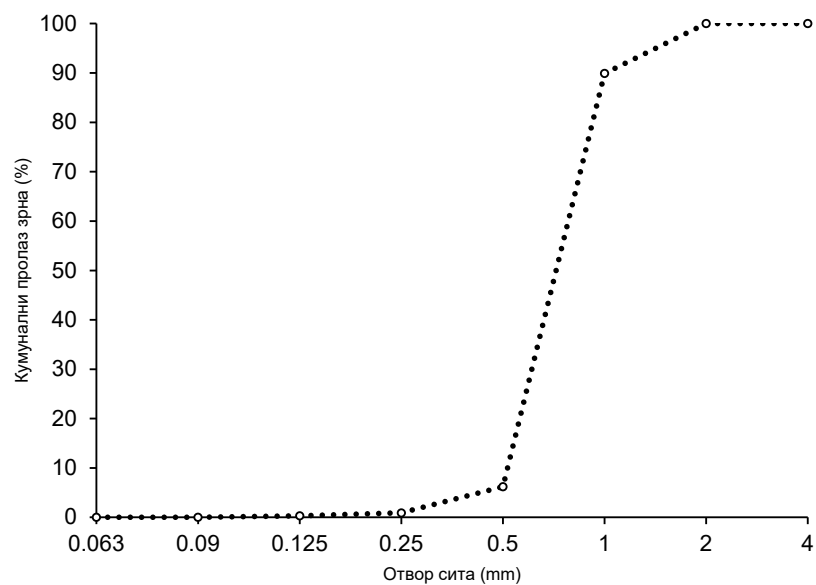
Испитивањем својстава дробљене гуме утврђена је специфична маса без пора и шупљина од 1170 kg/m³, а изглед зрна, гранулометријски и хемијски састав дробљене гуме приказани су на Слици II-1, Слици II-2 и у Табели II-2.



Слика II-1 - Изглед дробљене гуме фракције 0-1 mm, „ECO Recycling“ – Нови Сад.

Табела II-1 - Хемијска својстава дробљене гуме фракције 0-1 mm, „ECO Recycling“ – Нови Сад.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cu mg/kg	Pb mg/kg	Co mg/kg
Дробљена гума	0.78	0.18	0.12	0.24	0.08	<0.01	0.07	3.05	147	26	276



Слика II-2 - Дијаграм гранулометријског састав дробљене гуме „ECO Recycling“ – Нови Сад.

Табела II-2 - Типичан приказ хемијског састава **CR**.

Референца	Састојци , масе, %												
	Природна и синтетичка гума	Црни угљеник	Органски материјали	Челик/ Метал	Екстракт ацетона	Пепео	Сумпор	Цинк оксид	Изопрен	Вода	Влакна/ Текстил	Материје које испаравају	Остало/ адитиви
Aslani и др. [60] и Aslani и Khan [61]	45	40	15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Roichand и др. [62]	51	25	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	24
Formela и др. [63]	45	28	–	13	–	–	–	–	–	–	–	–	14
Venkatesan и др. [64]	57.1	27.4	–	–	8.3	7.2	–	–	–	–	–	–	–
Zhu и др. [65] и Yu и Zhu [66]	45.2	25.8	–	–	14.2	0.9	–	–	12.1	0.8	0.5	–	0.5
Ossola и Vojcik [67]	45–50	20–25	–	12–25	–	–	–	–	–	–	5–10	–	–
Sukontasukkul и Tiamlom [58], Sukontasukkul [40] и Najim и Hall [68]	41	28	–	14.5	–	5.1	–	–	–	–	–	–	16.5
Thomas и др. [27] и Thomas и др. [39]	56.05	28.43	–	–	9.85	5.11	–	–	–	–	–	0,56	–
Nematzadeh и Mousavimehr [69]	55	30	–	–	–	–	1	1	–	–	2	–	11
Ganjian и др. [59]	41	28	–	14–15	–	–	–	–	–	–	–	–	16–17
Mavridou [48]	47	21.5	–	16.5	–	–	–	1	–	–	5.5	–	7.5

III ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА БЕТОНА

1. СВОЈСТАВА СВЕЖЕГ БЕТОНА СА ДРОБЉЕНОМ ГРАНУЛИСАНОМ ГУМОМ (CRC)

1.1. Конзистенција бетона

Обрадивост бетона се генерално смањује употребом CR. У већини истраживања је објављено да се обрадивост смањила са повећањем количине CR, што је објашњено чињеницом да високо хидрофобне и лагане CR честице, имају тенденцију да „лебде“ што доводи до сегрегације [70], [71], [72], [73]. Међутим, у неколико истраживања је објављено да употреба малих количина CR (<20%), који се користи као замена за ситан агрегат, може повећати обрадивост бетона јер честице CR не упијају воду, тако да се повећава количина слободне воде у бетону [44, 74, 75]. Употреба CR у бетону, као замена за природне агрегате, може утицати на укупну обрадивост смеше због разлика у физичким својствима гумених честица и агрегата. Bisht i Ramana [21] су известили да су веће дозе суперпластификатора (SP) потребне за бетон са већим количинама CR да би се постигао исти ниво збијености. На конзистенцију CRC-а у великој мери утиче употреба CR агрегата.

Alsaif и др. [76] су установили да се конзистенција мерена методом слегања смањивала како се количина CR повећавала због храпаве површине зрна CR. Високо унутрашње трење између крупнијих честица CR захтева додатну енергију да би се савладало то трење и да би се свеж бетон са лакоћом покретао [67]. Фине нечистоће (гумена прашина и паперје) такође могу да утичу неповољно на уградљивост и покретљивост свежег бетона [76, 78].

Међутим, неки истраживачи су добили повећање конзистенције услед коришћења CR. Повећање обрадивости CRC-а се приписује ниској апсорпцији воде CR-а [79]. Mendis и др. [80] предлаже употребу одговарајућег додатка за побољшање покретљивости CRC у случају повећаног садржаја CR.

Величина CR честица утиче на обрадивост CRC-а. Објављено је да се обрадивост повећава са повећањем количине CR са крупнијим зрнима (модул финоће 2,36) [82]. У том случају потребно је применити оптималну дозу суперпластификатора или хиперпластификатора да би се постигла жељена обрадивост у CRC, ово посебно важи код бетона са запреминским уделом ситне дробљене гуме CR.

Укратко, може се рећи да примена прекомерне количине CR у бетону доводи до агрегације оштроивичних CR честица што резултира значајним смањењем подмазивања и обрадивости свежег бетона. Међутим, агрегација се може избећи употребом мале количине CR. Такође, обрадивост CR ће бити слична оној код нормалног бетона због ниске апсорпције воде CR.

Табела III-1 - Табеларни приказ резиме истраживачких студија спроведених о обрадивости **CRC**-а (1).

Референца	Величина CR (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Коришћење RW или SP	Резултат
Adeboje и др. [83]	<2.36	(RW) 0.25, 0.5 и 0.75% FA	0,55	Не	Смањење конзистенције, слегања CR мешавине за 10 mm у односу на контролну мешавину (41 mm).
Bišt и Ramana [21]	0.6	(RW) 4, 4.5, 5 и 5.5% FA	0.4	Да	Фактор збијања је одржаван на 0,9 за све мешавине, док су дозе суперпластификатора расле са повећањем количине CR.
Salehudin и др. [74]	2–4	(RW) 2.5, 5 и 7,5% FA	0.5	Не	Слегање је износило 55, 80, 75 i 70 mm, respektivno.
Nematzadeh и Mousavimehr [69]	≤2,36	(RV) 7,5 и 15% FA	0,51	Не	Sleganje se povećalo sa 90 na 105 mm при 15% замене.
Wang и др. [84]	0,6–2,8	(RV) 10 и 15% FA	0,44	Да	Слегање контролне мешавине и CRC са 10% и 15% CR мешавина је било 200, 176 i 165 mm, respektivno.
Guo и др. [9]	0,85–1,4	(RV) 0, 4, 8, 12 i 16% од FA	0,35	Да	Слегање је износило 125, 125, 122, 123 i 122 mm, respektivno.
Youssf и др. [75]	1.18 i 2.36	(RV) 20% од FA	0.5	Да	CRC је показао бољу обрадивост у поређењу са контролном мешавином.
Alwesabi и др. [85]	1–2	(RV) 20% од FA	0.42	Да	Слегање CRC-а је износило 130 mm у поређењу са 75 mm у нормалном бетону.
Musavimehr и Nematzadeh [86]	≤2,36	(RV) 15 и 30% FA	0,51	Не	Слегање контролне мешавине и CRC мешавине са 15 и 30% CR износе 90, 105 и 110 mm, respektivno.
Mohamadi и Khabbaz [18]	<4,75	(RV) 10, 20 и 25, 30 и 40% FA	0,4 i 0,45	Да	Слегања CRC мешавина била је веома слична контролној мешавини.

Табела III-2 (наставак) - Табеларни приказ резиме истраживачких студија спроведених о обрадивости **CRC**-а (2).

Референца	Величина CR (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Коришћење RW или SP	Резултат
Marie [87]	4,75–0,15	(RV) 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 i 100% FA	0,56	Не	Слегање контролне мешавине био је 75 mm, док је код 100% CR мешавине био само 4,5 mm.
Khaloo и др.	2 i 15	(RV) 12,5, 25, 37,5 i 50% TA	0,45	Не	CRC мешавина са ситнијом CR има повећано слегање, док је слегање код примене крупнијих ЦР смањена у поређењу са контролном мешавином.
Bompa i Elgazouli [88]	0–0,5, 0,5–0,8, 1,0–2,5, 2–4, 4–10 i 10–20	(RV) 60% TA	0,35	Да Фиксирана	Слегање CRC мешавине са 60% CR се смањило на 50 mm у поређењу са контролном мешавином која је износила 125 mm.
Jokar и др. [89]	1–6	(RW) 0, 5, 10 i 15% CA	0,48	Да Фиксирана	Слегање контролне мешавине и CRC са заменом 5, 10 i 15% CR је износило 80, 75, 64 i 55 mm, респективно.
Wang и др. [90]	0.18	(AW) 1, 2, 3 i 4% cementa	0,4, 0,45, 0,5, 0,55 i 0,6	Да Прилагођавана	Флуидност цементне пасте опада са повећањем количине CR. Садржај CR треба да буде мањи од 3% да би се постигла флуидност пасте од 180 mm.

Где је:

FA - ситан агрегат,

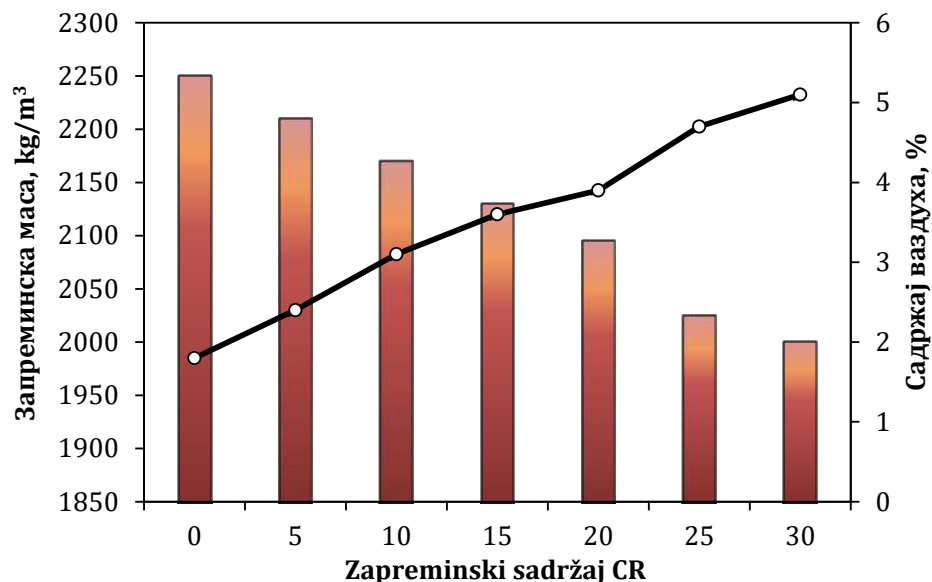
CA - крупан агрегат, TA - укупан агрегат,

RW - замена по тежини, AW – додаје се по тежини,

RV – замењује се по запремини, AV - додаје се по запремини.

1.2. Запреминска маса

Запреминска маса CRC ће бити мања од оне код нормалног бетона због мале запреминске масе гуме. Раније студије су потврдиле постојање инверзне везе између запреминске масе бетона и количине CR у бетону. Ismail и Hassan [12] су проучавали утицај CR на запреминску масу и порозност бетона. Као што је приказано на Слици III-1., запреминска маса бетона се смањивала како се повећавала количина CR. Смањење запреминске масе CRC се поред мале запреминске масе гуме, приписује и повезаном заробљеном ваздуху између гумених честица и цементног малтера, који се повећавао са повећањем количине CR.



Слика III-1 – Утицај CR на запреминску масу и садржај ваздуха свежег бетона [12]

Запреминска маса је једно од испитиваних својстава свежег бетона CRC-а [76, 91]. Међутим, неки истраживачи, као што су Ramdani и др. [77], да би дефинисали запреминску масу свежег бетона користили су јединичну тежину. Запреминска маса свежег CRC справљеног са садржајем CR као замене за ситан агрегат са учешћем од 5–30% CR, смањена је за 2–6% у поређењу са бетоном без CR [92]. Thomas и Gupta [22] су такође потврдили да је запреминска маса бетона високе чврстоће произведеног заменом 2,5–20% ситне фракције агрегата са CR смањена у распону од 0–9,6% у поређењу са контролним бетоном без CR. Ramdani и др. [77] приметили су смањење запреминске масе од 3,1–10,7% код мешавина произведених са заменом ситног агрегата учешћем од 10–60% CR, у поређењу са мешавином без CR.

Thomas и Gupta су уочили линеарно смањење запреминске масе бетона са повећањем количине CR-а [91]. Порозност коју стварају ваздушне шупљине нижа је

од специфичне масе воде што смањује запреминску масу у сувом стању CRC-а [93, 94].

Запреминска маса CRC узорака који садрже крупније CR агрегате већа је од запреминске масе узорака са ситнијим CR честицама [95]. Su и др. [93] приметили су да се CRC узорци различите запреминске масе могу произвести варирањем величине CR честица. Међутим, супротно налазима Girska и Nagrockiene [95], Su и др. [93] су известили о растућем тренду смањења запреминске масе са ситнијим CR честицама. Јокаг и др. [89] приметили су смањење запреминске масе са додатком CR и зеолита у поређењу са нормалним бетоном. Увођење макро полипропиленских (PP) влакана заједно са CR агрегатима додатно је смањило запреминску масу [84].

Табела III-3 - Утицај количине CR на запреминску масу CRC (1).

Референца	CR величина (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Резултати
Tomas и Gupta [91]	60% гранула у облику 0,8–4 mm и 40% у облику праха	(RW) 2,5–20% FA	0,4 и 0,5	Запреминска маса бетона мања је за 0–9,6% у поређењу са контролном мешавином без CR.
Vang и др. [84]	0,6–2,8	(RV) 10 и 15% FA	0.44	Садржај ваздуха контролне мешавине, мешавине са PP влакнима и бетона са CR 10% и CR 15% износи 3,2, 3,7, 4,1 и 4,2% респективно. Запреминска маса контролне мешавине, мешавине са PP влакнима и бетона са CR 10% и CR 15% износе 2243, 2149, 2083 и 2016 kg/m ³ , респективно.
Su и др. [93]	3, 0.5 и 0.3	(RV) 20% од FA	0,37	Смањена за 16.8, 23.2 и 25.2% за CR величине зрна од 3, 0.5 и 0.3 mm, респективно.
Mustafa и Elgavadi [92]	Прашкasti и гранулирани CR 2.36–1.4, 1.4–0.6 и 0.6	(RV) 5–30% FA	0.42	Смањење запреминске масе у распону од 2–6% у односу на бетон без CR.
Ramdani и др. [77]	0,2 –4 (granularno)	(RV) 10–60% FA	0.43	Запреминска маса свежих цементних мешавина смањена је за 3,1–10,7% у односу на мешавине без CR.
Aslani и др. [60]	5 (2–5) и 10 (5–10)	(RV) 10 и 20% TA	0.4	Смањен са 2334 kg/m ³ на минимум од 2141 kg/m ³ .

Табела III-4 (наставка) - Утицај количине CR на запреминску масу CRC (2).

Референца	CR величина (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Резултати
Alsaif и др. [96]	Зрнасти облик 0–6 mm, а чипс 5–20 mm	(RV) 30–60% TA	0,35	Смањење тежине јединице у распону од 9,4–22,3%.
Јокар и др. [89]	1–6	(RW) 0, 5, 10 и 15% CA	0,48	Запреминска маса CRC третираног NaOH је смањена у односу на CRC са необрађеним CR. Запреминска маса мешавине смањена је са 2370 kg/m ³ (контрола) на 2130 kg/m ³

Где је:

PP – полипропиленска влакна

FA – ситан агрегат, CA – крупан агрегат, TA – укупан агрегат,

RW – замена по тежини, AW – додаје се по тежини,

RV – замењује се по запремини, AV – додаје се по запремини.

2. СВОЈСТАВА ОЧВРСЛОГ БЕТОНА СА ДРОБЉЕНОМ ГРАНУЛИСАНОМ ГУМОМ (CRC)

2.1. Упијање воде

Упијање воде значајно утиче на трајност бетона. Све познате хемијске реакције у бетону се одвијају само у присуству влаге. Дакле, апсорпција воде CRC-а контролише и његову трајност. Неколико истраживача је посматрало ефекат CR на упијање воде CRC. Већина њих је утврдила да се упијање воде CRC повећава са повећањем количине CR [43, 74, 97]. С друге стране, мали број истраживача је приметио супротан тренд, односно смањење упијања воде са повећањем количине CR [42, 90]. Gheni и др. [11] су објавили скоро линеарну везу између упијања воде бетона и количине CR.

Они су указали да се ваздушне шупљине повећавају са повећањем количине CR што доводи до повећања упијања воде. Слична запажања су пријављена у другим студијама [21, 74, 82]. Пошто се упијање воде бетона повећава са количином CR, можда би било корисно предложити ограничење количине CR у погледу трајности бетона.

Ganjian и др. [59] су користили до 10% дробљене гуме за замену крупног агрегата и приметио је повећање упијања воде са повећањем количине CR. Супротно, у бетонској мешавини замењена је количина цемента ситно млевеном гумом где је добијено мање упијање воде. Међутим, током овог испитивања приликом сушења узорака у сушници, установљено је пуцање бетона што омогућава да вода лако продре кроз CRC. Овај закључак су такође потврдили Bravo и De Brito [98], чији су експериментални резултати такође указивали на повећање упијања воде како се

повећава количина CR. Gupta и др. [99] су закључили да је повећање односа w/b , величине и количине CR честица довело до повећања апсорпције воде.

Неколико студија показују предности CR у смањењу упијања воде бетона. Oikonomi и Mavridou [100] су известили да је CRC потопљен у воду под вакуумом упио мање воде у распону од 7–25% са садржајем CR до 15%. Yilmaz и Degirmenci [101] су добили смањење упијања воде са крупнијим зрнима CR агрегата. Segre и др. [102] су приказали да је упијање воде код бетонске мешавине са 10% CR било мање од оног добијеног код контролне бетонске мешавине.

Неки истраживачи су закључили да се апсорпција воде смањила до одређене граничне вредности, а затим је забележено постепено повећање [90, 91]. Укључивање различитих величина CR ће побољшати гранулометријски састав агрегата чиме се производи гушћа микроструктура и смањује се упијање воде, као што су објавили Si и др. [47] и Rezaifar и др. [103].

Табела III-5 - Резултати истраживачких студија о упијању воде **CRC** (1)

Референца	Величина CR (mm)	Замена или додавање или додавање CR	w/c или w/b однос	Упијање воде
Bišt и Ramana [21]	0.6	(RW) 4, 4.5, 5 и 5.5% FA	0.4	Повећано за 12.6, 26.2, 41.9 и 68.1%, респективно.
Salehudin и др. [74]	2–4	(RW) 2.5, 5 и 7.5% FA	0.5	Повећано за 42, 91 и 548%, респективно.
Hesami и др. [19]	<4.75	(RV) 5, 10 и 15% FA	0.39	Повећано за 9.6, 17.6 и 26.5%, респективно.
Marie [41]	4.75–0.075	(RV) 10 и 20% FA	0.56	Повећано за 6.7 и 10%, респективно.
Girskas и Nagrockiene [95]	0.1–3.0	(RW) 5, 10 и 20% FA	0.35	Упијање за 20 % CR износи 4.95% у поређењу са 3.49% за контролну мешавину.
Thomas и др. [27]	25% од 2–4 mm, 35% од 0.8–2 mm и 40% гуменог праха	(RW) 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 и 20% FA	0.4, 0.45 и 0.5	Упијање воде контролне мешавине за w/c 0.4, 0.45 и 0.5 износило је: 0.25, 0.3 и 0.35%. Упијање воде за 20% CR за w/c 0.4, 0.45 и 0.5 износило је: 0.5, 0.7 и 0.65%.
Thomas и др. [15] и Tomas и Gupta [22]	25% од 2–4 mm, 35% од 0.8–2 mm и 40% gumenog praha	(RV) 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 и 20% FA	0.3	Смањено за CR до 7.5%, повећано за CR већи од 7.5%

Табела III-6 - Резултати истраживачких студија о упијању воде CRC (2)

Референца	Величина CR (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Упијање воде
Gesolu и Guneyisi [104]	<4	(RV) 5, 15 и 25% FA	0.35	Повећано за 4.3, 14.6 и 36%, респективно.
Gupta и др. [99]	<1.9	(RV) 5, 10, 15 и 20% FA	0.35, 0.45 и 0.55	Повећање од 154% и 16%, што одговара w/b од 0.55 и 0.45. Смањење од 11% за av/b од 0.35.
Gupta и др. [99]	1.9-20	(RV) 10, 15, 20, 25, 30 и 35% од FA	0.35, 0.45 и 0.55	14.3% и 11% смањење што одговара w/b од 0.35 и 0.55. Повећање од 12% за однос w/b од 0.45.
Muhammed Adamu [25]	и 40% од 0.595 mm, 40% од 1-3 mm и 20% од 3-5 mm	(RV) 10, 20 и 30% FA	0.37	Повећано у односу на садржај CR . Не прелази 2% при 30% CR .
Rezaifar др. [103]	и 1.01-1.32	(RV) 0-30% FA	0.5	Смањује се са повећањем садржаја CR до око 9 vol. %, међутим, супротно понашање примећено после те границе.
Si и др. [47]	1.44-2.83	(RV) 15, 25, 35 и 50% FA	0.44	Смањено са повећањем садржаја ЦР третираног NaOH до 35%. Апсорпција воде 50% CR третираног NaOH била је једнака оној код 15% необрађеног CR .
Bani-Hani и Senuci [105]	1.7, 0.85, 0.6, 0.425 и 0.3	(RW) 20, 40 и 60% FA	0.34	Благо смањено са повећањем садржаја CR у пешачким блоковима.
Aliabdo и др. [43]	0.42, 1 и 2	(RV) 20, 40, 60, 80 и 100% FA	0.45	Повећано за 35, 44, 74, 90 и 93%, респективно.

Табела III-7 - Резултати истраживачких студија о упијању воде CRC (3)

Референца	Величина CR (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Упијање воде
Pham и др. [97]	1–7	(RV) 15 и 30% TA	0.5	Повећано у односу на садржај CR. Узорци третирани NaOH су показали већу апсорпцију од узорака за третман воде.
Ganjian и др. [59]	4.75–20 и 0.045–1.2	(RW) 5, 7,5 и 10% CA или цемента	0.5	Повећано са повећањем садржаја уситњене гуме за замену крупног агрегата. Смањен са повећањем садржаја гуменог праха у замени за цемент.
Wang и др. [46]	0.6–2.36 и 0.3–1.18	(AV) или (RV) 20 и 40% FA	0.18	Креће се између 2.5 и 3.0% за малтер са додатком гуме.
Wang и др. [90]	0.18	(AW) 1, 2, 3 и 4% цемента	0.4, 0.45, 0.5, 0.55 и 0.6	Смањено за 3.4, 8.4, 10.1 и 6.5%, респективно.
Wang и др. [106]	0.297–0.595	(AW) 5 и 10% епоксида у полимер бетону	–	Додатак CR нема већи ефекат.
Kashani и др. [42]	0.9–2.5	(AW) 10, 20 и 30% укупне тежине чврстог материјала од лаког целуларног бетона	0.5	Повећано у односу на садржај CR . Период намакања CR честица у води нема већи утицај на апсорпцију воде CRC узорака.

Где је:

FA - ситан агрегат, CA - крупан агрегат, TA - укупан агрегат,

RW - замена по маси, AW – додаје се по маси

RV – замењује се по запремини, AV - додаје се по запремини.

2.2. Чврстоћа при притиску

На основу истраживања закључено је да чврстоћа на притиску CRC генерално опада са повећањем количине CR. Salehudin и др. [74] је испитали су чврстоћу на притисак бетона припремљеног са три различита учешћа (2.5%, 5.0% и 7.5%) CR за замену ситног агрегата. Однос w/c је био 0.5, а величина CR честица се кретала од 2 до 4 mm. Регистровано је постепено смањење чврстоће при притиску са повећањем количине CR.

Смањење чврстоће на притисак приписано је смањењу запреминске масе услед замене песка са CR који има малу запреминску масу. Поред тога, пријављено је да је међуфазна прелазна зона (ITZ) између цементног малтера и честица гуме била слабија у односу на исту зону између цементног малтера и природних агрегата. Ово се приписује чињеници да разлика у крутости између честица гуме и цементних честица генерише високу концентрацију напона на ITZ-у што доводи до стварања микропрслина [74].

Aslani и Khan [61] су заменили 10–40% природног крупног агрегата са зрнима величине 2–5 mm и 5–10 mm CR агрегата у SCC. Истражен је утицај повишене температуре на чврстоћу на притисак самозбијајућег бетона са рециклираном

гумом (SCRC). Уочено је да су SCRC мешавине са CR агрегатима величине 2–5 mm имале мање љуштења у поређењу са мешавинама са агрегатима величине 5–10 mm. Такође, регистровано је у мешавинама свих величина CR са заменом од 40% на 600°C да је дошло до стварања пукотина унутар структуре. Највећа заостала чврстоћа при притиску је регистрована у смешама са 10% замене CR величине 2–5 mm. Најмања чврстоћа је забележена у узорцима са 40% CR обе величине зрна. SCRC мешавине са 40%, CR величине 5–10 mm изложене температури од 600 ° C су се распале и није било могуће извршити испитивање чврстоће, док су смеше са CR величине 2–5 mm показале значајно смањење чврстоће.

Јокаг и др. [89] је спровео студију за побољшање чврстоће при притиску CRC-а додавањем природног зеолита за делимичну замену цемента. Додатно је извршена површинска обрада CR честица са 1 M раствором NaOH (aq) да би се побољшала веза цемент-гума. Одабрана је CR величине зрна од 1 до 6 mm и нивои замене од 5, 10 и 15% у односу на масу крупног агрегата. Чврстоћа на притисак свих CRC мешавина без зеолита била је мања од оне код нормалног бетона. Међутим, замена цемента зеолитом је допринела повећању чврстоће бетона. Најбољи учинак, у погледу чврстоће на притисак, забележен је у смешама које садрже 5% CR са 10 или 15% зеолита.

Adeboје и др. [83] је истраживао ефекат замене цемента и песка бентонитном глином и CR на својства CRC. Чврстоћа на притисак модификованог бентонит глине-CR бетона била је слична оној код обичног бетона, па је закључено да се такав бетон може користити за изградњу прилаза, подова и пролаза.

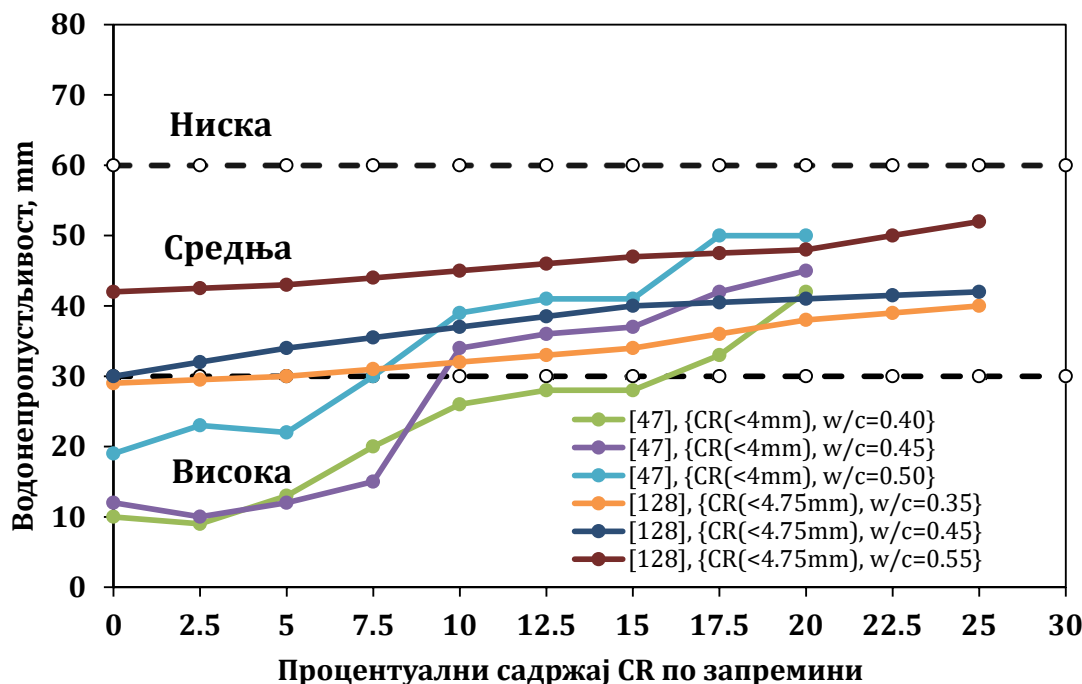
2.3. Водонепропустљивост бетона

Трајност бетона зависи од пропустљивости бетона [107]. Констатовано је да се водопрпусност CRC повећава са повећањем количине CR. Повећање пропустљивости CRC приписује се порозности и микро прслинама које настају у ITZ између CR и цементне пасте. Слаба међуфазна веза између везивне (цементне) пасте и CR агрегата повећала је водопрпусност бетона, како наводе Munoz-Sanchez и др. [108].

Ganjian и др. [59] су показали да се водопрпусност повећава како се повећава величина честица CR. Thomas и др. [109] су указали на повећање дубине продирања воде са повећањем w/b у CRC мешавинама са уделом 20% CR. Su и др. [93] је такође заменио 20% природног ситног агрегата са CR (величине 3, 0.5 и 0.3 mm) добио је највећу дубину продирања воде у бетон који је садржао зрна CR већа од 3 mm. Велике CR честице или неодговарајући гранулометријски састав могу довести до неправилне дистрибуције честица у бетону, што ће узроковати повећање водопрпусности [93]. Дакле, закључено је да су ситније CR честице корисне у смањењу водопрпусности CRC. Bisht и Ramana [21] су известили да се дубина

продирања воде повећава са повећањем количине CR у бетону због ваздушних шупљина заробљених у бетону током мешања CR.

Ефекат w/c односа на водопропусност CRC-а истраживали су Thomas и др. [27] и Gupta и др. [107]. Закључили су да се са повећањем w/c повећава дубина продирања воде, што је приказано на Слици III-2 [27, 107]. Такође се из података на Слици III-2 може закључити да се бетон ниске пропусности може постићи под условом да ниво замене ситног агрегата не прелази 15%.



Слика III-2 – Дубина продирања воде под притиском у бетон са додатком гуме [27], [107]

Слаба веза између CR и цементне пасте доводи до стварања микропрслина око честица CR. Ове прслине олакшавају дифузију влаге, кисеоника итд. у бетон, што доводи до његовог пропадања. Дубље и веће прслине се формирају употребом CR честица великих димензија. Ове прслине могу да се међусобно повежу ако се користи прекомерна количина CR. Сходно томе, величина и количина CR треба да се контролишу како би се избегао недостатак трајности CRC.

2.4. Отпорност бетона на замрзавање и одмрзавање

Отпорност бетона на замрзавање и одмрзавање је главни фактор који утиче на трајност бетона, посебно у хладним земљама и један је од главних разлога за пропадање старе инфраструктуре [38]. Међутим, спроведено је недовољно студија да би се проценио учинак CRC-а на отпорност бетона на замрзавање и одмрзавање. Студија коју су спровели Gesoglu и др. [26] је показала да нема разлике у отпорности

на замрзавање-одмрзавање бетонске мешавине са додатком CR и нормалног бетона при мањем броју циклуса. Даље, није било значајне разлике у отпорности на замрзавање-одмрзавање референтне и мешавине са CR до 240 ciklusa. Губитак масе свих бетонских мешавина био је мањи од 4%. Међутим, дошло је до драматичне промене у понашању нормалне бетонске мешавине пошто је број циклуса премашио 300. Губитак масе нормалне бетонске мешавине достигао је 34%, док није било промене у губитку масе мешавина са CR (губитак масе < 4,2%). Ово се може сматрати великим побољшањем отпорности на замрзавање-одмрзавање јер се побољшана отпорност на мраз може постићи само додавањем 10-20% CR.

Richardson и др. [38] приметили су да постоји губитак масе од 0,6% и 0,07% масе природног агрегата за бетон (Natural aggregate concrete - NAC) и CRC након 70 циклуса замрзавања-одмрзавања, респективно. Посматрањем CR честица величине мање од 0,5 mm под микроскопом откривено је да имају неправилан облик и храпаву површину. Такође је откривено да заробљени ваздух ствара систем шупљина у CRC (Richardson и др.) [48]. Даље, Gonen [94], Alsaif и др. [110] и Pham и др. [111] су приметили да CRC може повећати отпорност на замрзавање-одмрзавање због употребе флексибилних CR честица.

Pham и др. [111] су истраживали ефекат побољшане везе између CR и цементне матрице на отпорност CRC на замрзавање-одмрзавање. Нетретирани и CR обложен кополимером коришћени су као замена од 30% запремине ситног агрегата. Узорци бетона су били изложени 200 циклуса замрзавања-одмрзавања. После 200 циклуса замрзавања-одмрзавања, губитак масе у контролном бетону без CR, необрађеном CR и CR обложен кополимером био је 4.1, 0.5 и 1.5%, респективно. Ово је доказало да је необрађени CR најбољи у погледу перформанси замрзавања-одмрзавања.

Wang и др. [84] су установили да су се меки CR агрегати деформисали са лакоћом у поређењу са природним агрегатима и стога повећали запреминско скупљање у CRC. Ипак, није дошло до повећања дужине узорка који имају PP влакна и CR агрегате. Ослобађање унутрашњег напрезања услед деформисања CR агрегата обезбедило је заштиту од замрзавања CRC. Бетонска мешавина са PP влакнима и 15% CR агрегата ограничавале су експанзију услед циклуса замрзавања-одмрзавања и било је слично контролној смеси.

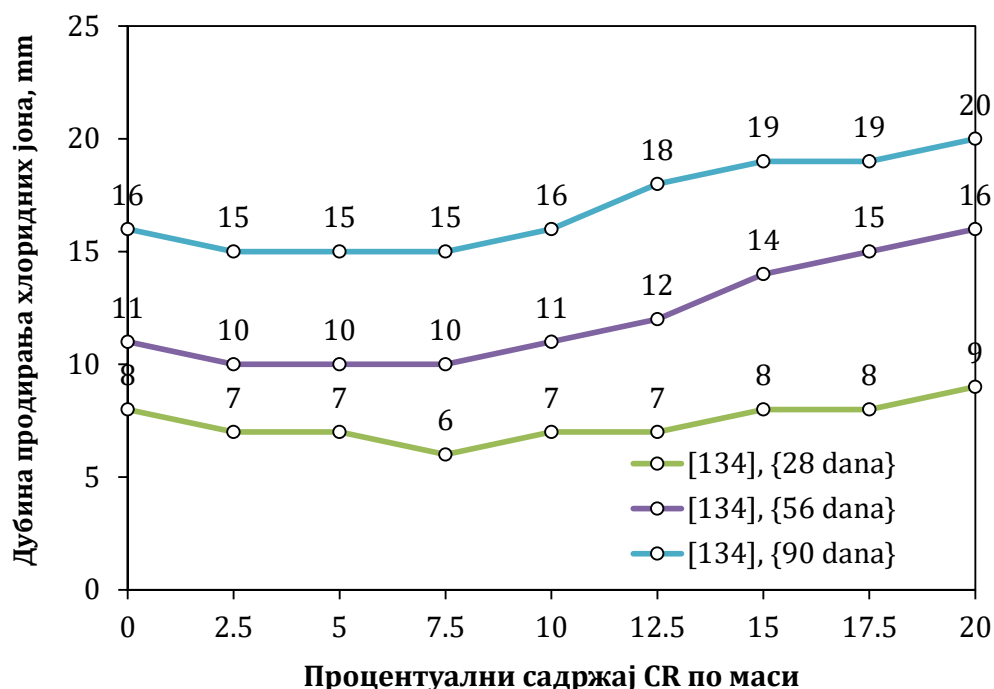
Barčević и др. [112] су закључили да је након 56 циклуса смрзавања-одмрзавања кумулативни губитак масе CRC био једна четвртина оног код прсканог бетона без CR честица. CRC са малим учешћем CR имао је бољу отпорност на циклусе смрзавања-одмрзавања ако количина CR није прелазила 1% агрегата, што се приписује повећању ефективне порозности. Честице CR агрегата са мањом запреминском масом повећале су количину заробљеног ваздуха и створиле додатне просторе смањујући на тај начин унутрашње напрезање изазвано замрзавањем и одмрзавањем CRC-а.

Висока флексибилност CR-а, као и повезане ваздушне шупљине, обезбеђују одличан капацитет релаксације CRC-у који му омогућава да ослободи унутрашње напоне изазване циклусима замрзавања-одмрзавања. Сходно томе, употреба одговарајућег дозирања и гранулометријског састава CR у бетону је добро решење за избегавање оштећења услед замрзавања и одмрзавања.

2.5. Отпорност на хлоридне јоне

Продор хлорида утиче на трајност бетона, посебно на његово пропадање услед корозије арматуре. Thomas и др. [113] су установили да бетонске мешавине са до 10% CR имају скоро сличне или мање дубине пенетрације хлоридних јона у поређењу са контролном мешавином, док се дубина пенетрације постепено повећава са повећањем количине CR. Умерено смањење дубине продирања у смешама са више од 7,5% CR приписано је нижој апсорпцији гумених честица. Међутим, повећање количине CR до 20% резултирало је повећањем порозности бетона што је довело до повећања дубине продирања хлорида. Слика III-3 приказује дубину продирања хлорида у испитиване бетонске мешавине у зависности од процентуалног учешћа CR (0%-20% са кораком од 2,5%), и дужине изложености продору хлорида (28, 56 и 90 дана) [113].

Отпорност на хлоридне јоне CRC се повећавала са количином CR. Штавише, коефицијент дифузије хлоридних јона се смањивао са повећањем количине CR, како су известили Gupta и др. [114]. Коефицијент дифузије хлоридних јона у бетон са 20% CR праха и хибридног бетона са 10% CR праха и 25% CR влакана смањен је за 24,5% и 21,81%, респективно, у поређењу са NAC [114]. Продор хлорида је био ограничен због влакана која су блокирала хлоридне јоне док CR прах испунио поре у бетону. Смањење пенетрације хлоридних јона се такође приписује непропусној природи честица CR-а које стварају препреку пролазу хлоридних јона, према Thomas и др. [39]. Zhu и др. [65] је навео да је CRC показао повећану отпорност на ерозију хлоридних јона у поређењу са NAC, посебно на температурама испод 20° C Њихова истраживања су показала да се додавањем дробљене гранулисане гуме (CR) може повећати капиларна засићеност бетона и смањити степен корозије челичних шипки у бетону, а са повећањем садржаја дробљене гуме смањује се и губитак тежине челичних шипки. Отпорност на хлоридне јоне CRC-а може се додатно побољшати смањењем w/c односа.



Слика III-3 – Дубина продорања хлоридних јона у **CRC** у зависности од садржаја **CR** и дужини изложености хлоридима [113]

Пропустљивост хлоридних јона CRC-а су такође проучавали Gesoglu i Guneyisi [115] заменом агрегата са уситњеном и издробљеном гумом (15 и 25% запремине). Они су известили да се пропустљивост хлоридних јона повећава са повећањем количине CR агрегата супротно ономе што су известили Gupta и др. [114]. Повећање пропусности хлоридних јона за 57%, показао CRC бетон са 25% CR као замена за агрегат. Налази ове студије показују добро слагање са налазима Bravoa i De Brita, где је замена CR до 15% показала повећање коефицијента дифузије хлорида. Bravo i De Brito [98] су навели да је процес млевења CR такође утицао на продорање хлоридних јона, при чему су честице CR грубе површине обезбедиле повећано приањање честица CR са цементном пастом и на тај начин смањиле пропустљивост хлоридних јона. Штавише, дошло је до смањења пенетрације хлоридних јона, јер је период очвршћавања CRC продужен.

Повећање продора хлоридних јона такође се приписује повећању запремине пропусних шупљина и капиларног упијања воде употребом CR агрегата, према Alsaif и др. [96]. Међутим, одговарајући третман и коришћење одговарајуће количине и процентно учешће CR може значајно смањити дифузију хлоридних јона у бетону.

Резултати испитивања водопрпусности, отпорности на замрзавање-одмрзавање и отпорности на хлоридне јоне који су добијени у истраживањима бетонских мешавинама CRC са CR агрегатом приказани су у Табели III-8.

*Табела III-8 - Резултати водопропустности, отпорности на замрзавање-одмрзавање и отпорности на хлоридне јоне код бетонских мешавинама **CRC** са **CR** агрегатом (1)*

Референца	CR величина (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Резултати
Водопропусност				
Ganjian др. [59]	и 4.75–20 и 0.045–1.2	(RV) 5, 7.5 и 10% CA или цемента	0.5	Повећано за 150% и 114% са CR величинама 10 и 1,2 mm респективно за 10% CR смешу.
Thomas др. [27]	и <4	(RV) 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 и 20% FA	0.4, 0.45 и 0.5	Повећано до 310%, 275% и 163% што одговара омјерима w/b 0.4, 0.45 и 0.5.
Su и др. [93]	3, 0.5 и 0.3	(RV) 20% од FA	0.37	Повећан за 209%, 42%, 38% и 25% у односу на величину гуме.
Bisht и Ramana [21]	и 0.6	(RV) 4, 4.5, 5 и 5.5% FA	0.4	Повећање од 35% у односу на садржај CR.
Tomas Gupta [22]	и 25% од 2–4 mm, 35% од 0.8–2 mm и 40% гуменог праха	(RV) 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 и 20% FA	0.3	Повећано са 4 mm за бетон без CR на 13 mm за 20% CRC. Повећање од 225% за 20% CRC у поређењу са бетоном без CR.
Отпорност на замрзавање-одмрзавање				
Pham др. [111]	и 1–4	(RV) 30% од FA	0.47	Чврстоће и масе узорка су смањене.
Gonen [94]	1–2	(RV) 0.5–4% TA	0.5	Проценат губитка масе се смањила за (37–80% за величину CR од 2 mm) и (33–86% за величину CR од 1 mm).
Richardson др. [38]	и 0.5	–	0.44	0,6 % и 0,07% релативног губитка масе примећено је за NAC i CRC након 70 циклуса замрзавања-одмрзавања.
Gesoglu др. [26]	и 4 до 1	(RV) 10 и 20% TA	0.27	Фини CR agregat је bio bolji od krupnog CR. Губитак масе био је мањи од 3,5% до 240 циклуса и није било разлике између контроле и CRC. Контролни бетон је изгубио 34% масе након 300 циклуса замрзавања-одмрзавања.

Табела III-9 - (наставак) Резултати водопропустности, отпорности на замрзавање-одмрзавање и отпорности на хлоридне јоне код бетонских мешавинама CRC са CR агрегатом (2)

Референца	CR величина (mm)	Замена или додавање CR	w/c или w/b однос	Резултати
Отпорност на хлоридне јоне				
Gheni др. [116]	и >0,075 и пролази кроз 0.2 mm	(RV) 5–25% cementa	0,51	Количина наелектрисања (кулони) је смањен за 27.3–72.7% за 5–20% CR, повећан за 168% за 25% CR.
Li и др. [117]	0.6	(RV) 5, 10, 15, 20 i 30% FA	0.45	Коефицијент дифузије хлорида ($10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$): смањен за 5.23% за 5% CR, повећан за 1.63–35.08% за 10–30% CR, смањен за 35.84–9.15% за 5–15% третирани CR. Повећан за 2.83–16.34% за 20–30% третирани CR.
Gesoglu Guneyisi [115]	и Чипс мрвице	и (RV) 15 i 25% TA	0.4 i 0.6	Пропустљивост хлоридних јона повећана је 57% за 25% CR.
Thomas др. [113]	и 25% од 2–4 mm, 35% од 0,8–2 mm и 40% гуменог праха	(RV) 2,5,5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5 i 20% FA	0.3	Смањење дубине пенетрације хлоридних јона до 25% за 7,5% CR (28 дана), до 10% за 7,5% CR (56 дана), до 6% за 7,5% CR (84 дана). Замена >7,5% CR су повећале пенетрацију хлоридних јона.

Где је:

NAC - бетон од природног агрегата.

FA - ситан агрегат, CA - крупан agregat, TA - укупан агрегат, RW – се замењује по тежини, AW – се додаје по тежини, RV – се замењује по запремини, AV - се додаје по запремини.

3. ЗАКЉУЧЦИ ИЗВЕДЕНИ НА ОСНОВУ РЕЛЕВАНТНИХ ИСТРАЖИВАЊА

На основу прегледа литературе изведени су одређени закључци, који ће уједно представљати и почетни основ за даља експериментална истраживања. Примењена количина дробљене гуме која је коришћена као замена (ситног, крупног и укупног) агрегата у односу на свако испитивано својство бетона која је прегледана у литератури биће приказана за свако својство засебно.

3.1. Свеж бетон

3.1.1. Конзистенција

Конзистенција бетона зависи од величине зрна и процентуалног учешћа дробљене гуме у бетону, као и од начина замене природног агрегата са дробљеном гумом, у односу на запремину или масу (ситног, крупног или укупног) агрегата. Општи закључак је да се конзистенција (уградљивост бетона) смањује увођењем дробљене гуме у бетонску мешавину и да би се одржала конзистенција мора се додати оптимална количина хемијског додатка (пластификатора, суперпластификатора или хиперпластификатора).

Утицај коришћења дробљене гуме за делимичну замену ситног и/или крупног агрегата на конзистенцију бетона, приказан је шематски на дијаграму на Слици III-4.

3.1.2. Запреминска маса и садржај ваздуха

С обзиром да дробљена гума има мању специфичну масу у односу на природан фракционисани агрегат, са заменом ситне или крупне фракције (запремински или по маси) добијају се ниже вредности запреминске масе свежег бетона.

Са повећањем количине дробљене гуме садржај ваздуха у бетону се повећава.

Утицај коришћења дробљене гуме за делимичну замену ситног и/или крупног агрегата на запреминску масу и садржај ваздуха бетона приказан је шематски на дијаграму на Слици III-5.

3.2. Очврсли бетон

3.1.3. Упијање воде

На основу прегледа литературе закључено је да се заменом, по маси или запремини, ситног агрегата до 20% добијају више вредности упијања воде, а да се заменом цемента у количини од 1% до 4% дробљеном гумом добијају ниже вредности упијања воде у односу на обичан бетон. У случају када је крупан агрегат замењен са дробљеном гумом величине веће од 4 mm у количини већој од 20%, добијени су више вредности упијања воде, Слика III-6.

3.1.4. Чврстоћа при притиску

Прегледом научних радова у којима је анализиран утицај дробљене гуме, као делимичне замене за ситан и крупан агрегат, закључено је да се применом дробљене гуме добијају ниже вредности чврстоће при притиску. Постепено повећање учешћа дробљене гуме у бетону доводи до постепеног смањивања чврстоће при притиску, Слика III-7.

3.1.5. Водонепропустљивост

Запреминском заменом ситног и /или крупног агрегата дробљеном гумом добијају се веће вредности продирања воде у бетону. Међутим, правилним избором водоцементног фактора, крупноће зрна и дозаже рецилиране гуме могу се добити бетони високе и средње водонепропустљивости.

Шематски приказ утицаја дробљене гуме на водонепропустљивост бетона приказана је на Слици III-7.

3.1.6. Отпорност на замрзавање и одмрзавање

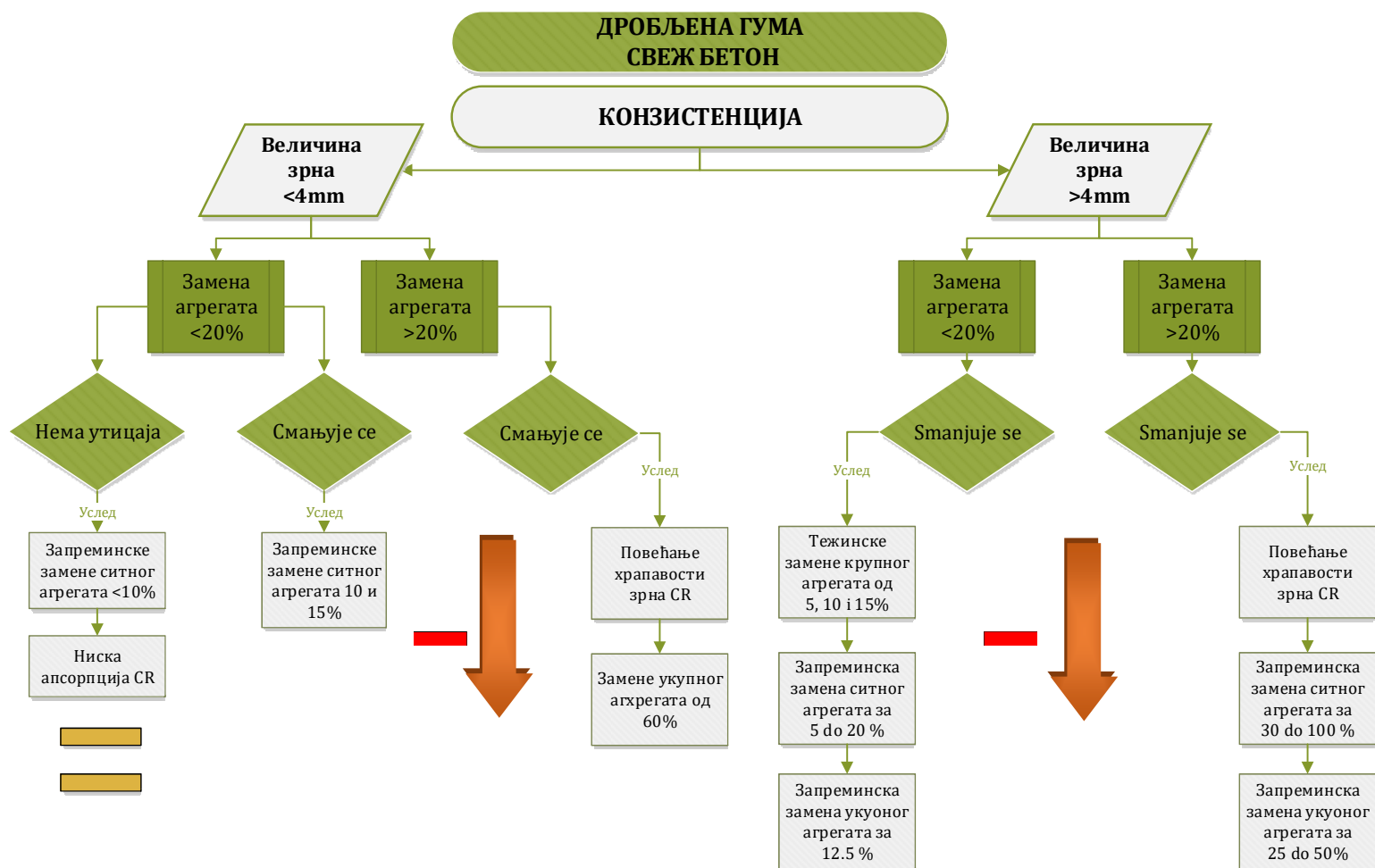
Запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом добијају се ниже вредности чврстоће при притиску, као и ниже вредности запреминских маса. Уједно се добија већа отпорност бетона на дејство мраза у односу на обичан бетон, захваљујући деформабилности зрна дробљене гуме и компензацији унутрашњих напрезања који се генеришу приликом кристализације воде. Вредности чврстоћа при притиску бетона са дробљеном гумом ситне гранулације, који су изложени наизменичним циклусима замрзавања и одмрзавања, су приближне вредностима еталонских узорка (незамрзавани узорци).

Шематски приказ утицаја дробљене гуме на отпорност бетона на дејство мраза приказан је на Слици III-8.

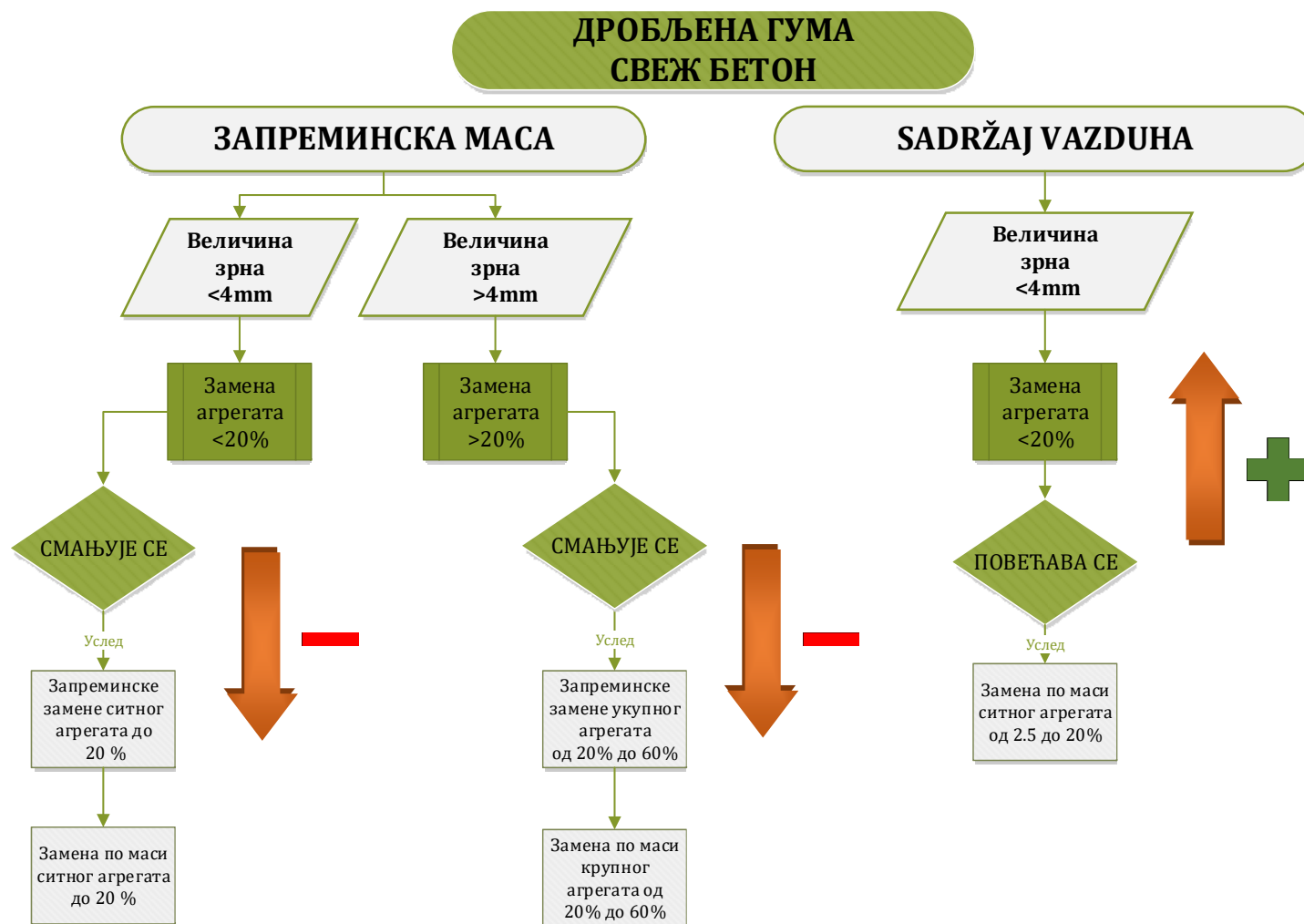
3.1.7. Отпорност на продор хлоридних јона

Отпорност бетона на продирање хлоридних јона је повећана код бетона у коме је ситан агрегат замењен дробљеном гумом у количини од 10% до 30% по запремини. Према резултатима неких аутора, повећање продора хлоридних јона у бетон се може приписати повећању запремине ваздушних пора у бетону.

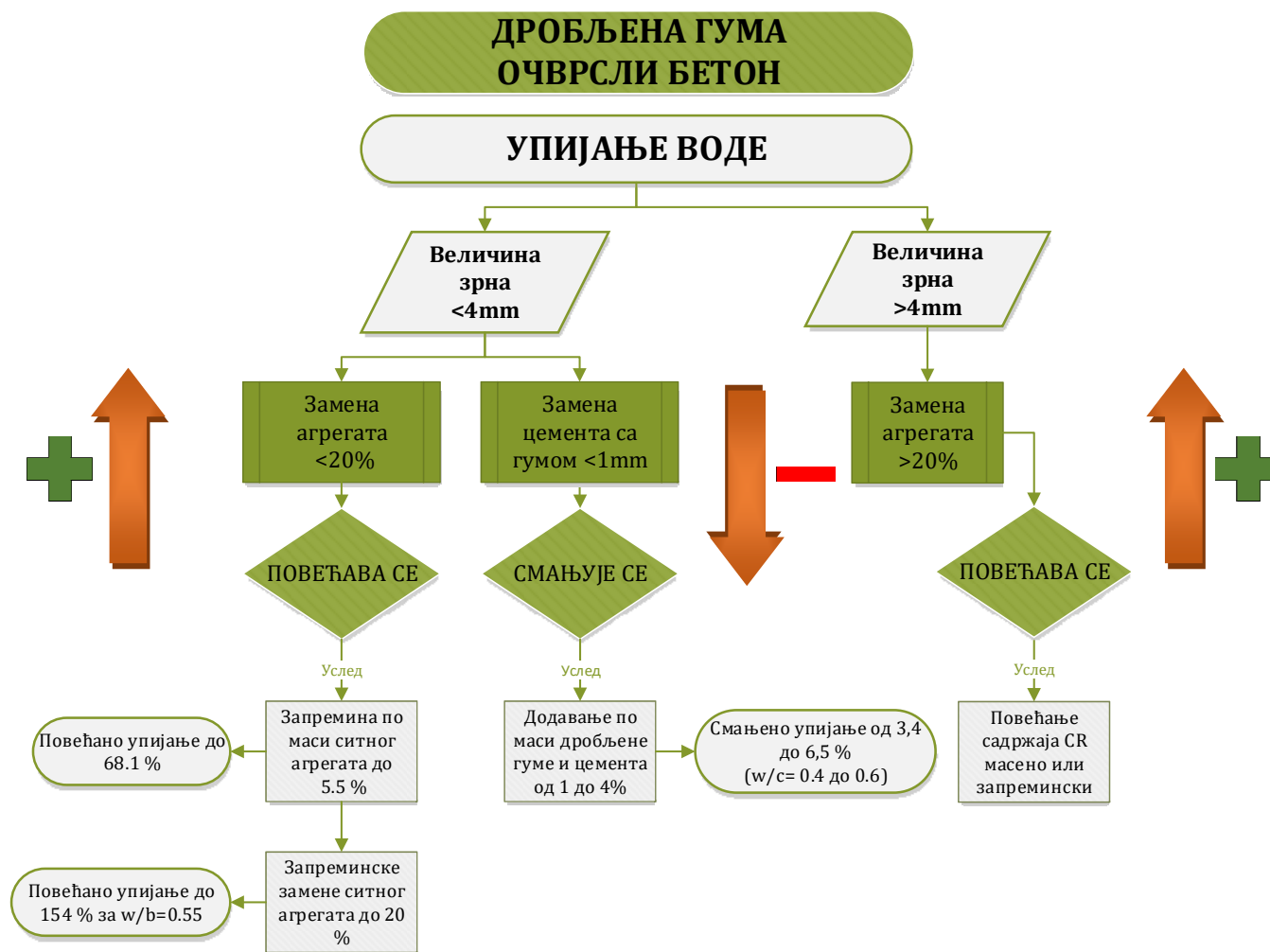
Шематски приказ утицаја дробљене гуме на отпорност бетона на продирање хлоридних јона приказан је на Слици III-8.



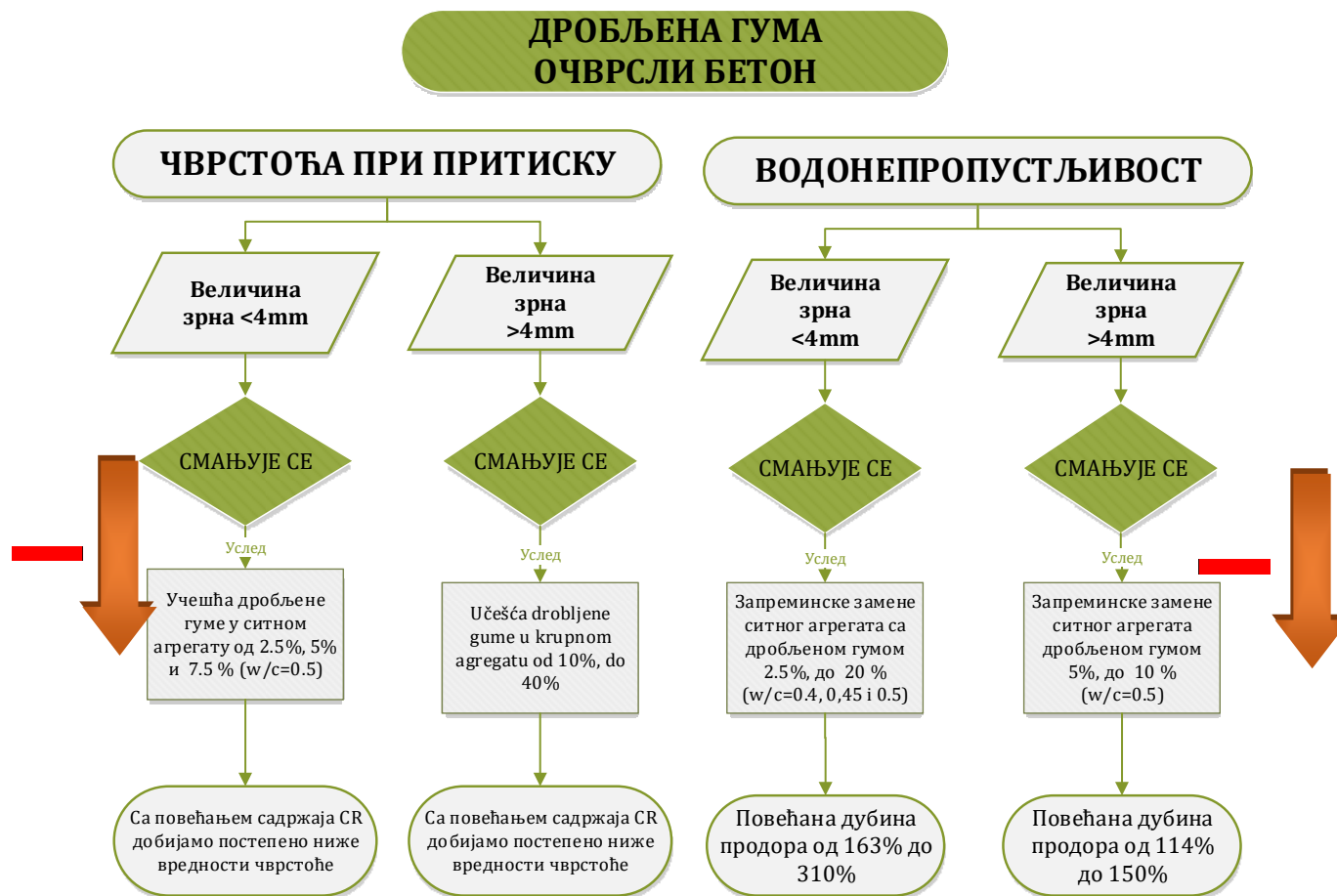
Слика III-4 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на конзистенцију бетона



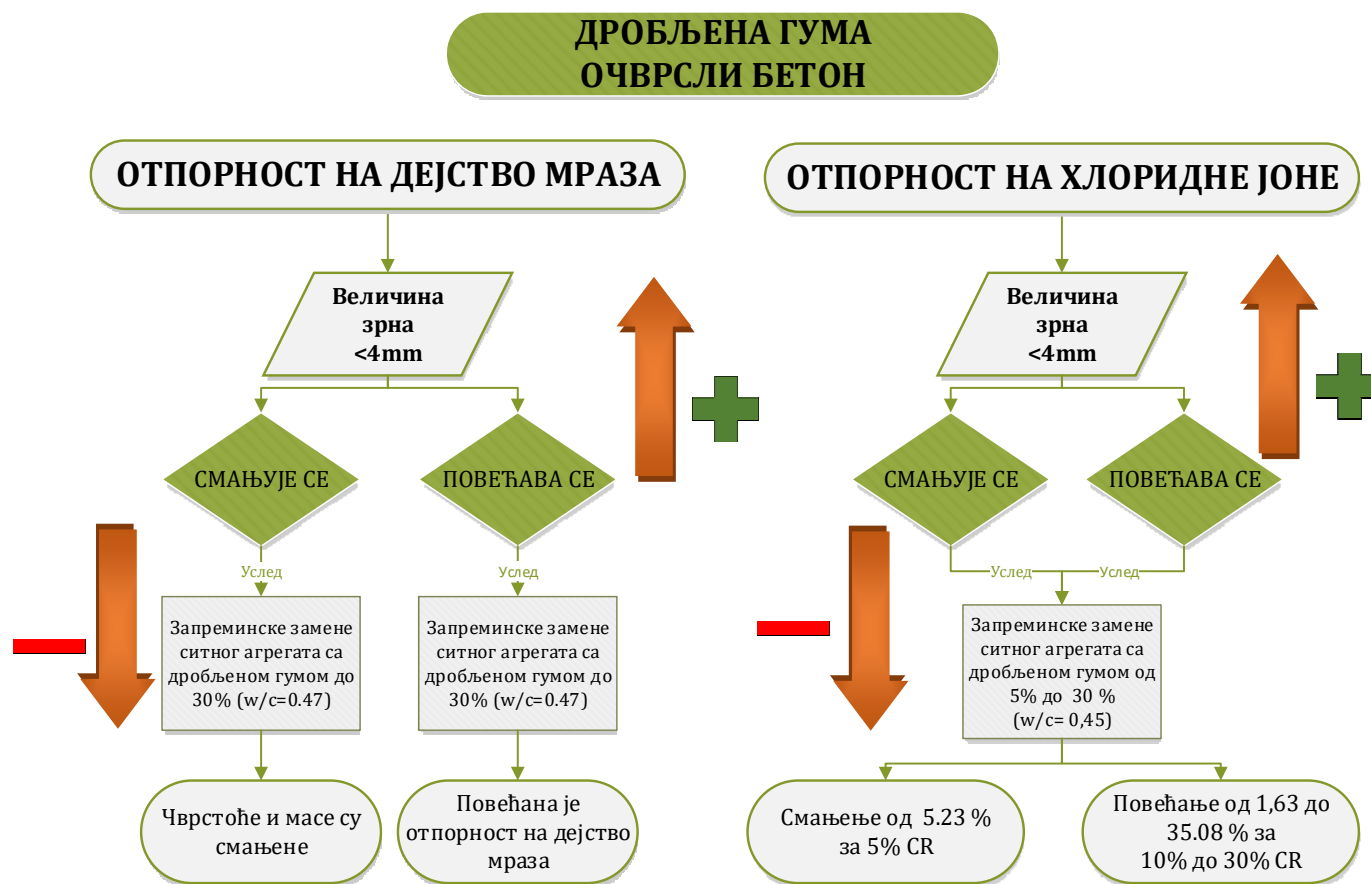
Слика III-5 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на запреминску масу и садржај ваздуха свежег бетона



Слика III-6 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на упијање воде



Слика III-7 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на чврстоћу при притиску и водонепропустности бетона



Слика III-8 – Шематски приказ утицаја дробљене гуме на отпорност бетона на дејство мраза и отпорност бетона на хлоридне јоне

4. ОПРАВДАНОСТ ИСТРАЖИВАЊА

Анализом доступне литературе утврђено је да постоји одређени број радова из области истраживања могућности примене дробљене рециклиране гуме у бетону као замене за природни ситан агрегат, за производњу бетона који задовољава захтевана својства у свежем, као и физичко-механичка својства у очврслом стању.

Применом дробљене рециклиране гуме у бетонским мешавинама добијају се следећи бенефити:

- смањује се експлоатација природног песка,
- повећава се рециклажа отпадних гума чиме би се очувала животна средина,
- применом одређене количине рециклиране гуме гранулације 0/1 mm не нарушава се трајност бетона, а могу и да се у извесној мери побољшавају или очувају трајносна својства очврслог бетона, као што су отпорност на дејство мраза, отпорност на продирање хлоридних јона у бетон,
- побољшавају се својства бетона на удар.

Основна идеја истраживања је да се утврди могућност примене ситне гранулисане рециклиране гуме уместо аеранта, ради заштите бетона од унутрашњих напрезања која настају приликом ширења залеђене воде у капиларним порама цементног камена.

Код бетона који је изложен циклусима замрзавања и одмрзавања постоји могућност оштећења структуре. Амерички институт за бетон (ACI) утврдио је спецификације за заштиту уграђеног бетона током хладног времена. АЦИ је хладно време дефинисао као период у коме је више од три узастопна дана средња дневна температура ваздуха мања од $\approx +4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($+40\text{ }^{\circ}\text{F}$). Трајност бетона услед замрзавања и одмрзавања је од највеће важности у земљама које имају температуру испод нуле. У једну од таквих земаља се убраја и наша земља.

Трајност бетона изложених циклусима замрзавања и одмрзавања (eng. FTC – freezing and thawing cycles) је посебно наглашена код објеката путне инфраструктуре у земљама у којима се смењују годишња доба и различити временски услови. Наизменично замрзавање и одмрзавање бетона у присуству влаге/воде и у присуству соли за спречавање стварања ледене покорице је један од најагресивнијих механизма који доводе до прераног пропадања бетона, који наноси озбиљну материјалну штету свакој држави. Ефекат замрзавања и одмрзавања је сложен феномен који се проучава већ дуги низ година, али још увек није у потпуности објашњен.

Оштећења од мраза се прогресивно повећавају. Започињу појавом микропрслина у цементном камену, настављају се љуштењем површинског слоја цементног камена

и завршавају се потпуном дезинтеграцијом бетона понављањем циклуса замрзавања и одмрзавања, а бетон постепено губи крутост и чврстоћу. Додатно, индукује се све веће неповратно ширење услед чега се јављају прслине и пукотине.

Бетони који ће бити изложени дејству мраза у свом саставу имају веће количине цемента у односу на традиционалне (обичне) бетоне. Проблем примене веће количине цемента се последњих година посебно наглашава због све већег загађења животне средине и стварања ефекта стаклене баште, за шта се посебно „оптужује“ цементна индустрија.

Често се током производње бетона дешава да одређени хемијски додаци – аеранти имају проблем да обезбеде потребан садржај ваздуха у свежем бетону услед промене у неким од компонентних материјала, најчешће цемента, агрегата и/или суперпластификатора. Као последица напред наведеног добијају се бетони који немају потребан садржај увученог ваздуха како би заштитили бетон у моменту када буде изложен дејству мраза.

Решење оваквог проблема такође се види у материјалу који би се физички задржао у самој структури - цементној матрици.

Применом рециклиране дробљене гуме у бетонским мешавинама добио би се бетон који има својстава обичног бетона без:

- значајног повећаног садржаја ваздуха,
- већег смањења чврстоће при притиску и
- повећане количине цемента,

чиме би се, поред захтеваних својстава за трајност бетона, задовољили и захтеви у погледу одрживог развоја и заштите животне средине.

IV ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

1. УВОД

Анализом доступне литературе из области примене рециклиране дробљене гуме, уочено је да постоји мали број истраживања у којима се примењује дробљена рециклирана гума као запреминска замена дела ситног агрегата у циљу добијања задовољавајуће трајности бетона класе изложености XF1, XF2, XF3 и XF4. Прегледом литературе уочено је да је у већем броју истраживања примењена дробљена гума са величином зрна већом од 4 mm, док је мањи број истраживања посвећен примени дробљене гуме са величином зрна мањом од 4 mm.

Циљ истраживања је да се на основу експерименталних резултата и њихове анализе закључи да ли бетон, у којем се део ситне фракције природног агрегата запремински мења са дробљеном рециклираном гумом у варијацијама од 2,5%, 5% и 7,5%, има иста или упоредива физичка и механичка својства као референтни бетон. Посебна пажња код ових бетона посвећена је испитивању својстава која указују на трајност очврслог бетона.

Резултати истраживања и изведени закључци биће подлога за дефинисање препорука за примену ситнозрнасте дробљене гуме у бетонским композитима. Такође, резултати истраживања ће омогућити дефинисање могућности и ограничења за примену ових врста бетона.

Сва испитивања спроведена су у Централној лабораторији за испитивање материјала компаније “Институт за испитивање материјала” а.д. из Београда. Испитивање компонентних материјала, цемента, хемијских додатака, природног агрегата и дробљене рециклиране гуме извршено је у лабораторији за везива, хемију и малтер, као и у лабораторији за камен и агрегат. Испитивањем минеролошког састава цемента извршено је у лабораторији за цемент фабрике цемента “Лафарге БФЦ” у Беочину. Сва испитивања бетона у свежем и очврслом стању извршена су у Лабораторији за бетон, осим испитивања скупљања бетона сушењем, које је извршено у Лабораторији за везива, хемију и малтер.

Испитивања су обављена у периоду: децембар 2022 - априла 2024. године.

2. ПЛАН И ПРОГРАМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ ИСТРАЖИВАЊА

У циљу благовременог планирања свих активности предвиђених планом истраживања и контроле његове реализације, састављен је детаљан програм испитивања. Овај програм је обухватио:

- избор компонентних материјала,
- припрема и набавка компонентних материјала,
- испитивање квалитета компонентних материјала,
- одређивање састава бетонских мјешавина,

- избор својстава бетона помоћу којих ће се оцењивати могућа употребе дробљене рециклиране гуме,
- дефинисање облика, димензија и броја узорака за испитивање бетона,
- израду динамичког плана испитивања одабраних својстава бетона.

Планом и програмом истраживања спровешће се: пројектовање састава бетонских мешавина, справљање бетона, испитивање својстава свежег бетона након 5, 30 и 60 минута од момента додавања воде бетонској мешавини, израда и нега узорака за испитивање физичких и механичких карактеристика очврслог бетона при различитој старости.

Планом су обухваћена испитивања на следећим бетонима:

- Обичан бетон,
- Аерирани бетони и
- Бетон са ситно дробљеном рециклираном гумом **CR**

Варирани параметри су:

- Водоцементни фактор: 4 различита водоцементна фактора 0,40, 0,45, 0,50 и 0,55. Оваквим распоном водоцементног фактора обухватили би се бетони са малом и умереном капиларном порозношћу.
- Материјал за компензацију унутрашњих напрезања изазваних експанзијом леда, одабрана су два материјала: *хемијски додаток аерант* у количини да се оствари потребан садржај ваздушних пора у цементној матрици и *дробљена, рециклирана гума* у количини која је добијена анализом прикупљених резултата из прегледа актуелне литературе.
- Количина дробљене рециклиране гуме којом се делимично замењује ситан агрегат у инкрементима од 2,5%, 5% и 7% (запремински удео)

Планирано је да се укупно направи 20 бетонских мешавина:

- четири контролне, са четири одабрана водоцементна фактора и без материјала за компензацију унутрашњих напрезања (P1-P4),
- четири бетонске мешавине са четири водоцементна фактора и хемијским додатком аерантом (P5-P8)
- дванаест бетонских мешавина у којима је вариран водоцементни фактор и количина дробљене рециклиране гуме (P9-P20).

Ознаке и основни параметри за наведене бетонске мешавине приказани су у Табели IV-1.

Табела IV-1 - Ознаке и основни параметри за одабране бетонске мешавине

Водоцементни фактор, w/c	0.55	0.50	0.45	0.40
Количина цемента, kg/m ³	360	360	360	360
Обични бетони	P-1	P-2	P-3	P-4
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	P-6	P-7	P-8
Бетони са гранулисаном гумом (0,0-1,0 mm)				
Замена ситног агрегата 2.5% (запремински удео)	P-9	P-10	P-11	P-12
Замена ситног агрегата 5.0% (запремински удео)	P-13	P-14	P-15	P-16
Замена ситног агрегата 7.5% (запремински удео)	P-17	P-18	P-19	P-20

Према плану и програму испитана су следећа својстава свежег и очврслог бетона.

2.1. Свеж бетон

Провера својстава свежег бетона би се радила након 5, 30 и 60 минута од момента додавања воде бетонској мешавини. Проверавали би се:

- Конзистенција,
- Садржај ваздуха,
- Температура бетона и
- Запреминска маса свежег бетона.

2.2. Очврсли бетон

За испитивање својстава очврслог бетона израдиће се узорци облика и величине који су у складу са одговарајућим стандардом и који ће се неговати такође према одредбама одговарајућег стандарда (на пример SRPS EN 12390-2). Планирано је да се испитају следећа својства очврслог бетона:

- запреминска маса очврслог бетона,
- чврстоћа при притиску,
- дубина пенетрације воде под притиском,
- отпорност бетона на дејство мраза,
- отпорност бетона на дејство мраза и соли за одмрзавање,
- карактеризација ваздушних пора у очврслном бетону,
- брзина проласка ултразвучног импулса (динамички модул еластичности бетона),
- статички модул еластичности,
- коефицијент миграције хлоридних јона,
- скупљање при сушењу.

У Табели IV – 2, Табели IV – 3 и Табели IV – 4 дат је преглед броја узорака и потребне количине бетона за њихово справљање.

Табела IV-2 - Спецификација узорака и испитивања на свежем и очврслом бетону (1)

Редни број	Методe испитивања	Назив методе	Стање бетона у моменту испитивања	Фреквенција испитивања	Облик и димензије узорка за испитивање	Количина узорака ком
1	SRPS EN 12350-1:2019 [118]	Узорковање свежег бетона и мерење температуре	Свеж бетон	-	-	-
2	SRPS EN 12390-2:2019 [119]	Израда и нега узорака за испитивање чврстоће	Свеж бетон	-	-	-
3	SRPS EN 12350-7:2019 [120]	Одређивање садржаја ваздуха у свежем бетону	Свеж бетон	5, 30 и 60 минута	-	-
4	SRPS EN 12350-2:2019 [121]	Испитивање конзистенције свежег бетона методом слегања	Свеж бетон	5, 30 и 60 минута	-	-
5	SRPS EN 12350-6:2019 [122]	Одређивање запреминске масе свежег бетона	Свеж бетон	-	-	-
6	SRPS EN 12390-1:2021 [123]	Мере, толеранције и применљивост епрувете,	Очврсли бетон	-	-	-
7	SRPS EN 12390-7:2019 [124]	Одређивање запреминске масе очврслог бетона	Очврсли бетон	2, 7, 28 дана	коцке d=150 mm	6*
8	SRPS EN 12390-3:2019 [125]	Одређивање чврстоће при притиску	Очврсли бетон	2, 7, 28 дана	коцке d=150 mm	6
9	SRPS EN 12390-8:2019 [126]	Дубина пенетрације воде под притиском	Очврсли бетон	28 дана	коцке d=150 mm	3

* Испитивање се спроводи пре испитивања чврстоће при притиску

Табела IV-3 - Спецификација узорака и испитивања на свјежем и очврслом бетону (2)

Редни број	Методe испитивања	Назив методе	Стање бетона у моменту испитивања	Фреквенција испитивања	Облик и димензије узорка за испитивање	Количина узорака, ком
10	SRPS U.M1.206:2023, Prilog D [127]	Испитивање отпорности према дејству мраза	Очврсли бетон	након 28 дана, испитивање након 100 и 200 циклуса	коцке d=150 mm	12
11	SRPS U.M1.206:2013, Prilog O [128]	Испитивање отпорности површине бетона на дејство мраза и соли за одмрзавање	Очврсли бетон	након 28 дана, (7, 14, 28, 42 и 56 циклуса)	коцке d=150 mm из којих се сечењем добијају плоче дим. 150x150x50 mm	3
12	SRPS EN 480-11:2010 [129]	Одређивање карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону	Очврсли бетон	28 дана	коцке d=150 mm, из којих се сечењем добијају плоче дим. 150x100x20mm	1
13	SRPS EN 12504-4:2021 [130]	Испитивање без разарања - одређивање брзине ултразвучног импулса	Очврсли бетон	испитивање на узорцима на дејство мраза 200 и 300 циклуса пре испитивање чврстоће	коцке d=150 mm	12*

Табела IV-4 - Спецификација узорака и испитивања на свјежем и очврслом бетону (3)

Редни број	Методe испитивања	Назив методе	Стање бетона у моменту испитивања	Фреквенција испитивања	Облик и димензије узорка за испитивање	Количина узорака, ком
14	SRPS EN 12390-13:2021[131]	Одређивање секантног модула еластичности при притиску	Очврсли бетон	Испитивање цилиндара у старости од 28 дана	Цилиндри d/h=150/300 mm	4
15	SRPS EN 12390-18:2021 [132]	Одређивање коефицијента миграције хлорида	Очврсли бетон	Испитивање у старости од 28 дана	коцке d=150 mm, из којих се сечењем добијају цилиндри d/h=100/50 mm	3
16	SRPS U.M1.029:1983 [133]	Одређивање запреминских деформација у бетону скупљањем	Очврсли бетон	Испитивање у старости од 3 - 91 дана	призме 100x100x400 mm	3

За једну врсту бетона ће бити справљено следећи број бетонских узорака:

- коцке d=150 mm, 27 ком.
- цилиндри D/H=150/300 mm, 4 ком.
- призме 100mm x 100mm x 400mm, 3 ком.

27x20=540 ком

4x20=80 ком

3x20=60 ком

Укупно ће бити израђено и испитано 680 бетонских узорака.

Укупно је планирано да се испита 680 узорака бетона и да се обаве претходно испитивања на 20 бетонских мешавина.

Планом је предвиђено да се справи ~2.5 m³.

3. ПОДАЦИ О КОМПОНЕНТНИМ МАТЕРИЈАЛИМА

3.1. Цемент

За експериментално истраживање одабран је Портланд цемент ознаке PC 42,5R (CEM I 42,5R), произвођача "Lafarge", Беоцинска фабрика цемента. Цемент испуњава услове квалитета према Правилнику о квалитету цемента [135]. У Лабораторији за везива, хемију и малтере су испитана сва физичка и механичка својства цемента према стандардима SRPS EN 196-1 [136], SRPS EN 196-3 [137] и SRPS EN 196-6 [138]. Резултати испитивања дати су у Прилогу 1. На основу добијених резултата закључено је да цемент задовољава прописана физичко-хемијска и механичка својства дефинисана у Правилнику о квалитету цемента [135] и SRPS EN 197-1 [139].

3.2. Агрегат

Одабрани агрегат за справљање бетонских мешавина је: природан, фракционисан камени агрегат из реке Дунав, произвођача „Хидробазе“ доо из Београда. Агрегат је пран и сепарисан у три фракције 0/4mm, 4/8mm и 8/16mm са сепарације у месту Остружница. Изглед природног, фракционисаног, каменог агрегата, приказан је на Слици IV-1.



Фракција 0/4 mm

Фракција 4/8 mm

Фракција 8/16 mm

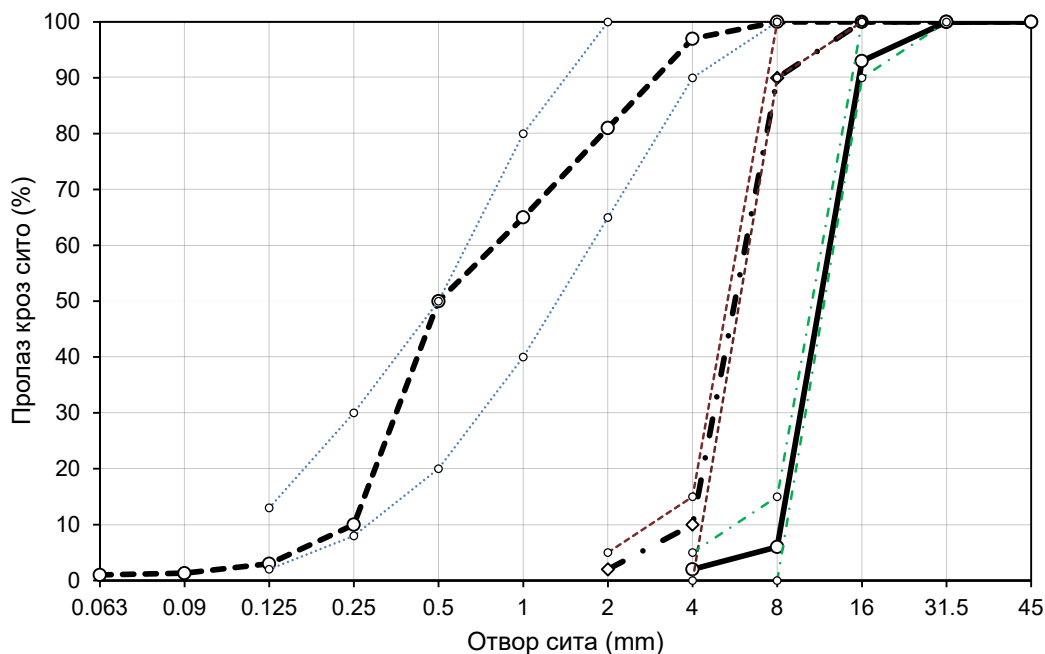
Слика IV-1 – Изглед фракција речног агрегата

У Лабораторији за камен и агрегат су испитана следећа својства агрегата:

- Гранулометријски састав фракција агрегата (Правилник за агрегат – Прилог III-I), [140]
- Садржај ситних честица методом мокрог просејавања (Правилник за агрегат – Прилог III-K), [140]
- Модул зрнавости ситног агрегата (Правилник за агрегат – члан 7.), [140],
- Облик зрна агрегата (Правилник за агрегат – Прилог III-S) [140],

- Стварна запреминска маса водом засићеног и површински сувог узорка зрна агрегата (SRPS ISO 6783 i SRPS ISO 7033) [141, 142],
- Упијање воде (SRPS ISO 6783 i SRPS ISO 7033) [141, 142],

Резултати испитивања гранулометријског састава дати су у Прилогу 2, а гранулометријске криве су приказане на Слика IV-2.



Слика IV-2 – Графички приказ гранулометријског састава фракционисаног природног агрегата

Ситан агрегат: Са Сlike IV-2 се види да гранулометријски састав фракције агрегата 0/4 mm задовољава услове за задате граничне вредности за ситан агрегат. Модул финоће износи 3,08 и налази се у дозвољеним границама (2,3-3,6).

Крупан агрегат: Гранулометријски састав агрегата фракција 4/8 mm и 8/16 mm задовољава услове квалитета у погледу подмерених и надмерених зрна.

У Табели IV-5 су дати резултати испитивања агрегата, ради лакшег пројектовања састава бетона и анализе резултата експерименталног дела. Такође, у табели су осим резултата испитивања дати и стандарди према којима је испитивање урађено.

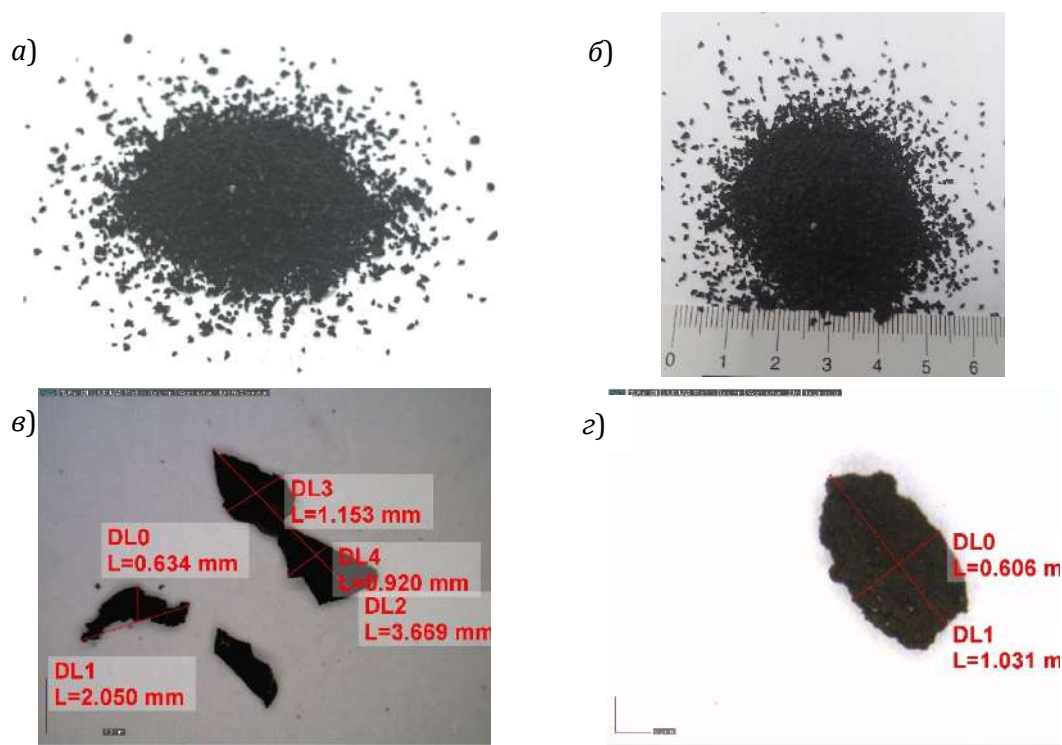
Табела IV-5 - Резултати испитивања природног фракционисаног каменог агрегата

Својство	Прилог Правилника или Стандарду	Резултат		
		0/4mm	4/8mm	8/16mm
Садржај ситних честица (мокро сејање) [%]	Правилник – Прилог III-K [140]	0.7	0.0	0.0
Облик зрна	Правилник – Прилог III-S [140]	-	0.24	0.26
Запреминска маса водом засићеног, површински сувог узорка [kg/m ³]	SRPS ISO 6873 SRPS ISO 7033 [140]	2615	2618	2620
Упијање воде [%]	SRPS ISO 6873 SRPS ISO 7033 [140]	0.9	0.9	1.0

На основу анализе добијених резултата, може се закључити да природни фракционисани камени агрегат задовољава захтеване критеријуме за испитивана својства.

3.3. Дробљена рециклирана гума (CR)

Рециклирана, дробљена, гума, добијена је у фабрици за рециклажу аутомобилских гума фирме „Есо Recycling“ доо из Новог Сада. За справљање бетонских мешавина изабрана је фракција 0/1 мм. Изглед и величина зрна дробљене рециклиране гуме приказан је на Слици IV-3.



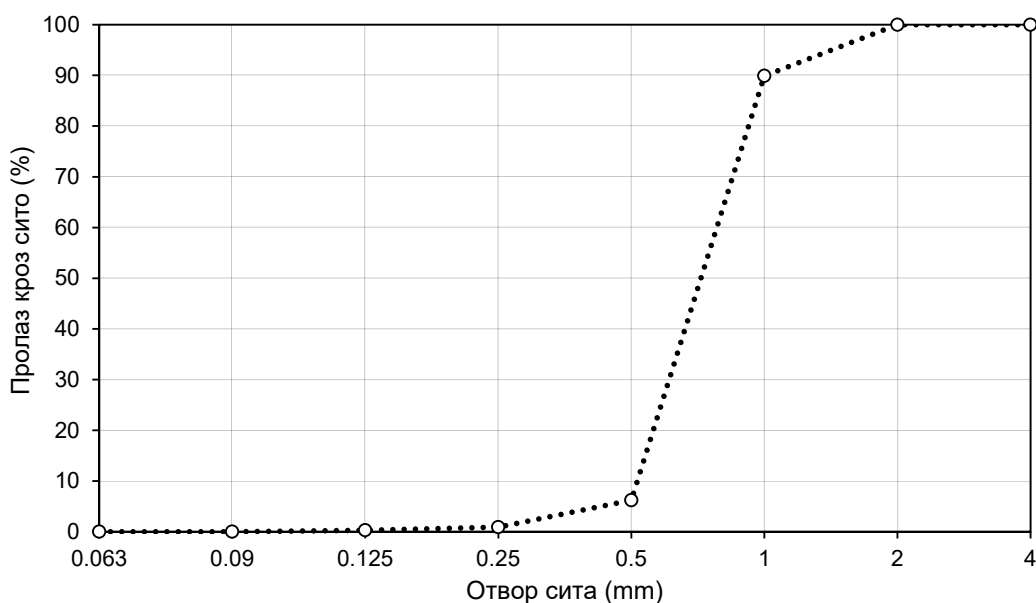
Слика IV-3– Изглед и величине зрна дробљене рециклиране гуме (фракције 0/1mm),
а) и б) макро приказ, в) Дигитални микроскоп Dino Lite - увећање 60х, г)
Дигитални микроскоп Dino Lite - увећање 200х

На дробљеној рециклираној гуми испитана су следећа својства:

- Гранулометријски састав (Правилник за агрегат – Прилог III-I) [140];
- Запреминска маса (SRPS ISO 7033) [142],
- Хемијски састав помоћу XRF методом.

Наведена испитивања урађена су у „Институту ИМС“ у Лабораторији за камен и агрегат и у Лабораторији за везиво, хемију и малтер.

Резултати испитивања гранулометријског састава, запреминске масе и хемијског састава дробљене рециклиране гуме дати су у Прилогу 3, а графички приказ гранулометријског је приказан на Слици IV-4.



Слика IV-4 – Графички приказ гранулометријског састава дробљене рециклиране гуме

3.4. Хемијски додаци

3.4.1. Суперпластификатор „Sika ViscoCrete 4077“

За побољшање уградљивости бетона предвиђена је употреба суперпластификатор "Sika ViscoCrete 4077" (модификовани поликарбоксилат). Основни подаци о примененом суперпластификатору приказани су у Табела IV-6. Резултати испитивања утицаја хемијског додатка бетона на битне карактеристике пасте и малтера приказни су у Прилогу 4.

Табела IV-6. Osnovni podaci o primenjenom superplastifikatoru

Врста суперпластификатора	Запреминска маса [kg/m ³]	Садржај суве материје [%]	Уобичајено дозирање (%m _c)
Sika ViscoCrete 4077	1050	26,37	0,6-1,2

3.4.2. Аерант „Sika Control AER 100 RS“

За побољшање структуре бетона на наизменичним циклусима замрзавања/одмрзавања без и уз присуство соли коришћен је аерант „Sika Control AER 100 RS“, произвођача „Sika“ - Београд. Основни подаци о примењеном аеранту приказани су у Табели IV-7. Резултати испитивања утицаја хемијског додатка бетона на битне карактеристике пасте и малтера приказни су у Прилогу 4.

Табела IV-7. Основни подаци о примењеном аеранту

Vrsta аеранта	Запреминска маса [kg/m ³]	Садржај суве материје [%]	Уобичајено дозирање (%m _c)
Sika Control AER 100 RS	1010	5.29	0,02-0.15%

3.5. Вода

За справљање бетона коришћена је вода из градског водовода, која се може употребити за справљање бетонских мешавина без претходних испитивања.

4. ПРОЈЕКТОВАЊЕ САСТАВА БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА

Пројектовање састав бетонских мешавина за све врсте бетона одређен је на основу следећих услова:

- Укупна количина цемента износи 360kg/m³.
- Водоцементни однос је вариран у вредностима од 0.55, 0.50, 0.45, 0.40.
- Усвојен је садржај ваздуха код обичних (референтних) бетона и бетона са додатком гуме у вредности од $\Delta\rho=2\%$, док је код бетонских мешавина са хемијским додатком аеранта усвојен садржај ваздуха $\Delta\rho=5\%$.
- Количина дробљене рециклиране гуме усвојена је као запреминска замена ситног агрегата у процентуалним вредностима од 2,5%, 5,0% и 7,5%, на основу прегледаних релевантних истраживања.
- Гранулометријски састав мешавине фракција агрегата је у облику континуалне криве.
- Почетна конзистенција бетонске мешавине, одређена методом слегања, подешена је додавањем хемијског додатка суперпластификатора како би се постигла конзистенција свежег бетона са класом слегања S4 (160-210 mm).

За компактирање бетона коришћен је первибратор. Након уградње, сви узорци бетона су 24 часа неговани у калупима, прекривени PVC фолијом. Узорци облика коцке и цилиндра, за испитивање физичко-механичких својстава и испитивање трајности бетона, неговани су у води температуре $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ до дана испитивања или почетка припреме за испитивање (узорци за испитивање отпорности површине бетона на замрзавање и одмрзавање уз присуство соли), док су узорци облика призме за испитивање скупљања при сушењу неговани у складу са релевантним стандардима.

Комбинацијом изабраних материјала и претходно дефинисаних услова, дефинисан је састав 20 бетонских мешавина. У Табели IV-8 дате су ознаке бетонских мешавина усвојене ради лакше упоредне анализе.

Табела IV-8. Обележавање бетонских мешавина

Водоцементни фактор, w/c	0.55	0.50	0.45	0.40
Количина цемента, kg/m ³	360	360	360	360
Обични (референтни) бетони	P-1	P-2	P-3	P-4
Бетони са додатком аеранта	P-5	P-6	P-7	P-8
Бетони са дробљеном гранулисаном гумом (0/1 mm)				
Замена ситног агрегата 2.5% дробљеном рециклираном гумом (запремински удео)	P-9	P-10	P-11	P-12
Замена ситног агрегата 5.0% дробљеном рециклираном гумом (запремински удео)	P-13	P-14	P-15	P-16
Замена ситног агрегата 7.5% дробљеном рециклираном гумом (запремински удео)	P-17	P-18	P-19	P-20

4.1. Пример одређивања састава обичног (референтног) бетона са природним речним агрегатом (P-1)

Састав бетонске мешавине P-1 (бетон справљен са портланд цементом СЕМ I и природним, фракционисаним речним ситним и крупним агрегатом) одређен је на основу следећих полазних параметара:

- Количина цемента $m_c=360\text{kg/m}^3$;
- Количина воде одређена на основу усвојеног водо-везивног фактора $m_v/m_{vez}=0,55$ износи $m_v=198\text{kg/m}^3$;
- Учешћа појединих фракција агрегата су одређена на основу визуелног прегледа бетонских мешавина, на основу чега је одабран гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција (Прилог 5):
 - фракција 0/4 mm – $X_{0/4}=45\%$;
 - фракција 4/8 mm – $X_{4/8}=15\%$;
 - фракција 8/16 mm – $X_{8/16}=40\%$.

У циљу постизања класе конзистенције свежег бетона S4 (160-210 mm), додат је суперпластификатор у количини од 0,4% мс.

Количина агрегата је добијена из суме апсолутних запремина материјала у 1 m³ бетона, уз претпостављену количину увученог ваздуха $\Delta p = 2\%$.

$$\frac{360}{3010} + \frac{198}{1000} + \frac{m_a}{2650} + \frac{1,4}{1050} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1751 \text{ kg/m}^3$$

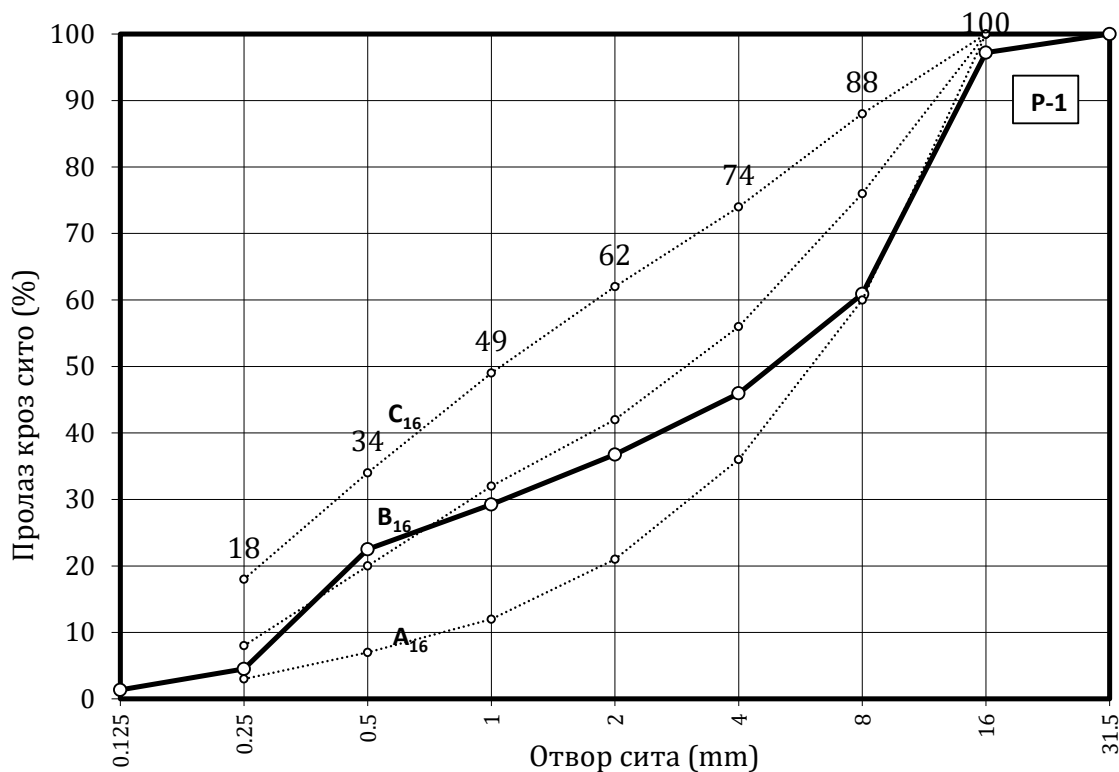
Количине појединачних фракција у складу са усвојеним учешћима износе:

- фракција 0/4 – m0/4=788kg;
- фракција 4/8 – m4/8=263kg;
- фракција 8/16 – m8/16=700kg

Запреминска маса бетона у свјежем стању износи:

$$\gamma_{b,sv} = 360 + 198 + 1751 + 2,4 = 2310 \text{ kg/m}^3$$

На Слици IV-5 приказане су вредности ордината добијене гранулометријске криве као и референтних криви за повољан гранулометријски састав (A₁₆ и B₁₆).



Слика IV-5 - Гранулометријска крива мешавине агрегата и референтне криве (P-1)

4.2. Пример одређивања састава бетона са природним речним агрегатом и хемијским додатком аеранта (Р-8)

Састав бетонске мешавине Р-8 (бетон справљен са портланд цементом СЕМ I, природним, фракционисаним речним ситним и крупним агрегатом и хемијским додатком аеранта) одређен је на основу следећих полазних параметара:

- Количина цемента $m_c = 360 \text{ kg/m}^3$;
- Количина воде одређена на основу усвојеног водо-везивног фактора $m_v/m_{vez} = 0,40$ износи $m_v = 144 \text{ kg/m}^3$;
- Учешћа појединих фракција агрегата су одређена на основу визуелног прегледа бетонских мешавина, на основу чега је одабран гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција (Прилог 5):
 - фракција 0/4 mm – $X_{0/4} = 45\%$;
 - фракција 4/8 mm – $X_{4/8} = 15\%$;
 - фракција 8/16 mm – $X_{8/16} = 40\%$.

У циљу постизања класе конзистенције свежег бетона S4 (160-210 mm), додат је суперпластификатор у количини од 1,2% mс.

Количина агрегата је добијена из суме апсолутних запремина материјала у 1 m^3 бетона, уз претпостављену количину увученог ваздуха $\Delta p = 4.2\%$.

$$\frac{360}{3010} + \frac{144}{1000} + \frac{m_a}{2650} + \frac{4,32}{1050} + \frac{0,029}{1000} + 0,042 = 1 \Rightarrow m_a = 1829 \text{ kg/m}^3$$

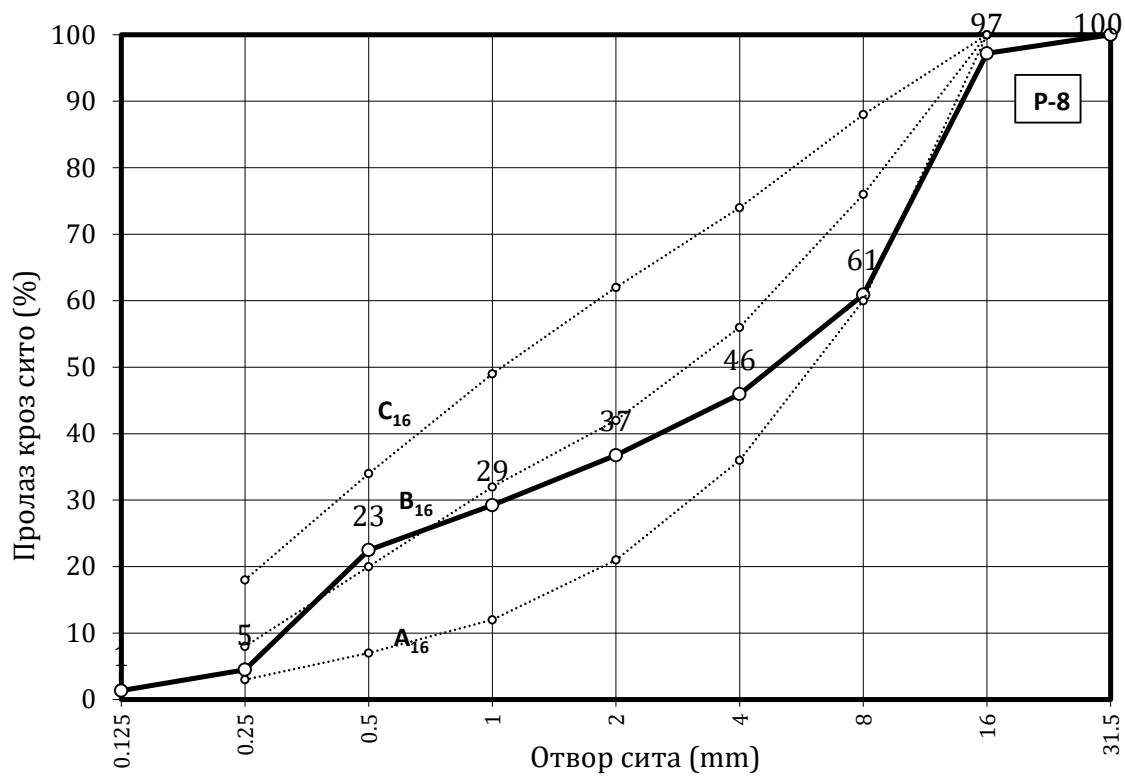
Количине појединачних фракција у складу са усвојеним учешћима износе:

- фракција 0/4 – $m_{0/4} = 823 \text{ kg}$;
- фракција 4/8 – $m_{4/8} = 274 \text{ kg}$;
- фракција 8/16 – $m_{8/16} = 732 \text{ kg}$

Запреминска маса бетона у свежем стању износи:

$$\gamma_{b,sv} = 360 + 144 + 1829 + 4,32 = 2338 \text{ kg/m}^3$$

На Слици IV-6 приказане су вредности ордината добијене гранулометријске криве као и референтних криви за повољан гранулометријски састав (A₁₆ и B₁₆).



Слика IV-6 - Гранулометријска крива мешавине агрегата и референтне криве (P-8)

4.3. Пример одређивања састава бетона са 5% запреминском заменом природног ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом (P-14)

Састав бетонске мешавине P-13 (бетон справљен са портланд цементом СЕМ I, природним, фракционисаним речним ситним и крупним агрегатом, и 5% запреминском заменом ситног агрегата са дробљеном рециклираном гумом) одређен је на основу следећих полазних параметара:

- Количина цемента $m_c = 360 \text{ kg/m}^3$;
- Количина воде одређена на основу усвојеног водо-везивног фактора $m_v/m_{vez} = 0,55$ износи $m_v = 198 \text{ kg/m}^3$;
- Учешћа појединих фракција агрегата су одређена на основу визуелног прегледа бетонских мешавина, на основу чега је одабран гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција (Прилог 5):
 - фракција 0/4 mm – $X_{0/4} = 45\%$;
 - фракција 4/8 mm – $X_{4/8} = 15\%$;
 - фракција 8/16 mm – $X_{8/16} = 40\%$.

У циљу постизања класе конзистенције свежег бетона S4 (160-210 mm), додат је суперпластификатор у количини од 0,4% m_c .

Количина агрегата је добијена из суме апсолутних запремина материјала у 1 m^3 бетона, уз претпостављену количину увученог ваздуха $\Delta\rho = 2\%$, која је дата у примеру за бетонску мешавину обичног (референтног) бетон за (P-1), где смо добили:

$$\frac{360}{3010} + \frac{198}{1000} + \frac{m_a}{2650} + \frac{1,4}{1050} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1751 \text{ kg/m}^3$$

Усвојили смо да је запреминска замена ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом 5%, па треба израчунати запремину гуме и запремину агрегата која је умањена за запремину дробљене гранулисане гуме, где:

- Запремина ситног агрегата, фракције 0/4 mm, износи:

$$\frac{m_a \cdot 0,45}{2650} = 0,297$$

- Запремина дробљене рециклиране гуме износи 5% од запремине ситног агрегата, износи:

$$\frac{m_a \cdot 0,45 \cdot 0,05}{2650} = 0,0149$$

- Запремина ситног агрегата фракције 0/4 mm, умањена за 5% дробљеном гранулисаном гумом износи:

$$\frac{m_a \cdot 0,45}{2650} - \frac{m_a \cdot 0,45 \cdot 0,05}{2650} = 0,282$$

Колићине дробљене рециклиране гуме и агрегата по фракцијама, сада износе:

- Фракција 0/1 mm (дробљена рециклирана гума):

$$0,0149 \cdot 1130 = 17 \text{ kg/m}^3$$

- Фракција 0/4 mm:

$$0,282 \cdot 2650 = 748 \text{ kg/m}^3$$

- Фракција 4/8 mm:

$$m_a \cdot 0,15 = 263 \text{ kg/m}^3$$

- Фракција 8/16 mm:

$$m_a \cdot 0,40 = 700 \text{ kg/m}^3$$

Укупна количина агрегата износу:

$$m_a = 17 + 748 + 263 + 700 = 1728 \text{ kg/m}^3$$

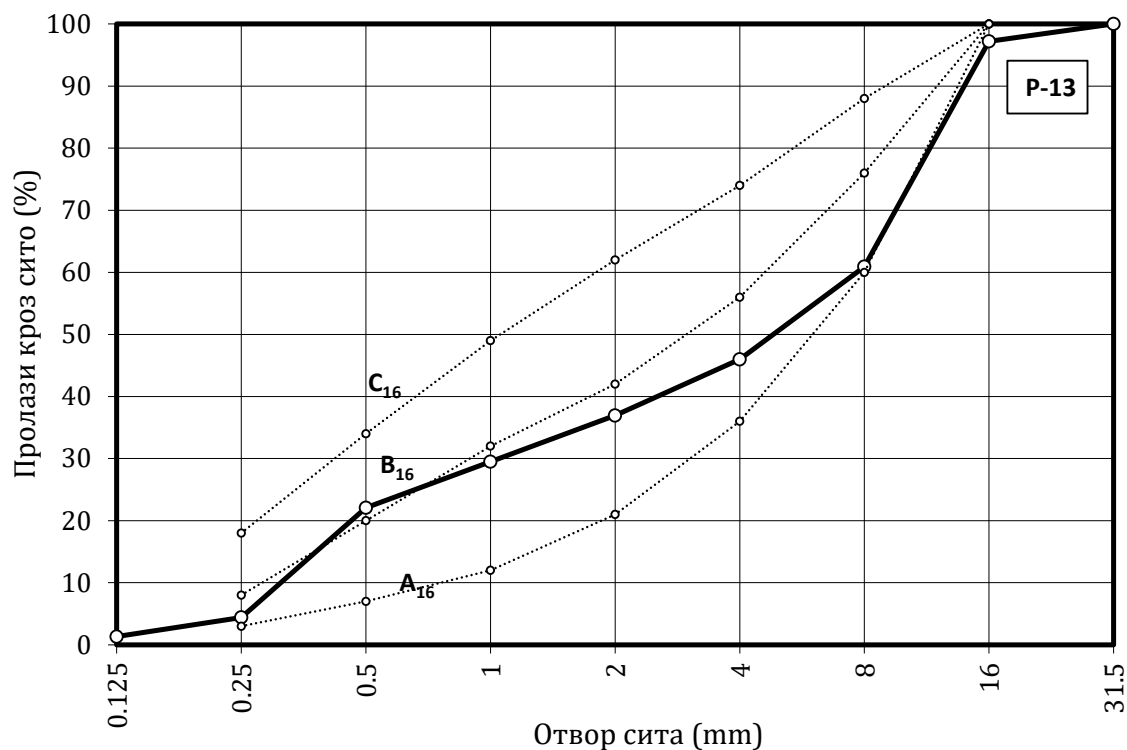
Количине појединачних фракција у складу са усвојеним учешћима износе:

- фракција 0/1 mm – $X_{0/1}=1\%$;
- фракција 0/4 mm – $X_{0/4}=44\%$;
- фракција 4/8 mm – $X_{4/8}=15\%$;
- фракција 8/16 mm – $X_{8/16}=40\%$.

Запреминска маса бетона у свјежем стању износи:

$$\gamma_{b,sv} = 360 + 198 + 1728 + 1,4 = 2287 \text{ kg/m}^3$$

На Слици IV-7 приказане су вредности ордината добијене гранулометријске криве као и референтних криви за повољан гранулометријски састав (A₁₆ и B₁₆).



Слика IV-7 - Гранулометријска крива мешавине агрегата и референтне криве (P-13)

4.4. Пројектовани састав бетонских мешавина

На основу претходно приказаних поступака прорачуна, одређени су састави свих бетонских мешавина (укупно 20). Пројектоване састави предметних бетонских мешавина дати су у Табели IV-9.

Табела IV-9. Количине компонентних материјала у kg по 1m^3 бетона

Ознака мешавине	Водоцементни однос, w/c	Цемент	Дробљена рециклирана гума 0/1 mm	Ситан агрегат 0/4 mm	Крупан агрегат 4/8mm	Крупан агрегат 8/16mm	Хемијски додатак суперпластификатор Sika Viscocrete 4077x	Хемијски додатак аерант Sika Control AER 100RS	Вода	Запреминска маса $[\text{kg}/\text{m}^3]$
P-1	W/C=0.55	360	0	788	263	700	1.4	0.0	198	2310
P-2	W/C=0.50	360	0	809	270	719	1.8	0.0	180	2340
P-3	W/C=0.45	360	0	829	276	737	2.9	0.0	162	2367
P-4	W/C=0.40	360	0	849	283	755	4.3	0.0	144	2395
P-5	W/C=0.55	360	0	762	254	677	1.4	0.029	198	2252
P-6	W/C=0.50	360	0	783	261	696	1.8	0.029	180	2282
P-7	W/C=0.45	360	0	805	268	716	2.9	0.029	162	2314
P-8	W/C=0.40	360	0	823	274	731	4.3	0.029	144	2336
P-9	W/C=0.55	360	8.4	768	263	700	1.4	0.0	198	2299
P-10	W/C=0.50	360	8.6	789	270	719	1.8	0.0	180	2328
P-11	W/C=0.45	360	8.8	808	276	737	2.9	0.0	162	2355
P-12	W/C=0.40	360	9.1	828	283	755	4.3	0.0	144	2383
P-13	W/C=0.55	360	16.8	748	263	700	1.4	0.0	198	2287
P-14	W/C=0.50	360	17.2	768	270	719	1.8	0.0	180	2316
P-15	W/C=0.45	360	17.7	788	276	737	2.9	0.0	162	2344
P-16	W/C=0.40	360	18.1	806	283	755	4.3	0.0	144	2370
P-17	W/C=0.55	360	25.1	729	263	700	1.4	0.0	198	2277
P-18	W/C=0.50	360	25.9	748	270	719	1.8	0.0	180	2305
P-19	W/C=0.45	360	26.5	767	276	737	2.9	0.0	162	2331
P-20	W/C=0.40	360	27.2	785	283	755	4.3	0.0	144	2359

5. ИЗРАДА БЕТОНСКИХ МЕШАВИНА, УЗОРАКА ЗА ИСПИТИВАЊЕ И НЕГА УЗОРАКА

Справљање бетонских мешавина извршено је у лабораторијској мешалици за бетон запремине 160 литара. Распоред мешалице је такав да обезбеђује хоризонтално планетарно мешање бетона око једне вертикалне осовине. Време мешања компоненти бетона износило је укупно 5 минута. У мешалицу су прво додате потребне количине свих фракција агрегата (агрегат и дробљена рециклирана гума), мешане у суво 30 секунди, па је постепено дозирана једна половина потребне количине воде, у циљу површинског квашења агрегата. Након 2 минута од почетка рада мешалице, додат је цемент, па је постепено дозирана друга половина воде у коју је био растворен суперпластификатор, уз континуално мешање.

Просечна температура ваздуха у току справљања бетонских мешавина износила је 23°C.

Након мерења температуре свежег бетона, одређивана је конзистенција (методом слегања), а затим је бетон уграђиван у калупе (облика коцке, цилиндра и призме), Слика IV-8. Уграђивање свежег бетона је вршено помоћу первибратора, у два слоја код калупа облика коцки и призми и три слоја у калупе облика цилиндра са вертикалним вибрирањем у више тачака. Након уградње, узорци свежег бетона су 24h неговани на ваздуху у калупима, а затим вађени из калупа и његовани: у води до дана испитивања (коцке и цилиндри) Слика IV-9, у условима релативне влажности 55-70% (призме), по програмираном режиму неге у складу са SRPS U.M1.029:1983 [133]. Након вађења из калупа, на свим узорцима је означена врста бетона и редни број узорка.



Слика IV-8 – Припрема калупа за израду узорка



Слика IV-9 – Неговање узорка у води

6. ПОСТУПЦИ И ТОК ИСПИТИВАЊА

6.1. Свеж бетон

6.1.1. Конзистенција

Конзистенција бетона испитивана је методом слегања у складу са стандардом SRPS EN 12350-2 [121]. Мерење је вршено након 10 мин, 30 мин и 60 мин од момента додавања воде у бетонску мешавину. Температура свежег бетона је мерена за сваку врсту бетона и у наведеним временским интервалима. Добијене вредности температуре су у распону од 18.5°C до 21.8°C. На Слици IV-10 је приказан поступак одређивања конзистенције бетона, а резултати мерења дати су у Прилогу 6.



Слика IV-10 - Мерење конзистенције (методом слијегања) за бетоне P-1, P-3, P-7 и P-10

6.1.2. Запреминска маса

Запреминска маса свежег бетона одређена је према стандарду SRPS EN 12350-6 [122] за сваку врсту бетона. Свеж бетон је уграђиван у зависности од конзистенције бетона методом слагања у посуди запремине 0.008 m³. Конзистенције бетона одговара класи S4 (160-210 mm), бетон је уграђиван у три слоја, а сваки слој је уграђиван са по 25 продирања шипком и са 10-15 удараца гуменим чекићем око спољне стране посуде. Горња површина се обрађује лењиром за равнање и мери се маса узорка и посуде на дигиталној ваги, Слика IV-11. Добијене вредности запреминских маса за све бетоне приказани су у Прилогу 7.



Слика IV-11 - Поступак мерења запреминске масе бетона

6.1.3. Садржај ваздуха

Садржај ваздуха свежег бетона код свих бетона мерен је након одређивање запреминске масе свежег бетона, методом притиска, помоћу порозиметра произвођача Testing – Немачка, Слика IV-12. Испитивање је спроведено према процедури која је описана у SRPS EN 12350-7 [120]. Добијене вредности мерења садржаја ваздуха за све бетонске мешавине, приказане су у Прилогу 8.



Слика IV-12 – Одређивање садржаја ваздуха у свежем бетону помоћу порозиметра Testing – Немачка

6.2. Очврсли бетон

6.2.1. Запреминска маса

Запреминска маса очврслог бетона одређена је на узорцима облика коцке са ивицом димензије $d=150\text{ mm}$ у старостима од 3, 7 и 28 дана према SRPS EN 12390-7 [124]. Запремина узорака израчуната је на основу димензија измерених бетонских узорака према SRPS EN 12390-1 [123], док је маса узорака одређена у водом засићеном стању на дигиталној ваги опсега до 20 kg, са тачношћу од 0.1g. Добијене вредности мерења запреминских маса за све бетонске мешавине, приказани су у Прилогу 9.



Слика IV-13 - Мерење димензија бетонских узорака и мерење масе узорка у водом засићеном стању

6.2.2. Чврстоћа при притску

Испитивање чврстоће бетона при притиску је обављено према стандарду SRPS EN 12390-3 [125] на узорцима облика коцке ивице 15cm при старостима 3, 7 и 28 дана. Репрезентативна чврстоћа одређена је као средња вредност чврстоћа добијених на два узорка за сваку врсту бетона. За испитивање је коришћена дигитална аутоматска хидраулична преса капацитета 3000 kN са серво контролом, а брзина наношења оптерећења износила је 0,6 MPa/s.

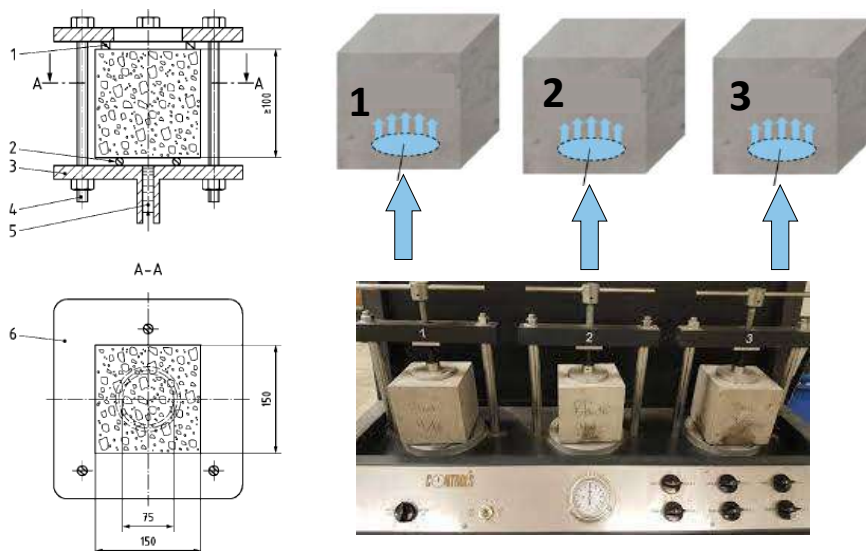
Пре испитивања, узорци се ваде из воде. Вишак воде са површина бетонских узорака се брише сувом крпом. Контролником дужине су провераване декларисане величине узорка како би се одредила испитна површина $A_s\text{ (mm}^2\text{)}$. Испитивање чврстоће при притиску је приказано на Слици IV-14, а резултати испитивања, сила лома и чврстоћа при притиску за сваки узорак дати су у Прилогу IV-14.



Слика IV-14 - Одређивање чврстоће бетона при притиску

6.2.3. Водонепропустљивост бетона

Дубина продирања воде под притиском одређена је према SRPS EN 12390-8 [126], на узорцима облика коцке са ивицама димензија $d = 150 \text{ mm}$, који су неговани под водом све до момента испитивања према стандарду SRPS EN 12390-2 [119]. Површине бетонских узорака изложене су воденом притиску од $(500 \pm 50) \text{ kPa}$ током (72 ± 2) сати. Након тога, узорци се скидају са апаратуре и коцка се помоћу хидрауличне пресе излаже затезању цепањем. Коцка се ломи на два дела како би се измерио максимални продор воде у бетонском узорку. Вредност дубине продирања воде под притиском изражена је у mm . На Слици IV-15 приказан је шематски приказ постављања узорка за испитивање. Апаратура на којој је извршено испитивање, поступак цепања узорака и мерење дубине продирања воде у бетонски узорак приказани су на Слици IV-16.



Слика IV-15 Шематски приказ постављања узорка за испитивање водонепропустљивости бетона



Слика IV-16 – Апаратура за испитивање, цепање узорак и мерење дубине продирање воде

6.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза

Отпорност бетона на дејство мраза је једна од важнијих својстава очврслог бетона, посебно у хладнијим климатским условима где су бетонске конструкције изложене циклусима смрзавања и одмрзавања. Када се вода у порама бетона смрзне, она се шири и може проузроковати оштећења попут пуцања и љуштења бетона.

Отпорност бетона на дејство мраза је добијена из односа просечне чврстоће при притиску бетонских узорак излаганих замрзавању и одмрзавању и просечне чврстоће при притиску бетонских узорак еталона (узорци који нису изложени циклусима замрзавања и одмрзавања) испитаних у еквивалентној старости према SRPS U.M1.206:2023, Прилог D [127]. Узорци су након израде неговани на ваздуху 24х, а након тога у води све до дана стављања узорак у дигиталну хладњачу. Узорци су на дан стављања узорак у дигиталну хладњачу имали старост од 74 и 75 дана. Излагање бетонских узорак на замрзавање и одмрзавање спроведено је у аутоматизованој дигиталној хладњачи унутрашњег капацитета од 2 m³, Слика IV-17. Узорци за испитивање су облика коцке димензија ивица d=150 mm, који су излагани замрзавању и одмрзавању у трајању од 200 и 300 циклуса. Један циклус траје 8 часа (4 часа – замрзавање на ваздуху -20 °C, 4 часа – одмрзавање у води на +20 °C), а у току 24 часа се спроведу укупно 3 циклуса. Бетонски узорци који нису изложени циклусима замрзавања и одмрзавања неговани су у води до момента испитивања чврстоће при притиску према SRPS EN 12390-3.



Слика IV-17 а) Узорци бетона у комори за испитивање отпорности бетона на мраз, б) Режим испитивања једног циклуса замрзавања и одмрзавања

Испитивање је спроведено на 12 бетонских узорака, од чега:

- 6 узорака за испитивање чврстоће при притиску при еквивалентној старости – еталон (Е)
- 6 узорка за испитивање чврстоће при притиску након оствареног броја циклуса замрзавања и одмрзавања (по 3 узорка на 200 и 300 циклуса).

Добијени однос чврстоћа изражен у процентима без децимала и добијене вредности резултата испитивања приказане су у Прилогу 13.

6.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Отпорност бетона на дејство мраза уз присуство соли је одређена на основу мерења количине ољуспалог материјала са површине бетонских узорака. Испитивање је извршено на површини узорка плочастог облика димензије (150mm x 150mm x 50mm) које су добијене сечењем бетонске коцке димензије ивице $d=150$ mm. Узорци су након уградње неговани на ваздуху прва 24 часа а након тога у води и у клима комори у свему према SRPS U.M1.206:2013, Прилог О [128]. Након неге и сечења, спољашње површине узорка су изоловане гумом и термоизолационим материјалом. Испитивање је спроведено у старости бетона од 28 дана. Испитна површина је прво засићавана дејонизованом водом, а пре излагања замрзавања и одмрзавања на површини узорка је сипан 3% раствор NaCl. Испитивање је вршено у дигитализованој клима комори произвођача „Schleibinger Gerate“ – Немачка, температурног опсега од -35°C до $+45^{\circ}\text{C}$, која је приказана на Слици IV-18. Мерење масе ољуспалог материјала након сушења мерено је на дигиталној ваги произвођача „Kern“, опсега 2100 g и тачности 0.01g. Резултати мерења дати су у Прилогу 14.



Слика IV-18 -
Дигитална клима
комора „Schleibinger
Geräte“



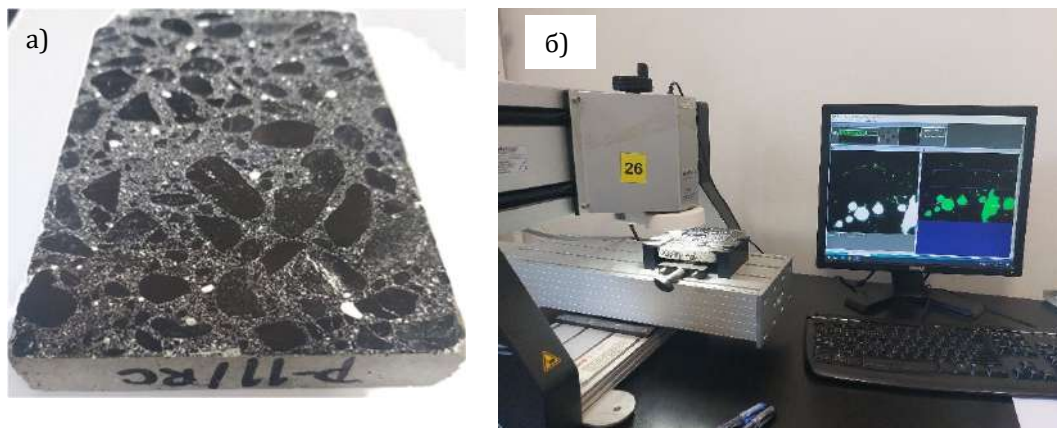
Слика IV-19 – Узорци припремљени за испитивање

6.2.6. Карактеризација ваздушних пора у очврслом бетону

Поред деструктивне методе, отпорност бетона на замрзавање и одмрзавање без и уз присуство соли за одмрзавање можемо проверити и недеструктивном методом, одређивањем карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону према методи SRPS EN 480-11 [129].

Испитивање је спроведено на бетонском узорку облика коцке димензија ивице $d=150\text{ mm}$ из које се сечењем добије плочасти узорак димензије $150\times100\times20\text{ mm}$. Површине узорака су припремљене на машини за полирање како би се добио њихов матиран изглед. Након полирања површина је премазана црном бојом, а поре су запуњене баријум сулфатом, Слика IV-20 а). Карактеризација пора извршена је помоћу аутоматског дигиталног микроскопа „Rapid Air 457“, произвођач German Instruments – Немачка, Слика IV-20 б).

Плочасти узорак димензије $(150\times100\times20)\text{ mm}$ добијен је сечењем из бетонске коцке димензије ивице $d=150\text{ mm}$.



Слика IV-20 - а) Површина узорка припремљена за карактеризацију пора, б) уређај за карактеризацију пора

Припрема и испитивање је спроведено према методи SRPS EN 480-11 [129]. Испитивање је спроведено након седмодневне неге бетонских узорака у води. Мерење је вршено методом линија која укључује повлачење линија преко површине узорка и бројање пресека између линија и пора. Уређај користи микроскопске камере и софтвер за аутоматско скенирање дуж линије. Систем детектује и бележи сваку пору која сече линију. Софтвер аутоматски броји поре и мери њихове пречнике. Такође, одређује позицију сваке поре дуж линије. Дужина мерења по узорку за сваки узорак износила је 1200 mm. Количина пасте је прорачуната за сваку врсту бетона. Резултати мерења дати су у Прилогу 15.

6.2.7. Динамички модул еластичности (мерење брзине проласка ултразвучног импулса)

Брзина проласка ултразвучног таласа мерена је на бетонским узорцима који су били изложени наизменичним циклусима замрзавања на ваздуху температуре -20°C и одмрзавања у води температуре $+20^{\circ}\text{C}$. На бетонским коцкама димензија ивице $d=150\text{mm}$ вршено је мерење масе (g), дужине (mm) и време проласка ултразвучног импулса (μs) кроз бетонску коцку. Маса је мерена на дигиталној ваги опсега мерења до 15 kg, тачности 1 g, произвођача „Kern“ – Немачка. Промена дужине је мерена дигиталним кљунастим мерилом, опсега мерења до 200 mm, тачности 0.01 mm, произвођача „MIB“ – Немачка. Дигитална хладњача за замрзавање и одмрзавање приказана је у тачки 6.2.4. Време проласка ултразвучног таласа мерено је сондама фреквенције 55 kHz помоћу уређаја „Ултразвучни апарат високих перформанси“, произвођача „Impact Test Equipment“ – Енглеска, приказан на Слици VI-21. Узорци су након израде неговани на ваздуху 24h, а након тога у води све до дана стављања узорка у дигиталну хладњачу. Узорци су на дан стављања узорка у дигиталну хладњачу имали старост од 74 и 75 дана. На бетонским коцкама свих мешавина извршена су мерења пре и након сваког 25-ог циклуса

излагања узорака замрзавању/одмрзавању, све до 300 циклуса. На основу мерења израчунат је динамички модул еластичности, који је одређен као производ квадрата брзине ултразвучног таласа и запреминске масе очврслог бетона. Резултати мерења дати су у Прилогу 11.



Слика IV-21 – Ултразвучни апарат високих перформанси, произвођача „Impact Test Equipment“ – Engleska.

6.2.8. Статички модул еластичности при притиску

Одређивање статичког модула еластичности је рађено на бетонским цилиндрима пречника $D=150$ (mm), и висине $h=300$ (mm) према SRPS EN 12390-13 [131]. Узорци су израђени у металним калупима и неговани у води температуре 20 ($^{\circ}\text{C}$), у свему према SRPS EN 12390-2 [119]. Након неге обе испитне површине узорка су припремљене брушењем како би добили равне и планпаралелне површине. Прва два цилиндра су испитана на чврстоћу при притиску према SRPS EN 12390-3 [125], а други и трећи цилиндар су изложени на три циклуса оптерећења како би се стабилизовала деформација узорака. Добијене вредности модула еластичности су добијене из односа напона и деформације. Испитивање је извршено у старости бетона од 6 месеци. Лонгитудиналне деформације су мерене на три места (мерна база дужине $l_0=90$ (mm)), укључујући нулто оптерећење и максимално оптерећење ($\sigma/3$). За испитивање је коришћена дигитална аутоматска хидраулична преса капацитета 3000 kN са серво контролом, а брзина наношења оптерећења износила је 0.6 (MPa/s). Индуктивни претварач (екстензометар) је осетљивости 0.02 (μm), са напајањем од 10 (V), и са максималним ходом од ± 1.5 (mm). Сви уређаји којима су вршена испитивања приказани су на Сликама IV-22, IV-23 и IV-24. Резултати мерења дати су у Прилогу 16.



Слика IV-22 –
Дигитално
кљунасто мерило
дужине „MIB“ –
Немачка опсега до
300 (mm)



Слика IV-23 – Дигитална
хидраулична преса 3000 (kN)



Слика IV-24 – Индуктивни
претварач (екстензометар),
осетљивости 0.02(μm)

6.2.9. Коефицијент миграције хлорида

Одређивање коефицијента миграције хлорида спроведено је у складу са SRPS EN 12390-18 [132], на бетонским узорцима облика цилиндра димензија $D=100\text{ mm}$ и $h=50\text{ mm}$, који су добијени вађењем језгара из бетонске коцке димензија ивица $d=150\text{ mm}$ бушењем, а извађено језгро је сечено на захтевану висину. Овако добијени узорци су засићавани до константне масе у води температуре 20°C . Узорак је постављен између електроде без раствора хлорида и електроде алкалног раствора која садржи хлорид, а електрични напон се примењивао између ове две електроде како би се хлоридни јони убацили у бетонски узорак. Почетну струју и дужину трајања испитивања смо одредили при напону од 30 V. Почетна струја је била променљива у зависности од врсте бетона и кретала се у вредностима од 8 до 87 mA, на основу чега је одређен напон који се задаје у mA и дужина трајања испитивања. Након завршеног излагања, бетонски узорак се цепа и дубина слободних хлоридних јона се одређује коришћењем одговарајућег раствора индикатора боје, након чега смо мерили дубину продирања хлорида на 9 места са обе преломне површине са тачношћу од 1 mm. За наношење одређеног струјног напона коришћен је уређај „Proove'it“, произвођача „Germann Instruments“ – Немачка, са опсегом аплицирања напона од 5 до 60 V (Слика IV-26). Мерене су дубине са дигиталним кљунастим мерилом „MIB“ – Немачка, опсега мерења 0-150 mm, са тачношћу од 0.01 mm (Слика IV-27). Мерење дубине продирања хлорида у

бетонски узорак приказан је на Слици IV-28. Резултати мерења дати су у Прилогу 17.



Слика IV-25 – Дигитално кљунасто мерило дужине „MIB“ – Немачка, мерног опсега до 150 mm



Слика IV-26 – Уређај за наношење напона „Proove'it“, произвођача „Germann Instruments“ – Немачка, опсег напона од 5 до 60 V



Слика IV-27 – Изглед преломних површина након наношења индикатора боје

6.2.10. Скупљање бетона при сушењу

Скупљање бетона при сушењу (промена дужине бетонских узорак) одређено је у складу са SRPS U.M1.029 на призмама димензија 100 mm x 100 mm x 400 mm (Слика IV-28). За регистровање деформација употребљен је деформетар произвођача „Käfer“ (Немачка). Тачност уређаја износи 0,001 mm. Промена дужине је мерена у оси узорка, на мерној бази дужине 400 mm. Мередавна вредност промене дужине одређена је као аритметичка средина резултата добијених на три призме. Испитивање је спроведено на 20 врста бетона, за режим неговања узорак у условима релативне влажности ваздуха од 40% и температуре ваздуха од 20°C. Промена дужине је мерена 3 дана од момента уградње, па сваких седам дана све до

старости бетона од 91-ог дана. У Прилогу 12 приказане су појединачне вредности промене дужине бетонске призме ($\text{mm/m}'$) за сваку врсту бетона.



Слика IV-28 – Мерење скупљања при сушењу бетона

7. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА

7.1. Свеж бетон

7.1.1. Конзистенција

На основу резултата мерења датим у Прилогу 6 приказане су вредности конзистенције методом слегања након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину у Табели IV-10.

Табела IV-10. Конзистенција методом слегања

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Конзистенција методом слегања (mm)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Обични (референтни) бетони	P-1	W/C=0.55	210	180	160
	P-2	W/C=0.50	190	160	140
	P-3	W/C=0.45	180	150	110
	P-4	W/C=0.40	160	120	80
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	W/C=0.55	200	170	150
	P-6	W/C=0.50	180	150	110
	P-7	W/C=0.45	210	170	120
	P-8	W/C=0.40	160	120	80
Бетони са 2.5% дробљеном гумом	P-9	W/C=0.55	190	130	90
	P-10	W/C=0.50	180	120	90
	P-11	W/C=0.45	190	160	120
	P-12	W/C=0.40	180	110	60
Бетони са 5% дробљеном гумом	P-13	W/C=0.55	200	140	100
	P-14	W/C=0.50	190	150	120
	P-15	W/C=0.45	180	140	100
	P-16	W/C=0.40	170	100	50
Бетони са 7.5% дробљеном гумом	P-17	W/C=0.55	200	160	110
	P-18	W/C=0.50	190	140	100
	P-19	W/C=0.45	170	130	90
	P-20	W/C=0.40	160	90	40

7.1.2. Запреминска маса

На основу резултата мерења датим у Прилогу 7 приказане су вредности запреминских маса након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину у Табели IV-11.

Табела IV-11. Запреминска маса свежег бетона

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Запреминска маса (kg/m ³)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Обични (референтни) бетони	P-1	W/C=0.55	2330	2340	2350
	P-2	W/C=0.50	2350	2350	2360
	P-3	W/C=0.45	2370	2380	2380
	P-4	W/C=0.40	2390	2400	2410
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	W/C=0.55	2260	2270	2280
	P-6	W/C=0.50	2290	2300	2310
	P-7	W/C=0.45	2320	2330	2340
	P-8	W/C=0.40	2340	2360	2370
Бетони са 2.5% дробљеном гумом	P-9	W/C=0.55	2310	2300	2280
	P-10	W/C=0.50	2330	2310	2290
	P-11	W/C=0.45	2350	2330	2300
	P-12	W/C=0.40	2370	2360	2340
Бетони са 5% дробљеном гумом	P-13	W/C=0.55	2300	2280	2260
	P-14	W/C=0.50	2330	2310	2290
	P-15	W/C=0.45	2350	2320	2300
	P-16	W/C=0.40	2370	2350	2330
Бетони са 7.5% дробљеном гумом	P-17	W/C=0.55	2290	2270	2250
	P-18	W/C=0.50	2310	2300	2280
	P-19	W/C=0.45	2330	2310	2290
	P-20	W/C=0.40	2350	2330	2310

7.1.3. Садржај ваздуха

На основу резултата мерења датим у Прилогу 8 приказане су вредности садржаја ваздуха у свежем бетону након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину у Табели IV-12.

Табела IV-12. Садржај ваздуха у свежем бетону

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Садржај ваздуха (%)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Обични (референтни) бетони	P-1	W/C=0.55	2.3	2.1	2.0
	P-2	W/C=0.50	2.2	2.0	1.9
	P-3	W/C=0.45	2.1	2.0	1.8
	P-4	W/C=0.40	2.1	2.0	1.7
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	W/C=0.55	5.4	5.2	5.0
	P-6	W/C=0.50	6.0	5.8	5.5
	P-7	W/C=0.45	5.4	5.2	5.0
	P-8	W/C=0.40	5.0	4.5	4.0
Бетони са 2.5% дробљеном гумом	P-9	W/C=0.55	3.2	3.6	4.1
	P-10	W/C=0.50	3.1	3.4	3.6
	P-11	W/C=0.45	2.8	3.0	3.1
	P-12	W/C=0.40	2.5	2.7	2.9
Бетони са 5% дробљеном гумом	P-13	W/C=0.55	3.8	4.2	4.8
	P-14	W/C=0.50	3.2	3.6	3.9
	P-15	W/C=0.45	2.6	3.2	3.5
	P-16	W/C=0.40	2.6	2.8	3.1
Бетони са 7.5% дробљеном гумом	P-17	W/C=0.55	4.2	4.8	5.1
	P-18	W/C=0.50	3.3	3.7	4.0
	P-19	W/C=0.45	3.1	3.4	3.7
	P-20	W/C=0.40	2.8	3.2	3.5

7.2. Очврсли бетон

7.2.1. Запреминска маса

Резултати појединачних испитивања дати су у Прилогу 9. Срачунате средње вредности запреминских маса, за сваку врсту бетона, за старости бетона од 3, 7 и 28 дана, приказане су у Табела IV-14.

Табела IV-13 - Резултати испитивања запреминске масе очврског бетона

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Запреминска маса, D (kg/m ³)		
			3 дана	7 дана	28 дана
Обични (референтни) бетони	P-1	0.55	2350	2340	2330
	P-2	0.50	2360	2360	2360
	P-3	0.45	2340	2350	2370
	P-4	0.40	2390	2410	2410
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	0.55	2270	2270	2280
	P-6	0.50	2270	2280	2290
	P-7	0.45	2300	2300	2330
	P-8	0.40	2350	2350	2360
Бетони са 2.5% дробљеном гумом	P-9	0.55	2310	2300	2300
	P-10	0.50	2320	2320	2340
	P-11	0.45	2340	2340	2370
	P-12	0.40	2380	2390	2400
Бетони са 5% дробљеном гумом	P-13	0.55	2290	2300	2310
	P-14	0.50	2310	2320	2330
	P-15	0.45	2340	2350	2360
	P-16	0.40	2360	2380	2380
Бетони са 7.5% дробљеном гумом	P-17	0.55	2270	2270	2290
	P-18	0.50	2310	2320	2320
	P-19	0.45	2340	2340	2360
	P-20	0.40	2340	2350	2360

7.2.2. Чврстоћа при притиску

Резултати појединачних испитивања дати су у Прилогу 9. Срачунате средње вредности чврстоћа при притиску, за сваку врсту бетона, за старости бетона од 3, 7 и 28 дана, приказане су у Табела IV-14.

Табела IV-14. Резултати испитивања чврстоће бетона при притиску

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Чврстоћа при притиску, f_c (MPa)		
			3 дана	7 дана	28 дана
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	32.0	43.4	56.5
	P-2	0.50	33.7	45.7	58.5
	P-3	0.45	37.9	49.9	60.1
	P-4	0.40	47.2	59.3	70.8
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	28.8	38.4	48.8
	P-6	0.50	29.5	39.9	52.0
	P-7	0.45	32.9	43.8	56.5
	P-8	0.40	43.4	50.9	63.1
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	30.2	39.5	49.6
	P-10	0.50	32.4	41.5	52.6
	P-11	0.45	36.7	46.4	57.1
	P-12	0.40	45.4	55.6	66.0
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	26.1	36.5	44.4
	P-14	0.50	27.7	39.7	47.8
	P-15	0.45	35.3	43.4	52.2
	P-16	0.40	45.8	53.6	63.7
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	23.6	34.0	42.0
	P-18	0.50	25.9	35.6	44.3
	P-19	0.45	33.3	40.8	50.7
	P-20	0.40	41.3	47.9	56.8

7.2.3. Водонепропустљивост бетона

Резултати мерења дубине продора и количине упијене воде дати су Прилогу 10. У току експеримента мерена је маса узорка пре и након излагања дејству воде под притиском, на основу чега је упијање изражено у kg/m^2 . У Табели IV-15 дате су вредности упијања воде под притиском и дубине продора за сваку врсту бетона при старости бетона од 28 до 44 дана. Упијање воде израчунато према изразима:

$$U_{sr} = m_2 - m_1 \text{ [kg]}$$

$$U_{sr} = \frac{m_2 - m_1}{A} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

У датим изразима, ознаке имају следећа значења:

U_{sr} – вредност упијања у kg или kg/m^2 ,

m_1 – маса узорка пре испитивања,

m_2 – маса узорка након деловања воде под притиском,

A – контактна површина (круг пречника 7.5cm)

Табела IV-15 - Највеће дубине продора воде под притиском

Врста бетона	Ознака мешавине	w/c	Упијање воде		Највећа дубина продора воде
			$U_{sr} \text{ [kg]}$	$U_{sr} \text{ [kg/m}^2\text{]}$	$[\text{mm}]$
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	0.0113	2.565	26
	P-2	0.50	0.0110	2.490	24
	P-3	0.45	0.0110	2.490	22
	P-4	0.40	0.0083	1.886	16
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	0.0107	2.414	24
	P-6	0.50	0.0090	2.037	21
	P-7	0.45	0.0090	2.037	19
	P-8	0.40	0.0057	1.283	14
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	0.0243	5.508	32
	P-10	0.50	0.0127	2.867	25
	P-11	0.45	0.0103	2.339	20
	P-12	0.40	0.0060	1.358	16
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	0.0277	6.262	35
	P-14	0.50	0.0167	3.773	28
	P-15	0.45	0.0123	2.792	22
	P-16	0.40	0.0090	2.037	18
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	0.0290	6.564	42
	P-18	0.50	0.0207	4.678	32
	P-19	0.45	0.0130	2.943	25
	P-20	0.40	0.0100	2.264	21

7.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза

Резултати појединачних испитивања дати су у Прилогу 13. Срачунате су средње вредности чврстоће при притиску узорака који су излагани замрзавању и одмрзавању након 200 и 300 циклуса, као и еталонских узорака који нису били излагани замрзавању и одмрзавању. За сваку врсту бетона срачунати су односи чврстоће при притиску замрзаваних узорака и еталонских узорака који нису били излагани циклусима замрзавања. Добијене вредности приказане су у Табели IV-16.

Табела IV-16 - Резултати испитивања бетона на дејство мраза

Врста бетона	Ознака мешавине	w/c	Čvrstoća pri pritisku, f_c (MPa)					
			E	200 ciklusa	Odnos čvrstoća Δf	E	300 ciklusa	Odnos čvrstoća Δf
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	58.0	42.1	73%	58.4	58.4	66%
	P-2	0.50	60.6	52.7	87%	60.8	60.8	77%
	P-3	0.45	67.7	62.3	92%	68.9	68.9	89%
	P-4	0.40	74.4	70.9	95%	76.9	76.9	94%
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	52.3	45.7	87%	53.2	53.2	80%
	P-6	0.50	54.2	49.9	92%	55.6	55.6	88%
	P-7	0.45	62.7	59.6	95%	64.5	64.5	93%
	P-8	0.40	70.5	70.1	99%	73.8	73.8	99%
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	52.9	40.7	77%	53.4	53.4	73%
	P-10	0.50	55.5	48.8	88%	56.2	56.2	83%
	P-11	0.45	62.1	58.2	94%	63.0	63.0	88%
	P-12	0.40	72.7	70.9	98%	73.8	73.8	92%
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	47.6	42.1	88%	50.2	50.2	80%
	P-14	0.50	51.4	48.8	95%	53.2	53.2	90%
	P-15	0.45	58.2	55.8	96%	59.2	59.2	92%
	P-16	0.40	71.4	69.4	97%	71.6	71.6	96%
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	46.3	41.5	90%	49.1	49.1	86%
	P-18	0.50	50.1	47.3	94%	52.1	52.1	89%
	P-19	0.45	58.0	55.1	95%	59.2	59.2	92%
	P-20	0.40	65.8	63.4	96%	66.2	66.2	94%

7.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Резултати појединачних испитивања дати су у Прилогу 14. Срачунате су средње вредности количине ољуштеног материјала након 7, 14, 28, 42 и 56 циклуса са површина које су биле изложене дејству мраза уз присуство 3% раствора NaCl, које су приказане у Табели IV-17.

Табела IV-17 - Резултати испитивања бетона на дејство мраза уз присуство 3% NaCl

Врста бетона	Ознака мешавине	w/c	Количина ољуспалог материјала, S _n (kg/m ²)				
			7	14	28	42	56
			циклуса	циклуса	циклуса	циклуса	циклуса
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	0.00	0.21	1.86	2.81	4.97
	P-2	0.50	0.00	0.06	0.68	1.39	2.55
	P-3	0.45	0.00	0.06	0.16	0.58	1.12
	P-4	0.40	0.00	0.04	0.08	0.11	0.16
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	0.00	0.05	0.05	0.06	0.06
	P-6	0.50	0.00	0.02	0.03	0.03	0.03
	P-7	0.45	0.00	0.02	0.02	0.03	0.03
	P-8	0.40	0.00	0.02	0.03	0.03	0.03
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	0.00	0.14	0.82	1.53	3.07
	P-10	0.50	0.00	0.06	0.44	0.83	1.52
	P-11	0.45	0.01	0.03	0.13	0.35	0.95
	P-12	0.40	0.00	0.03	0.07	0.09	0.12
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	0.00	0.09	0.58	0.79	1.45
	P-14	0.50	0.00	0.03	0.05	0.12	0.32
	P-15	0.45	0.00	0.03	0.03	0.07	0.14
	P-16	0.40	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	0.00	0.02	0.12	0.18	0.28
	P-18	0.50	0.00	0.02	0.07	0.10	0.12
	P-19	0.45	0.00	0.01	0.03	0.04	0.04
	P-20	0.40	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03

7.2.6. Карактеристике ваздушних пора у очврслом бетону

Припрема узорка сечењем, полирањем, импрегнацијом црном бојом и запуњавањем баријум сулфатом извршена је у старости бетона од 7 до 24 дана, а снимање је спроведено у старости од 28 дана. На основу резултата снимања пора на површини узорка помоћу уређаја „Rapid Air 457“, помоћу програма аутоматски су генерисани подаци као што су: број пора, пречник пора, итд., који су приказани за сваку врсту бетона у Прилогу 15. Укупан садржај, специфична површина и фактор размака пора (средња раздаљина између пора) приказани су за све бетоне у Табели IV-18.

Табела IV-18 - Резултати карактеристика ваздушних пора у очврслом

Врста бетона	Ознака мешавине	w/c	Количина пасте (%)	Укупан садржај ваздуха (%)	Специфична површина пора (mm^{-1})	Фактор размака пора (mm)
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	31.90	6.37	48.56	0.095
	P-2	0.50	30.13	4.33	34.49	0.148
	P-3	0.45	28.43	4.52	34.07	0.15
	P-4	0.40	26.77	3.94	46.82	0.12
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	31.90	7.58	50.91	0.07
	P-6	0.50	30.13	7.39	28.02	0.15
	P-7	0.45	28.44	6.73	52.43	0.09
	P-8	0.40	26.77	4.22	31.38	0.16
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	31.90	8.80	43.81	0.07
	P-10	0.50	30.13	6.07	61.97	0.07
	P-11	0.45	28.43	4.54	35.56	0.14
	P-12	0.40	26.77	4.40	52.82	0.10
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	31.89	9.89	26.56	0.11
	P-14	0.50	30.13	8.99	40.95	0.09
	P-15	0.45	28.43	7.74	38.47	0.10
	P-16	0.40	26.77	4.44	35.66	0.14
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	31.90	11.71	56.90	0.05
	P-18	0.50	30.13	9.41	38.76	0.07
	P-19	0.45	28.43	7.56	37.59	0.11
	P-20	0.40	26.77	6.40	35.76	0.12

7.2.7. Динамички модул еластичности (мерењем брзине проласка ултразвучног импулса)

У Табели IV-19 дате су вредности динамичког модула еластичности одређеног преко брзине пролаза ултразвука и запреминске масе очврслог бетона. Вредности мерења добијене су након наизменичног замрзавања и одмрзавања бетонских узорака након сваких 25 циклуса, па све до 300 циклуса, на којима су након одмрзавања мерене масе, дужина и брзина проласка ултразвучног импулса. Резултати појединачних мерења приказани су у Прилогу 11.

Табела IV-19 - Резултати динамичког модула еластичности

Врста бетона	Ознака мешавине	w/c	Динамички модул еластичности E_d [GPa] након циклуса						
			0	50	100	150	200	250	300
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	38.19	38.59	38.31	37.36	36.62	35.87	34.92
	P-2	0.50	39.11	38.57	38.20	37.81	37.61	37.46	36.99
	P-3	0.45	39.97	40.01	39.70	39.78	39.84	39.78	38.94
	P-4	0.40	41.05	40.64	40.68	40.66	40.52	40.06	39.93
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	37.49	36.65	36.77	36.59	36.64	36.56	35.79
	P-6	0.50	38.10	38.09	37.83	37.72	37.63	37.42	37.39
	P-7	0.45	38.18	38.21	38.13	38.15	38.08	38.03	37.80
	P-8	0.40	39.84	39.58	39.28	39.11	39.09	39.15	38.84
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	38.05	38.05	37.62	36.80	36.40	35.98	35.61
	P-10	0.50	38.96	38.91	38.64	38.51	38.34	38.40	38.19
	P-11	0.45	39.65	39.72	39.25	39.26	39.01	38.99	38.73
	P-12	0.40	40.43	40.56	40.39	40.14	40.11	39.91	39.80
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	37.04	37.02	37.08	36.73	36.47	36.25	35.83
	P-14	0.50	38.63	38.54	38.65	38.15	38.26	38.16	37.96
	P-15	0.45	39.06	39.03	38.79	38.71	38.67	38.29	37.87
	P-16	0.40	39.93	40.03	39.89	39.86	39.67	39.60	39.41
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	36.23	36.21	35.95	35.84	35.65	35.40	35.40
	P-18	0.50	38.24	38.40	38.33	37.82	37.89	38.06	37.80
	P-19	0.45	38.69	38.66	38.69	38.31	38.35	38.39	38.14
	P-20	0.40	39.52	39.54	39.26	39.31	39.44	38.97	38.78

7.2.8. Статички модул еластичности

У Табели IV-20 дате су вредности статичког модула еластичности одређеног преко односа напона и деформације који је одређен на цилиндричним узорцима. Резултати појединачних мерења приказани су у Прилогу 16.

Табела IV-20 - Статички модул еластичности

Врста бетона	Ознака мешавине	w/c	Статички модул еластичности $E_{c,s}$ (GPa)
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	30.5
	P-2	0.50	32.4
	P-3	0.45	34.2
	P-4	0.40	36.7
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	28.1
	P-6	0.50	27.9
	P-7	0.45	30.6
	P-8	0.40	32.1
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	27.8
	P-10	0.50	29.2
	P-11	0.45	30.6
	P-12	0.40	36.7
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	27.0
	P-14	0.50	27.7
	P-15	0.45	30.2
	P-16	0.40	35.3
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	26.8
	P-18	0.50	27.6
	P-19	0.45	30.2
	P-20	0.40	34.2

7.2.9. Коефицијент миграције хлорида

У Табели IV-21 дате су средње вредности коефицијента миграције хлорида који је одређен за све врсте бетона. Резултати појединачних мерења приказани су у Прилогу 17.

Табела IV-21 - Коефицијент миграције хлорида

Врста бетона	Ознака мешавине	w/c	Средња вредност коефицијента миграције хлорида M _{nss} [$\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]
Обичан (референтни) бетон	P-1	0.55	17.5
	P-2	0.50	13.6
	P-3	0.45	12.7
	P-4	0.40	11.5
Бетони са додатком аеранта	P-5	0.55	18.0
	P-6	0.50	19.3
	P-7	0.45	12.8
	P-8	0.40	1.0
Бетони са додатком 2.5 % гуме	P-9	0.55	20.3
	P-10	0.50	18.6
	P-11	0.45	16.0
	P-12	0.40	12.7
Бетони са додатком 5.0 % гуме	P-13	0.55	20.2
	P-14	0.50	13.7
	P-15	0.45	11.4
	P-16	0.40	1.8
Бетони са додатком 7.5 % гуме	P-17	0.55	11.4
	P-18	0.50	4.8
	P-19	0.45	3.6
	P-20	0.40	0.4

7.2.10. Скупљање бетона при сушењу

На основу резултата појединачних мерења скупљања при сушењу бетонских узорака из Прилога 12, у Табелама IV-22 до IV-26 су приказане израчунате средње вриједности скупљања при сушењу за сваку врсту бетона у mm/m (‰), за мерну базу од 400mm.

Табела IV-22 - Скупљање при сушењу бетонских узорака [mm/m] - Обичан (референтни) бетон

Врста бетона		Обичан (референтни) бетон			
Ознака мешавине		P-1	P-2	P-3	P-4
w/c		0.55	0.50	0.45	0.40
Старост (дана) / Промена дужине (mm/m)	3	0	0	0	0
	4	-0.1333	-0.1100	-0.0967	-0.0710
	7	-0.2837	-0.2297	-0.2010	-0.1413
	14	-0.4043	-0.3463	-0.3137	-0.2810
	21	-0.4523	-0.4047	-0.3553	-0.3150
	28	-0.4967	-0.4490	-0.3957	-0.3470
	35	-0.5517	-0.4970	-0.4423	-0.4207
	42	-0.5820	-0.5357	-0.4867	-0.4457
	49	-0.6307	-0.5677	-0.5287	-0.4867
	56	-0.6313	-0.6000	-0.5580	-0.5247
	63	-0.6527	-0.6213	-0.5710	-0.5443
	70	-0.6533	-0.6217	-0.5787	-0.5410
	77	-0.6663	-0.6300	-0.5800	-0.5427
	84	-0.6720	-0.6287	-0.5927	-0.5623
	91	-0.6873	-0.6513	-0.6050	-0.5690

Табела IV-23 - Скупљање при сушењу бетонских узорака [mm/m] - Бетони са додатком аеранта

Врста бетона		Бетони са додатком аеранта			
Ознака мешавине		P-5	P-6	P-7	P-8
w/c		0.55	0.50	0.45	0.40
Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')	3	0	0	0	0
	4	-0.1240	-0.1397	-0.1050	-0.0863
	7	-0.2267	-0.2163	-0.1883	-0.1493
	14	-0.3817	-0.3723	-0.2980	-0.2600
	21	-0.4577	-0.4193	-0.3567	-0.2947
	28	-0.5460	-0.4670	-0.3983	-0.3267
	35	-0.6243	-0.5410	-0.4750	-0.3737
	42	-0.6883	-0.5737	-0.5297	-0.4090
	49	-0.7140	-0.6053	-0.5500	-0.4243
	56	-0.7320	-0.6293	-0.5577	-0.4570
	63	-0.7600	-0.6567	-0.5607	-0.4870
	70	-0.7630	-0.6647	-0.5747	-0.4857
	77	-0.7683	-0.6827	-0.5887	-0.4870
	84	-0.7847	-0.7013	-0.6070	-0.5013
	91	-0.7950	-0.7250	-0.6140	-0.5153

Табела IV-24 Скупљање при сушењу бетонских узорака [mm/m] - Бетони са додатком 2.5 % гуме

Врста бетона		Бетони са додатком 2.5 % гуме			
Ознака мешавине		P-9	P-10	P-11	P-12
w/c		0.55	0.50	0.45	0.40
Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')	3	0	0	0	0
	4	-0.1803	-0.1523	-0.1233	-0.1030
	7	-0.3457	-0.3153	-0.2647	-0.2247
	14	-0.4683	-0.4167	-0.3647	-0.3400
	21	-0.5783	-0.4863	-0.4210	-0.3883
	28	-0.6773	-0.5690	-0.4997	-0.4420
	35	-0.7197	-0.6257	-0.5657	-0.4817
	42	-0.7750	-0.6787	-0.5933	-0.5343
	49	-0.8203	-0.7000	-0.6200	-0.5543
	56	-0.8490	-0.7687	-0.6527	-0.5760
	63	-0.8767	-0.7767	-0.6673	-0.5860
	70	-0.8780	-0.7977	-0.6790	-0.5907
	77	-0.8863	-0.7970	-0.7007	-0.6030
	84	-0.9000	-0.8143	-0.7037	-0.6123
	91	-0.9217	-0.8207	-0.7147	-0.6203

Табела IV-25 - Скупљање при сушењу бетонских узорака [mm/m] - Бетони са додатком 5.0 % гуме

Врста бетона		Бетони са додатком 5.0 % гуме			
Ознака мешавине		P-13	P-14	P-15	P-16
w/c		0.55	0.50	0.45	0.40
Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')	3	0	0	0	0
	4	-0.1640	-0.0947	-0.0857	-0.0777
	7	-0.3377	-0.2417	-0.2273	-0.1753
	14	-0.4597	-0.3620	-0.3187	-0.2800
	21	-0.5673	-0.4620	-0.4027	-0.3607
	28	-0.6740	-0.5593	-0.4970	-0.4433
	35	-0.7547	-0.6627	-0.5673	-0.5077
	42	-0.8233	-0.7240	-0.6320	-0.5560
	49	-0.8620	-0.7660	-0.6693	-0.5937
	56	-0.8827	-0.7837	-0.6970	-0.6183
	63	-0.8943	-0.8000	-0.7290	-0.6377
	70	-0.9060	-0.8103	-0.7327	-0.6550
	77	-0.9250	-0.8393	-0.7370	-0.6577
	84	-0.9350	-0.8433	-0.7570	-0.6683
	91	-0.9503	-0.8540	-0.7637	-0.6910

Табела IV-26 - Скупљање при сушењу бетонских узорака [mm/m] - Бетони са додатком 7.5 % гуме

Врста бетона		Бетони са додатком 7.5 % гуме			
Ознака мешавине		P-17	P-18	P-19	P-20
w/c		0.55	0.50	0.45	0.40
Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')	3	0	0	0	0
	4	-0.2185	-0.1997	-0.1903	-0.1573
	7	-0.4050	-0.3543	-0.3277	-0.2860
	14	-0.5213	-0.4740	-0.4447	-0.3503
	21	-0.6073	-0.5640	-0.5300	-0.4380
	28	-0.6977	-0.6517	-0.6110	-0.5340
	35	-0.7607	-0.7010	-0.6603	-0.5900
	42	-0.8023	-0.7390	-0.6773	-0.6167
	49	-0.8470	-0.7650	-0.7067	-0.6400
	56	-0.8793	-0.7940	-0.7353	-0.6587
	63	-0.9023	-0.8363	-0.7710	-0.6923
	70	-0.9197	-0.8467	-0.8013	-0.7043
	77	-0.9433	-0.8600	-0.7997	-0.7150
	84	-0.9577	-0.8790	-0.8110	-0.7340
	91	-0.9650	-0.8917	-0.8233	-0.7417

V АНАЛИЗА И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

1. БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $w/c=0.55$

У ову групу спада пет врста бетона који су справљени са истом врстом и количином цемента од 360 kg/m^3 , са истом врстом агрегата и процентуалним учешћем фракција у гранулометријском саставу мешавине агрегата, уз водоцементни однос ($w/c=0.55$). Коришћен је суперпластификатор у количини од 0.4% у односу на масу цемента. Код бетона са хемијским додатком аеранта, примењен је аерант у количини од 0.008% у односу на масу цемента. Такође, дробљена гума је коришћена као запреминска замена ситног агрегата у процентима од 2.5%, 5% и 7.5%.

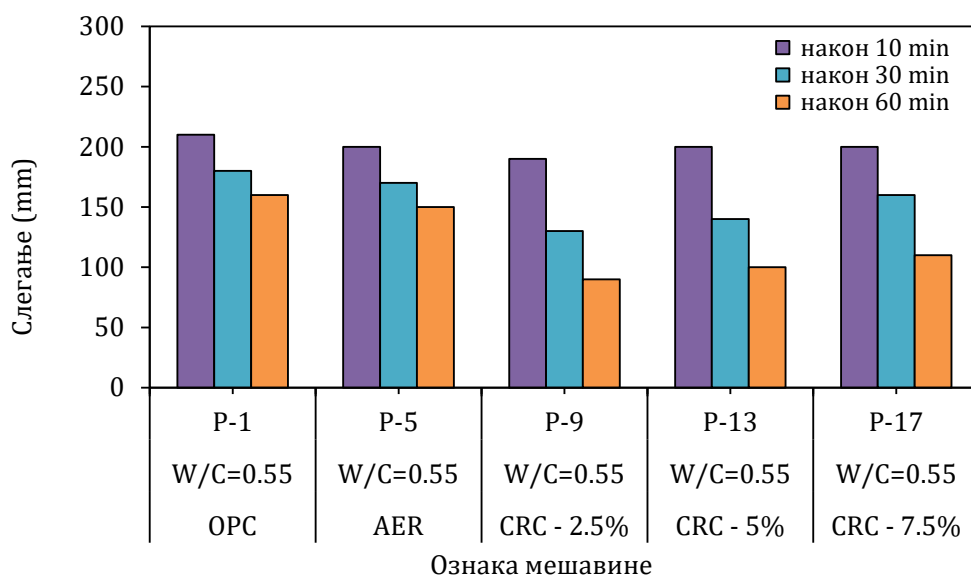
Врсте бетона су:

1. Обичан (референтни) бетон (P-1),
2. Бетони са хемијским додатком аеранта (P-5),
3. Бетони са запреминском заменом 2.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-9),
4. Бетони са запреминском заменом 5.0% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-13) и
5. Бетони са запреминском заменом 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-17).

1.1. Свеж бетон

1.1.1. Конзистенција слегањем

Резултати мерења конзистенције слегањем испитиваних врста бетона дати су у Табели IV-10, док су резултати мерења конзистенције слегањем за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом графички приказани на Слици V-1. Слегања су праћена током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-1 – Конзистенција методом слегања бетони $w/c=0.55$

Ознаке мешавина бетона на Слици:

OPC – Обичан (референтни) бетон,

AER – Бетон са хемијским додатком аеранта,

CRC – 2.5%, 5.0%, 7.5% - Бетони са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом

Анализом резултата добијених испитивањем конзистенције ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

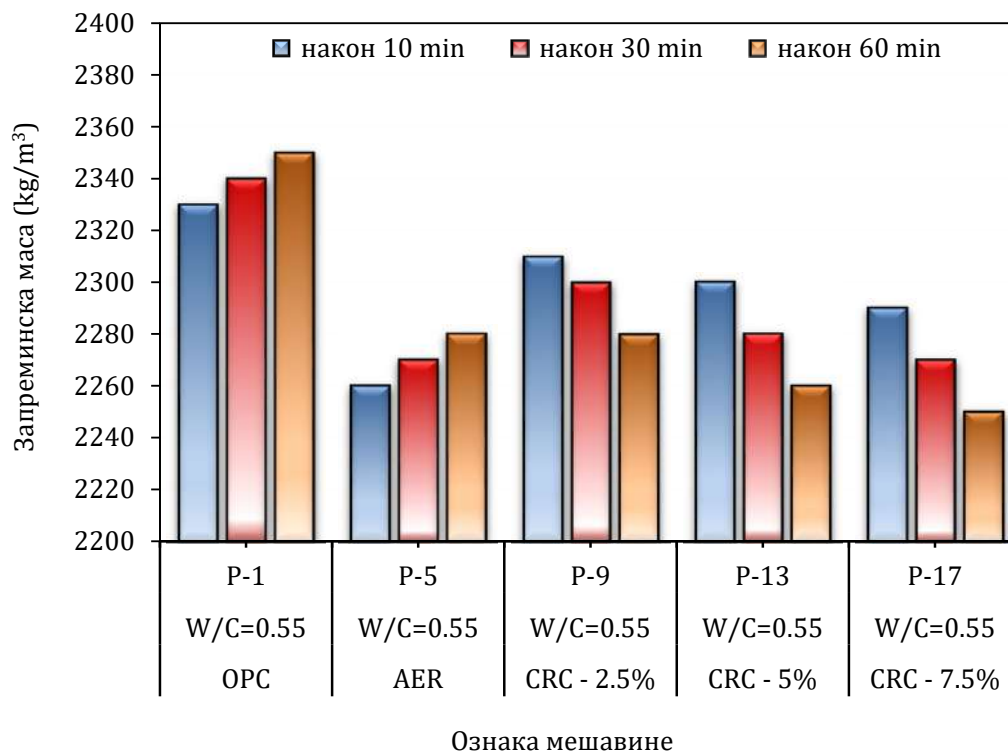
- На основу добијених мера слегања након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) задовољавају критеријум за класу S4 у складу са табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- Слегање бетона кроз време се смањује, тако да након 30 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, бетони P-1, P-5 и P-17 задовољавају

критеријум за класу слегања S4, док бетони P-9 и P-13 задовољавају критеријум за класу слегања S3, у складу са табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.

- Слегање бетона након 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину: бетон P-1 задовољава критеријум за класу слегања S4, бетони P-5, P-13 и P-17 задовољавају критеријум за класу слегања S3, док бетон P-9 задовољава критеријум класе конзистенције S2, у складу са табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- Слегање бетона кроз време се смањује за све врсте бетона. Код бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 5% и 7.5% (P-13 и P-17), уочено је повећање слегања мерено након 30 минута у односу на бетон са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 2.5% (P-9) за 7.69% и 23.08%, респективно. Исто повећање мерено након 60 минута износи 11.11% за P-13 и 22.22% за P-17.
- Услед прогреса процеса хидратације, слегање бетона након 30 и 60 минута за све бетоне се смањује у односу на слегање након 10 минута од момента додавања воде и оно износи за: P-1 (14% и 24%), P-5 (15% и 20%), P-9 (32% и 53%), P-13 (30% и 50%) и P-17 (20% и 45%), респективно.
- Све бетонске мешавине су изгледале кохезивно и повезано; при испитивању мере слегања није долазило до сегрегације, издвајања воде, цемента и фракције агрегата, и бетони су се лако уградили у калупе.
- Примећује се пад конзистенције при супституцији агрегата са 2,5% рециклираном гумом, што се може објаснити већом потражњом воде услед храпаве површине честица гуме [70], [71], [72], [73].
- Повећањем удела рециклиране гуме, конзистенција се поправља. Овакав тренд се приписује већој количини слободне воде у структури бетона, што је последица повећане количине хидрофобних честица гуме [44, 74, 75].

1.1.2. Запреминска маса

Резултати мерења запреминске масе испитиваних врста бетона дати су у Табела IV-10, а прорачунате вредности запреминских маса за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-2. Запреминске масе су праћене кроз време, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-2 – Запреминска маса бетони $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених испитивањем запреминске масе ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

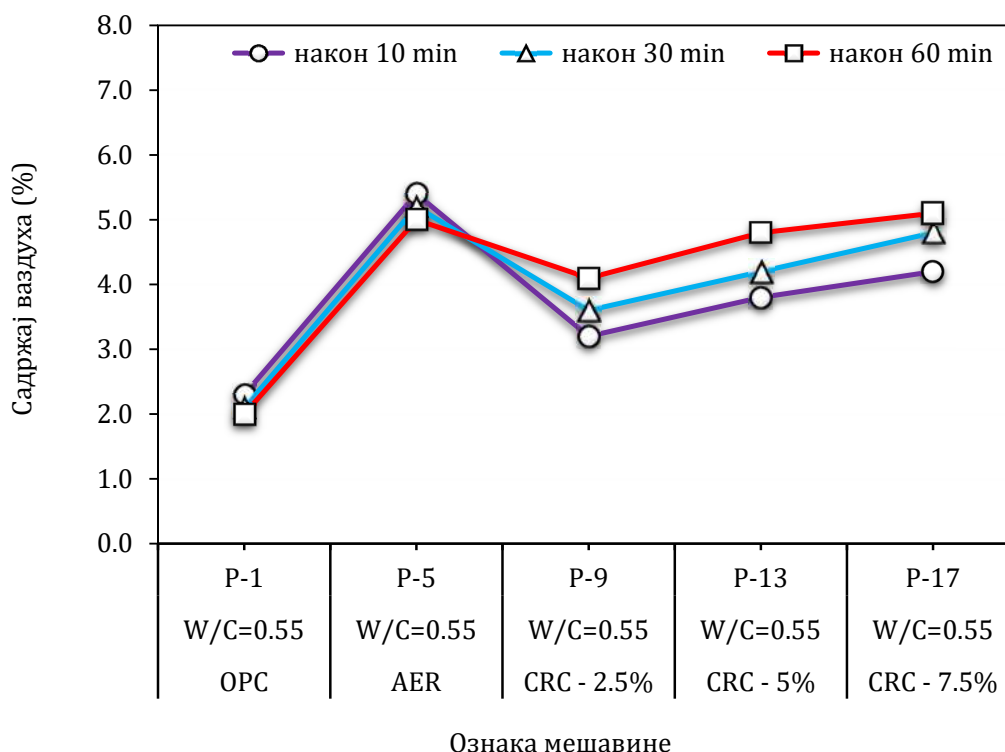
- На основу добијених вредности запреминских маса бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) су имали запреминску масу у опсегу од 2260 до 2330 kg/m^3 . Запреминске масе бетона код мешавина P-5, P-9, P-13 и P-17, мерених након 10 минута од додавања воде, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-1 за 3.0%, 0.9%, 1.3% и 1.7%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-1 и P-5 вредности запреминских маса бетона мерених након 30 и 60 минута од додавања воде, биле су више у односу на

мерења након 10 минута, за 0.4% и 0.9 % за P-1 и 0.4% и 0.9% за P-5, респективно. Код бетонских мешавина P-9, P-13 и P-17, добијене су ниже вредности запреминске масе за 0.4% и 1.3% за P-9, 0.9% и 1.7% за P-13 и 0.9% и 1.8% за P-17.

- Сви бетони су се лако уградјивали у калупе помоћу первибратора.
- Узрок смањења запреминске масе код бетона са запреминском заменом дробљене гуме приписује се поред мале запреминске масе гуме у односу на природан агрегат и повезаном заробљеном ваздуху између гумених честица и цементног малтера, који се повећавао са повећањем количине CR [12], [22], [77], [91], [92].

1.1.3. Садржај ваздуха

Резултати мерења садржаја ваздуха испитиваних врста бетона дати су у Табела IV-10, а вредности садржаја ваздуха за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-3. Садржаји ваздуха су праћени током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-3 – Садржај ваздуха бетона $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених испитивањем садржаја ваздуха ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

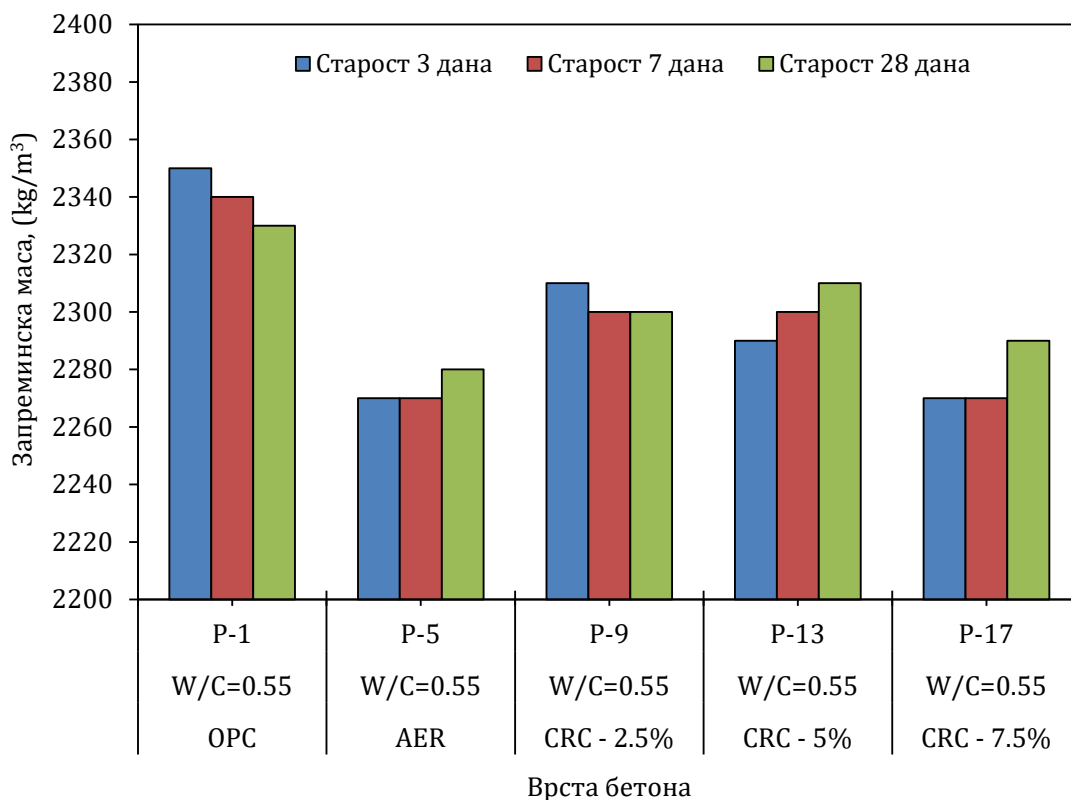
- На основу добијених вредности садржаја ваздуха бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) се одликују садржајем увученог ваздуха у опсегу 2.3% до 5.4 %. Количине ваздуха у бетону код мешавина P-5, P-9, P-13 и P-17, мерене након 10 минута од додавања воде, биле су више у односу на бетонску мешавину P-1 за 134.8%, 39.1%, 65.2% и 82.6%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-1 и P-5 вредности садржаја ваздуха у бетону мерених након 30 и 60 минута од додавања воде биле су ниже у односу на мерења након 10 минута, за 8.7% и 13% за P-1, и 3.7% и 7.4% за P-5, респективно, док су код бетонских мешавина P-9, P-13 и P-17 добијене више вредности за 12.5% и 28.1% за P-9, 10.5% и 16.3% за P-13, и 14.3% и 21.4% за P-20.
- Повећање садржаја ваздуха након 30 и 60 минута у односу на вредности након 10 минута није уобичајена појава за садржај ваздуха у бетону. Обично се дешава да вредност садржаја ваздуха у бетону опада током времена. Може се претпоставити да је повећање садржаја ваздуха током времена настало услед повећаног трења између честица дробљене гуме и осталих материјала приликом мешања.
- У односу на обичну (референтну) бетонску мешавину, сви испитивани бетони имају вишу вредност садржаја ваздуха. Код бетона са хемијским додатком аерантом то је очекивано; међутим, повећањем запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом примећује се повећан садржај ваздуха у односу на референтну бетонску мешавину (ОРС). Овакво понашање забележено је и у истраживањима других аутора [12], [84].

1.2. Очврсли бетон

1.2.1. Запреминска маса

Резултати испитивања запреминских маса очврслог бетона дати су у Табели VI-13.

Вредности запреминских маса очврслог бетона приказане су графички на Слици V-4.



Слика V-4 – Запреминска маса очврслог бетона $w/c=0.55$

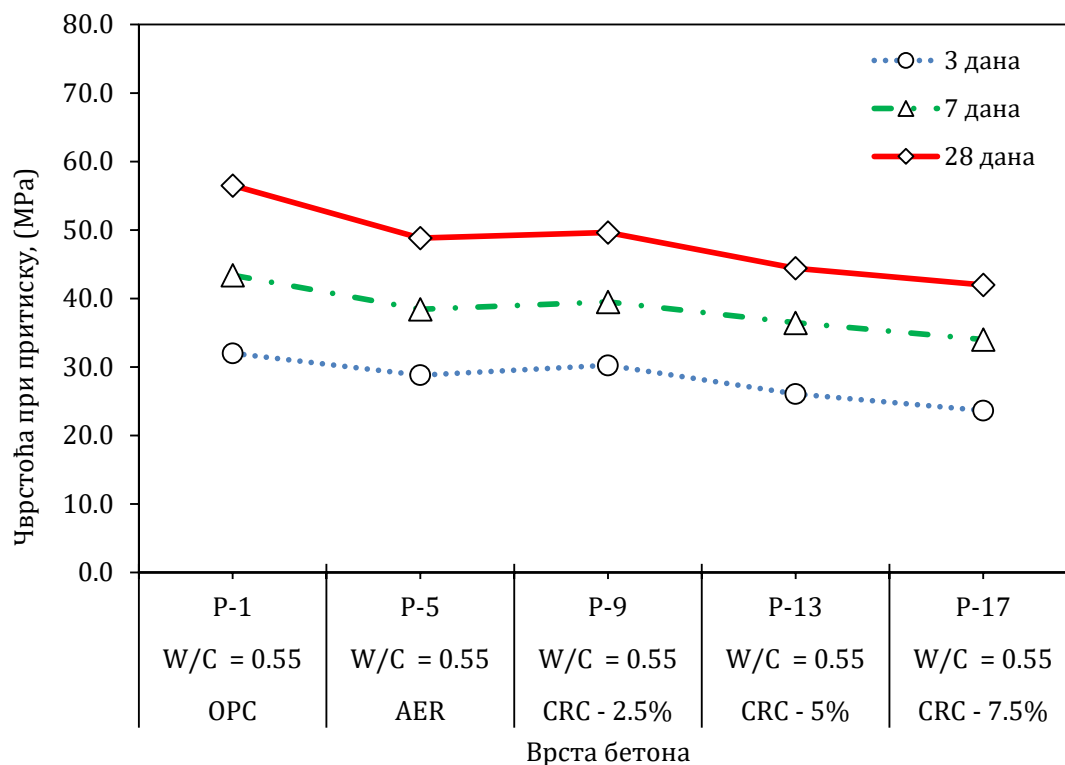
Анализом резултата добијених испитивањем запреминске масе ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности запреминске масе очврслог бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 2270 kg/m³ до 2350 kg/m³, од 2270 kg/m³ до 2340 kg/m³ и од 2290 kg/m³ до 2330 kg/m³, респективно. Запреминска маса бетона код мешавина P-5, P-9, P-13 и P-17, у старости од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-1 за 3.4%, 3.0% и 2.1%; 1.7%, 1.7% и 1.7%; 2.6%, 1.7% и 0.9%; и 3.4%, 3.0% и 1.7%, респективно.

- Са повећавањем садржаја дробљене гуме добијамо ниже вредности запреминских маса.
- Сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу запреминску масу у односу на обичан (референтни бетон).
- Бетони са додатком аеранта показују највеће смањење запреминске масе, што је очекивано због присуства додатних ваздушних пора које су унешене у структуру бетона додавањем аеранта.
- Повећањем процентуалног садржаја дробљене гуме у бетону смањује се запреминска маса, што се може приписати мањој запремној маси рециклиране гуме у односу на природни речни агрегат, као и већој количини заосталог ваздуха између честица дробљене гуме и цементног камена [12], [22], [77], [91], [92].

1.2.2. Чврстоћа при притиску

Резултати испитивања чврстоћа при притиску очврслог бетона дати су у Табели IV-14. Вредности чврстоћа при притиску очврслог бетона приказане су графички на Слици V-5.



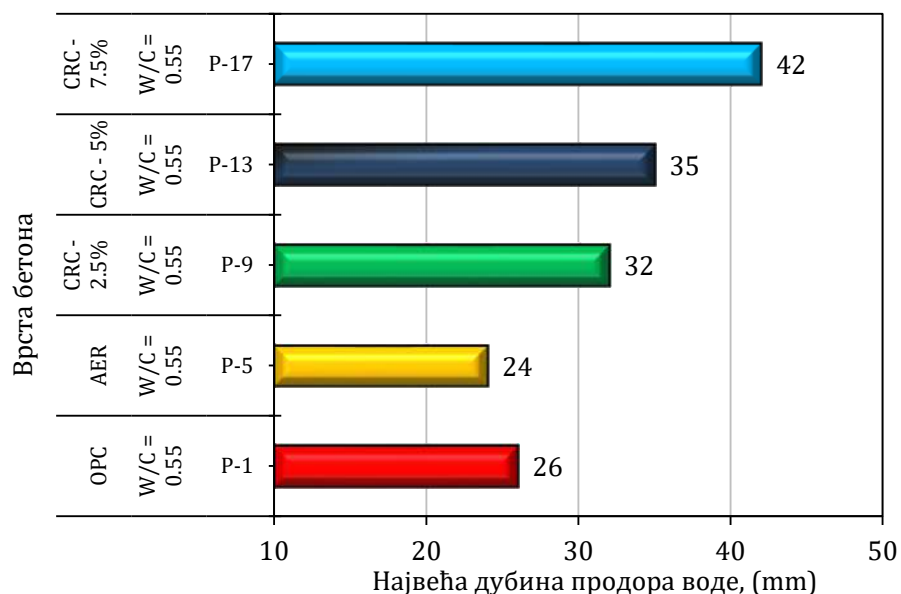
Слика V-5 – Чврстоћа при притиску бетона $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 32.0 (МПа) до 56.5 (МПа), од 28.8 (МПа) до 48.8 (МПа), од 30.2 (МПа) до 49.6 (МПа), од 26.1 (МПа) до 44.4 (МПа) и од 23.6 (МПа) до 42.0 (МПа), респективно.
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-5, P-9, P-13 и P-17, при старости од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-1 за: 9.9 %, 11.4% и 13.6%; 5.5%, 9.0% и 13.6%; 18.5%, 16.0% и 21.4%; и 26.1%, 21.6% и 25.7%, респективно.
- Са повећањем садржаја дробљене гуме чврстоћа при притиску се градуално смањује.
- Без обзира на старост, сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу чврстоћу при притиску у односу на обичан (референтни) бетон. Познато је да је агрегат, као најмасовнија компонента у бетону носилац механичких карактеристика ових композита. Стога је пад чврстоће при притиску директна последица повећања ваздуха у бетону и нижих вредности чврстоће рециклиране гуме у односу на природни агрегат. Сличне резултате су у својим истраживањима добили Salehudin i dr. [74].
- Ипак, вредност чврстоће при притиску при 28-дневној старости за бетон са највећим садржајем гуме од 7.5% износи 42.0 МПа, што указује да се оваква врста бетона може користити у конструкцијским елементима. Приликом развоја топлоте хидратације, додавање дробљене гуме није имало утицај на прираст чврстоће. Прираст чврстоће при притиску у старости од 3, 7 и 28 дана је у већем делу идентичан у овој групи бетона.
- Највишу чврстоћу при притиску је постигао обичан (референтни) бетон са 28-дневном чврстоћом од 56.5 (МПа).

1.2.3. Водонепропустљивост бетона

Резултати испитивања дубине продора воде за наведене врсте бетона дати су у Табели IV-15. Вредности дубине продора воде бетона за сваку врсту бетона из ове групе бетона приказане су графички на Слици V-6.



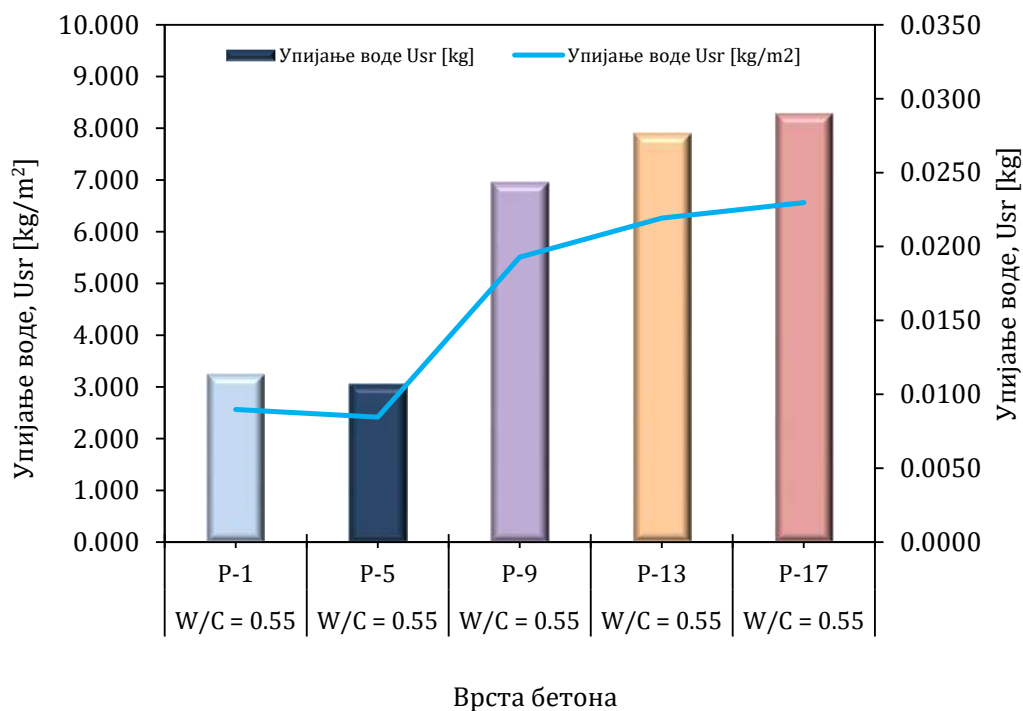
Слика V-6 –Вредности дубине продора воде бетона $w/c=0.55$

Анализом резултата на дијаграму, могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности дубина продирања воде под притиском бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 24 (mm) до 42 (mm), респективно. Најниже вредности дубине продирања воде под притиском забележене су код бетона P-1 и P-5, које износе 26 mm и 24 mm, те задовољају услов за класу водонепропустљивости V-2, Табела 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023. Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су веће вредности и то: 32 mm, 35mm i 42 mm, респективно, те задовољају услов за класу водонепропустљивости V-1, Табела 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Дубина продирања воде код мешавина P-1, P-9, P-13 и P-17, била је већа у односу на бетонску мешавину P-5 за: 8.3 %, 33.3%, 45.8% и 75%, респективно.

- Са повећањем садржаја дробљене гуме уочавају се више вредности дубина продирања воде под притиском у бетон.
- Аерирани бетон се одликује најнижом вредношћу дубине продора воде, што се може објаснити ефектом хемијског додатка аеранта. Наиме, увођењем ситних затворених ваздушних мехурића у структуру бетона, пресецају се отворене (капиларне) поре, што за последицу има нижу вредност упијања и продора воде.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има неповољан утицај на водонепропустљивост бетона у односу на обичан (референтни) бетон. Слаба међуфазна веза између цементне пасте и зрна дробљене гуме повећава водопропустност бетона, као што је наведено у истраживању Munoz-Sanchez и др. [108]. Такође, дубина продирања воде се повећава са повећањем количине CR у бетону због веће количине ваздушних шупљина заробљених у бетону током мешања [21], [27], [107].
- Највиша вредност дубине продора воде постигнута је код бетона са додатком 2.5% дробљене гуме (P-17), и износи 42 mm, док је најнижа вредност постигнута код бетона са хемијским додатком аеранта (P-5) и износи 24 mm.

На основу мерења масе упијене воде и срачунатих средњих вредности упијене воде по површини, добијени су резултати који су приказани у Табели IV-15, а вредности количине упијања воде и срачунате средње вредности упијања воде по површини за ову групу бетона графички су приказане на Слици V-7.



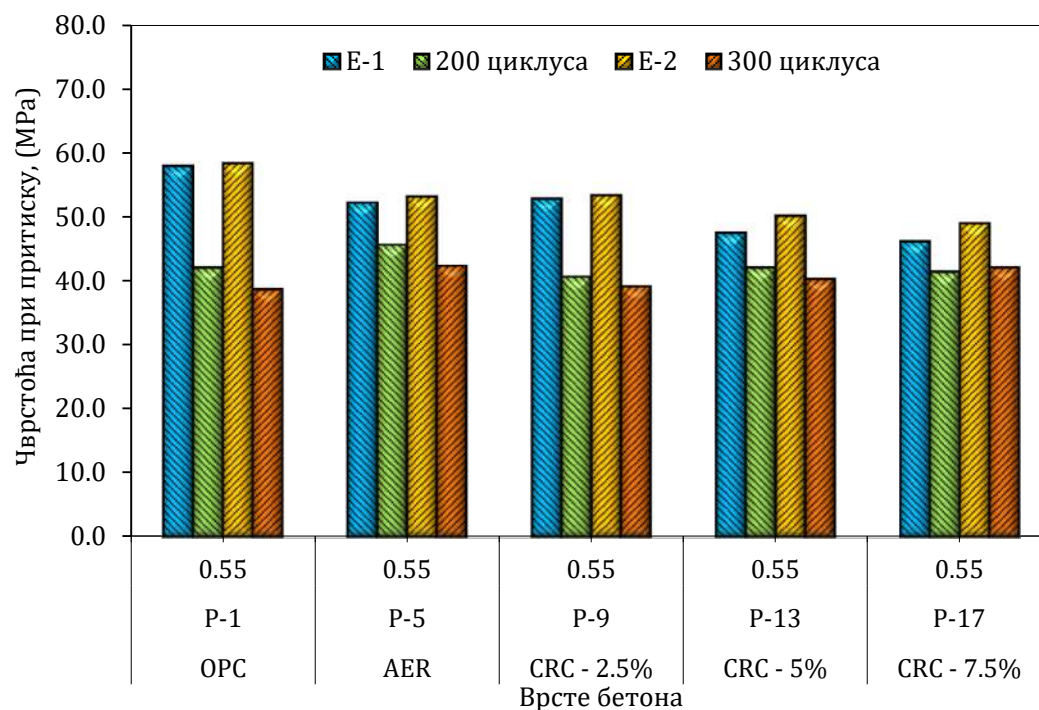
Слика V-7 – Вредности упијања воде бетони $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених мерењем маса и срачунатих вредности количине упијања воде, која је израчуната као маса по површини, за ову групу бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности упијања воде и срачунате вредности упијања воде по површини у бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 0.0107 (kg) до 0.029 (kg) и од 2.41 (kg/m²) до 6.56 (kg/m²), респективно. Најнижа вредност упијања воде и упијања воде по површини, је забележена код бетона P-5, која износи 0.0107 (kg), односно 2.41 (kg/m²). Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су највеће вредности код ове врсте бетона и то: 0.0243 (kg), 0.0277 (kg) и 0.0290 (kg), односно 5.51 (kg/m²), 6.26 (kg/m²) и 6.56 (kg/m²), респективно.
- Додавање дробљене гуме за ову групу бетона има неповољан утицај јер се са њеним додавањем упијање воде повећава, што је потврђено и у истраживањима [43], [74], [97].

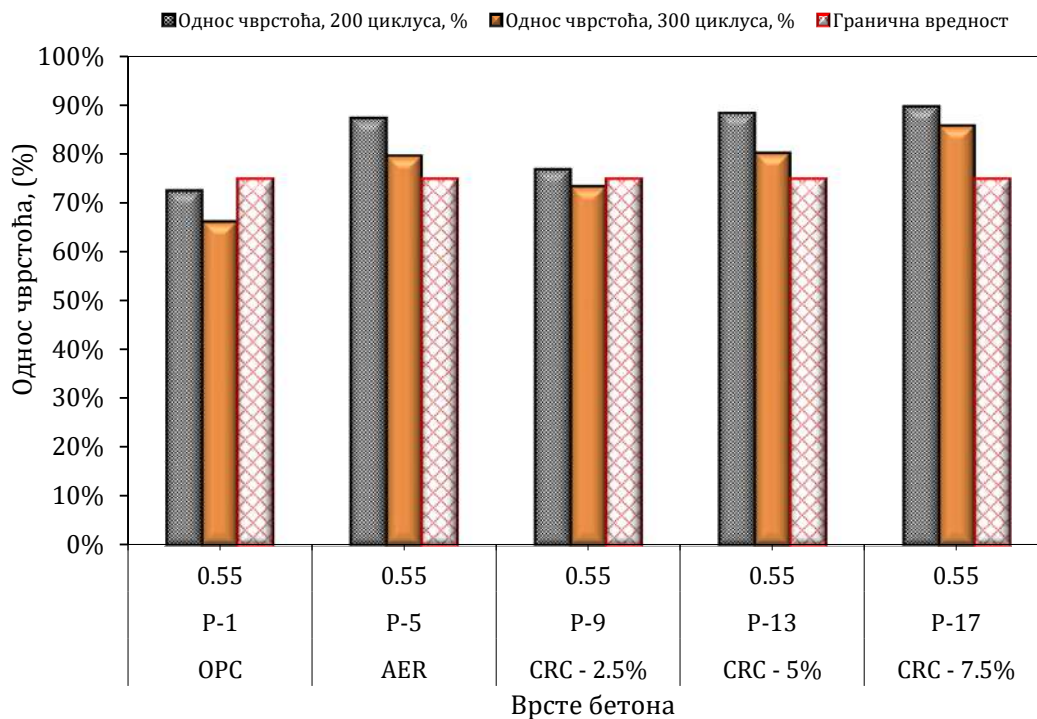
1.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза дати су у Табели IV-16. Резултати испитивања чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-8.



Слика V-8 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетона $w/c=0.55$

Однос чврстоће при притиску узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака приказан је графички на Слици V-9.



Слика V-9 – Однос чврстоћа узорака након дејства мраза и еталонских узорака $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорака (Е-1), који су испитани у еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 46.3 (МПа) до 58.0 (МПа), респективно.
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17 након 200 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорака који нису замрзавани за: 27%, 13%, 23%, 12% и 10%, респективно.
- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорака (Е-2), који су испитани у еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 49.1 (МПа) до 58.4 (МПа), респективно.

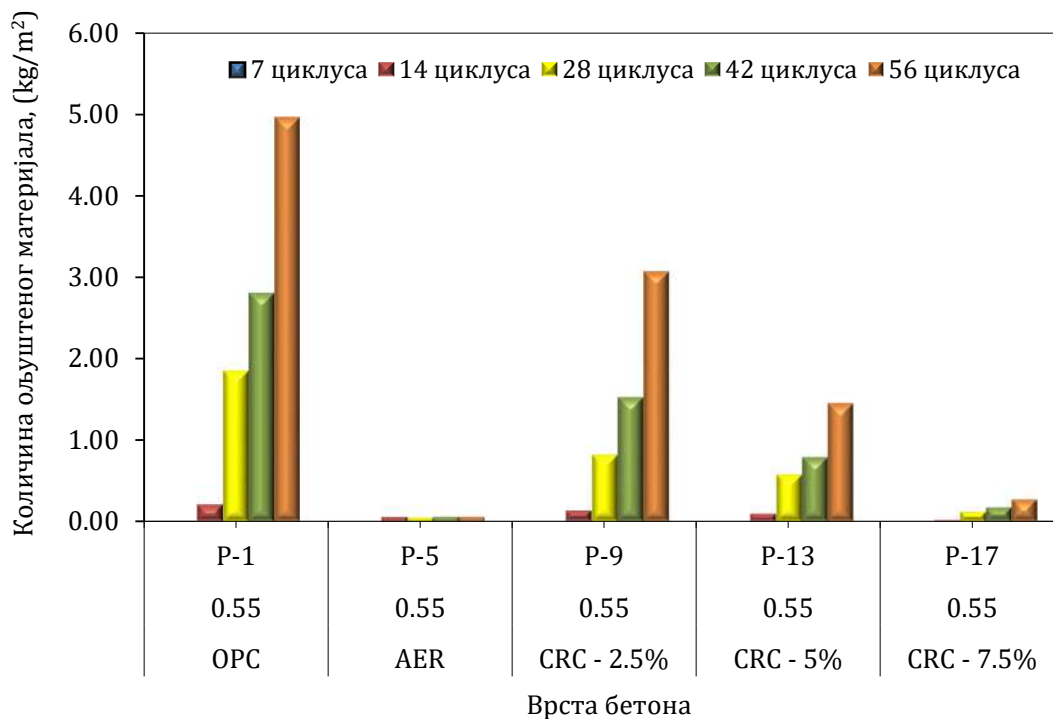
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17 након 300 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорака који нису замрзавани за: 34%, 20%, 27%, 20% и 14%, респективно.
- На основу добијеног односа чврстоће након 200 циклуса замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака, обичан (референтни) бетон (P-1) је постигао 73% чврстоће, што не задовољава услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорака од 75% према табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023. Сви остали бетони у овој групи: бетон са хемијским додатком аеранта (P-5), бетони са запреминском заменом 2.5% (P-9), 5% (P-13) и 7.5% (P-17) дробљене гуме ситним агрегатом, задовољавају услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорака од 75% према табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- На основу добијеног односа чврстоће након 300 циклуса замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака, обичан (референтни) бетон (P-1) и бетон са запреминском заменом 2.5% дробљене гуме (P-9) су постигли однос чврстоће од 66% и 73%, респективно, што не задовољава услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорака од 75% према табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023. Сви остали бетони у овој групи: бетон са хемијским додатком аеранта (P-5), бетони са запреминском заменом 5% (P-13) и 7.5% (P-17) дробљене гуме ситним агрегатом, задовољавају услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорака од 75% према табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Бетонске мешавине са запреминском заменом од 5% (P-13) и 7.5% (P-17) ситног агрегата дробљеном гумом имају позитиван утицај на чврстоћу при притиску код узорака који су испитивани након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања, јер су код ових бетона добијене веће чврстоће у односу на обичан (референтни) бетон (P-1). Њихове вредности су биле веће и од бетона са хемијским додатком аеранта (P-5).
- Повећан садржај ваздуха, настао током мешања бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 5% и 7.5%, допринео је

стварању довољног ваздушног простора у структури бетона за ширење леда током циклуса замрзавања и одмрзавања [48]. Такође, флексибилност дробљених зрна гуме, која омогућава компензацију напона затезања услед ширења леда у структури бетона, додатно побољшава отпорност бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања [84], [94], [110], [111].

- Значајно је напоменути да су притисне чврстоће свих бетона са дробљеном рециклираном гумом, након излагања циклусима замрзавања и одмрзавања и ширењу леда, премашиле чврстоћу обичног (референтног) бетона са природним агрегатом.

1.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање дати су у Табели IV-17. Резултати испитивања количине ољуспалог материјала за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-10.



Слика V-10 – Количина ољуштеног материјала бетони $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених количине ољуштеног материјала са површина бетонских узорак ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

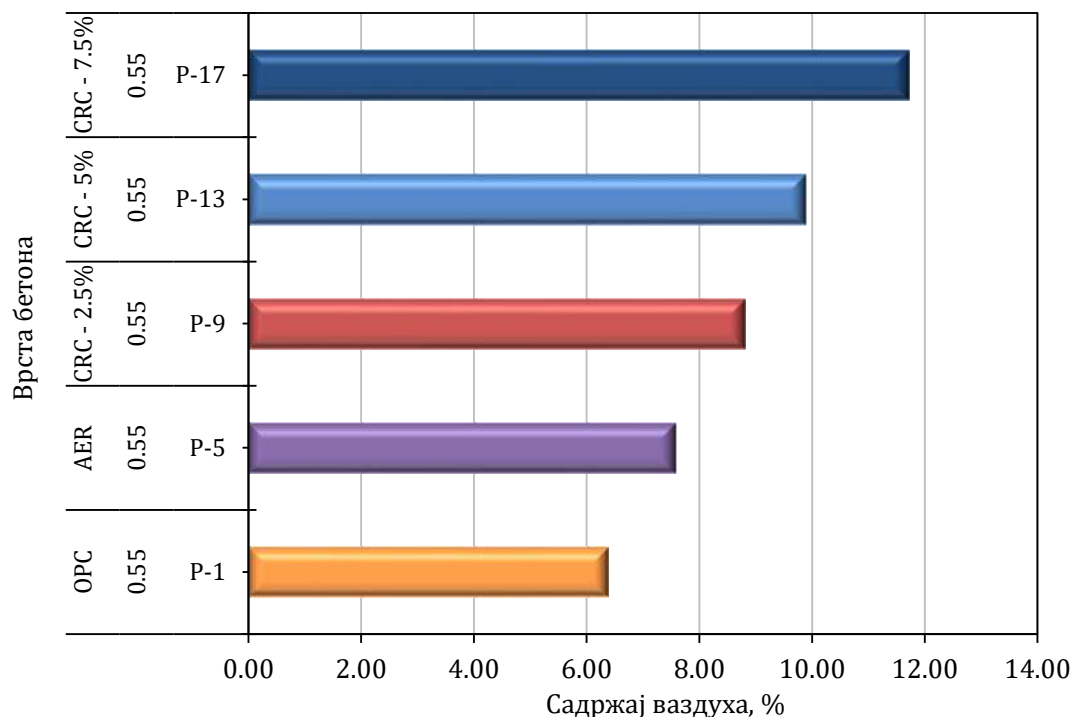
- Након 7 циклуса замрзавања/одмрзавања уз присуство соли, није дошло до значајног оштећења на површинама бетона, што указује на то да у овој раној фази није било љуштења на површинама бетона.
- На основу добијених вредности количина ољуштеног материјала након 14 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 0.02 (kg/m²) до 0.21 (kg/m²), респективно. Бетони са додатком аеранта и дробљене гуме (P-5, P-9, P-13, P-17) показали су ниже вредности ољуштеног материјала у односу на обичан (референтни) бетон (P-1). Бетон са запреминском заменом 7.5% (P-17) ситног агрегата дробљеном гумом показује најмању вредност.
- На основу добијених вредности, количина ољуштеног материјала која је добијена код бетонских мешавина (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варира од 0.05 (kg/m²) до 1.86 (kg/m²) након 28 циклуса, од 0.06 (kg/m²) до 2.81 (kg/m²) након 42 циклуса и од 0.06 (kg/m²) до 4.97 (kg/m²) након 52 циклуса, респективно.
- Након 28, 42 и 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, бетон са хемијским додатком аеранта (P-5) показује најмању вредност ољуштеног материјала са површине бетонских узорака. Код бетона са дробљеном гумом, најмања количина ољуштеног материјала забележена је код бетона са запреминском заменом 7.5% (P-17) ситног агрегата дробљеном гумом.
- Количине ољуштеног материјала код обичног (референтног) бетона (P-1) и бетона са 2.5% и 5% запреминском заменом дробљене гуме ситног агрегата (P-9 и P-13) прекорачиле су највећу дозвољену екстремну граничну вредност за количину ољуштеног материјала, према табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- На основу добијених вредности количина ољуштеног материјала, бетон са хемијским додатком аеранта (P-5) и бетон са запреминском заменом 7.5% (P-17) ситног агрегата дробљеном гумом, задовољавају захтеване највеће дозвољене граничне вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања према табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Бетонска мешавина са аерантом и мешавина са највишим процентом дробљене гуме (7.5%) су показале бољу отпорност на дејство мраза уз

присуство соли у поређењу са обичним бетоном и бетоном са нижим процентом дробљене гуме.

- Увођењем ситних сферичних пора ваздуха у структуру бетона додавањем хемијског додатка аеранта, обезбеђује се заштита бетона изложеног мразу, било да је у питању присуство соли за одмрзавање или не. Најбоља заштита постигнута је код бетона са додатком аеранта (P-5), што је потврђено најмањом количином ољуспалог материјала након 56 циклуса.
- Након 56 циклуса замрзавања-одмрзавања уз присуство соли, бетон са 7,5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом показао је најмању количину ољуспалог материјала у поређењу са осталим бетонима са заменом гуме. Овај резултат се приписује повећаном садржају ваздуха, који је током мешања остао распоређен између и унутар зрна дробљене гуме [38], [48], [112]. Додатно, флексибилност зрна дробљене гуме помогла је у смањењу напона затезања изазваних ширењем леда у структури бетона [84], [94], [110], [111].

1.2.6. Карактеризација ваздушних пора у очврслом бетону

Резултати испитивања садржаја ваздуха у очврслом бетону дати су у Табели IV-18. Вредности садржаја ваздуха за сваку врсту бетона из ове групе бетона приказане су графички на Слици V-11.



Слика V-11 - Вредности садржаја ваздуха бетони, $w/c=0.55$

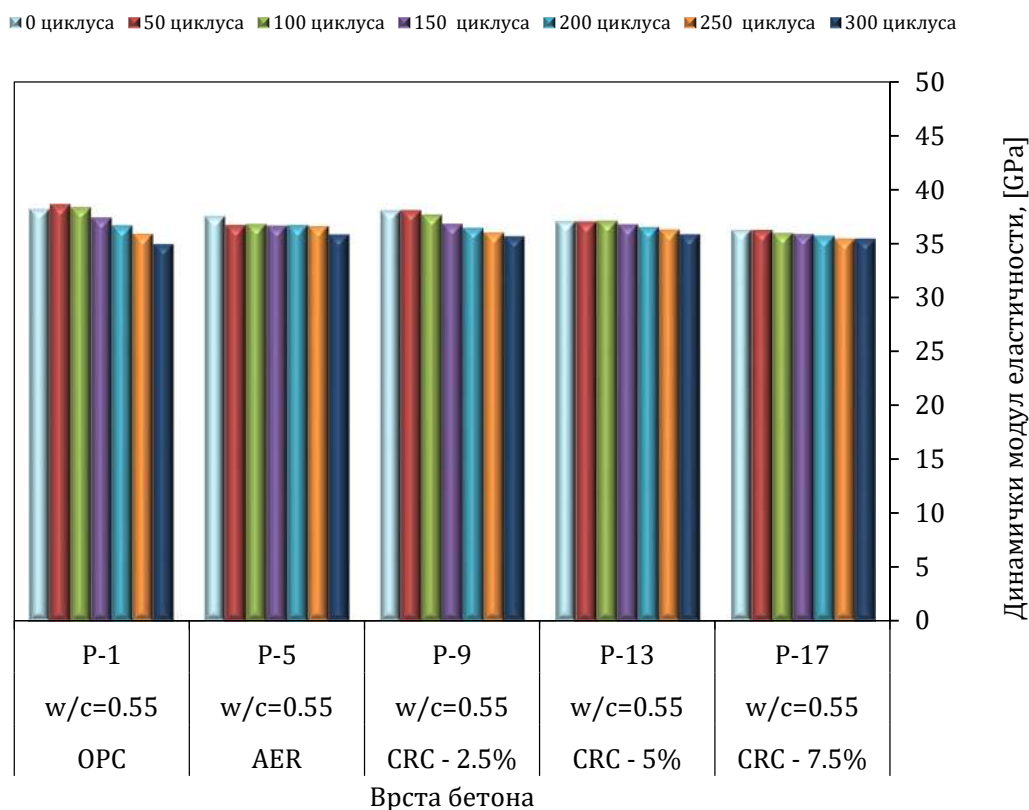
Анализом резултата на дијаграму, могу се извести следећи закључци за ову врсту бетона:

- На основу добијених вредности садржаја ваздуха у очврслом бетону у старости од 28 дана, вредности за бетоне (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 6.37 (%) до 11.71 (%), респективно. Најниже вредности садржаја ваздуха забележене су код бетона P-1 и P-5, које износе 6.37 (%) и 7.58 (%). Код бетона са додатком 2.5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су највеће вредности код ове врсте бетона и то: 8.80 (%), 9.89 (%) и 11.71 (%), респективно.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има утицај на повећање садржаја ваздуха у односу на обичан (референтни) бетон. Са повећањем садржаја дробљене гуме уочавају се веће вредности садржаја ваздуха у бетон.

- Највиша вредност садржаја ваздуха постигнут је код бетона са додатком 7.5% дробљене гуме (P-17), која износи 11.71(%), док је најнижа вредност постигнута код обичног (референтног) бетона (P-1) и износи 6.37 (%).
- Прегледом научне литературе, утврђено је да није било сличних истраживања која су се бавила испитивањем карактеристикама ваздушних пора у очврслом бетону са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом.

1.2.7. Динамички модул еластичности

Резултати испитивања динамичког модула еластичности дати су у Табели IV-19. Вредности динамичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-12.



Слика V-12 – Динамички модул еластичности бетони $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених испитивањем динамичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности динамичког модула еластичности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања, вредности за бетоне

(P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 36.2 (МПа) до 38.2 (МПа), респективно. Уочава се смањење вредности динамичког модула еластичности код P-5, P-9, P-13 и P-17, за 1.8%, 0.4%, 3.0% и 5.1% у односу на обичан (референтни) бетон. Са повећањем садржаја дробљене гуме вредности динамичког модула еластичности опадају у односу на обичан (референтни) бетон.

- У односу на добијене вредности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања и након 300 циклусима наизменичног замрзавања/одмрзавања, вредности динамичког модула еластичности имају тенденцију пада за: обичан (референтни) бетон P-1 износи 9%, код бетона са хемијским додатком аеранта P-5 износи 5%, а код бетона са запреминском заменом 2.5% , 5% и 7.5% (P-9, P-13, P-17) дробљеном гумом ситног агрегата 6%, 3% и 2%, респективно.
- Обичан (референтни) бетон (P-1) показује постепени пад динамичког модула еластичности како број циклуса замрзавања/одмрзавања расте, са највећим смањењем након 300 циклуса.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-5) показује мањи пад динамичког модула еластичности у поређењу са обичним бетоном. Тек након 300 циклуса замрзавања/одмрзавања, аерирани бетон је претрпео осетнији пад чврстоће при притиску.
- Бетони са уделом од 2.5%, 5%, 7.5% дробљене гуме (P-9, P-13, P-17) показују различите трендове смањења динамичког модула еластичности, при чему је смањење мање изражено код бетона са већим процентом дробљене гуме. Бетон са 2.5% дробљене гуме (P-9) показује сличан тренд као обичан (референтни) бетон, али са мањим укупним смањењем. Бетон са 5% дробљене гуме (P-13) је показао постепени пад модула еластичности, али, поређењу са P-9, задржао је већи проценат модула еластичности након 300 циклуса. Бетон са 7.5% дробљене гуме (P-17) показује најмање смањење динамичког модула еластичности од свих испитиваних мешавина, што сугерише бољу отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.
- Бетони са дробљеном гумом, посебно са већим процентима замене, показују већу отпорност на утицај ниских температура, у смислу смањења динамичког модула еластичности, у поређењу са обичним бетоном, чинећи

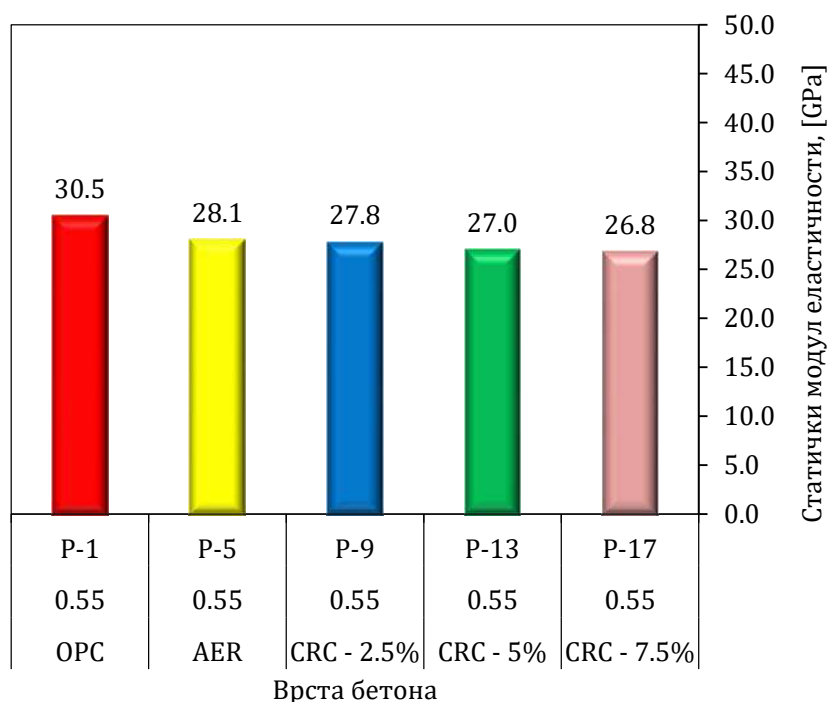
их погоднијим за употребу у условима где су чести циклуси замрзавања/одмрзавања.

- Гума као материјал има мањи динамички модул у односу на очврсли бетон. Са повећањем запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом, добијају се ниже вредности динамичког модула еластичности.
- Поред деформабилности зрна дробљене гуме у структури очврслог бетона садржај ваздуха који се ствара приликом мешања, како унутрашњи тако и око зрна дробљене гуме, чини бетон отпорним на циклусе замрзавања/одмрзавања [48], [84], [94], [110], [111].
- Смањење вредности динамичког модула еластичности услед повећања запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом, може се објаснити нижом специфичном тежином дробљене гуме у поређењу са природним ситним агрегатом, што повећава брзину проласка ултразвучног импулса кроз бетонски узорак [37].

1.2.8. Статички модул еластичности

Резултати испитивања статичког модула еластичности дати су у Табели IV-20.

Вредности статичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-13.



Слика V-13 – Статички модул еластичности бетони $w/c=0.55$

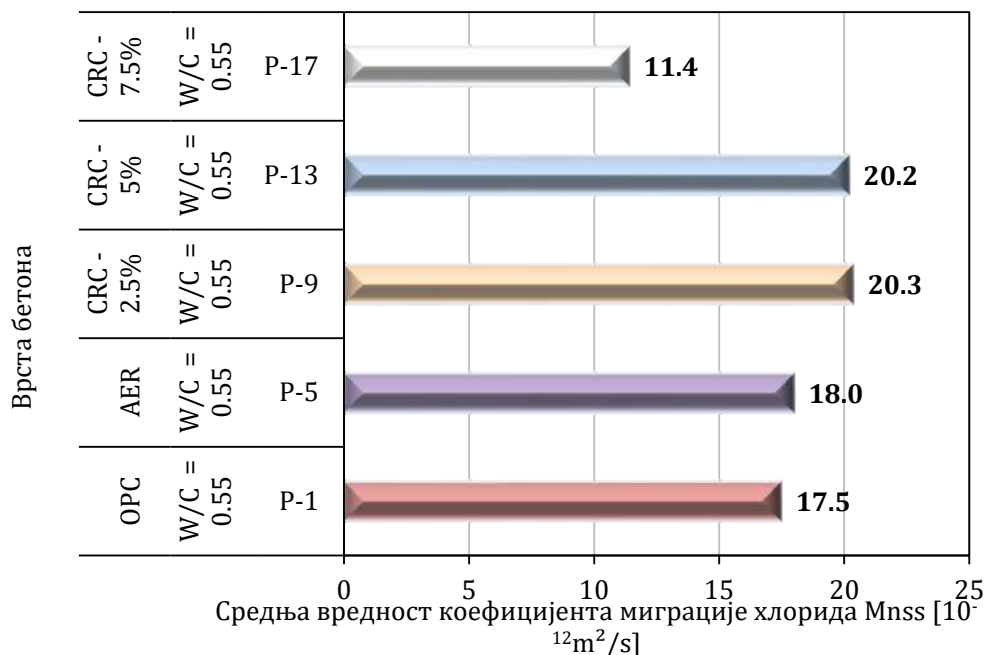
Анализом резултата добијених испитивањем статичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности статичког модула еластичности, уочавамо да вредности за (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 26.8 (GPa) до 30.5 (GPa). Уочава се смањење вредности статичког модула еластичности код P-5, P-9, P-13 и P-17 за 7.9%, 8.9%, 11.5% и 12.1% у односу на обичан (референтни) бетон (P-1). Са повећањем садржаја дробљене гуме, вредности статичког модула еластичности опадају у односу на обичан (референтни) бетон (P-1).
- Уочавамо да је највиша добијена вредност статичког модула еластичности постигнута код обичног (референтног) бетона (P-1). Ово указује на високу крутост и отпорност на деформације.
- Примена хемијског додатка аеранта има негативан утицај на статички модул еластичности аерираног бетона у поређењу са обичним (референтним) бетоном (P-1) јер се, услед формирања сферичних микропора ваздуха у структури бетонске матрице, смањује његова крутост, па је вредност статичког модула еластичности мања за 7.9%.
- Код бетона (P-9) са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом уочава се благо смањење статичког модула еластичности од 8.9% у односу на обични (референтни) бетон.
- Бетони (P-13 и P-17) са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом постигли су веома блиске вредности статичког модула еластичности. У поређењу са обичним (референтним) бетоном, постигли су смањење статичког модула еластичности за 11.5% и 12.1%, респективно. То показује да већи садржај дробљене гуме значајно утиче на смањење механичких својстава бетона код ове групе бетона.
- Смањење статичког модула еластичности бетона са рециклираном гумом је последица мање отпорности на деформације, односно ниже вредности модула еластичности гуме у односу на природни камени агрегат, као и слаба веза између зрна дробљене гуме и цементног камена, што је потврђено и другим истраживањима [59], [62].
- Додавање различитих материјала попут аераната и рециклиране гуме у бетон може неповољно утицати на његова механичка својства. Иако ове промене могу донети додатне предности као што су побољшана

термоизолација или већа отпорност на буку, важно је имати на уму да могу резултовати смањењем чврстоће и крутости бетона.

1.2.9. Коефицијент миграције хлорида

Резултати испитивања коефицијента миграције хлорида дати су у Табели IV-21. Добијене вредности коефицијента миграције хлорида приказане су графички на Слици V-14.



Слика V-14 – коефицијент миграције хлорида $w/c=0.55$

Анализом резултата добијених вредности коефицијената миграције хлорида ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

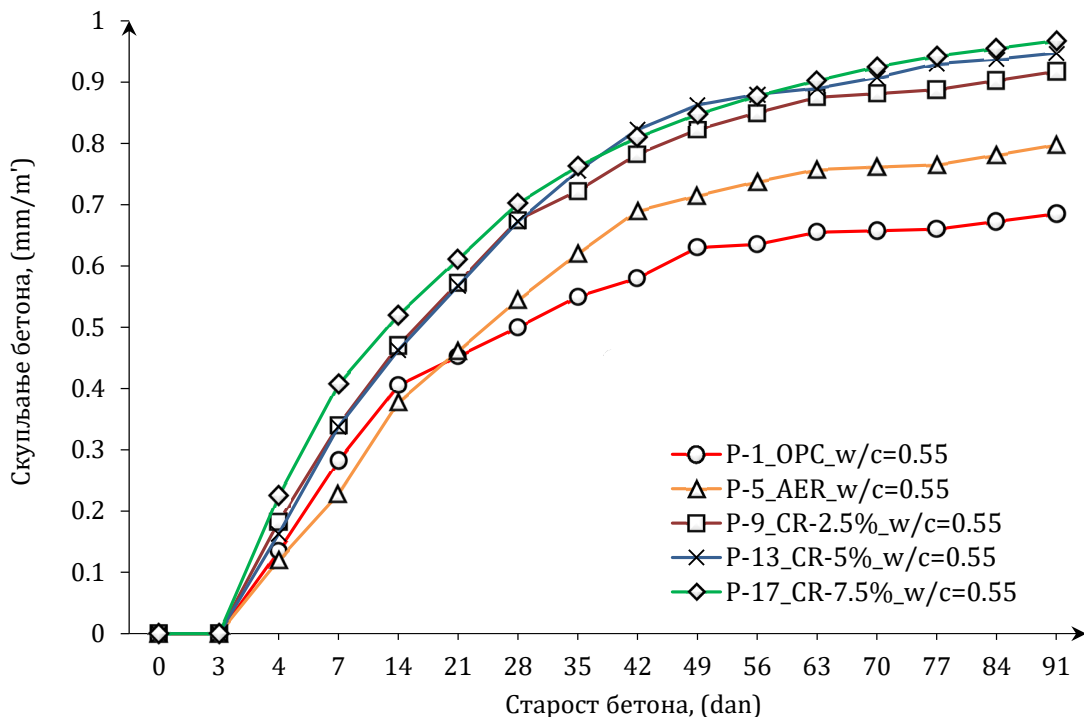
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида, уочавамо да вредности за (P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17) варирају од 11.4 до 20.3 [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]. Уочава се повећање вредности коефицијента миграције хлорида код P-5, P-9, P-13 и за 2.9%, %, 16.5% и 15.5% у односу на обичан (референтни) бетон (P-1), док се код P-17 та вредност смањује за 34.5%.
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида можемо закључити да бетон са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-17), са оствареним коефицијентом од 11.4 [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$], према дефинисаним критеријумима коефицијената миграције за појединачне и

просечне вредности, задовољава критеријуме за класу отпорности CL-1, односно класу изложености XD1 према Табели 10, тачке 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.

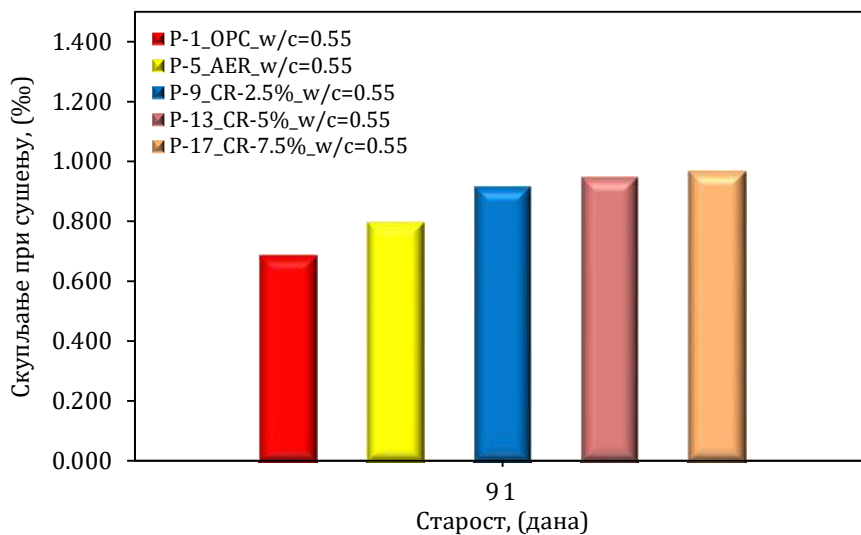
- Коефицијент миграције хлорида добијен код осталих бетонских мешавина не задовољава критеријуме дефинисане за класу отпорности и класу изложености према Табели 10, тачке 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Повећање отпорности бетона на продирање хлоридних јона при запреминској замени од 7,5% ситног агрегата дробљеном гумом може се приписати хидрофобним својствима гуме, која успорава продор хлоридних јона у структуру очврслог бетона. До сличног закључка су дошли и аутори Thomas и други [39]. Они су у свом раду истраживали утицај дробљене гуме која је замене ситног агрегата са дробљеном гумом од 2.5% до 20%. Уочили су да је дубина продирања хлорида у бетон са 2.5–7.5% гумених мрвице мања или једнака бетону контролне мешавине.
- Очигледно је да је количина запреминске замене од 2.5 и 5% недовољна за побољшање отпорности бетона на продор хлоридних јонда. Код аерираног бетона, висок водоцементни фактор ($w/c=0.55$) ствара систем повезаних пора које су допринеле већој вредности коефицијента миграције хлорида у односу на обичан (референтни) бетон.
- Zhu и други [65] у свом раду су се бавили истраживањем фактора која утичу на корозију арматурне шипке у бетону. Установили су да степен корозије бетона у контакту са хлоридном сољу примарно зависи од притиска финих пора у структури очврслог бетона. Захваљујући утицају контактеног угла додавањем гуменог агрегата, може се променити притисак у овим порама и тако смањити интензитет корозије челика.

1.2.10. Скупљање при сушењу

Резултати испитивања скупљања при сушењу свих врста бетона дати су у Табелама IV-22 до IV-26. Скупљање при сушењу бетона приказано је графички на Слици V-15, а коначне вредности скупљања након 3 месеца испитивања на Слици V-16.



Слика V-15 – Скупљање при сушењу бетони $w/c=0.55$



Слика V-16 – Коначне вредности скупљања при сушењу бетона $w/c=0.55$ након 3 месеца испитивања

Анализом резултата на приказаним дијаграмима, могу се извести следећи закључци:

- У првим данима након уградње, сви бетони показују најизраженије скупљање које се, са временом, постепено смањује. Након 28 дана, код бетонских мешавина P-1, P-5, P-9, P-13 и P-17, скупљање варира од -0.497 (‰) до -0.698 (‰).
- Обичан (референтни) бетон (P-1) је након 91 дана имао најмању вредност скупљања од -0.687 (‰), са уједначеним трендом скупљања при сушењу до цца 60 дана. Након ове старости, вредности конвергирају ка коначној вредности, али са умерено растућим трендом.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-5) након 91 дана имао је скупљање од -0.795 (‰), што је више за 15.7% у односу на обичан (референтни) бетон (P-1). Скупљање је такође најинтензивније у раним фазама, након чега је тренд и даље растући током времена.
- Бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата са дробљеном гумом (P-9, P-11 и P-17), након 91 дана показали су скупљање од -0.922‰ до -0.965‰, респективно, што чини повећано скупљање за 34.1%, 38.3% и 40.4% у односу на обичан (референтни) бетон (P-1). Код ових бетона уочава се растући тренд скупљања и након 91 дана.
- Бетони са додатком гуме имају негативан утицај на скупљање, јер се са повећавањем количине дробљене гуме у структури очврслог бетона скупљање значајно повећава у односу на обичан (референтни) бетон. Овакво понашање бетона са рециклираном гумом може се приписати већој количини слободне воде у структури бетона (хидрофобне честице гуме), али и мањој отпорности ове врсте бетона на скупљање у односу на референтни бетон са природним каменим агрегатом.
- Прегледом литературе пријављено је да је скупљење услед сушења бетона CRC веће у односу на референтну бетонску мешавину. Већи удео CR у смеши узроковао је прекомерно скупљање при сушењу, што се може приписати повећаном броју ваздушних пора које омогућавају брже испаравање воде из смеше [18], [58].

2. БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $W/C=0.50$

У ову групу спада пет врста бетона који су справљени са истом врстом и количином цемента од 360 kg/m^3 , са истом врстом агрегата и процентуалним учешћем фракција у гранулометријском саставу мешавине агрегата, уз водоцементни однос ($w/c=0.50$). Коришћен је суперпластификатор у количини од 0.5% у односу на масу цемента. Код бетона са хемијским додатком аеранта, примењен је аерант у количини од 0.008% у односу на масу цемента. Такође, дробљена гума је коришћена као запреминска замена ситног агрегата у процентима од 2.5%, 5% и 7.5%.

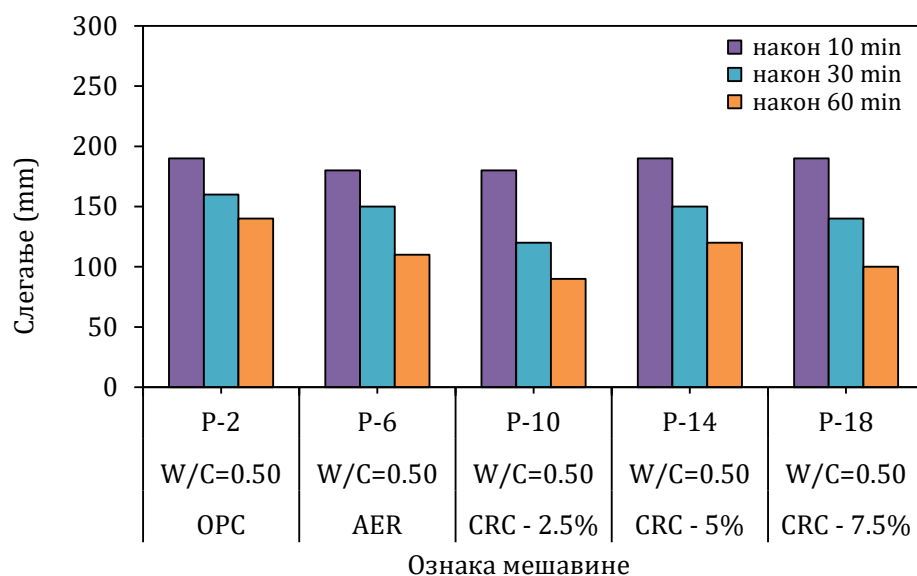
Врсте бетона су:

1. Обичан (референтни) бетон (P-2),
2. Бетон са хемијским додатком аеранта (P-6),
3. Бетон са запреминском заменом 2.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-10),
4. Бетон са запреминском заменом 5.0% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-14) и
5. Бетон са запреминском заменом 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-18).

2.1. Свеж бетон

2.1.1. Конзистенција слегањем

Резултати мерења конзистенције слегањем испитиваних врста бетона дати су у Табели IV-10, док су резултати мерења конзистенције слегањем за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом графички приказани на Слици V-17. Слегања су праћена током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-17 – Конзистенција методом слегања бетони $w/c=0.50$

Ознаке мешавина бетона на слици:

OPC – Обичан (референтни) бетон,

AER – Бетон са хемијским додатком аеранта,

CRC – 2.5%, 5.0%, 7.5% - Бетони са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом

Анализом резултата добијених испитивањем запреминских маса ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

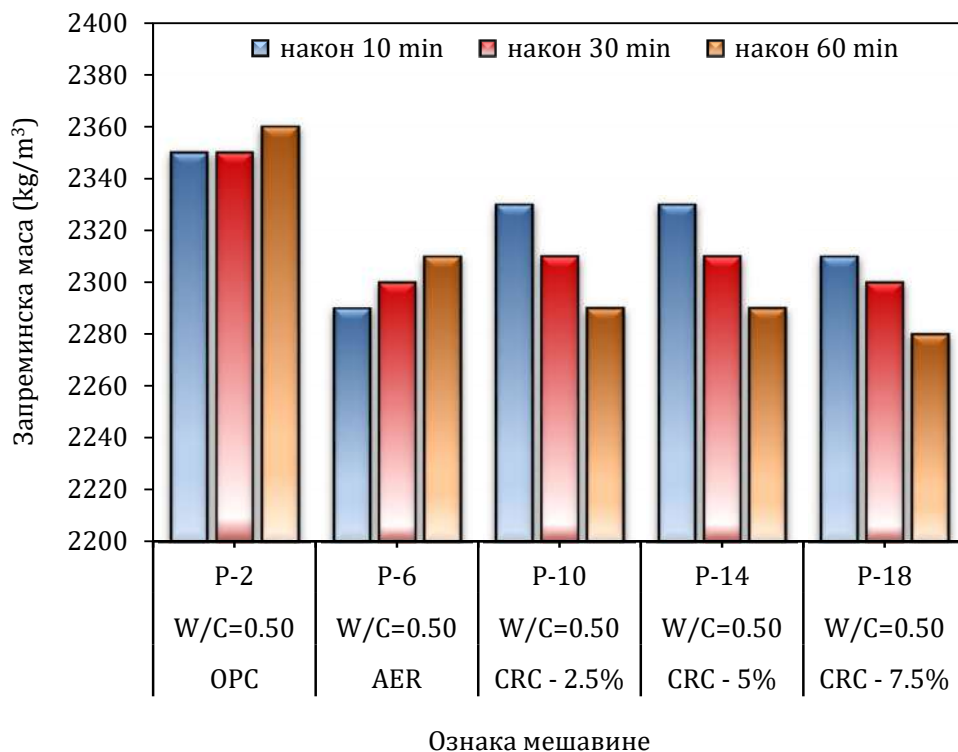
- На основу добијених мера слегања након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) задовољавају критеријум за класу S4 у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- На основу резултата слегања бетона након 30 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, може се закључити да бетон P-2 задовољава

критеријум за класу слегања S4, док бетони P-6, P-10, P-14 и P-18 задовољавају критеријум за класу слегања S3, у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.

- Слегање бетона након 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину: бетони P-2, P-6, P-14 и P-18 задовољавају критеријум за класу слегања S3, док бетон P-10 задовољава критеријум класе конзистенције S2, у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- Слегање бетона кроз време се смањује за све врсте бетона. Код бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 5% и 7.5% (P-14 и P-18), уочено је повећање слегања мерено након 30 минута у односу на бетон са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 2.5% (P-10) за 25% и 16,67%, респективно. Ово повећање мерено након 60 минута износи 33.33% за P-14 и 11.11% за P-18.
- Слегања бетона након 30 и 60 минута за све бетоне се смањују у односу на слегање након 10 минута од момента додавања воде и износе: P-2 (16% и 26%), P-6 (17% и 39%), P-10 (33% и 50%), P-14 (21% и 37%) и P-18 (26% и 47%), респективно.
- Све бетонске мешавине су изгледале кохезивно и повезано; при испитивању мере слегања није долазило до сегрегације, издавања воде, цемента и фракције агрегата, и бетони су се лако уградили у калупе.
- Конзистенција бетона опада када се агрегат делимично замењује са 2,5% рециклиране гуме. Овај ефекат се објашњава повећаном потребом за воду, која настаје због хrapаве површине честица гуме [70], [71], [72], [73].
- Са већим уделом рециклиране гуме у мешавини, конзистенција се побољшава. Ово побољшање је последица повећаног присуства слободне воде у структури бетона, које је изазвано већом количином хидрофобних честица гуме [44, 74, 75].

2.1.2. Запреминска маса

Резултати мерења запреминске масе испитиваних врста бетона дати су у Табели IV 11, а прорачунате вредности запреминских маса за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-18. Запреминске масе су праћене кроз време, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-18 – Запреминска маса бетони $w/c=0.50$

Анализом резултата добијених испитивањем запреминских маса ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

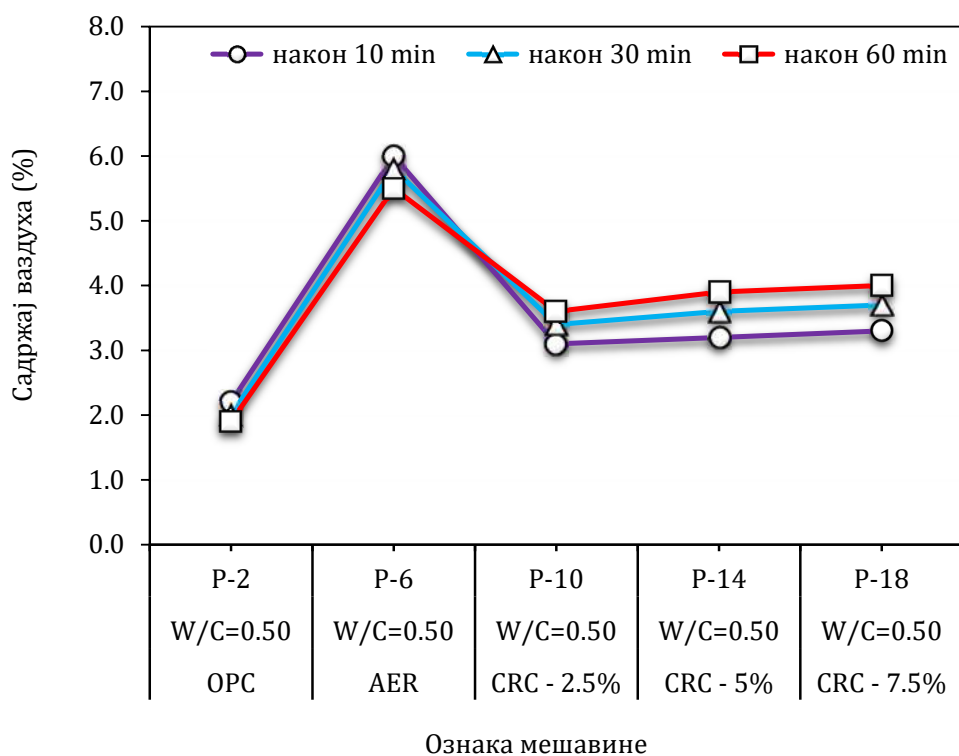
- На основу добијених вредности запреминских маса бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) су имали запреминску масу у опсегу од 2290 до 2350 kg/m³. Запреминске масе бетона код мешавина П-6, П-10, П-14 и П-18, мерених након 10 минута од додавања воде, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-2 за 2.6%, 0.9%, 0.9% и 1.7%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-2 и P-6 вредности запреминских маса бетона мерених након 30 и 60 минута од додавања воде биле су исте или више у

односу на мерења након 10 минута, за 0% и 0.4% за P-2, и 0.4% и 0.9% за P-6, респективно. За бетонске мешавине P-10, P-14 и P-18 добијене су ниже вредности за 0.9% и 1.7% за P-10 и P-14, и 0.4% и 1.3% за P-18.

- Сви бетони су се лако уграђивали у калупе помоћу первибратора.
- Смањење запреминске масе бетона при замени дела агрегата дробљеном гумом произлази из мање запреминске масе гуме у поређењу са природним агрегатом, као и из присуства заробљеног ваздуха између гумених честица и цементног малтера, који се повећава са повећањем количине CR [12], [22], [77], [91], [92].

2.1.3. Садржај ваздуха

Резултати мерења садржаја ваздуха испитиваних врста бетона дати су у Табела IV-10, а вредности садржаја ваздуха за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-19. Садржаји ваздуха су праћени током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-19 – Садржај ваздуха бетони $w/c=0.50$

Анализом резултата добијених испитивањем садржаја ваздуха ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

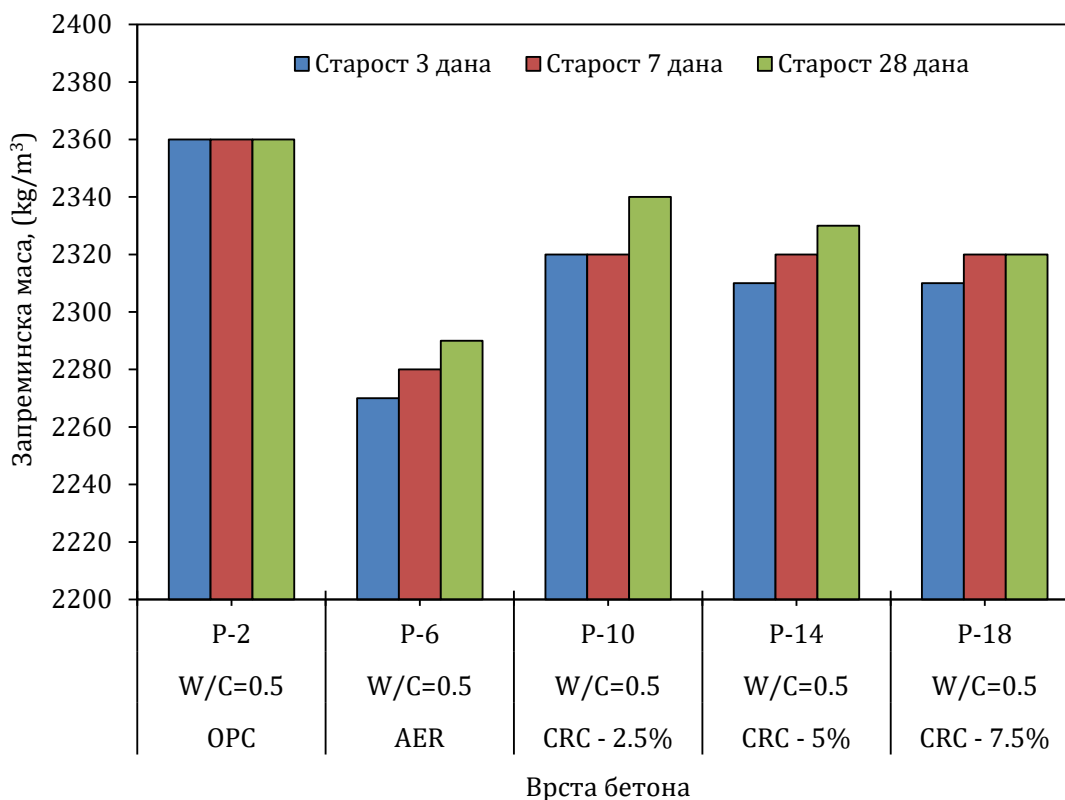
- На основу добијених вредности садржаја ваздуха бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) су имали количину ваздуха у опсегу од 2.2% до 6.0 %. Количине ваздуха у бетону код мешавина P-6, P-10, P-14 и P-18, мерене након 10 минута од додавања воде, биле су више у односу на бетонску мешавину P-2 за 172.8%, 40.9%, 45.5% и 50%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-2 и P-6, количине ваздуха у бетону мерених након 30 и 60 минута од додавања воде биле су ниже у односу на мерења након 10 минута, за 9.1% и 13.6% за P-2, и 3.3% и 8.3% за P-6, респективно. Код бетонских мешавина P-10, P-14 и P-18, добијене су веће вредности за 9.7% и 16.1% за P-10, 12.5% и 21.9% за P-14, и 12.1% и 21.2% за P-18.
- Повећање садржаја ваздуха након 30 и 60 минута у односу на вредности након 10 минута није уобичајена појава за садржај ваздуха у бетону. Обично се дешава да вредност садржаја ваздуха у бетону опада током времена. Може се претпоставити да је повећање садржаја ваздуха током времена настало услед повећаног трења између честица дробљене гуме и осталих материјала приликом мешања.
- Са повећањем садржаја гуме у саставу бетона повећава се и садржај ваздуха у бетону током времена мешања.
- У односу на обичну (референтну) бетонску мешавину, сви испитивани бетони имају вишу вредност садржаја ваздуха. Код бетона са хемијским додатком аерантом то је очекивано; међутим, повећањем запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом примећује се повећан садржај ваздуха у односу на референтну бетонску мешавину (ОРС). Овакво понашање забележено је и у истраживањима [12], [84].

2.2. Очврсли бетон

2.2.1. Запреминска маса

Резултати испитивања запреминских маса очврслог бетона дати су у Табели VI-13.

Вредности запреминских маса очврслог бетона приказане су графички на Слици V-20.



Слика V-20 – Запреминска маса очврслог бетона $w/c=0.50$

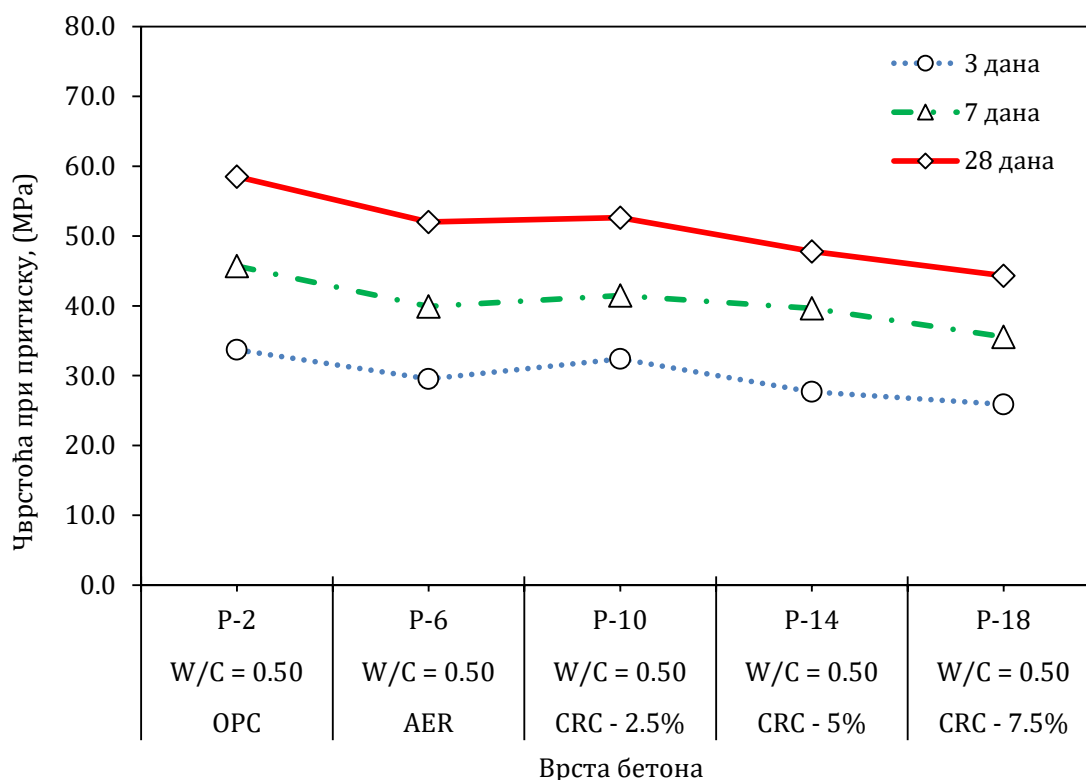
Анализом резултата добијених испитивањем запреминске масе ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности запреминске масе очврслог бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 2270 kg/m³ до 2360 kg/m³, од 2280 kg/m³ до 2360 kg/m³ и од 2290 kg/m³ до 2360 kg/m³, респективно. Запреминска маса бетона код мешавина P-6, P-10, P-14 и P-18, у старости од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-2 за 3.8%, 3.4% и 3.0%; 1.7%, 1.7% и 0.8%; 2.1%, 1.7% и 1.3%; и 2.1%, 1.7% и 1.7%, респективно.

- Сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу запреминску масу у односу на обичан (референтни бетон).
- Бетони са додатком аеранта показују највеће смањење запреминске масе, што је очекивано због присуства додатних ваздушних пора које су унешене у структуру бетона додавањем аеранта.
- Повећањем процентуалног садржаја дробљене гуме у бетону смањује се запреминска маса, што се може приписати мањој запреминској маси рециклиране гуме у односу на природни речни агрегат, као и заостао садржај ваздуха између честице дробљене гуме и цементног камена [12], [22], [77], [91], [92].

2.2.2. Чврстоћа при притиску

Резултати испитивања чврстоћа при притиску очврслог бетона дати су у Табели IV-14. Вредности чврстоћа при притиску очврслог бетона приказане су графички на Слици V-21.



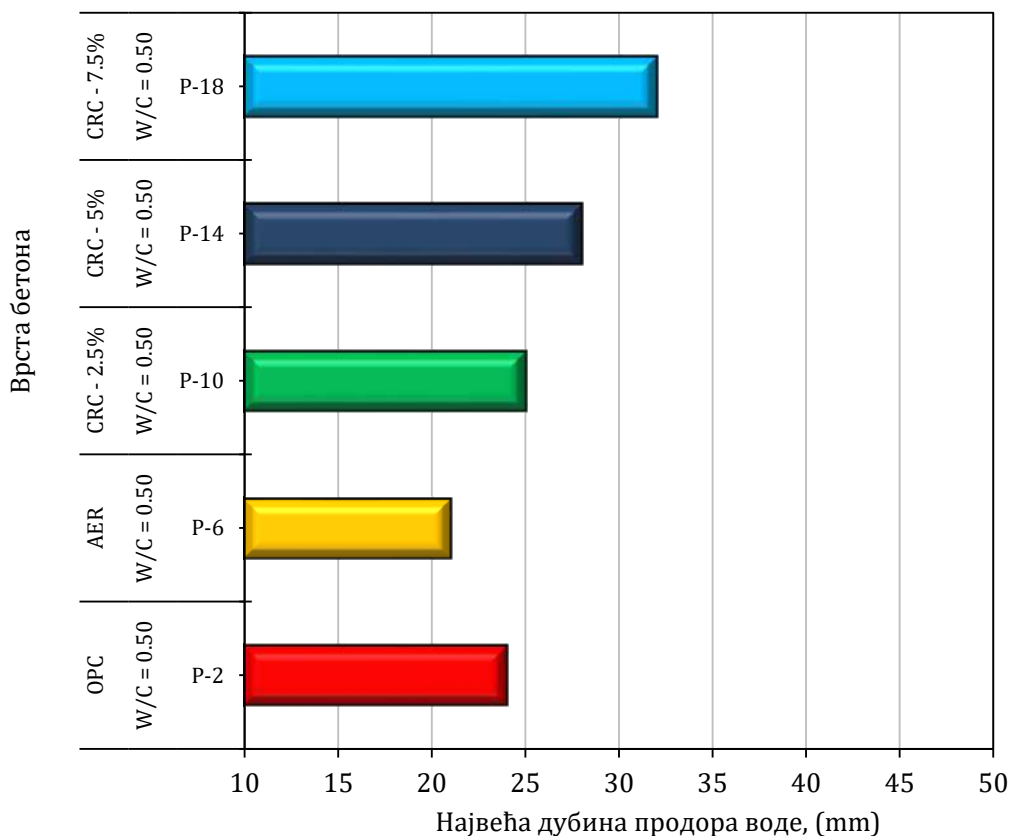
Слика V-21– Чврстоћа при притиску бетона $w/c=0.50$

Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 33.7 (МПа) до 58.5 (МПа), од 29.5 (МПа) до 52.0 (МПа), од 32.4 (МПа) до 52.6 (МПа), од 27.27 (МПа) до 47.8 (МПа) и од 25.9 (МПа) до 44.3 (МПа), респективно.
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-6, P-10, P-14 и P-18, у старости од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-2 за: 12.4 %, 12.7% и 11.1%; 3.9%, 9.2% и 10.0%; 17.8%, 13.2% и 18.3%; и 23.2%, 22.2% и 24.2%, респективно.
- Сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу чврстоћу при притиску у односу на обичан (референтни) бетон.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има неповољан утицај на чврстоћу при притиску у свим испитиваним старостима бетона. Резултат чврстоће при притиску у 28-дневној старости за бетон са највећим садржајем гуме од 7.5% износи 44.3 МПа, што указује да се оваква врста бетона може користити у конструкцијске сврхе. Додавање дробљене гуме има занемарљив утицај на ток развоја топлоте хидратације. Прираст чврстоће при притиску при старостима од 3, 7 и 28 дана је у већем делу идентичан у овој групи бетона.
- Највишу чврстоћу при притиску је постигао обичан (референтни) бетон са 28-дневном чврстоћом од 58.5 (МПа).

2.2.3. Водонепропустљивост бетона

Резултати испитивања дубине продора воде за наведене врсте бетона дати су у Табели IV-15. Вредности дубине продора воде бетона за сваку врсту бетона из ове групе бетона приказана су графички на Слици V-22.



Слика V-22 - Вредности дубине продора воде бетона $w/c=0.50$

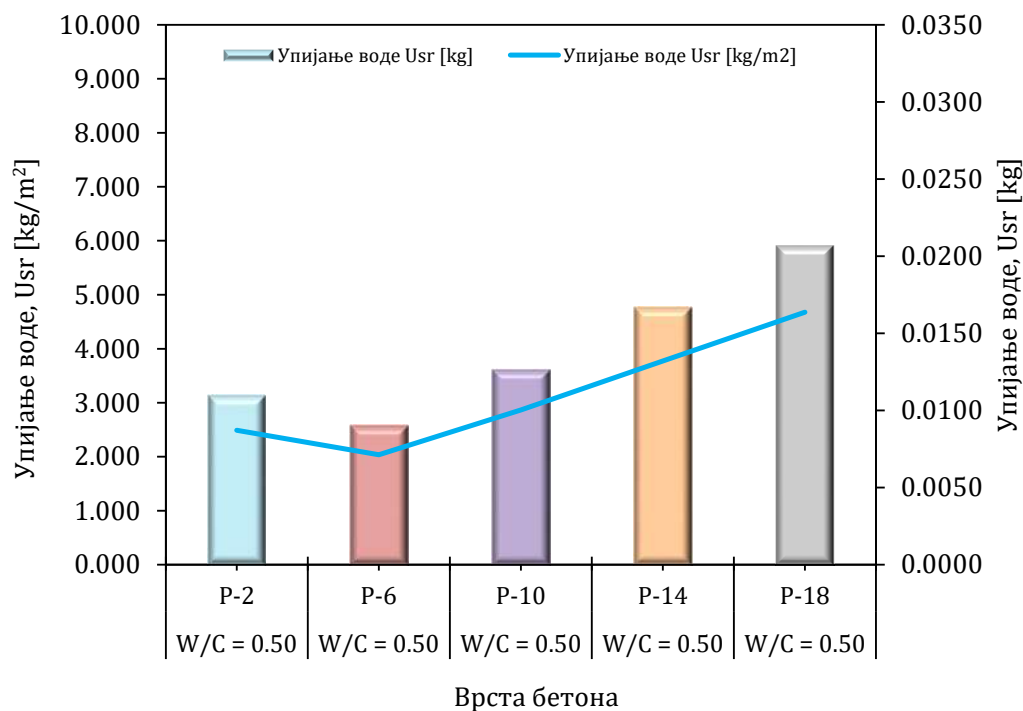
Анализом резултата на дијаграму, могу с б е извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности дубина продирања воде под притиском бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 21 (mm) до 32 (mm), респективно. Најнижа вредности дубине продирања воде под притиском забележена је код бетона P-6, која износи 21 mm, што задовољава услов за класу водонепропустљивости V-2, Табела 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су највеће вредности код ове врсте бетона и то: 25 mm, 28 mm и 32 mm, респективно, а задовољају услов за класу водонепропустљивости V-1 (P-

10 и P-14) и V-2 (P-18), према Табели 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023.

- Дубина продирања воде код мешавина P-10, P-14 и P-18 била је већа у односу на бетонску мешавину P-2 за: 33.3% и 29.2% и 4.2%, респективно, док је мешавина P-6 имала нижу вредност за 12.5%.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има неповољан утицај на водонепропустљивост бетона у односу на обичан (референтни) бетон. Слаба међуфазна веза између цементне пасте и зрна дробљене гуме повећава водопропустност бетона, као што је наведено и у истраживању Munoz-Sanchez и др. [108]. Такође, дубина продирања воде се повећава са повећањем количине CR у бетону због веће количине ваздушних шупљина заробљених у бетону током мешања [21], [27], [107].
- Највиша вредност дубине продора воде постигнута је код бетона са додатком 7.5% дробљене гуме (P-18), и износи 32 mm, док је најнижа вредност постигнута код бетона са хемијским додатком аеранта (P-6), а износи 21 mm.

На основу мерења масе упијене воде и срачунатих средњих вредности упијене воде по површини, добијени су резултати који су приказани у Табели IV-15, а вредности количине упијања воде и срачунате средње вредности упијања воде по површини за ову групу бетона графички су приказане на Слици V-23.



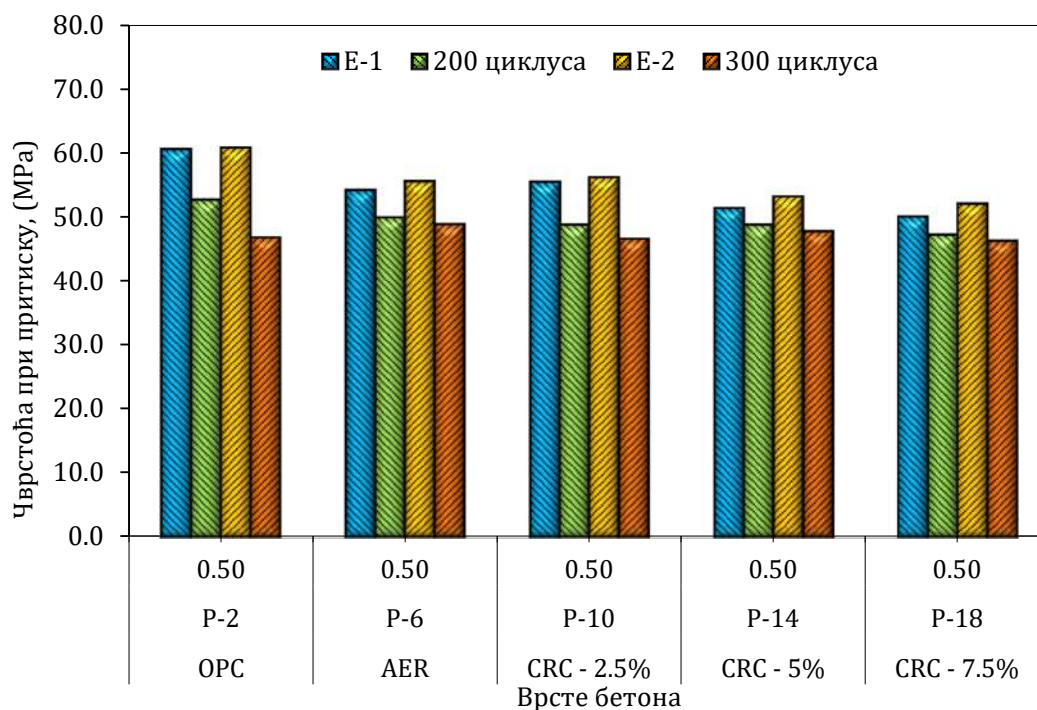
Слика V-23 - Вредности упијања воде бетона $w/c=0.50$

Анализом резултата добијених мерењем маса и срачунатих вредности количине упијања воде, која је израчуната као маса по површини, за ову групу бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности упијања воде и срачунате вредности упијања воде по површини у бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 0.0090 (kg) до 0.0207 (kg) и од 2.04 (kg/m²) до 4.68 (kg/m²), респективно. Најнижа вредност упијања воде и упијања воде по површини, забележене су код бетона P-6, а износе 0.0090 (kg), односно 2.04 (kg/m²). Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су највеће вредности и то: 0.0127 (kg), 0.0167 (kg) и 0.0207 (kg), односно 2.87 (kg/m²), 3.77 (kg/m²) и 4.68 (kg/m²), респективно.
- Додавање дробљене гуме за ову групу бетона има неповољан утицај јер се са њеним додавањем упијање воде повећава, што је потврђено и у истраживањима [43], [74], [97].

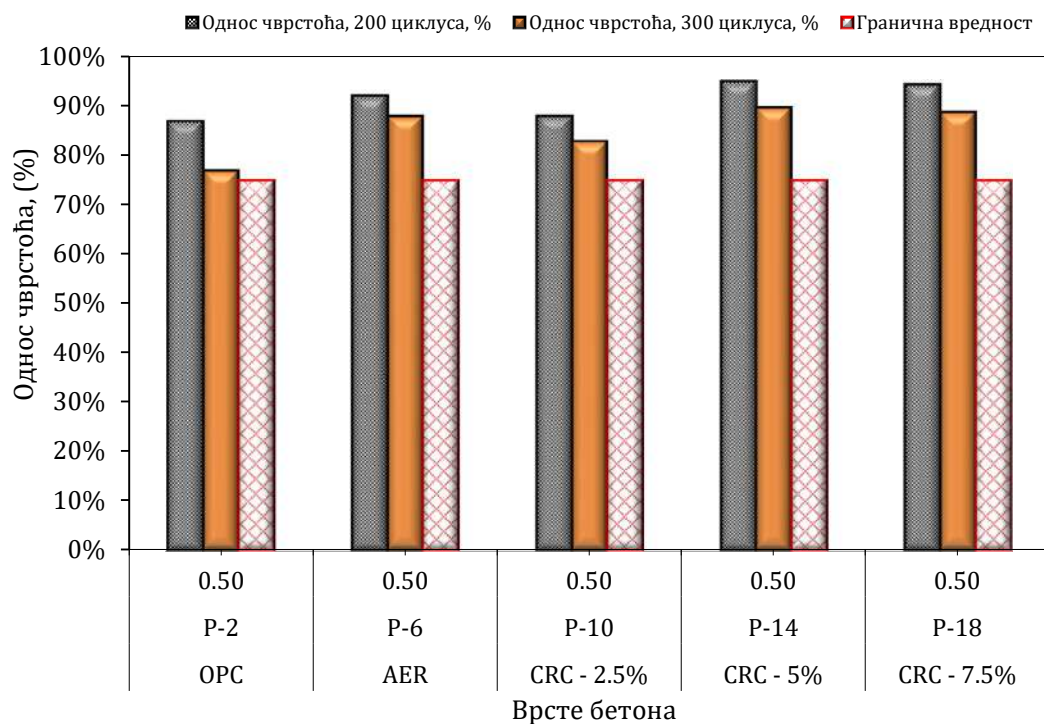
2.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза дати су у Табели IV-16. Резултати испитивања чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-24.



Слика V-24 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетона $w/c=0.50$

Однос чврстоће при притиску узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака приказан је графички на Слици V-25.



Слика V-25 – Однос чврстоћа узорка након дејства мраза и еталонских узорка $w/c=0.50$

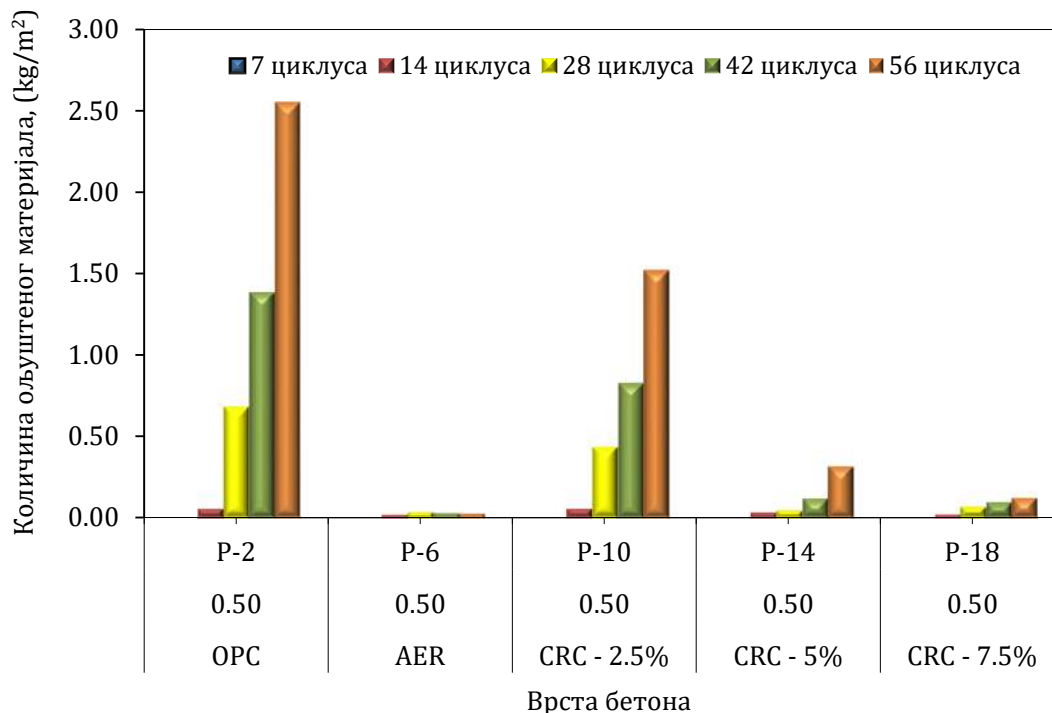
Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску еталонских узорка и узорка који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорка (Е-1), који су испитани ори еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 50.1 (МПа) до 60.6 (МПа), респективно.
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18 након 200 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорка који нису замрзавани за: 13%, 8%, 12%, 5% и 6%, респективно.
- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорка (Е-2), који су испитани при еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 52.1 (МПа) до 60.8 (МПа), респективно.

- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18 након 300 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорака који нису замрзавани за: 23%, 12%, 17%, 10% и 11%, респективно.
- На основу добијеног односа чврстоће након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака, сви бетони у овој групи постигли су однос чврстоће већи од 75%, што задовољава услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорака од 75% према Табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Бетонске мешавине са запреминском заменом од 5% (P-14) и 7.5% (P-18) ситног агрегата дробљеном гумом имају позитиван утицај на однос чврстоће при притиску код узорака који су испитивани након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања, јер су код ових бетона добијени већи односи чврстоће у односу на обичан (референтни) бетон (P-2). Њихове вредности су биле веће и од бетона са хемијским додатком аеранта (P-6).
- Повећани садржај ваздуха, генерисан током мешања бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом у процентима од 2.5%, 5% и 7.5%, обезбедио је довољан ваздушни простор у структури бетона за ширење леда током циклуса замрзавања и одмрзавања [48].
- Флексибилност дробљених зрна гуме, која смањује напоне затезања изазване ширењем леда у структури бетона, значајно доприноси побољшању отпорности бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања [84], [94], [110], [111].

2.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање дати су у Табели IV-17. Резултати испитивања количине ољуштеног материјала за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-26.



Слика V-26 – Количина ољуштеног материјала бетони $w/c=0.50$

Анализом резултата добијених количина ољуштеног материјала са површина бетонских узорака ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

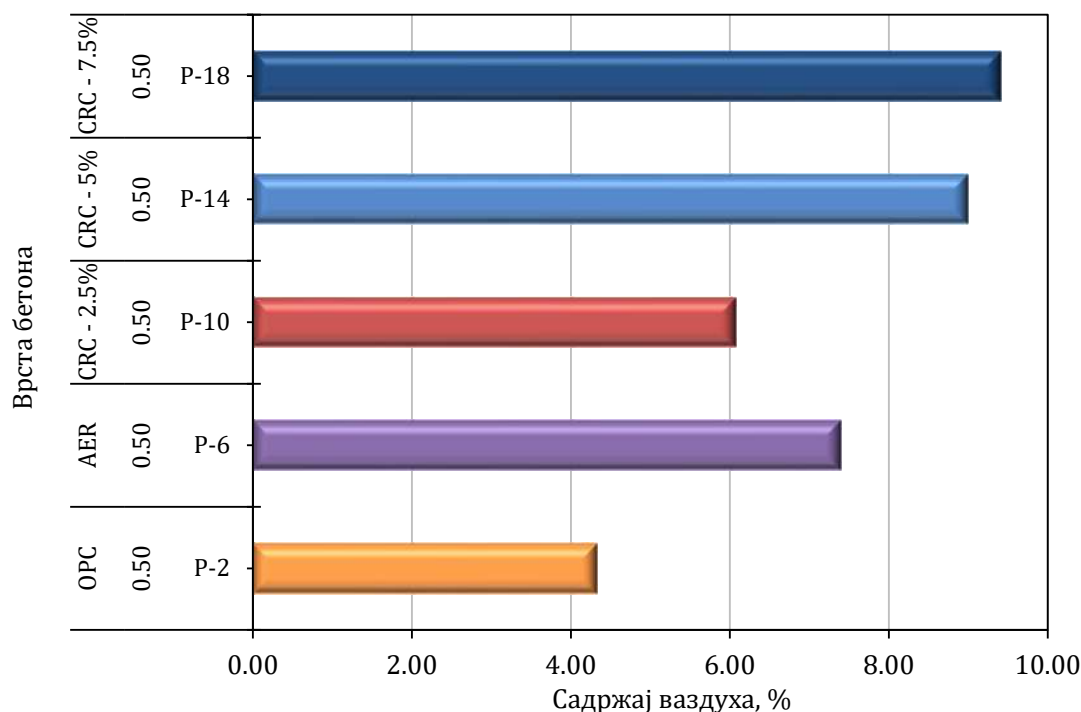
- Након 7 циклуса замрзавања/одмрзавања уз присуство соли, није дошло до значајног оштећења на површинама бетона, што указује на то да у овој раној фази није било љуштења на површинама бетона.
- Количина ољуштеног материјала која је добијена код бетонских мешавина (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варира од 0.02 (kg/m^2) до 0.06 (kg/m^2) након 14 циклуса, од 0.03 (kg/m^2) до 0.68 (kg/m^2) након 28 циклуса, од 0.03 (kg/m^2) до 1.39 (kg/m^2) након 42 циклуса и од 0.03 (kg/m^2) до 2.55 (kg/m^2) након 56 циклуса, респективно.
- Након 28, 42 и 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, бетон са хемијским додатком аеранта (P-6) показује најмању вредност ољуштеног материјала са површине бетонских узорака. Код бетона са дробљеном гумом,

најмања количина ољуштеног материјала забележена је код бетона са запреминском заменом 7.5% (P-18) ситног агрегата дробљеном гумом.

- Количина ољуштеног материјала код обичног (референтног) бетона (P-2) и бетона са 2.5% запреминском заменом дробљене гуме ситног агрегата (P-10) прекорачили су највећу дозвољену екстремну граничну вредност за количину ољуштеног материјала, како је наведено у Табели 12, тачка 5.3.4 стандарда СРПС ЕН У.М1.206:2023.
- На основу добијених вредности количина ољуштеног материјала, бетон са хемијским додатком аерантом (P-6) и бетони са запреминском заменом 5% и 7.5% (P-14 и P-18) ситног агрегата дробљеном гумом, задовољавају захтеване највеће дозвољене граничне вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања према Табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Бетонске мешавине са аерантом и вишим процентима дробљене гуме (5% и 7.5%) су показале бољу отпорност на дејство мраза уз присуство соли у поређењу са обичним (референтним) бетоном и бетоном са 2.5% запреминске замене дробљене гуме са ситним агрегатом.
- Додавањем хемијског додатка аеранта, у структуру бетона се уводе ситне сферичне поре ваздуха, чиме се обезбеђује адекватна заштита бетона од мраза, без обзира на присуство соли за одмрзавање. Најбољи ефекат постигнут је код бетона са аерантом (P-6), што је потврђено најнижом количином ољуштеног материјала након 56 циклуса.
- Бетони са 5% и 7.5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом показали су боље резултате у смислу количине ољуштеног материјала након 56 циклуса замрзавања и одмрзавања у условима присуства соли, у поређењу са бетоном који садржи 2.5% замене ситног агрегата гумом. Овај ефекат је последица повећаног садржаја ваздуха који се током мешања задржао у порама између и унутар зрна дробљене гуме [38], [48], [112]. Уз то, флексибилност зрна дробљене гуме допринела је смањењу напона затезања насталих услед ширења леда у структури бетона [84], [94], [110], [111].

2.2.6. Карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону

Резултати испитивања садржаја ваздуха у очврслом бетону дати су у Табели IV-18. Вредности садржаја ваздуха за сваку врсту бетона из ове групе бетона приказана су графички на Слици V-27.



Слика V-27 - Вредности садржаја ваздуха бетони $w/c=0.50$

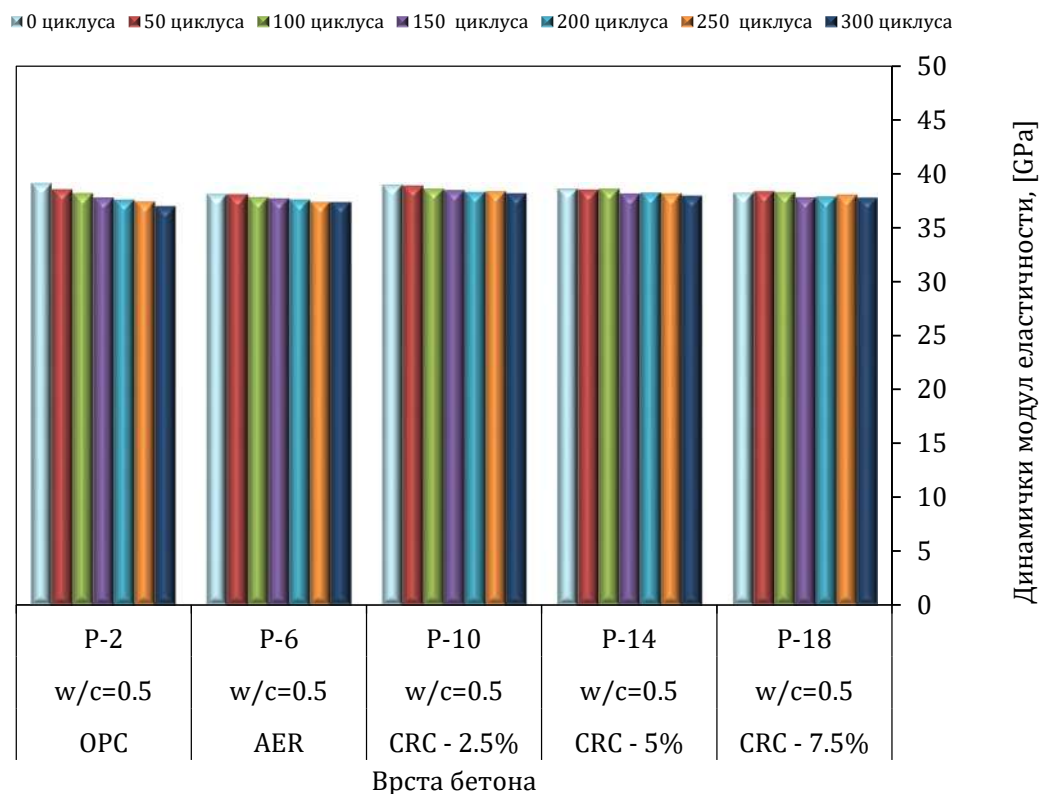
Анализом резултата на дијаграму, могу се извести следећи закључци за ову врсту бетона:

- На основу добијених вредности садржаја ваздуха у очврслом бетону у старости од 28 дана, вредности за бетоне (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 4.33 (%) до 9.41 (%), респективно. Најниже вредности садржаја ваздуха забележене су код бетона P-2 и P-10, које износе 4.33 (%) и 6.07 (%). Код бетона са додатком 2.5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су вредности 6.07 (%), 8.99 (%) и 9.41 (%), респективно.
- Са повећањем садржаја дробљене гуме добијају се веће вредности садржаја ваздуха.
- Повећањем процента дробљене гуме у бетону, расте и количина ваздуха у односу на обичан (референтни) бетон.

- Највиша вредност садржаја ваздуха постигнута је код бетона са додатком 7.5% дробљене гуме (P-18), а износи 9.41(%), док је најнижа вредност постигнута код обичног (референтног) бетона (P-2), и износи 4.33 (%).
- Прегледом научне литературе, утврђено је да није било сличних истраживања која су се бавила испитивањем карактеристикама ваздушних пора у очврслом бетону са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом.

2.2.7. Динамички модул еластичности

Резултати испитивања динамичког модула еластичности дати су у Табели IV-19. Вредности динамичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-28.



Слика V-28 – Динамички модул еластичности бетони $w/c=0.50$

Анализом резултата добијених испитивањем динамичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности динамичког модула еластичности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања, вредности за бетоне

(P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 38.1 (GPa) до 39.1 (GPa), респективно. Уочава се смањење вредности динамичког модула еластичности код P-5, P-9, P-13 и P-17, за 2.6%, 0.4%, 1.2% и 2.2% у односу на обичан (референтни) бетон. Са повећањем садржаја дробљене гуме, вредности динамичког модула еластичности опадају у односу на обичан (референтни) бетон.

- У односу на добијене вредности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања и након 300 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, вредности динамичког модула еластичности су за: обичан (референтни) бетон P-2 у опадању за 1.8%, код бетона са хемијским додатком аеранта P-6 у опадању за 5.4%, док код бетона са запреминском заменом 2.5% , 5% и 7.5% (P-10, P-14, P-18) ситног агрегата дробљеном гумом, редукције износе: 2%, 1.7% и 1.2%, респективно.
- Обичан (референтни) бетон (P-2) показује постепени пад динамичког модула еластичности како број циклуса замрзавања/одмрзавања расте, са највећим смањењем након 300 циклуса. Почетна вредност је 39.11 GPa, док се након 300 циклуса смањује на 36.99 GPa.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-6) показује мањи пад динамичког модула еластичности у поређењу са обичним бетоном. Почетна вредност динамичког модула еластичности је 38.10 GPa. Током 300 циклуса, вредност остаје стабилна, са минималним смањењем на 37.39 GPa. Смањење износи 0.71 GPa, што представља деградацију од 1.86%, указујући на врло добру отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.
- Бетони са запреминском заменом од 2.5%, 5%, 7.5% ситног агрегата дробљеном гумом (P-10, P-14, P-18) показују различите трендове смањења динамичког модула еластичности, при чему је смањење мање изражено код бетона са већим процентом дробљене гуме.
- Бетон са 2.5% дробљене гуме (P-10) има почетну вредност од 38.96 GPa. Након 300 циклуса, смањује се на 38.19 GPa. Смањење износи 0.77 GPa, односно деградација од 1.98%, што показује релативно добру отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.
- Бетон са 5% дробљене гуме (P-14) је претпео благо смањење модула еластичности, а бетон боље задржава својства након 300 циклуса у поређењу са P-10. Почетна вредност је 38.63 GPa, а након 300 циклуса износи 37.96 GPa.

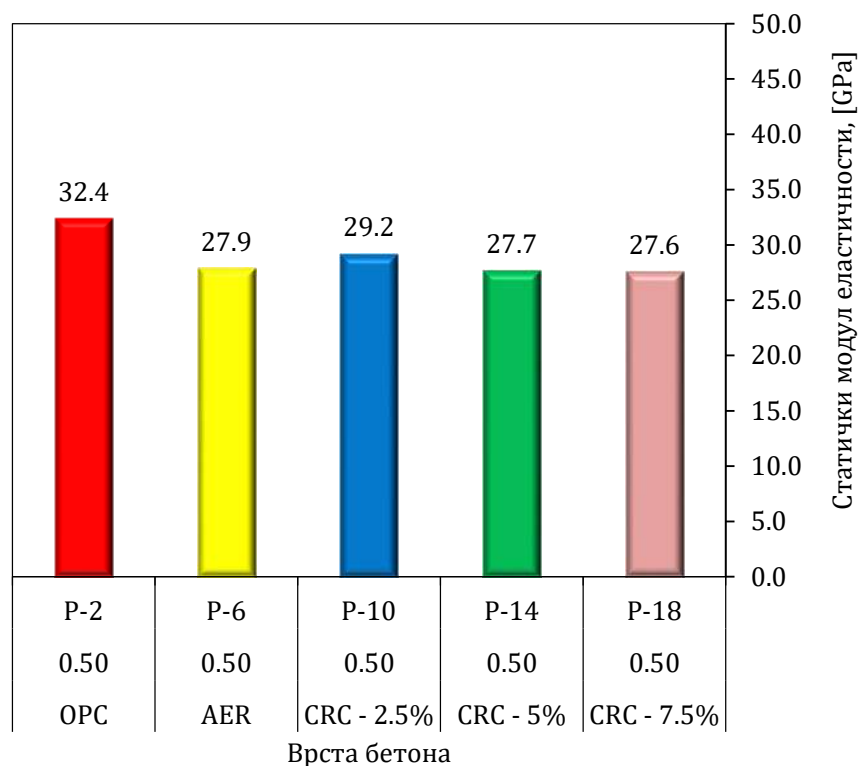
Смањење износи 0.67 GPa, што је редукција од 1.73%. Ови резултати показују да бетон са 5% дробљене гуме има добру отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.

- Бетон са 7.5% дробљене гуме (P-18) показује најмању деградацију модула еластичности, што га чини најотпорнијим на циклусе замрзавања/одмрзавања међу испитиваним мешавинама. Почетна вредност је 38.24 GPa, а након 300 циклуса 37.80 GPa. Смањење износи 0.44 GPa, што је деградација од 1.15%, указујући на врло добру отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.
- Бетони са дробљеном гумом, посебно са већим процентима замене, показују већу отпорност на смањење динамичког модула еластичности у поређењу са обичним (референтним) бетоном, чинећи их погоднијим за употребу у условима где су чести циклуси замрзавања/одмрзавања.
- Гума има нижи динамички модул у поређењу са очврслим бетоном. Како се повећава замена ситног агрегата дробљеном гумом, динамички модул еластичности опада.
- Поред деформабилности честица дробљене гуме у структури бетона, ваздух који се формира током мешања, и то и унутрашњи и око честица дробљене гуме, доприноси великој отпорности бетона на циклусу замрзавања и одмрзавања [44,], [84], [94], [110], [111].
- Смањење динамичког модула еластичности као последица повећања замене ситног агрегата дробљеном гумом може се објаснити нижом специфичном тежином дробљене гуме у односу на природни ситни агрегат, што доводи до веће брзине проласка и ултразвука [37].

2.2.8. Статички модул еластичности

Резултати испитивања статичког модула еластичности дати су у Табели IV-20.

Вредности статичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-29.



Слика V-29 – Статички модул еластичности бетони $w/c=0.50$

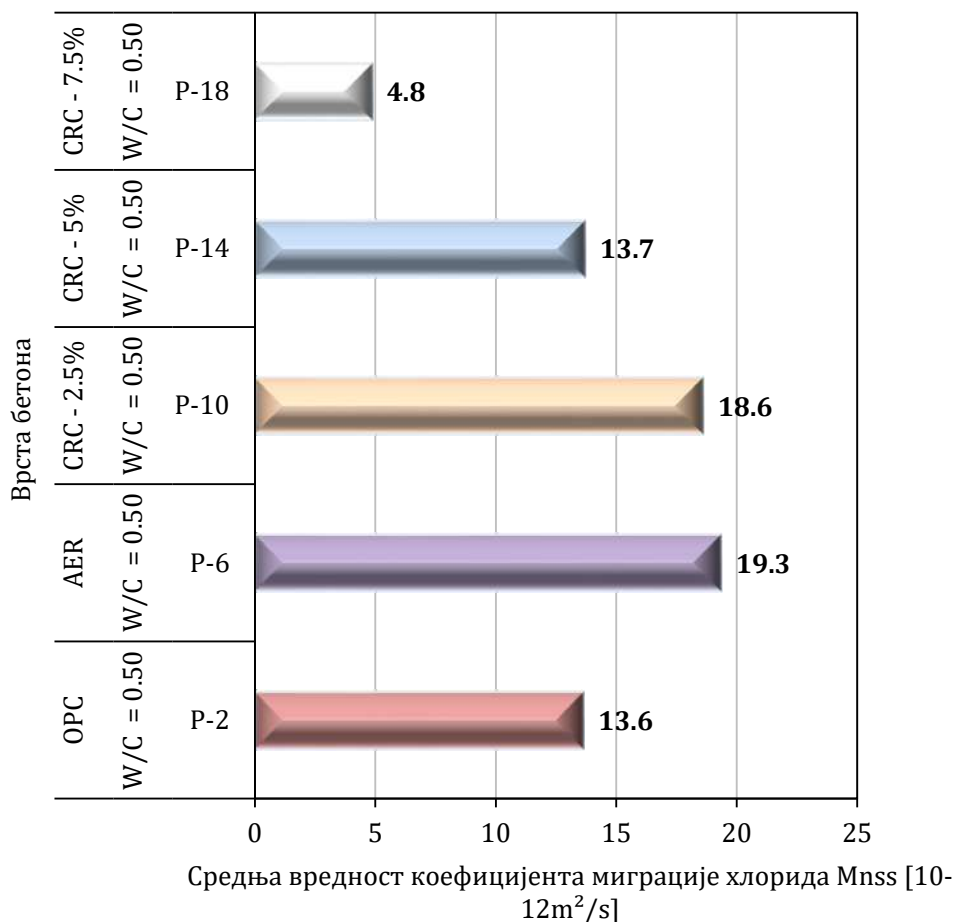
Анализом резултата добијених испитивањем статичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности статичког модула еластичности, уочавамо да вредности за (P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18) варирају од 27.6 (GPa) до 32.4 (GPa), респективно. Уочава се смањење вредности динамичког модула еластичности код P-6, P-10, P-14 и P-18 за 13.9%, 9.9%, 14.5% и 14.8% у односу на обичан (референтни) бетон. Са повећањем садржаја дробљене гуме, вредности динамичког модула еластичности опадају у односу на обичан (референтни) бетон.
- Примећујемо да је највиша добијена вредност статичког модула еластичности постигнута код обичног (референтног) бетона (P-2), што указује на његову високу крутост и отпорност на деформације.

- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-6) показује смањење статичког модула еластичности у односу на обични (референтни) бетон (P-2) због формирања сферичних микропора ваздуха у структури бетонске матрице, што резултира смањењем његове крутости и вредности статичког модула еластичности за 13.9%.
- У бетону (P-10) са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом примећује се благи пад статичког модула еластичности од 9.9% у односу на обични (референтни) бетон (P-2).
- Бетони (P-14 и P-18) са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом постижу веома сличне вредности статичког модула еластичности. У поређењу са обичним (референтним) бетоном, постигли су смањење статичког модула еластичности за 14.5% и 14.8%, респективно. Ови резултати указују на значајан утицај већег садржаја дробљене гуме на механичка својстава ове групе бетона.
- Смањење статичког модула еластичности бетона са рециклираном гумом је последица мање отпорности на деформације, односно ниже вредности модула еластичности гуме у односу на природни камени агрегат, као и слабе везе између зрна дробљене гуме и цементног камена, што је потврђено и у другим истраживањима [59], [62].

2.2.9. Коефицијент миграције хлорида

Резултати испитивања коефицијента миграције хлорида дати су у Табели IV-21. Добијене вредности коефицијента миграције хлорида приказане су графички на Слици V-30.



Слика V-30 – Коефицијент миграције хлорида бетони $w/c=0.50$

Анализом резултата добијених вредности коефицијената миграције хлорида ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида, уочавамо да вредности за P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18 варирају од 4.8 до 19.3 [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$], респективно. Примећено је повећање вредности коефицијента миграције хлорида код P-6, P-10 и P-14 за 42.0%, 36.4% и 0.5% у односу на обичан (референтни) бетон (P-2), док се код бетона са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-18) вредност смањује за 64.4%.

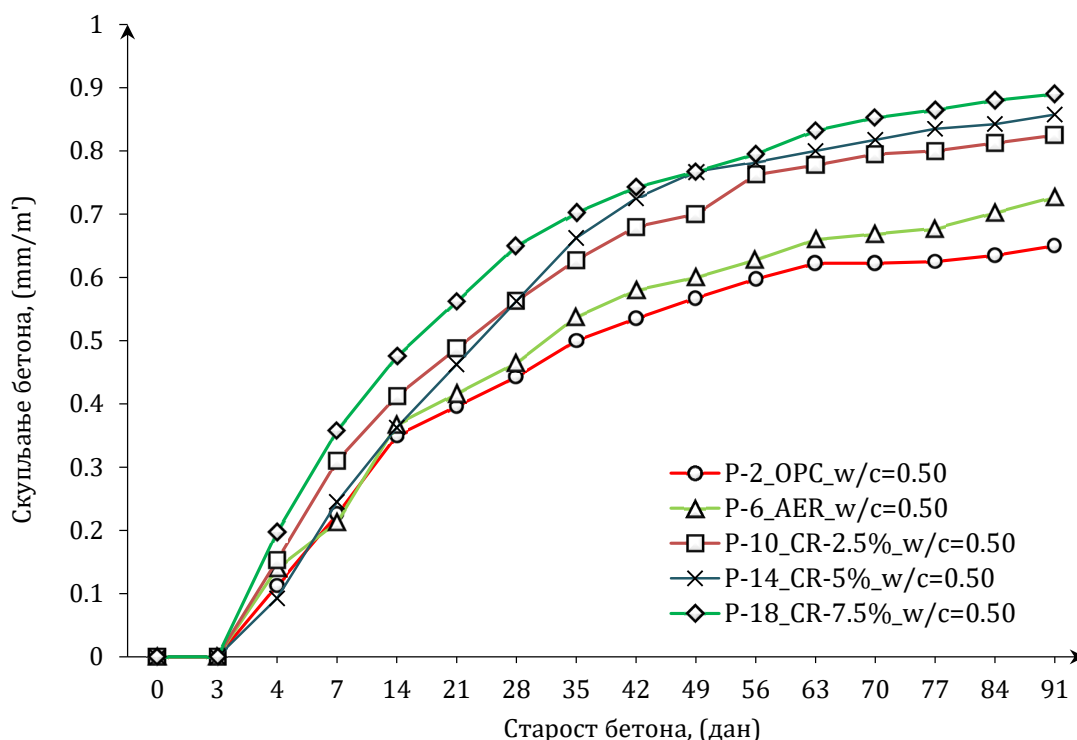
- Најнижа вредност коефицијента миграције хлорида постигнута је код бетона са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-18), са коефицијентом од $4.8 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$. Присуство веће количине дробљене гуме у структури очврслог бетона позитивно утиче на смањење коефицијента миграције хлорида, јер већа количина гуме смањује дубину продирања хлорида.
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида можемо закључити да бетон са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-18), према дефинисаним критеријумима коефицијената миграције за појединачне и просечне вредности, задовољава критеријуме за класу отпорности CL-3, односно класу изложености XD3 према табели 10, тачке 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида, можемо закључити да бетон са 5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-18) и обичан (референтни) бетон (P-2) показују сличне вредности коефицијента миграције хлорида, $13.7 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$ и $13.6 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$, респективно. Према дефинисаним критеријумима за коефицијенте миграције, ови бетони задовољавају тражене критеријуме за класу отпорности CL-1 и класу изложености XD1, наведене у Табели 10, тачка 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Коефицијент миграције хлорида добијен код осталих бетонских мешавина не задовољава критеријуме дефинисане за класу отпорности и класе изложености према Табели 10, тачке 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Побољшање отпорности бетона на продор хлоридних јона при замени 7,5% запремине ситног агрегата дробљеном гумом приписује се хидрофобним карактеристикама гуме, које успоравају улазак хлоридних јона у структуру бетона. Сличне закључке су изнели и аутори Thomas и сарадници [39], који су истраживали утицај замене ситног агрегата дробљеном гумом у распону од 2,5% до 20%. Утврђено је да бетон са 2,5–7,5% гумених честица показује мању дубину продирања хлоридних јона или једнаку оној код контролне мешавине.
- Међутим, замене од 2,5% и 5% нису довољне за значајно побољшање отпорности бетона на продор хлоридних јона. У случају аерираног бетона,

висок водоцементни однос ($w/c = 0,50$) формира систем повезаних пора, што доприноси већим вредностима коефицијента миграције хлорида у односу на уобичајен (референтни) бетон.

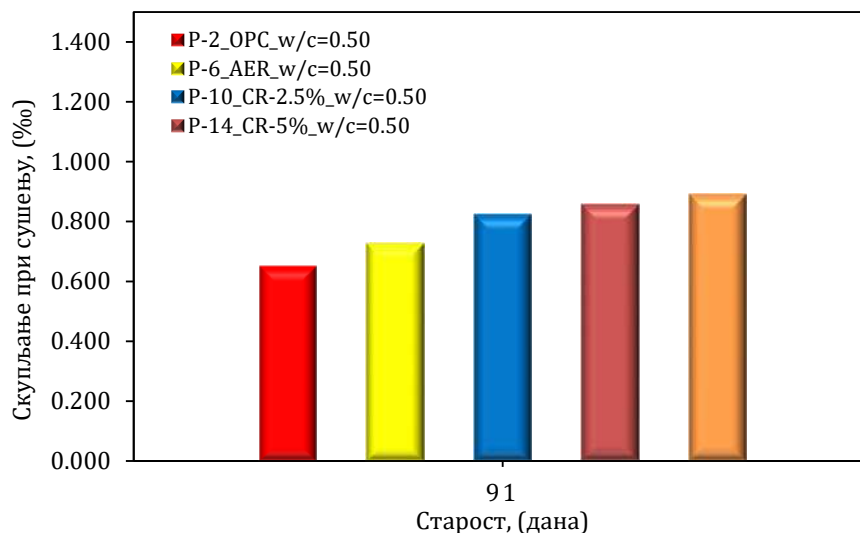
- Према истраживању Zhu и сарадника [65], корозија арматурних шипки у бетону зависи од више фактора, због чега је степен корозије у контакту са хлоридном сољу превасходно одређен притиском финих пора у структури очврслог бетона. Додавање гуменог агрегата може, након промене контактнoг угла, променити притисак у порама и на тај начин смањити интензитет корозије челика.

2.2.10. Скупљање при сушењу

Резултати испитивања скупљања при сушењу свих врста бетона дати су у Табелама IV-22 до IV-26. Скупљање при сушењу бетона са приказано је графички на Слици V-31, а коначне вредности скупљања након 3 месеца испитивања на Слици V-32.



Слика V-31 - Скупљање при сушењу бетони $w/c=0.50$



Слика V-32 - Коначне вредности скупљања при сушењу бетона $w/c=0.50$ након 3 месеца испитивања

Анализом резултата на приказаним дијаграмима, могу се извести следећи закључци:

- У првим данима након уградње, сви бетони показују најизраженије скупљање које се постепено смањује. Након 28 дана, код бетонских мешавина P-2, P-6, P-10, P-14 и P-18, скупљање варира од -0.449 (‰) до -0.652 (‰), респективно.
- Обичан (референтни) бетон (P-2) након 91 дана имао најмању вредност скупљања од -0.651 (‰), са уједначеним трендом скупљања при сушењу до сса 60 дана. Након ове старости, вредности конвергирају ка коначној вредности, али са растућим трендом.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-6) након 91 дана имао је скупљање од -0.725 (‰), што је више за 11.3% у односу на обичан (референтни) бетон (П-2). Скупљање је такође најинтензивније у раним фазама, након чега је тренд и даље растући током времена.
- Бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата са дробљеном гумом (P-10, P-14 и P-18), након 91 дана показали су скупљање од -0.821 до -0.892 (‰), респективно, што чини повећано скупљање за 26%, 31.1% и 36.9% у односу на обичан (референтни) бетон (P-2). Код ових бетона уочава се растући тренд скупљања и након 91 дана.

- Прегледом литературе пријављено је да је скупљење услед сушења бетона CRC веће у односу на референтну бетонску мешавину. Већи удео CR у смеши узроковао је прекомерно скупљање при сушењу, што се може приписати повећаном броју ваздушних пора које омогућавају брже испаравање воде из смеше [18], [58].

3. БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $W/C=0.45$

У ову групу спада пет врста бетона који су справљени са истом врстом и количином цемента од 360 kg/m^3 , са истом врстом агрегата и процентуалним учешћем фракција у гранулометријском саставу мешавине агрегата, уз водоцементни однос ($w/c=0.45$). Коришћен је суперпластификатор у количини од 0.8% у односу на масу цемента. Код бетона са хемијским додатком аеранта, примењен је аерант у количини од 0.008% у односу на масу цемента. Такође, дробљена гума је коришћена као запреминска замена ситног агрегата у процентима од 2.5%, 5% и 7.5% .

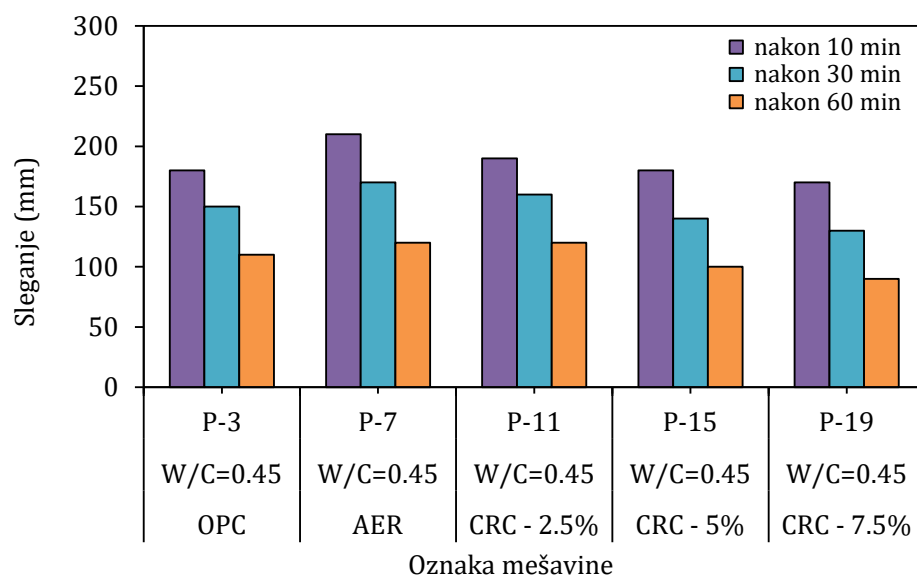
Врсте бетона су:

1. Обичан (референтни) бетон (P-3),
2. Бетон са хемијским додатком аеранта (P-7),
3. Бетон са запреминском заменом 2.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-11),
4. Бетон са запреминском заменом 5.0% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-15) i
5. Бетон са запреминском заменом 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-19).

3.1. Свеж бетон

3.1.1. Конзистенција слегањем

Резултати мерења конзистенције слегањем испитиваних врста бетона дати су у Табели IV-10, док су резултати мерења конзистенције слегањем за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом графички приказани на Слици V-33. Слегања су праћена током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-33 – Конзистенција методом слегања бетони $w/c=0.45$

Ознаке мешавина бетона на слици:

OPC – Обичан (референтни) бетон,

AER – Бетон са хемијским додатком аеранта,

CRC – 2.5%, 5.0%, 7.5% - Бетони са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом

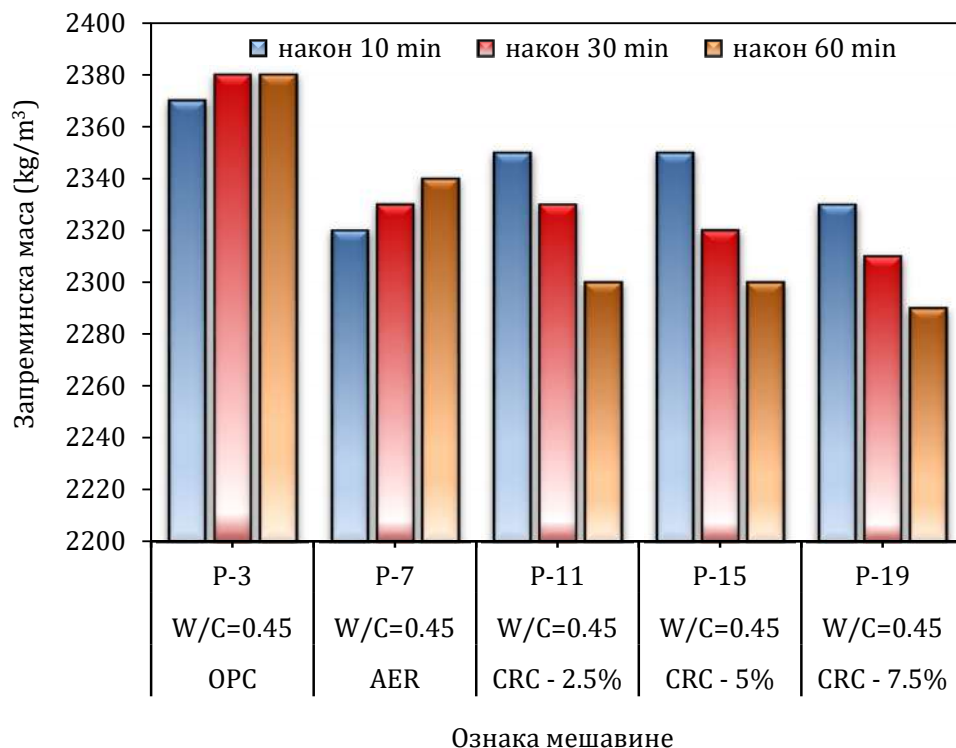
Анализом резултата добијених испитивањем конзистенције ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених мера слегања након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) задовољавају критеријум за класу S4 у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- Слегање бетона након 30 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину: бетони P-7 и P-11 задовољавају критеријум за класу слегања S4, док

- бетони P-3, P-10, P-15 и P-19 задовољавају критеријум за класу слегања S3, у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- Слегање бетона након 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину: бетони P-3, P-7, P-11 и P-15 задовољавају критеријум за класу слегања S3, док бетон P-19 задовољава критеријум класе конзистенције S2, у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
 - Слегање бетона кроз време се смањује за све врсте бетона. Код бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 5% и 7.5% (P-15 и P-19), уочено је смањење слегања мерено након 30 минута у односу на бетон са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 2.5% (P-11) за 3.2% и 18.8%, респективно. Вредност смањења мерена након 60 минута износи 16.8% за P-15 и 25% за P-19.
 - Слегање бетона након 30 и 60 минута за све бетоне се смањује у односу на слегање након 10 минута од момента додавања воде и оно износи за: P-3 (16.67% и 38.89%), P-7 (19.1% и 42.9%), P-11 (15.8% и 36.8%), P-15 (22.2% и 44.4%) и P-19 (23.5% и 47.1%), респективно.
 - Све бетонске мешавине су изгледале кохезивно и повезано; при испитивању мере слегања није долазило до сегрегације, издвајања воде, цемента и фракције агрегата, и бетони су се лако уградили у калупе.
 - Примећује се пад конзистенције при супституцији агрегата са 7,5% рециклираном гумом, што се може објаснити већом потражњом воде услед храпаве површине честица гуме [70], [71], [72], [73].

3.1.2. Запреминска маса

Резултати мерења запреминске масе испитиваних врста бетона дати су у Табели IV 11, а прорачунате вредности запреминских маса за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-34. Запреминске масе су праћене кроз време, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-34 – Запреминска маса бетони $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених испитивањем запреминских маса ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

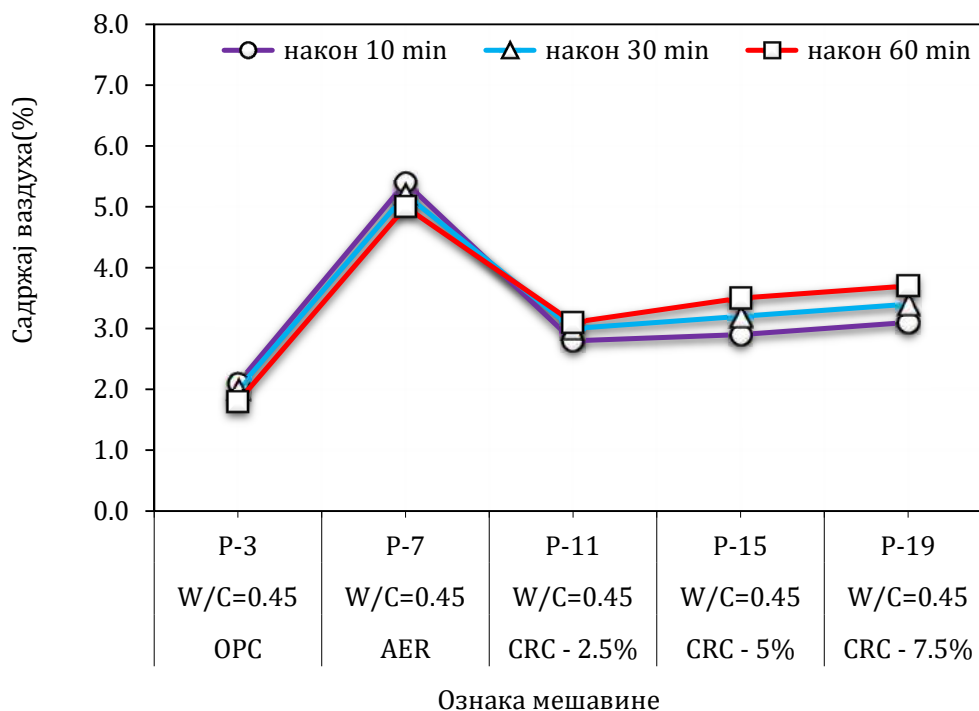
- На основу добијених вредности запреминских маса бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) су имали запреминске масе у опсегу од 2320 до 2370 kg/m³. Запреминска маса бетона код мешавина P-7, P-11, P-15 и P-19, мерених након 10 минута од додавања воде, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-3 за 2.1%, 0.8%, 0.8% и 1.7%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-3 и P-7 вредности запреминских маса бетона након 30 и 60 минута од додавања воде биле су веће у односу на мерења

након 10 минута, за 0.4% и 0.4% за P-3, и 0.4% и 0.9% за P-7, респективно, док су код бетонских мешавина P-11, P-15 и P-19 добијене ниже вредности за 0.8% и 2.1% за P-11, 1.3% и 2.1% за P-15, и 0.9% и 1.7% за P-19.

- Сви бетони су се лако уграђивали у калупе помоћу первибратора.
- Смањење запреминске масе бетона при замени дела агрегата дробљеном гумом произлази из мање запреминске масе гуме у поређењу са природним агрегатом, као и из присуства веће количине заробљеног ваздуха између гумених честица и цементног малтера, који се повећава са повећањем количине CR [12], [22], [77], [91], [92].

3.1.3. Садржај ваздуха

Резултати мерења садржаја ваздуха испитиваних врста бетона дати су у Табела IV-10, а вредности садржаја ваздуха за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-35. Садржаји ваздуха су праћени током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-35 – Садржај ваздуха бетони $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених испитивањем садржаја ваздуха ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

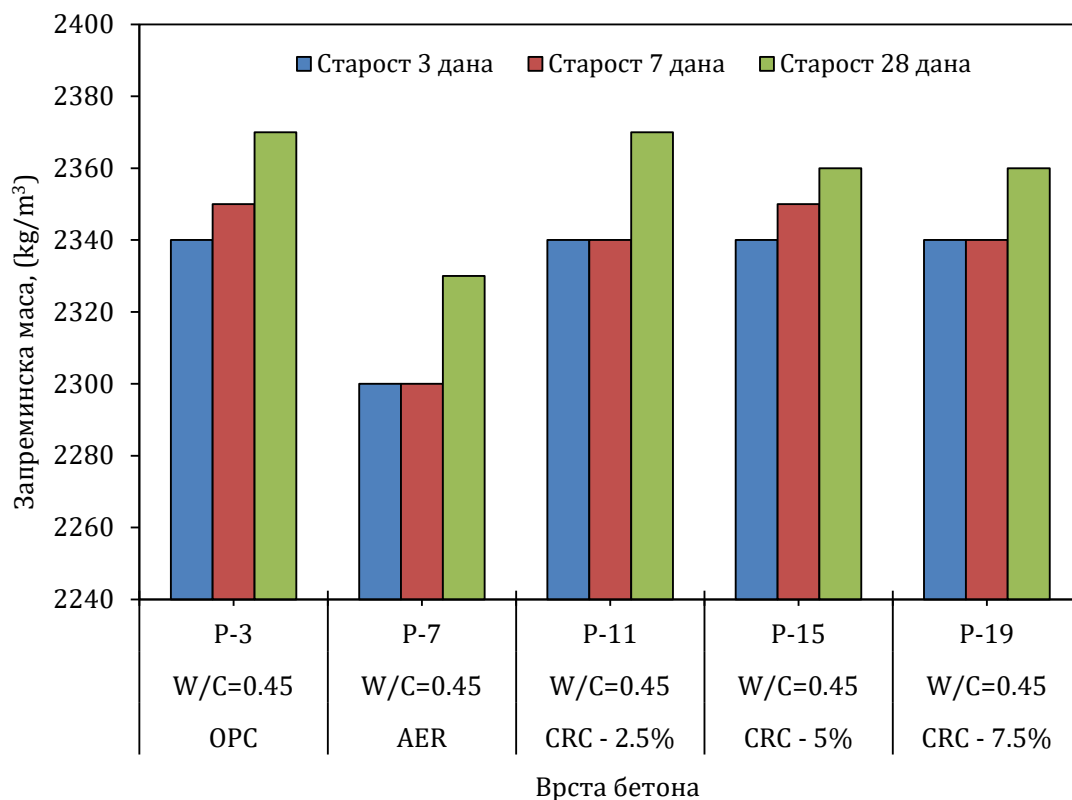
- На основу добијених вредности садржаја ваздуха бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) се одликују количинама ваздуха у опсегу од 2.1% до 5.4 %. Количине ваздуха у бетону код мешавина P-7, P-11, P-15 и P-19, мерене након 10 минута од додавања воде, биле су веће у односу на бетонску мешавину P-3 за 157.1%, 33.3%, 38.1% и 47.6%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-3 и P-7 вредности садржаја ваздуха у бетону мерене након 30 и 60 минута од додавања воде биле су ниже у односу на мерења након 10 минута, за 4.8% и 14.3% за P-3, и 3.7% и 7.4% за P-7, респективно, док су код бетонских мешавина P-11, P-15 и P-19 добијене више вредности за 7.1% и 10.7% за P-11, 10.3% и 20.7% за P-15, и 9.7% и 19.4% за P-19.
- Повећање садржаја ваздуха након 30 и 60 минута у односу на вредности након 10 минута није уобичајена појава за садржај ваздуха у бетону. Обично се дешава да вредност садржаја ваздуха у бетону опада током времена. Може се претпоставити да је повећање садржаја ваздуха током времена настало услед повећаног трења између честица дробљене гуме и осталих материјала приликом мешања.
- У односу на обичну (референтну) бетонску мешавину, сви испитивани бетони имају вишу вредност садржаја ваздуха. Код бетона са хемијским додатком аеранта то је очекивано; међутим, повећањем запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом примећује се повећан садржај ваздуха у односу на референтну бетонску мешавину (ОРС). Овакво понашање забележено је и у истраживањима других аутора [12], [84].

3.2. Очврсли бетон

3.2.1. Запреминска маса

Резултати испитивања запреминских маса очврслог бетона дати су у Табели VI-13.

Вредности запреминских маса очврслог бетона приказане су графички на Слици V-36.



Слика V-36 – Запреминска маса очврслог бетона $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених испитивањем запреминске масе ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

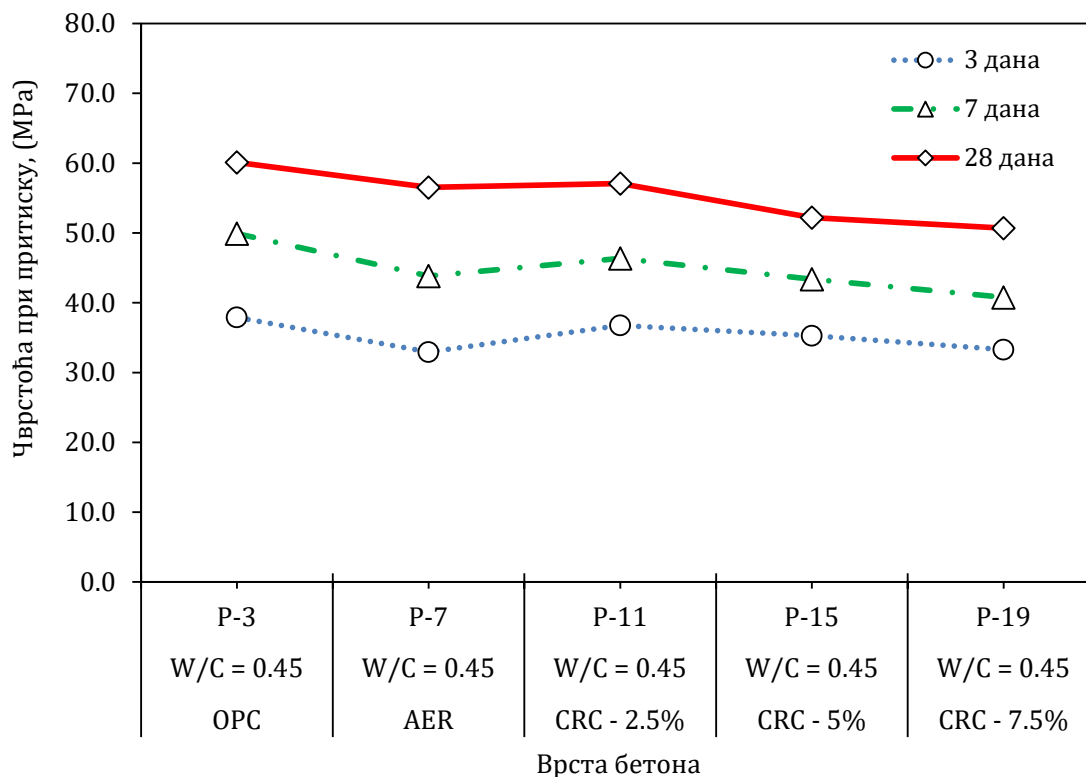
- На основу добијених вредности запреминске масе очврслог бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 2300 kg/m³ до 2340 kg/m³, од 2300 kg/m³ до 2350 kg/m³ и од 2330 kg/m³ до 2370 kg/m³, респективно.
- Запреминска маса бетона код мешавина P-7, P-11, P-15 и P-19, у старости од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-3 за 1.7%, 2.1% и 1.7%; исте су у старости од 3 дана, смањене за 0.4% у старости од 7 дана, и исте у старости од 28 дана; смањене су након старости од 3 и 7 дана, а за 1.3%

ниже након 28 дана; исте су након 3 дана, али ниже за 1.7% и 1.7% у старости од 7 и 28 дана, респективно.

- Сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу запреминску масу у односу на обичан (референтни бетон).
- Бетони са додатком аеранта показују највеће смањење запреминске масе, што је очекивано због присуства додатних ваздушних пора које су унешене у структуру бетона додавањем аеранта.
- Повећањем процентуалног садржаја дробљене гуме у бетону смањује се запреминска маса, што се може приписати мањој запреминској маси рециклиране гуме у односу на природни речни агрегат, као и већој количини заосталог ваздуха између честица дробљене гуме и цементног камена [12], [22], [77], [91], [92].

3.2.2. Чврстоћа при притиску

Резултати испитивања чврстоћа при притиску очврслог бетона дати су у Табели IV-14. Вредности чврстоћа при притиску очврслог бетона приказане су графички на Слици V-37.



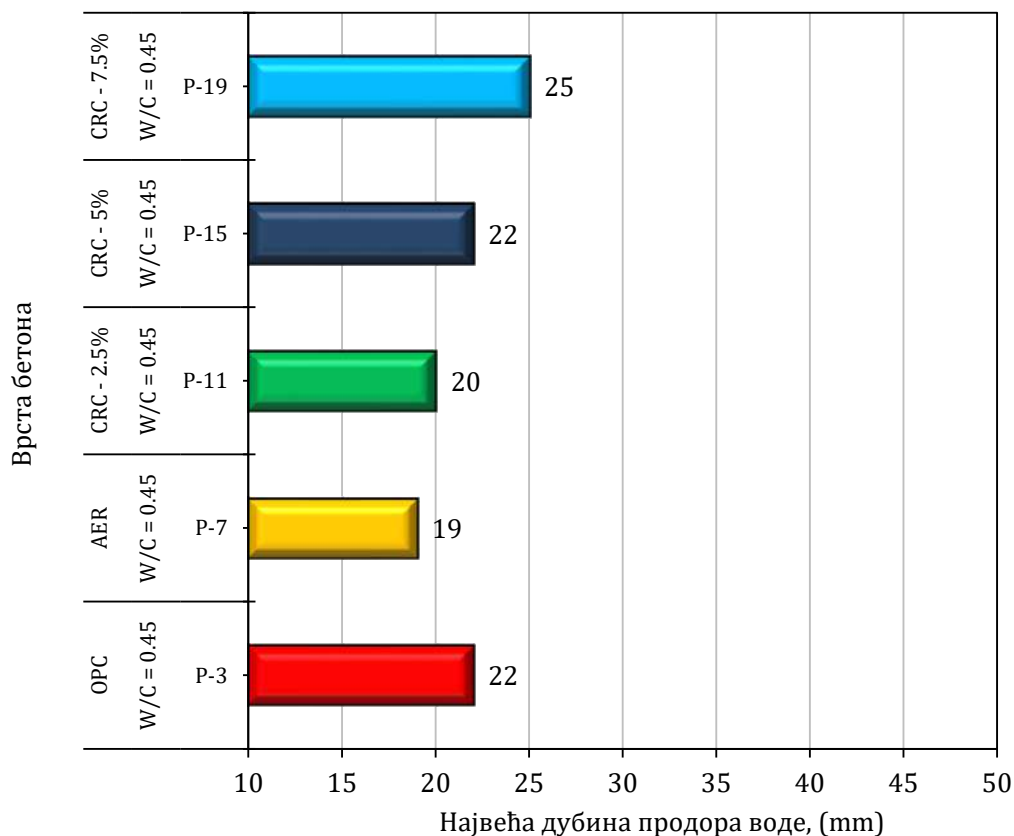
Слика V-37 – Чврстоћа при притиску бетона $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 37.9 (МПа) до 60.1 (МПа), од 32.9 (МПа) до 56.5 (МПа), од 36.7 (МПа) до 57.1 (МПа), од 35.3 (МПа) до 52.2 (МПа) и од 33.3 (МПа) до 50.7 (МПа), респективно.
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-7, P-11, P-15 и P-19, при старостима од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-3 за: 13.1 %, 12.2% и 6.0%; 3.0%, 7.1% и 5.0%; 6.9%, 13.1% и 13.1%; и 12.2%, 18.3% и 15.7%, респективно.
- Сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу чврстоћу при притиску у односу на обичан (референтни) бетон.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има неповољан утицај на чврстоћу при притиску у свим испитиваним старостима бетона. Чврстоћа при притиску при 28-дневној старости за бетон са највећим садржајем гуме од 7.5% износи 50.7 МПа, што указује да се оваква врста бетона може користити у конструкцијске сврхе. Приликом развоја топлоте хидратације, додавање дробљене гуме није имало утицаја на прираст чврстоће. Прираст чврстоће при притиску у старости од 3, 7 и 28 дана је у већем делу идентичан у овој групи бетона.
- Највишу чврстоћу при притиску је постигао обичан (референтни) бетон са 28-дневном чврстоћом од 60.1 (МПа).

3.2.3. Водонепропустљивост бетона

Резултати испитивања дубине продора воде за наведене врсте бетона дати су у Табели IV-15. Вредности дубине продора воде бетона за сваку врсту бетона у овој групи бетона приказана су графички на Слици V-38.



Слика V-38 - Вредности дубине продора воде бетона $w/c=0.45$

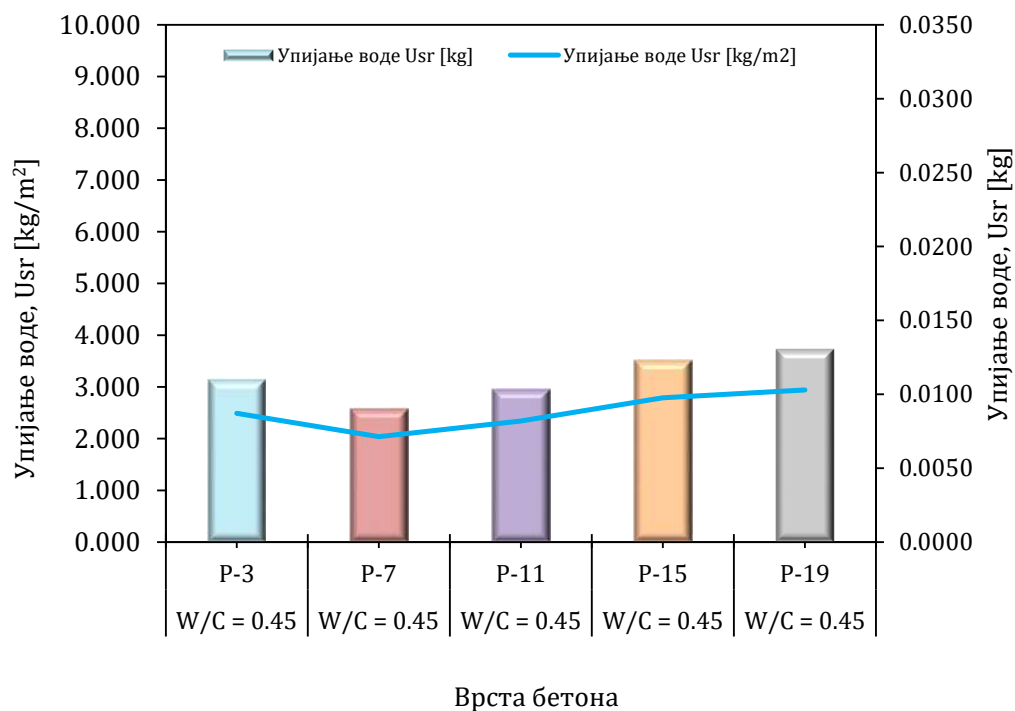
Анализом резултата на дијаграму, могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности дубина продирања воде под притиском у бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 19 (mm) до 25 (mm), респективно. Најнижа вредности дубине продирања воде под притиском забележена је код бетона P-7, а износи 19 mm, и задовоља услов за класу водонепропустљивости V-3, Табела 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023. Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су највеће вредности код ове врсте бетона и то: 20 mm, 22mm и 25 mm, респективно, које

задовољавају услов за класу водонепропустљивости V-2 (P-11 i P-15) i V-3 (P-19), према Табели 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023.

- У односу на бетонску мешавину P-3, највећа дубина продирања воде под притиском код мешавине: P-7 је нижа за 13.6% , P-11 нижа за 9.1%, P-15 има исту вредност, а P-19 је виша за 13.6%.
- Запреминска замена 2.5% и 5% ситног агрегата дробљеном гумом има позитиван и исти утицај на водонепропустљивост бетона у односу на обичан (референтни) бетон.
- Повећање удела дробљене гуме у бетону негативно утиче на његову водонепропустљивост у поређењу са обичним (референтним) бетоном. Како је наведено у истраживању Munoz-Sanchez и сарадника [108], слаба адхезија између цементне пасте и зрна дробљене гуме доводи до повећане водопропустности бетона. Поред тога, дубина продирања воде расте са повећањем количине CR у бетону, што је последица веће количине ваздушних шупљина заробљених у материјалу током процеса мешања [21], [27], [107].
- Највиша вредност дубине продора воде постигнут је код бетона са додатком 7.5% дробљене гуме (P-19), а износи 25 mm, док је најнижа вредност постигнута код бетона са хемијским додатком аеранта (P-7), и износи 19 mm.

На основу мерења масе упијене воде и срачунатих средњих вредности упијене воде по површини, добијени су резултати који су приказани у Табели IV-15, а вредности количине упијања воде и срачунате средње вредности упијања воде по површини за ову групу бетона графички су приказане на Слици V-39.



Слика V-39 - Вредности упијања воде бетони $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених мерењем маса и срачунатих вредности количине упијања воде, која је израчуната као маса по површини, за ову групу бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности упијања воде и срачунате вредности упијања воде по површини у бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 0.0090 (kg) до 0.0130 (kg) и од 2.04 (kg/m²) до 2.94 (kg/m²), респективно. Најнижа вредност упијања воде и упијања воде по површини забележена је код бетона P-7, а износе 0.0090 (kg), односно 2.04 (kg/m²). Код бетона са додатком 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су више вредности у односу на обичан (референтни) бетон за 12.1% и 18.2%, док је код бетона са додатком 2.5% дробљене гуме добијена нижа вредност за 6.1%.
- Запреминска замена ситног агрегата дробљеном гумом од 5% (P-15) и 7.5% (P-19) има неповољан утицај, јер се упијање воде повећава у односу на обичан (референтни) бетон (P-3). Међутим, са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 2.5% постиже се позитиван утицај јер

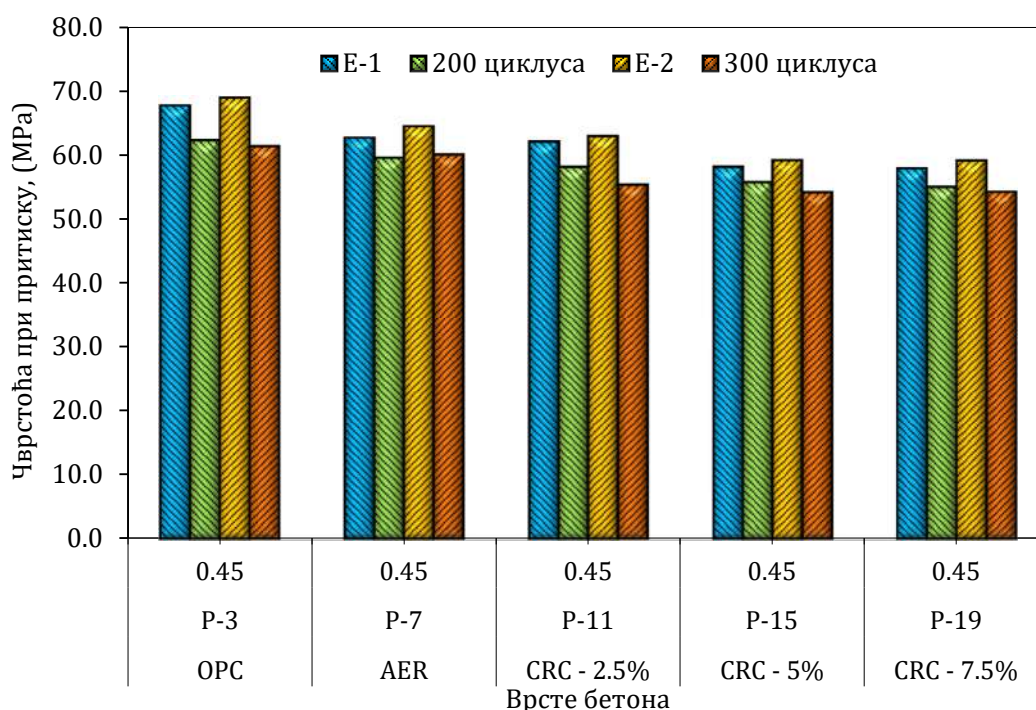
је количина упијања воде смањена (P-11) у односу на обичан (референтни) бетон (P-3).

- Додавање дробљене гуме у ову групу бетона има негативан утицај, јер повећава упијање воде, што је потврђено и у истраживањима [43], [74], [97].

3.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза

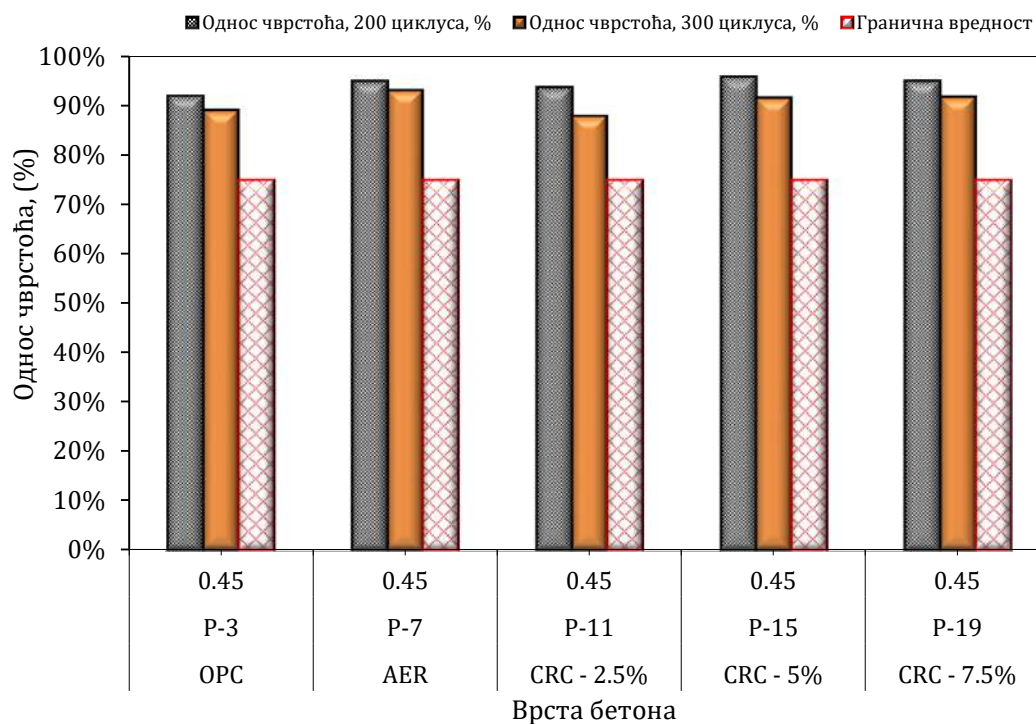
Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза дати су у Табели IV-16.

Резултати испитивања чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-40.



Слика V-40 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетона $w/c=0.45$

Однос чврстоће при притиску узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака приказан је графички на Слици V-41.



Слика V-41 – Однос чврстоћа узорака након дејства мраза и еталонских узорака $w/c=0.45$

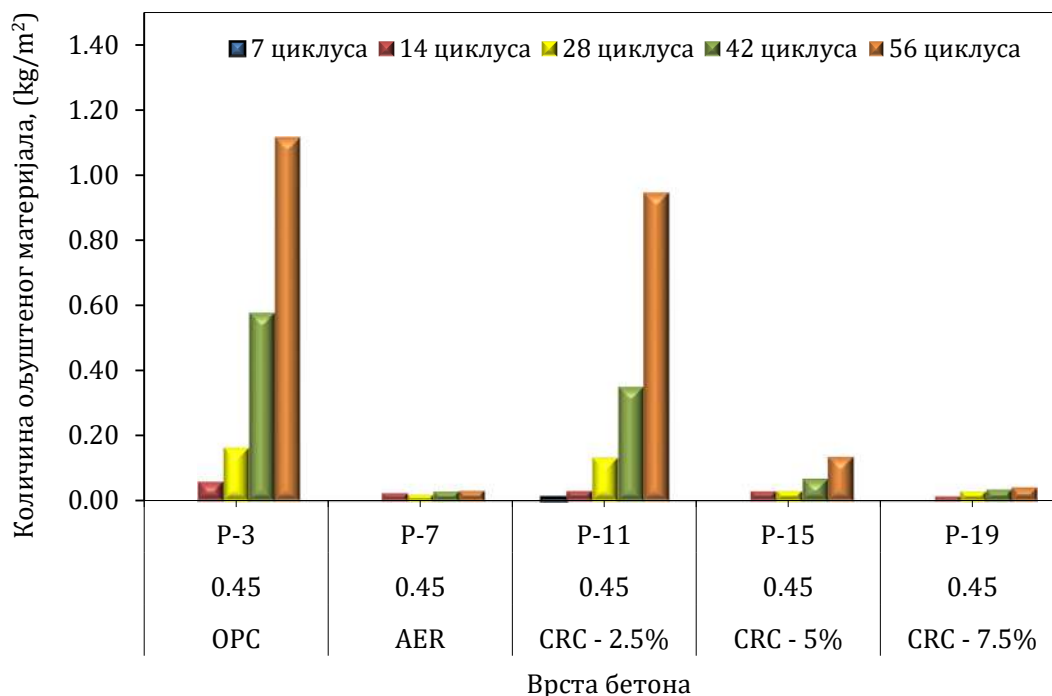
Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорака (Е-1), који су испитани при еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 58.0 (МПа) до 67.7 (МПа), респективно.
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19 након 200 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорака који нису замрзавани за: 8%, 5%, 6%, 4% и 5%, респективно.
- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорака (Е-2), који су испитани при еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 59.2 (МПа) до 68.9 (МПа), респективно.

- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина Р-3, Р-7, Р-11, Р-15 и Р-19 након 300 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорака за: 11%, 7%, 12%, 8% и 8%, респективно.
- На основу добијеног односа чврстоће након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака, сви бетони у овој групи постигли су однос чврстоће већи од 75%, што задовољава услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорака од 75% према Табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Бетонске мешавине са запреминском заменом од 5% (Р-15) и 7.5% (Р-19) ситног агрегата дробљеном гумом имају позитиван утицај на однос чврстоће при притиску код узорака који су испитивани након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања, јер су код ових бетона добијени већи односи чврстоће у односу на обичан (референтни) бетон (Р-3).
- Повећан садржај ваздуха, који је настао током мешања бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом у процентима од 2,5%, 5% и 7,5%, створио је довољан ваздушни простор у структури бетона, омогућавајући ширење леда током циклуса замрзавања и одмрзавања, како је наведено и у истраживањима других аутора [48].
- Флексибилност дробљених зрна гуме, која ублажава напоне затезања настале ширењем леда у структури бетона, значајно побољшава отпорност бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања, како је објављено у истраживањима других аутора [84], [94], [110], [111].

3.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање дати су у Табели IV-17. Резултати испитивања количине ољуштеног материјала за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-42.



Слика V-42 – Количина ољуштеног материјала бетони $w/c=0.45$

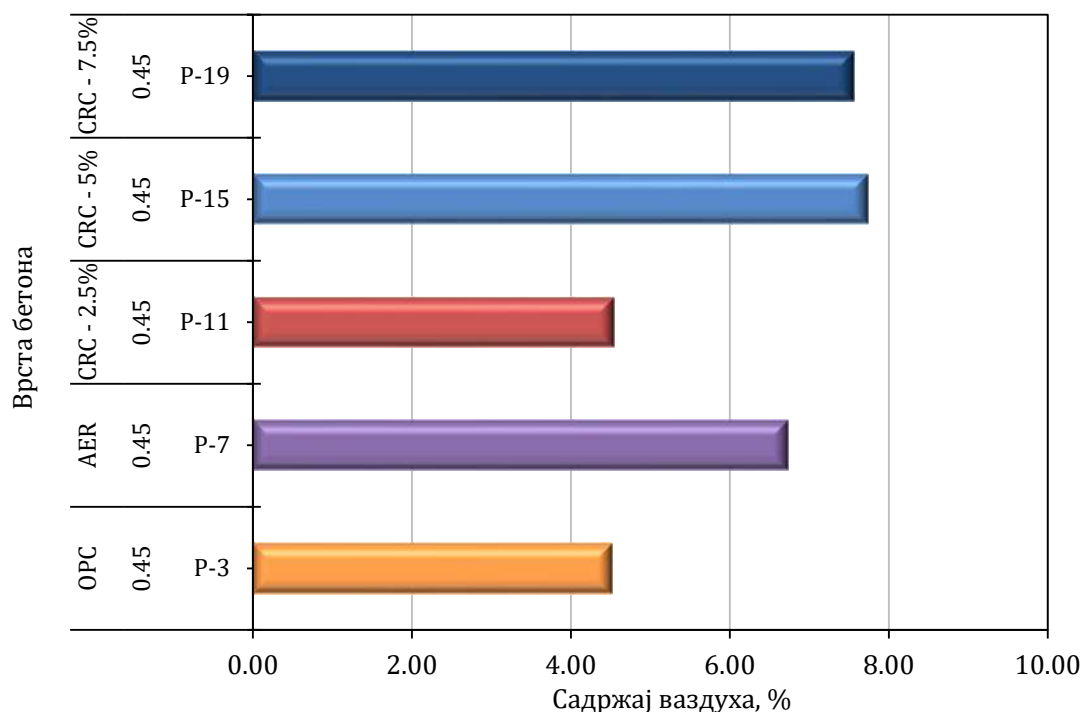
Анализом резултата добијених количине ољуштеног материјала са површина бетонских узорака ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- Након 7 циклуса замрзавања/одмрзавања уз присуство соли, није дошло до значајног оштећења на површинама бетона, што указује на то да у овој раној фази није било значајног љуштења на површинама бетона.
- На основу добијених вредности, количина ољуштеног материјала која је добијена код бетонских мешавина (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варира од 0.02 (kg/m^2) до 0.06 (kg/m^2) након 14 циклуса, од 0.02 (kg/m^2) до 0.16 (kg/m^2) након 28 циклуса, од 0.03 (kg/m^2) до 0.58 (kg/m^2) након 42 циклуса и од 0.03 (kg/m^2) до 1.12 (kg/m^2) након 56 циклуса, респективно.
- Након 28, 42 и 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, бетон са хемијским додатком аеранта (P-7) показује најмању вредност ољуштеног материјала са површине бетонских узорака. Код бетона са дробљеном гумом,

- најмања количина ољуштеног материјала забележена је код бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 7.5% (P-19).
- Количина ољуштеног материјала код обичног (референтног) бетона (P-3) и бетона са 2.5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (P-11) прекорачила је највећу дозвољену екстремну граничну вредност за количину ољуштеног материјала након 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања према Табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS EN U.M1.206:2023.
 - На основу добијених вредности количина ољуштеног материјала, бетони са хемијским додатком аерантом (P-7) и бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 5% и 7.5% (P-15 и P-19), задовољавају захтеване највеће дозвољене граничне вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања према Табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS EN U.M1.206:2023.
 - Бетонске мешавине са аерантом и вишим процентима дробљене гуме (5% и 7.5%) су показале бољу отпорност на дејство мраз уз присуство соли у поређењу са обичним (референтним) бетоном и бетоном са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом.
 - Током мешања бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом у процентима од 5% и 7,5%, повећан садржај ваздуха обезбедио је довољан простор у структури бетона који омогућава ширење леда током циклуса замрзавања и одмрзавања [48].
 - Поред тога, флексибилност дробљених зрна гуме, која смањује напоне затезања изазване ширењем леда унутар структуре бетона, значајно унапређује отпорност бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања [84], [94], [110], [111].

3.2.6. Карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону

Резултати испитивања садржаја ваздуха у очврслом бетону дати су у Табели IV-18. Вредности садржаја ваздуха за сваку врсту бетона из ове групе бетона приказане су графички на Слици V-43.



Слика V-43 - Вредности садржаја ваздуха бетони $w/c=0.45$

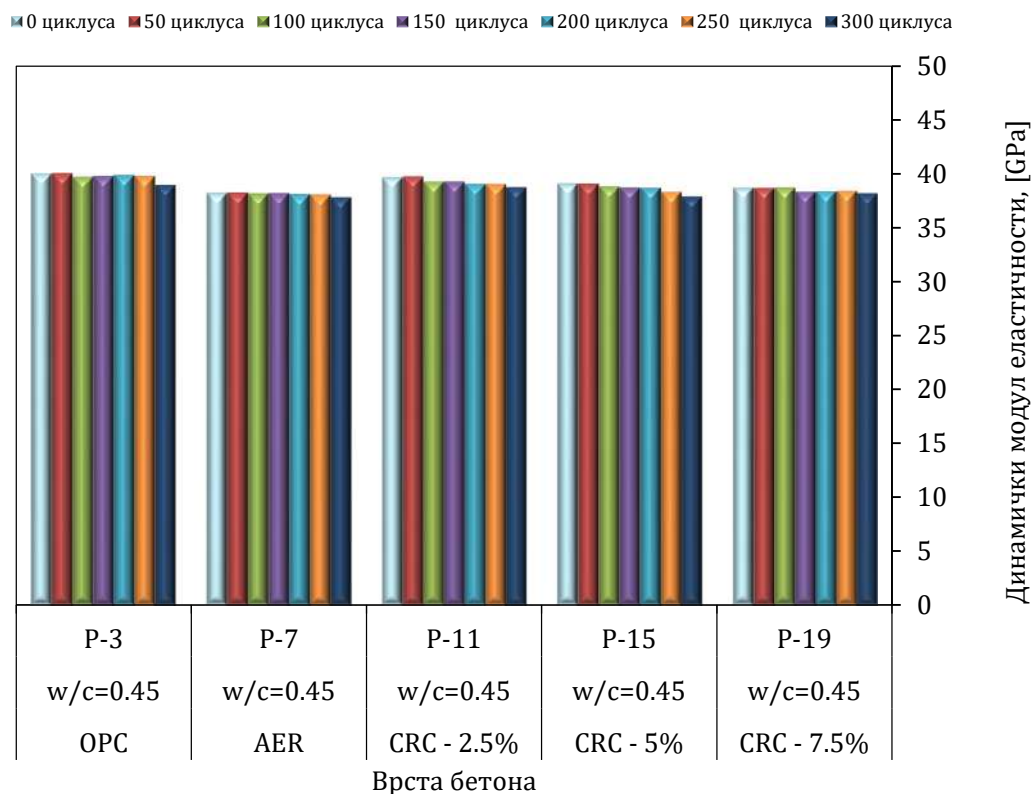
Анализом резултата на дијаграму, могу се извести следећи закључци за ову врсту бетона:

- На основу добијених вредности садржаја ваздуха у очврслом бетону у старости од 28 дана, вредности за бетоне (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 4.52 (%) до 7.56 (%), респективно. Најнижа вредност садржаја ваздуха забележена је код бетона P-3, а износи 4.33 (%). Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су вредности 4.54 (%), 7.74 (%) и 7.56 (%), респективно.
- Генерално, са повећањем садржаја дробљене гуме добијају се веће вредности садржаја ваздуха у бетону.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има утицај на повећање садржаја ваздуха у односу на обичан (референтни) бетон.

- Највиша вредност садржаја ваздуха постигнут је код бетона са додатком 7.5% дробљене гуме (P-19), која износи 7.56(%), док је најнижа вредност постигнута код обичног (референтног)бетона (P-3) и износи 4.52 (%).
- Прегледом научне литературе, утврђено је да није било сличних истраживања која су се бавила испитивањем карактеристикама ваздушних пора у очврслом бетону са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом.

3.2.7. Динамички модул еластичности

Резултати испитивања динамичког модула еластичности дати су у Табели IV-19. Вредности динамичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-44.



Слика V-44 – Динамички модул еластичности бетони $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених испитивањем динамичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности динамичког модула еластичности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања, вредности за бетоне

(P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 38.18 (GPa) до 39.97 (GPa), респективно. Уочава се смањење вредности динамичког модула еластичности код P-7, P-11, P-15 и P-19, за 4.5 %, 0.8%, 2.3% и 3.2% у односу на обичан (референтни) бетон. Са повећањем садржаја дробљене гуме вредности динамичког модула еластичности опадају у односу на обичан (референтни) бетон.

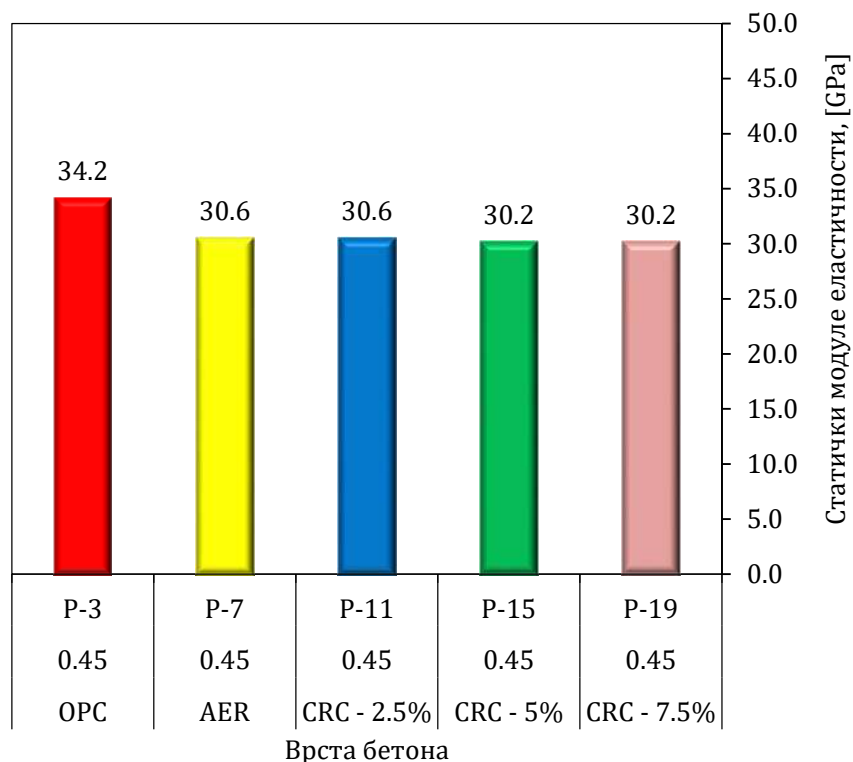
- У односу на добијене вредности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања и након 300 циклусима наизменичног замрзавања/одмрзавања, вредности динамичког модула еластичности су за: обичан (референтни) бетон P-3 у опадању за 2.6%, код бетона са хемијским додатком аеранта P-7 у опадању за 1.0%, док код бетона са запреминском заменом 2.5% , 5% и 7.5% (P-11, P-15, P-19) дробљеном гумом ситног агрегата ова редукција износи: 2.3%, 3.1% и 1.4%, респективно.
- Обичан (референтни) бетон (P-3) показује постепени пад динамичког модула еластичности како број циклуса замрзавања/одмрзавања расте, са највећим смањењем након 300 циклуса. Почетна вредност је 39.97 GPa, док се након 300 циклуса смањује на 38.94 GPa. Редукција износи 2.58%, што указује на добру отпорност, али мању у поређењу са бетонима са додатком дробљене гуме.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-7) има најмању почетну вредност динамичког модула еластичности - 38.18 GPa. Током 300 циклуса, вредност остаје стабилна, са минималним смањењем на 37.80 GPa. Смањење износи 0.38 GPa, што представља деградацију од 0.99%, што указује на изузетну отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.
- Бетони са запреминском заменом од 2.5%, 5%, 7.5% ситног агрегата дробљеном гумом (P-11, P-15, P-19) показују различите трендове смањења динамичког модула еластичности, при чему је смањење мање изражено код бетона са већим процентом дробљене гуме.
- Бетон са 2.5% дробљене гуме (P-11) има почетну вредност од 39.65 GPa. Након 300 циклуса, смањује се на 38.73 GPa. Смањење износи 0.92 GPa, што је деградација од 2.32%, што показује да су вредности блиске са обичним (референтним) бетоном, али са нешто мањим смањењем.

- Бетон са 5% дробљене гуме (P-15) има делимично веће смањење модула еластичности, након 300 циклуса у поређењу са P-11. Почетна вредност је 39.06 GPa, док након 300 циклуса износи 37.87 GPa. Смањење износи 1.19 GPa, што је деградација од 3.05%, што је нешто веће у поређењу са осталим мешавинама са додатком дробљене гуме.
- Бетон са 7.5% дробљене гуме (P-19) показује најмању деградацију модула еластичности у поређењу са осталим бетонима са гумом, што га чини најотпорнијим на циклусе замрзавања/одмрзавања међу тим бетонским мешавинама. Почетна вредност је 38.69 GPa, а након 300 циклуса износи 38.14 GPa. Смањење износи 0.55 GPa, што је деградација од 1.42%, указујући на врло добру отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.
- Бетони са дробљеном гумом, посебно са већим процентима замене, показују већу отпорност на смањење динамичког модула еластичности у поређењу са обичним (референтним) бетоном, чинећи их погоднијим за употребу у условима где су чести циклуси замрзавања/одмрзавања.
- Гума има нижи динамички модул у поређењу са очврслим бетоном. Како се повећава замена ситног агрегата дробљеном гумом, динамички модул еластичности опада.
- Поред деформабилности честица дробљене гуме у структури бетона, ваздух који се формира током мешања, и то и унутрашњи и око честица дробљене гуме, доприноси великој отпорности бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања [44,], [84], [94], [110], [111].
- Смањење динамичког модула еластичности као последица повећања замене ситног агрегата дробљеном гумом може се објаснити нижом специфичном тежином дробљене гуме у односу на природни ситни агрегат, што доводи до веће брзине проласка ултразвука [37].

3.2.8. Статички модул еластичности

Резултати испитивања статичког модула еластичности дати су у Табели IV-20.

Вредности статичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-45.



Слика V-45 – Статички модул еластичности бетони $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених испитивањем статичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

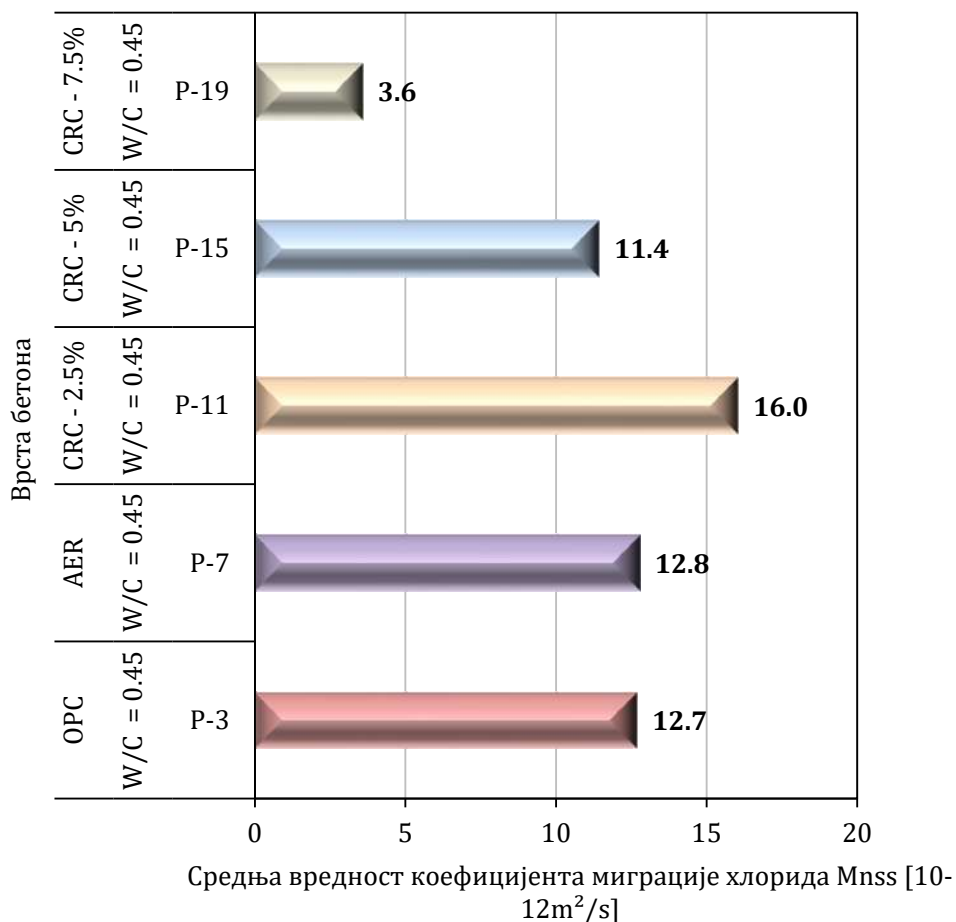
- На основу добијених вредности статичког модула еластичности, примећујемо да се вредности за P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19 крећу од 30.2 (GPa) до 34.2 (GPa), респективно. Такође се примећује смањење вредности динамичког модула еластичности код P-7, P-11, P-15 и P-19 за 10.5%, 10.5%, 11.7% и 11.7% у односу на обичан (референтни) бетон (P-3).
- Примећујемо да је највиша вредност статичког модула еластичности постигнута код обичног (референтног) бетона (P-3) од 34.2 GPa, што сугерише на његову високу крутост и отпорност на деформације.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-7) и бетон са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-11) имају ниже вредности статичког модула еластичности у поређењу са обичним (референтним)

бетоном (P-3), јер се услед увећаног формирања сферичних пора ваздуха (код P-7) и убацивања еластичних дробљених гумених зрна (код P-11) у структури бетона смањује крутост агрегата, па и бетона. Вредност статичког модула еластичности код обе врсте бетона је мања за 7.9%.

- Бетони P-15 и P-19, са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом, постигли су идентичне вредности статичког модула еластичности. У поређењу са обичним (референтним) бетоном, постигли су смањење статичког модула еластичности за 11.7%. То показује да већи садржај дробљене гуме значајно утиче на смањење механичких својстава бетона код ове групе бетона.
- Смањење статичког модула еластичности бетона са рециклираном гумом је последица мање отпорности на деформације, односно ниже вредности модула еластичности гуме у односу на природни камени агрегат, као и слабије везе између зрна дробљене гуме и цементног камена, што је потврђено и у другим истраживањима [59], [62].

3.2.9. Коефицијент миграције хлорида

Резултати испитивања коефицијента миграције хлорида дати су у Табели IV-21. Добијене вредности коефицијента миграције хлорида приказане су графички на Слици V-46.



Слика V-46 – Коефицијент миграције хлорида бетони $w/c=0.45$

Анализом резултата добијених вредности коефицијената миграције хлорида ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

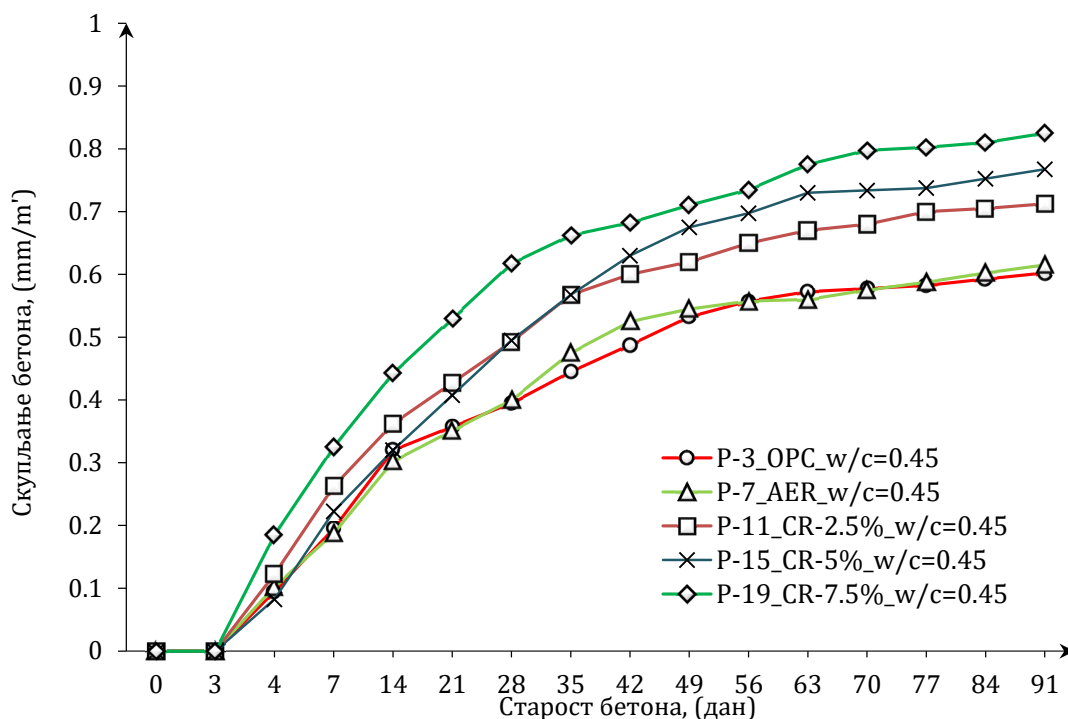
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида, уочавамо да вредности за (P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19) варирају од 3.6 до 16.0 [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$], респективно. Примећено је повећање вредности коефицијента миграције хлорида код P-7 и P-11 за 0.7%, 26.4%, респективно у односу на обичан (референтни) бетон (P-3), док се код бетона са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-15 и P-19) вредност смањује за 10.0% и 71.8%, респективно.

- Најнижа вредност коефицијента миграције хлорида постигнута је код бетона са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-19), са коефицијентом од $3.6 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$. Присуство веће количине дробљене гуме у структури очврслог бетона позитивно утиче на смањење коефицијента миграције хлорида, јер већа количина гуме смањује дубину продирања хлорида.
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида можемо закључити да бетон са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-19), према дефинисаним критеријумима коефицијената миграције за појединачне и просечне вредности, задовољава критеријуме за класу отпорности CL-3, односно класу изложености XD3, према Табели 10, тачке 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида, можемо закључити да обичан (референтни) бетон (P-3), бетон са хемијским додатком аеранта (P-7) и бетон са 5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-15), имају сличне вредности коефицијента миграције хлорида, $12.7 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$, $12.8 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$, и $11.4 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$, респективно. Према дефинисаним критеријумима за коефицијенте миграције, ови бетони задовољавају тражене критеријуме за класу отпорности CL-3 и класу изложености XD3, наведене у Табели 10, тачка 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Коефицијент миграције хлорида добијен код бетона са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом, не задовољава критеријуме дефинисане за класу отпорности и класу изложености према Табели 10, тачке 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Побољшање отпорности бетона на продор хлоридних јона при замени 5% и 7,5% ситног агрегата дробљеном гумом приписује се хидрофобним карактеристикама гуме, које успоравају улазак хлоридних јона у структуру бетона. Сличне закључке су изнели и аутори Thomas и сарадници [39], који су истраживали утицај замене ситног агрегата дробљеном гумом у распону од 2,5% до 20%. Утврђено је да бетон са 2,5–7,5% гумених честица показује мању дубину продирања хлоридних јона или једнаку оној код контролне мешавине.

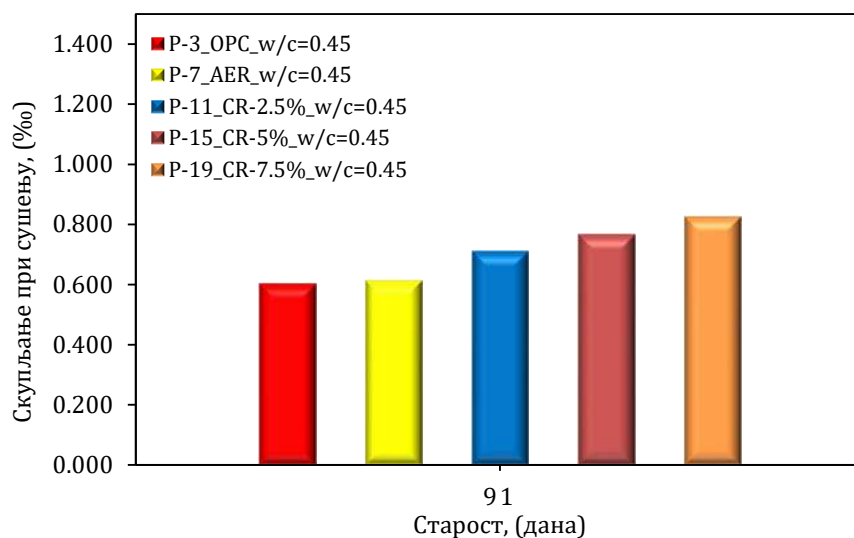
- Међутим, замена од 2,5% код ове врсте бетона није довољна, да би се постигло значајно побољшање отпорности бетона на продор хлоридних јона.
- Према истраживању Zhu и сарадника [65], корозија арматурних шипки у бетону зависи од више фактора, због чега је степен корозије у контакту са хлоридном сољу превасходно одређен притиском финих пора у структури очврслог бетона. Додавање гуменог агрегата може, након промене контактнoг угла, променити притисак у порама и на тај начин смањити интензитет корозије челика.

3.2.10. Скупљање при сушењу

Резултати испитивања скупљања при сушењу свих врста бетона дати су у Табелама IV-22 до IV-26. Скупљање при сушењу бетона са приказано је графички на Слици V-47, а коначне вредности скупљања након 3 месеца испитивања на Слици V-48.



Слика V-47 – Скупљање при сушењу бетона $w/c=0.45$



Слика V-48 - Коначне вредности скупљања при сушењу бетона $w/c=0.45$ након 3 месеца испитивања

Анализом резултата на приказаним дијаграмима, могу се извести следећи закључци:

- У првим данима након уградње, сви бетони показују најизраженије скупљање које се постепено смањује. Након 28 дана, код бетонских мешавина P-3, P-7, P-11, P-15 и P-19, скупљање варира од -0.605 (‰) до -0.823 (‰), респективно.
- Обичан (референтни) бетон (P-3) је након 91 дана имао најмању вредност скупљања од -0.605 (‰), са уједначеним трендом скупљања при сушењу до сса 60 дана. Након ове старости, вредности конвергирају ка коначној вредности.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-7) након 91 дана имао је најмање скупљање од -0.614 (‰), што је више за 1.5% у односу на обичан (референтни) бетон (P-3). Скупљање је такође најинтензивније у раним фазама, након чега се смањује током времена.
- Бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата са дробљеном гумом (P-11, P-15 и P-19), након 91 дана показали су скупљање од -0.715 до -0.823 (‰), респективно, што чини повећано скупљање за 18.1%, 26.2% и 36.1% у односу на обичан (референтни) бетон (P-3). Код ових бетона уочава се растући тренд скупљања и након 91 дана.

- Прегледом литературе пријављено је да је скупљење услед сушења бетона CRC веће у односу на референтну бетонску мешавину. Већи удео CR у бетонској мешавини узроковао је прекомерно скупљање при сушењу, што се може приписати повећаном броју ваздушних пора које омогућавају брже испаравање воде из бетонске мешавине [18], [58].

4. БЕТОНИ СА ВОДОЦЕМЕНТНИМ ОДНОСОМ – $W/C=0.40$

У ову групу спада пет врста бетона који су справљени са истом врстом и количином цемента од 360 kg/m^3 , са истом врстом агрегата и процентуалним учешћем фракција у гранулометријском саставу мешавине агрегата, уз водоцементни однос ($w/c=0.40$). Коришћен је суперпластификатор у количини од 1.2% у односу на масу цемента. Код бетона са хемијским додатком аеранта, примењен је аерант у количини од 0.008% у односу на масу цемента. Такође, дробљена гума је коришћена као запреминска замена ситног агрегата у процентима од 2.5%, 5% и 7.5% .

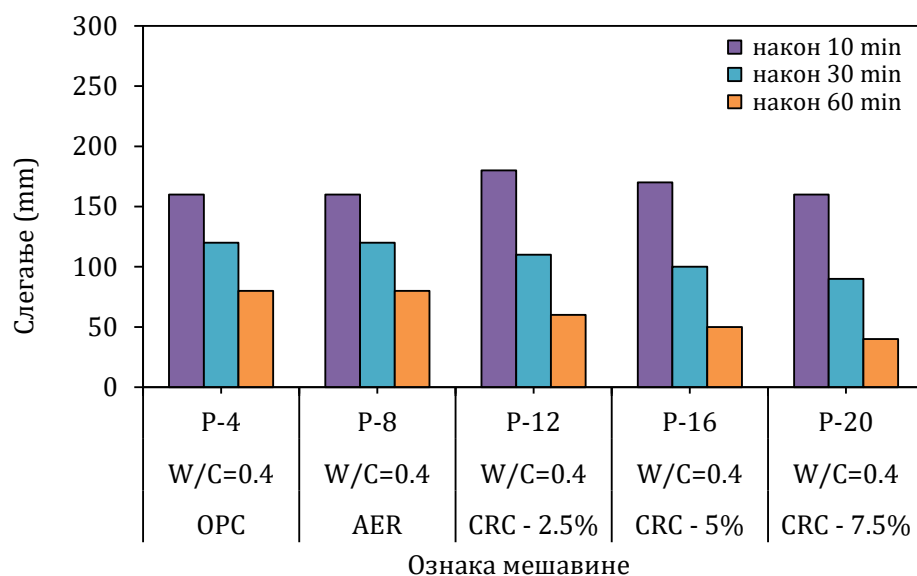
Врсте бетона су:

1. Обичан (референтни) бетон (P-4),
2. Бетон са хемијским додатком аеранта (P-8),
3. Бетон са запреминском заменом 2.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-12),
4. Бетон са запреминском заменом 5.0% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-16) и
5. Бетон са запреминском заменом 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом (P-20).

4.1. Свеж бетон

4.1.1. Конзистенција слегањем

Резултати мерења конзистенције слегањем испитиваних врста бетона дати су у Табели IV-10, док су резултати мерења конзистенције слегањем за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом графички приказани на Слици V-49. Слегања су праћена током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-49 – Конзистенција методом слегања бетони $w/c=0.40$

Ознаке мешавина бетона на слици:

OPC – Обичан (референтни) бетон,

AER – Бетон са хемијским додатком аеранта,

CRC – 2.5%, 5.0%, 7.5% - Бетони са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом

Анализом резултата добијених испитивањем конзистенције ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

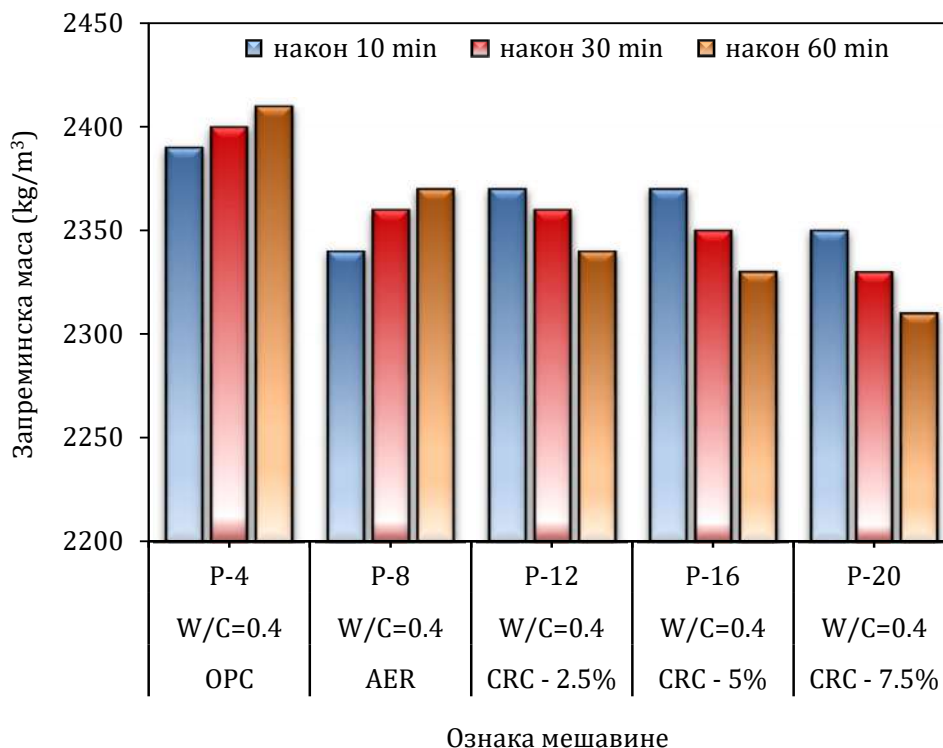
- На основу добијених мера слегања након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) задовољавају критеријум за класу S4 у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- Слегање бетона након 30 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину: бетон P-20 задовољава критеријум за класу слегања S2, док бетони

P-4, P-8, P-12 и P-16 задовољавају критеријум за класу слегања S3, у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.

- Слегање бетона након 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину: бетони P-4, P-8, P-12 и P-16 задовољавају критеријум за класу слегања S2, док бетон P-20 задовољава критеријум класе конзистенције S1, у складу са Табелом 3. тачке 4.2.1. стандарда SRPS EN 206.
- Слегање бетона кроз време се смањује за све врсте бетона. Код бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 5% и 7.5% (P-16 и P-20), уочено је смањење слегања мерено након 30 минута у односу на бетон са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом од 2.5% (P-10) за 9.1% и 18.2%, респективно, док то смањење мерено након 60 минута износи 16.7% за P-16 и 33.3% за P-20.
- Слегање бетона након 30 и 60 минута за све бетоне се смањује у односу на слегање након 10 минута од момента додавања воде и оно износи за: P-4 (25% и 50%), P-8 (25% и 50%), P-12 (38.9% и 66.7%), P-16 (41.2% и 70.6%) и P-20 (43.8% и 75%), респективно.
- Све бетонске мешавине су изгледале кохезивно и повезано; при испитивању мере слегања није долазило до сегрегације, издвајања воде, цемента и фракције агрегата, и бетони су се лако уградили у калупе.
- Примећује се повећање конзистенције при супституцији агрегата са 2.5, 5% рециклираном гумом, што се приписује ниској апсорпцији воде CR-a [79].

4.1.2. Запреминска маса

Резултати мерења запреминске масе испитиваних врста бетона дати су у Табели IV 11, а прорачунате вредности запреминских маса за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-50. Запреминске масе су праћене кроз време, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-50 – Запреминска маса бетони $w/c=0.40$

Анализом резултата добијених испитивањем запреминских маса ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

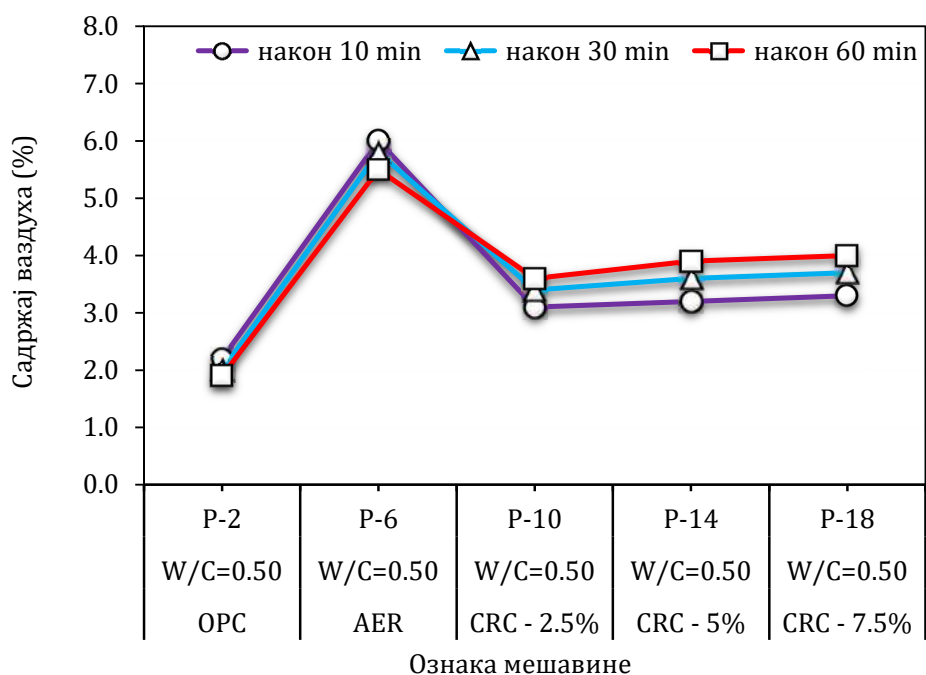
- На основу добијених вредности запреминских маса бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) имају запреминске масе у опсегу од 2340 до 2390 kg/m³. Запреминска маса бетона код мешавина P-8, P-12, P-16 и P-20, мерена након 10 минута од додавања воде, била је мања у односу на бетонску мешавину P-4 за 2.1%, 0.8%, 0.8% и 1.7%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-4 и P-8 вредности запреминских маса бетона мерених након 30 и 60 минута од додавања воде биле су више у односу на

мерења након 10 минута, за 0.4% и 0.8% за P-4, и 0.9% и 1.3% за P-8, респективно, док су код бетонских мешавина P-12, P-16 и P-20 добијене ниже вредности за 0.4% и 1.3% за P-12, 0.8% и 1.7% за P-16, и 0.8% и 1.7% за P-20.

- Сви бетони су се лако уграђивали у калупе помоћу первибратора.
- Смањење запреминске масе бетона при замени дела агрегата дробљеном гумом произлази из мање запреминске масе гуме у поређењу са природним агрегатом, као и из присуства веће количине заробљеног ваздуха између гумених честица и цементног малтера, који се повећава са повећањем количине CR [12], [22], [77], [91], [92].

4.1.3. Садржај ваздуха

Резултати мерења садржаја ваздуха испитиваних врста бетона дати су у Табела IV-10, а вредности садржаја ваздуха за: обичне (референтне) бетоне, бетоне са хемијским додатком аеранта, бетоне са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом су графички приказани на Слици V-51. Садржаји ваздуха су праћени током времена, и то након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.



Слика V-51 – Садржај ваздуха бетони $w/c=0.40$

Анализом резултата добијених испитивањем садржаја ваздуха ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

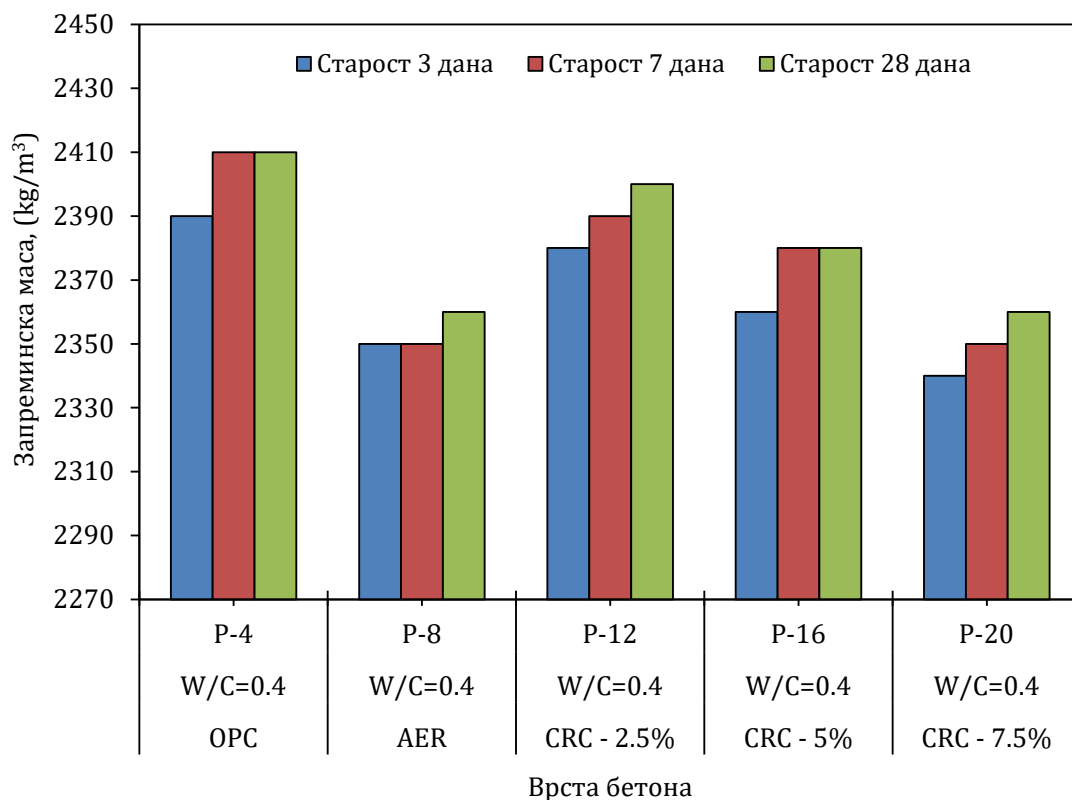
- На основу добијених вредности садржаја ваздуха бетона након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, сви бетони (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) имају количине увученог ваздуха у опсегу од 2.1% до 5.0 %. Количине ваздуха у бетону код мешавина P-8, P-12, P-16 и P-20, мерено након 10 минута од додавања воде, биле су веће у односу на бетонску мешавину P-4 за 138.1%, 19.0%, 23.8% и 33.3%, респективно.
- Код бетонских мешавина P-4 и P-8 вредности садржаја ваздуха у бетону мерених након 30 и 60 минута од додавања воде биле су ниже у односу на мерења након 10 минута, за 4.8% и 19.0% за P-4, и 10% и 20% за P-8, респективно, док су код бетонских мешавина P-12, P-16 и P-20 добијене више вредности за 8% и 16% за P-12, 7.7% и 19.2% за P-16, и 14.3% и 25.0% за P-20.
- Повећање садржаја ваздуха након 30 и 60 минута у односу на вредности након 10 минута није уобичајена појава за садржај ваздуха у бетону. Обично се дешава да вредност садржаја ваздуха у бетону опада током времена. Може се претпоставити да је повећање садржаја ваздуха током времена настало услед повећаног трења између честица дробљене гуме и осталих материјала приликом мешања.
- У односу на обичну (референтну) бетонску мешавину, сви испитивани бетони имају вишу вредност садржаја ваздуха. Код бетона са хемијским додатком аерантом то је очекивано; међутим, повећањем запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом примећује се повећан садржај ваздуха у односу на референтну бетонску мешавину (ОРС). Овакво понашање забележено је и у истраживањима других аутора [12], [84].

4.2. Очврсли бетон

4.2.1. Запреминска маса

Резултати испитивања запреминских маса очврслог бетона дати су у Табели VI-13.

Вредности запреминских маса очврслог бетона приказане су графички на Слици V-52.



Слика V-52 – Запреминска маса очврслог бетона $w/c=0.40$

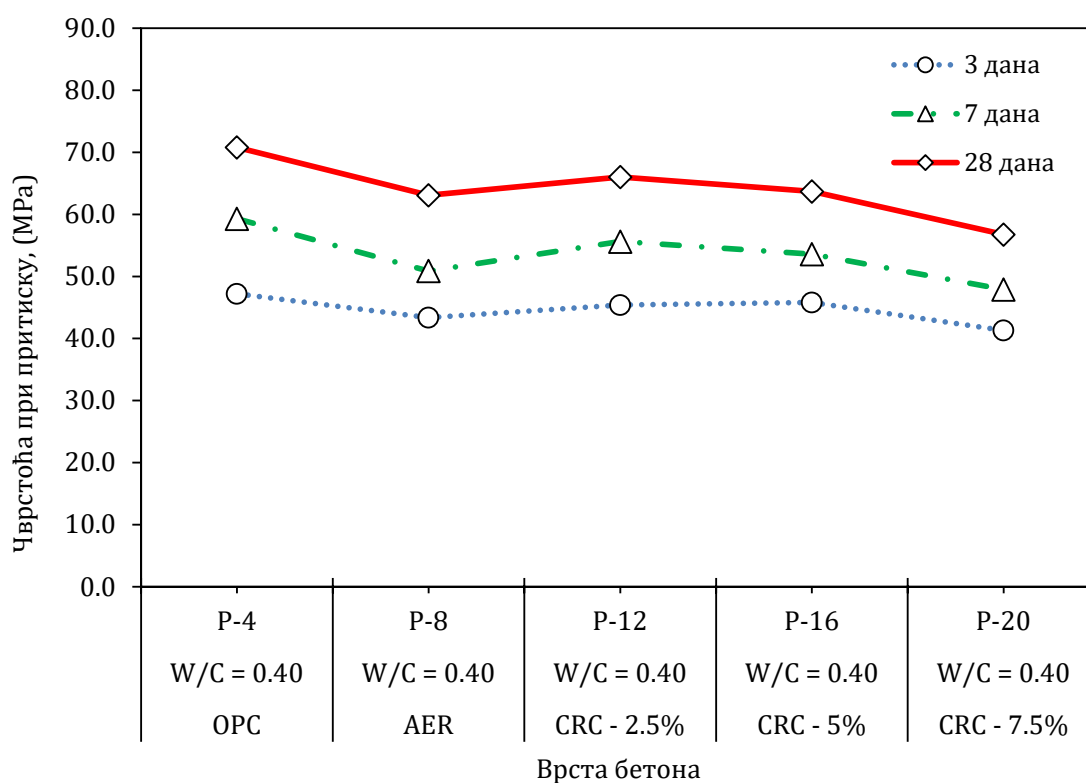
Анализом резултата добијених испитивањем запреминске масе ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности запреминске масе очврслог бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) варирају од 2340 kg/m³ до 2390 kg/m³, од 2350 kg/m³ до 2410 kg/m³ и од 2360 kg/m³ до 2410 kg/m³, респективно.
- Запреминска маса бетона код мешавина P-8, P-12, P-16 и P-20, у старости од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-4 за 1.7%, 2.5% и 2.1%; 0.4%, 0.8% и 0.4%; 1.3%, 1.2% и 1.2%; и 2.1%, 2.5% и 2.1%; респективно.

- Сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу запреминску масу у односу на обичан (референтни бетон).
- Бетони са додатком аеранта показују највеће смањење запреминске масе, што је очекивано због присуства додатних ваздушних пора које су унешене у структуру бетона додавањем аеранта.

4.2.2. Чврстоћа при притиску

Резултати испитивања чврстоћа при притиску очврслог бетона дати су у Табели IV-14. Вредности чврстоћа при притиску очврслог бетона приказане су графички на Слици V-53.



Слика V-53 – Чврстоћа при притиску бетона $w/c=0.40$

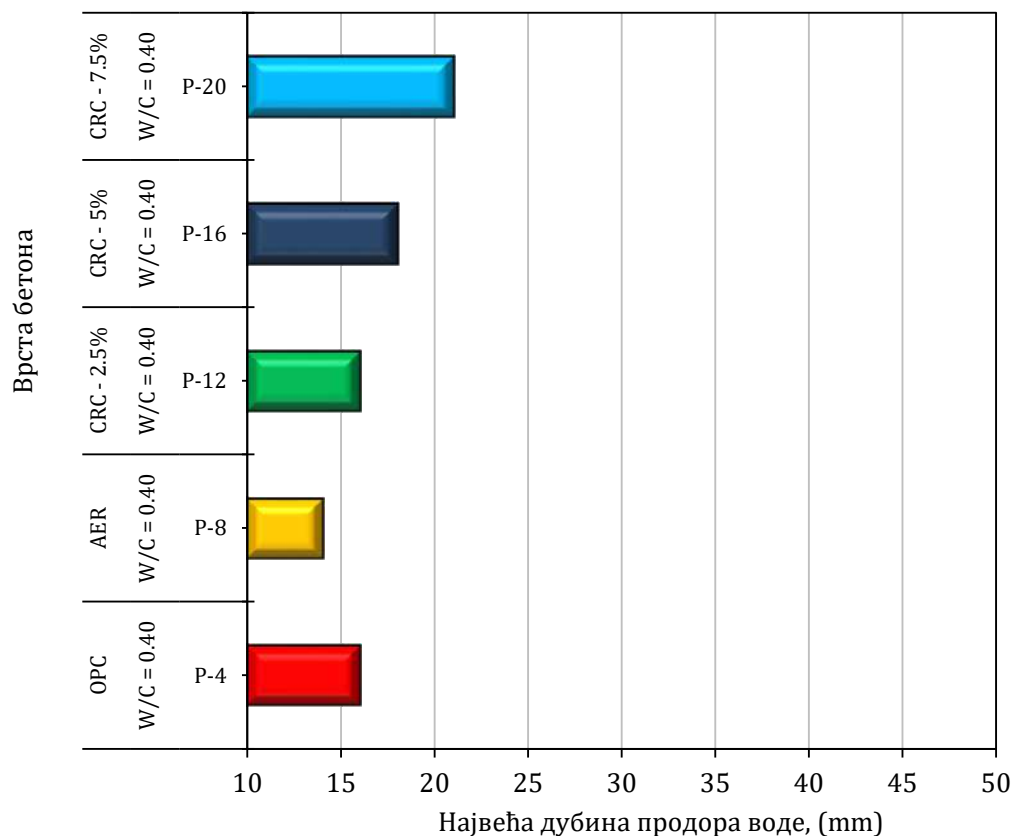
Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона након 3, 7 и 28 дана, вредности за бетоне (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) варирају од 47.2 (MPa) до 70.8 (MPa), од 43.4 (MPa) до 63.1 (MPa), од 45.4 (MPa) до 66.0 (MPa), од 45.8 (MPa) до 63.7 (MPa) и од 41.3 (MPa) до 56.8 (MPa), респективно.

- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-8, P-12, P-16 и P-20, у старости од 3, 7 и 28 дана, биле су ниже у односу на бетонску мешавину P-4 за: 81 %, 14.2% и 10.9%; 3.8%, 6.2% и 6.7%; 3.0%, 9.6% и 10.0%; и 12.5%, 19.2% и 19.8%, респективно.
- Сви бетони са додацима аеранта и дробљене гуме имају нижу чврстоћу при притиску у односу на обичан (референтни) бетон.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има неповољан утицај на чврстоћу при притиску у свим испитиваним старостима бетона. Резултат чврстоће при притиску при 28-дневној старости за бетон са највећим садржајем гуме од 7.5% износи 56.8 МПа, што указује да се оваква врста бетона може користити у конструкцијске сврхе. На основу резултата чврстоће при притиску за ову групу бетона, са повећањем дробљене гуме прираст чврстоће при притиску у испитиваној старости од 3, 7 и 28 дана се смањује и има неповољан утицај у односу на обичан (референтни) бетон. Salehudin и др. [74] у својим истраживањима приказују слично понашање чврстоће при притиску бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом.
- Највишу чврстоћу при притиску је постигао обичан (референтни) бетон са 28-дневном чврстоћом од 70.8 (МПа).

4.2.3. Водонепропустљивост бетона

Резултати испитивања дубине продора воде за наведене врсте бетона дати су у Табели IV-15. Вредности дубине продора воде бетона за сваку врсту бетона у овој групи бетона приказана су графички на Слици V-54.



Слика V-54 - Вредности дубине продора воде бетона $w/c=0.40$

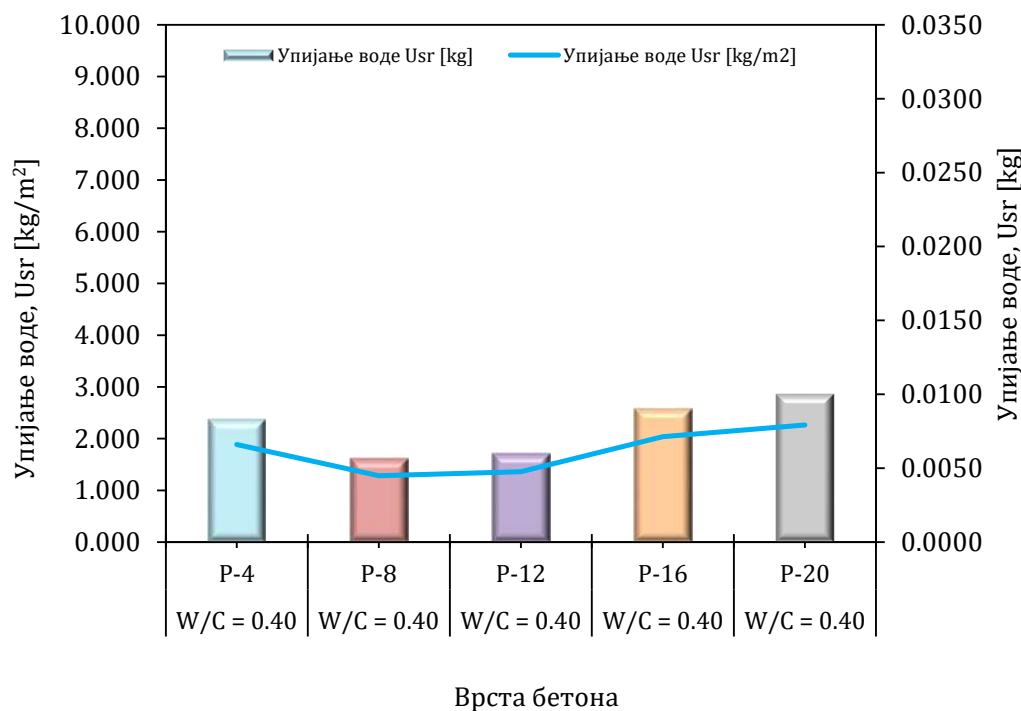
Анализом резултата на дијаграму, могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности дубина продирања воде под притиском у бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) варирају од 14 (mm) до 21 (mm), респективно. Најнижа вредности дубине продирања воде под притиском забележена је код бетона P-8, а износи 14 mm, што задовољава услов за класу водонепропустљивости V-3, Табела 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023. Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су највеће вредности код ове врсте бетона и то: 16 mm, 18mm и 21 mm, респективно, које

задовољавају услов за класу водонепропустљивости V-3 (P-12 и P-16) и V-2 (P-20), према Табели 9. тачка 5.3.1. стандарда SRPS U.M1.206:2023.

- У односу на бетонску мешавину P-4, највећа дубина продирања воде под притиском код мешавине: P-8 је нижа за 12.5% , P-12 има исту вредност, P-16 виша за 12.5, P-20 виша за 31.3%.
- Запреминска замена 2.5% дробљене гуме у ситном агрегату има исти утицај на водонепропустљивост бетона у односу на обичан (референтни) бетон. Такође, са повећањем садржаја дробљен гуме повећава се дубина продирања воде под притиском за ову групу бетона.
- Највиша вредност дубине продора воде постигнута је код бетона са додатком 7.5% дробљене гуме (P-20), и износи 21 mm.
- Повећање удела дробљене гуме у бетону негативно утиче на његову водонепропустљивост у поређењу са обичним (референтним) бетоном. Како је наведено у истраживању Munoz-Sanchez и сарадника [108], слаба адхезија између цементне пасте и зрна дробљене гуме доводи до повећане водопропустљивости. Поред тога, дубина продирања воде расте са повећањем количине CR у бетону, што је последица присуства веће количине ваздушних шупљина које настају током процеса мешања [21], [27], [107].

На основу мерења масе упијене воде и срачунатих средњих вредности упијене воде по површини, добијени су резултати који су приказани у Табели IV-15, а вредности количине упијања воде и срачунате средње вредности упијања воде по површини за ову групу бетона графички су приказане на Слици V-55.



Слика V-55 - Вредности упијања воде бетони $w/c=0.40$

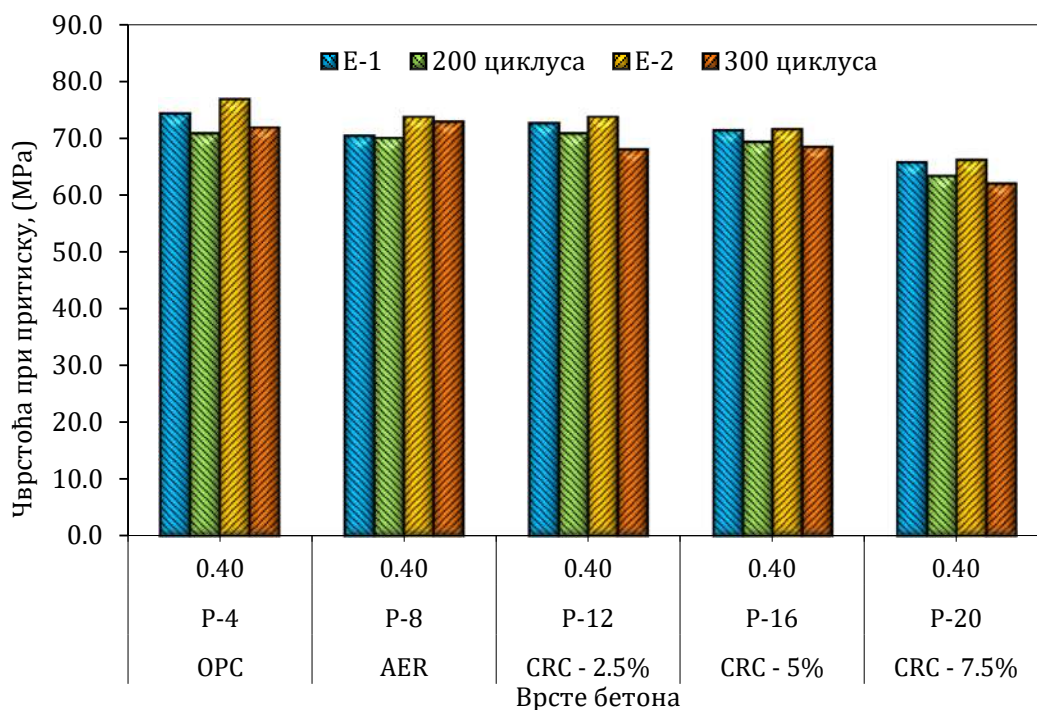
Анализом резултата добијених мерењем маса и срачунатих вредности количине упијања воде, која је израчуната као маса по површини, за ову групу бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности упијања воде и срачунате вредности упијања воде по површини у бетонске узорке након 28 дана, вредности за бетоне (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) варирају од 0.0057 (kg) до 0.0100 (kg) и од 1.28 (kg/m²) до 2.26 (kg/m²), респективно. Најнижа вредност упијања воде и упијања воде по површини забележена је код бетона P-8, а износе 0.0057 (kg), односно 1.28 (kg/m²). Код бетона са додатком 5% (P-16) и 7.5% (P-20) дробљене гуме добијене су више вредности у односу на обичан (референтни) бетон (P-4) за 8% и 20%, док је код бетона са додатком 2.5% дробљене гуме добијена нижа вредност за 28%.
- Запреминска замена ситног агрегата дробљеном гумом од 5% (P-16) и 7.5% (P-20) има неповољан утицај, јер се упијање воде повећава у односу на референтни бетон. Међутим, са запреминском заменом од 2.5%, постиже се позитиван утицај јер је количина упијања воде смањена код P-12 у односу на обичан (референтни) бетон (P-4). Ова тенденција, где додавање дробљене

гуме доводи до повећава упијања воде, потврђена је и у истраживањима [43], [74], [97].

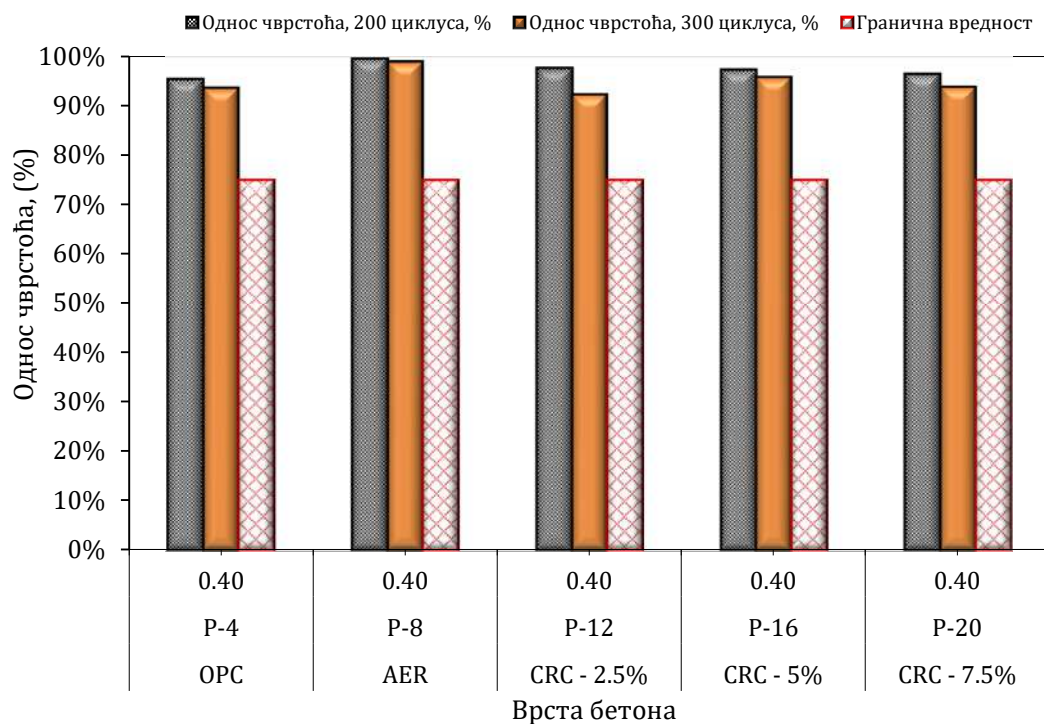
4.3.4. Отпорност бетона на дејство мраза

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза дати су у Табели IV-16. Резултати испитивања чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-56.



Слика V-56 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза бетона $w/c=0.40$

Однос чврстоће при притиску узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака приказан је графички на Слици V-57.



Слика V-57 – Однос чврстоћа узорака након дејства мраза и еталонских узорака бетона $w/c=0.40$

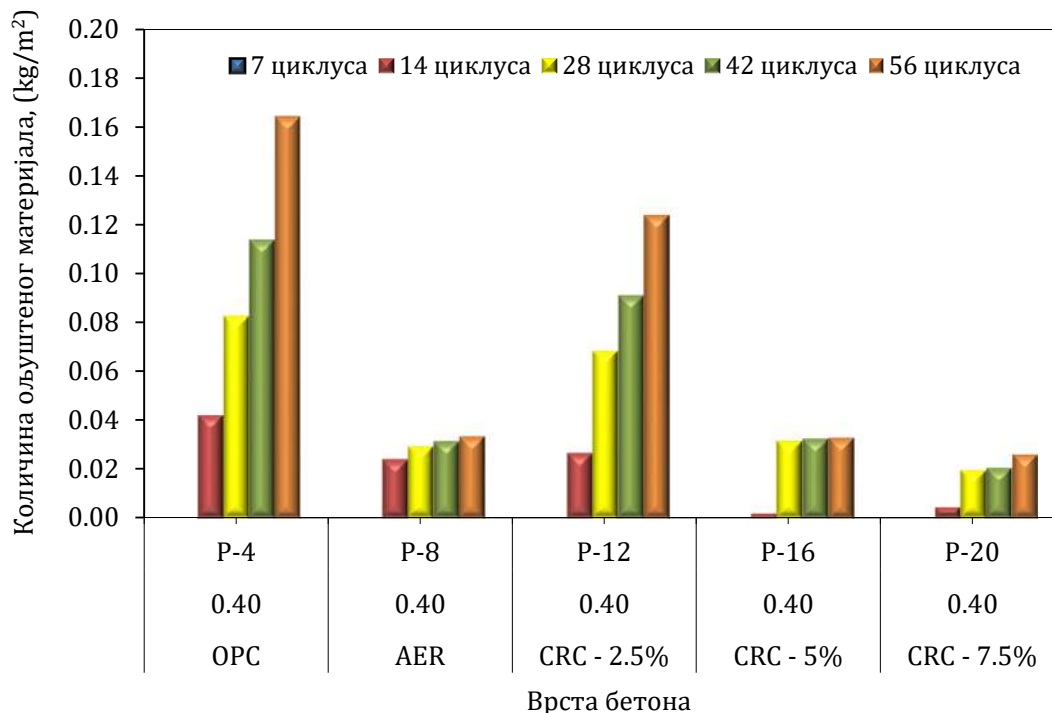
Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорака (Е-1), који су испитани при еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-4, P-8 P-12, P-16 и P-20) варирају од 65.8 (МПа) до 74.4 (МПа), респективно.
- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-4, P-8 P-12, P-16 и P-20 након 200 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорака који нису замрзавани за: 5%, 1%, 2%, 3% и 4%, респективно.
- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску бетона еталонских узорака (Е-2), који су испитани при еквивалентној старости бетона, вредности за бетоне (P-4, P-8 P-12, P-16 и P-20) варирају од 66.2 (МПа) до 76.9 (МПа), респективно.

- Чврстоћа при притиску бетона код мешавина P-4, P-8 P-12, P-16 и P-20 након 300 циклуса замрзавања/одмрзавања била је нижа у односу на чврстоће при притиску добијене код еталонских узорака који нису замрзавани за: 6%, 1%, 8%, 4% и 6%, респективно.
- На основу добијеног односа чврстоће након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака, сви бетони у овој групи постигли су однос чврстоће већи од 75%, што задовољава услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорака од 75% према Табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Бетонске мешавине са запреминском заменом од 5% (P-16) и 7.5% (P-20) ситног агрегата дробљеном гумом су показале повољне резултате са аспекта односа чврстоће при притиску код узорака који су испитивани након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања, јер су код ових бетона добијени већи или исти односи чврстоће у односу на обичан (референтни) бетон (P-4).
- Повећан садржај ваздуха, који је настао током мешања бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом у процентима од 5% и 7,5%, створио је довољан ваздушни простор у структури бетона, омогућавајући ширење леда током циклуса замрзавања и одмрзавања, како је наведено и у истраживањима других аутора [48].
- Флексибилност дробљених зрна гуме, која ублажава напоне затезања настале ширењем леда у структури бетона, значајно побољшава отпорност бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања, како је објављено у истраживањима [84], [94], [110], [111].

4.3.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање дати су у Табели IV-17. Резултати испитивања количине ољуштеног материјала за ову групу бетона приказани су графички на Слици V-58.



Слика V-58 – Количина ољуштеног материјала бетони $w/c=0.40$

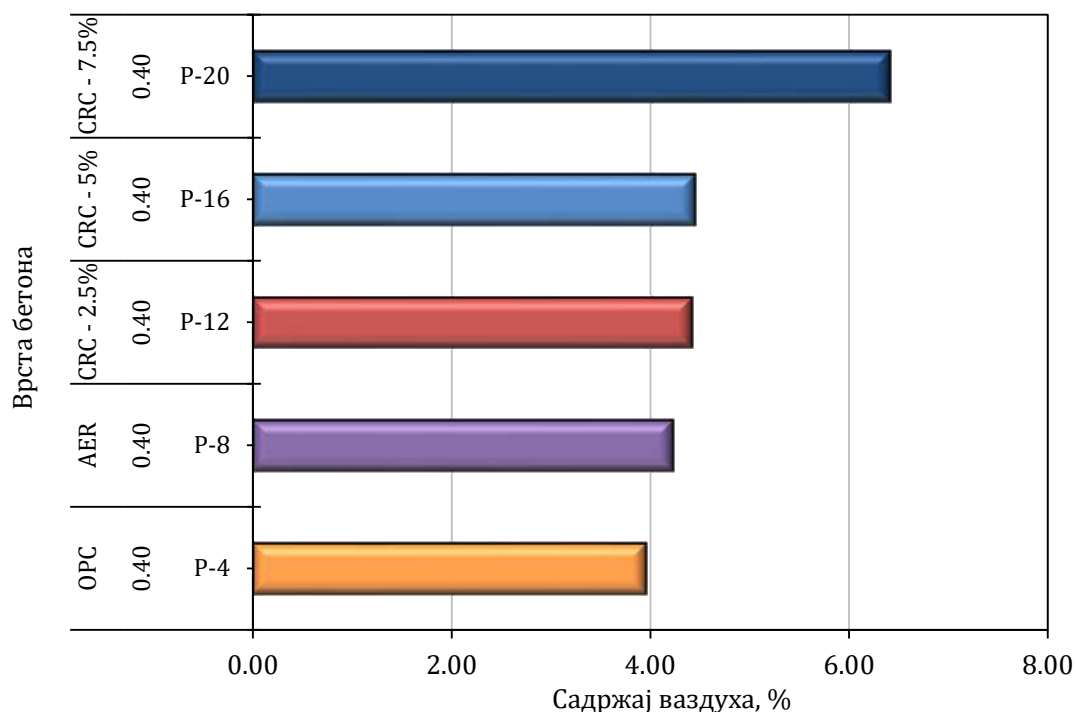
Анализом резултата добијених количине ољуштеног материјала са површина бетонских узорака ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- Након 7 циклуса замрзавања/одмрзавања уз присуство соли, није дошло до значајног оштећења на површинама бетона, што указује на то да у овој раној фази није било значајног љуштења на површинама бетона.
- На основу добијених вредности, количина ољуштеног материјала која је добијена код бетонских мешавина (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) варира од 0.02 (kg/m^2) до 0.04 (kg/m^2) након 14 циклуса, од 0.02 (kg/m^2) до 0.08 (kg/m^2) након 28 циклуса, од 0.03 (kg/m^2) до 0.11 (kg/m^2) након 42 циклуса и од 0.03 (kg/m^2) до 0.16 (kg/m^2) након 56 циклуса, респективно.
- Након 28, 42 и 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, бетон са 7.5% запреминске замене дробљене гуме у ситном агрегату (P-8) показује најмању вредност ољуштеног материјала са површине бетонских узорака.

- На основу добијених вредности количина ољуштеног материјала, све врсте бетона у овој групи, задовољавају захтеване највеће дозвољене граничне вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања према Табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Бетонске мешавине са аерантом и вишим процентима дробљене гуме (5% и 7.5%) су показале бољу отпорност на дејство мраза уз присуство соли у поређењу са обичним (реферетним) бетоном и бетоном са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом.
- Током мешања бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом у процентима од 5% и 7,5%, дошло је до повећања садржаја ваздуха, што је резултирало стварањем довољно великог ваздушног простора у структури бетона, који омогућава несметано ширење леда током циклуса замрзавања и одмрзавања, као што је наведено у истраживању [48].
- Флексибилност дробљених зрна гуме, која ублажава напоне затезања настале ширењем леда у бетону, има значајан утицај на повећање отпорности бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања, што је потврђено и у истраживањима других аутора [84], [94], [110], [111].

4.3.6. Карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону

Резултати испитивања садржаја ваздуха у очврслом бетону дати су у Табели IV-18. Вредности садржаја ваздуха за сваку врсту бетона из ове групе бетона приказана су графички на Слици V-59.



Слика V-59 - Вредности садржаја ваздуха бетони $w/c=0.40$

Анализом резултата на дијаграму, могу се извести следећи закључци за ову врсту бетона:

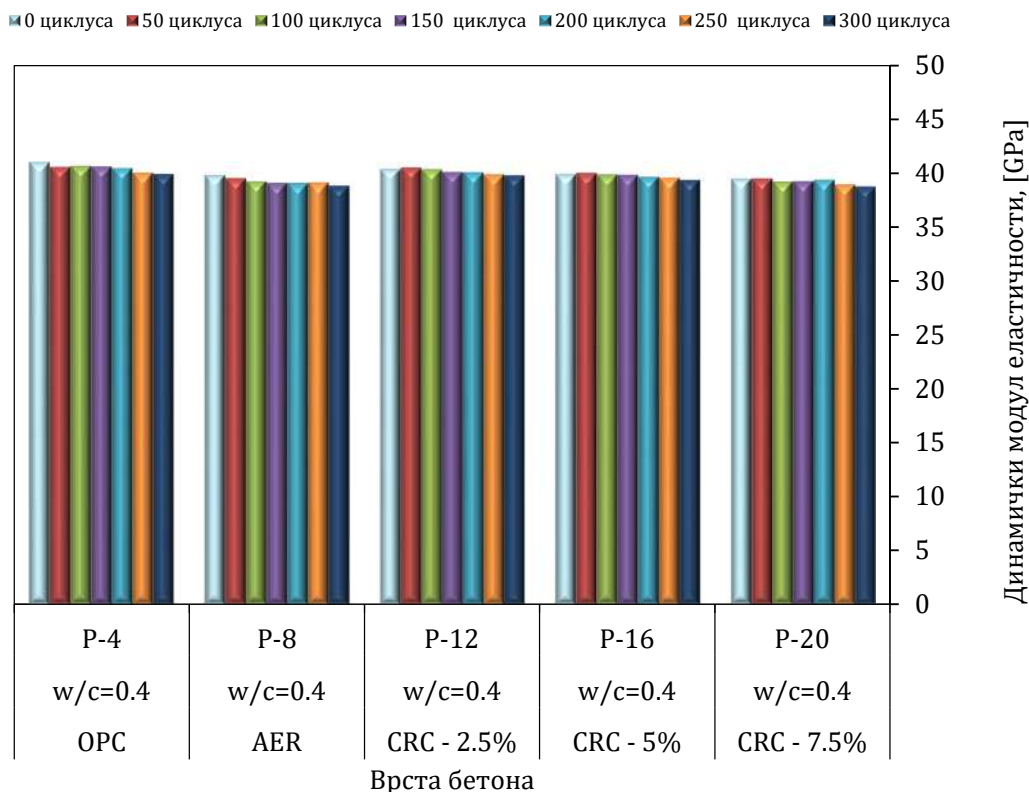
- На основу добијених вредности садржаја ваздуха у очврслом бетону у старости од 28 дана, вредности за бетоне (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) варирају од 3.94 (%) до 6.40 (%), респективно. Најнижа вредност садржаја ваздуха забележена је код бетона P-4, а износи 3.94 (%). Код бетона са додатком 2,5%, 5% и 7.5% дробљене гуме добијене су вредности 4.40 (%), 4.44 (%) и 6.40 (%), респективно.
- Са повећањем садржаја дробљене гуме добијају се веће вредности садржаја ваздуха у бетон.
- Повећање процента дробљене гуме у бетону има утицај на повећање садржаја ваздуха у односу на обичан (референтни) бетон. Највиша

вредност садржаја ваздуха постигнута је код бетона са додатком 7.5% дробљене гуме (P-19), а износи 6.40(%).

- Прегледом научне литературе утврђено је да не постоје слична истраживања која су се бавила испитивањем карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом.

4.2.7. Динамички модул еластичности

Резултати испитивања динамичког модула еластичности дати су у Табели IV-19. Вредности динамичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-60.



Слика V-60 – Динамички модул еластичности бетони $w/c=0.40$

Анализом резултата добијених испитивањем динамичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности динамичког модула еластичности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања, вредности за бетоне (P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20) варирају од 39.52 (GPa) до 41.05 (GPa),

респективно. Уочава се смањење вредности динамичког модула еластичности код Р-8, Р-12, Р-16 и Р-20, за 3.0 %, 1.5%, 2.7% и 3.7% у односу на обичан (референтни) бетон. Са повећањем садржаја дробљене гуме вредности динамичког модула еластичности опадају у односу на обичан (референтни) бетон.

- У односу на добијене вредности пре излагања узорака циклусима замрзавања/одмрзавања и након 300 циклусима наизменичног замрзавања/одмрзавања, вредности динамичког модула еластичности су за: обичан (референтни) бетон Р-4 у опадању за 2.7%, код бетона са хемијским додатком аеранта Р-8 у опадању за 2.5%, док код бетона са запреминском заменом 2.5% , 5% и 7.5% (Р-11, Р-15, Р-19) дробљеном гумом ситног агрегата редукција износи: 1.6%, 1.3% и 1.9%, респективно.
- Обичан (референтни) бетон (Р-4) показује постепени пад динамичког модула еластичности како број циклуса замрзавања/одмрзавања расте, са највећим смањењем након 300 циклуса. Почетна вредност је 40.05 GPa, док се након 300 циклуса смањује на 39.93 GPa. Ово смањење указује на добру отпорност, али мању у поређењу са бетонима са додатком дробљене гуме.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (Р-8) има почетну вредност динамичког модула еластичности од 39.84 GPa. Током 300 циклуса, показује постепени пад динамичког модула еластичности, са смањењем на 38.84 GPa, што представља деградацију од 2.5%, указујући на добру отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања, али мању у поређењу са бетонима са додатком дробљене гуме.
- Бетони са запреминском заменом од 2.5%, 5%, 7.5% ситног агрегата дробљеном гумом (Р-12, Р-16, Р-20) показују различите трендове смањења динамичког модула еластичности, при чему је смањење мање изражено код бетона са 5% дробљене гуме.
- Бетон са 2.5% дробљене гуме (Р-12) има почетну вредност од 40.43 GPa. Након 300 циклуса, смањује се на 39.80 GPa. Смањење износи 0.63 GPa, што је деградација од 1.6%, што показује веома стабилне вредности након циклуса замрзавања/одмрзавања.
- Бетон са 5% дробљене гуме (Р-16) има најмање смањење модула еластичности, након 300 циклуса, што га чини најотпорнијим на циклусе

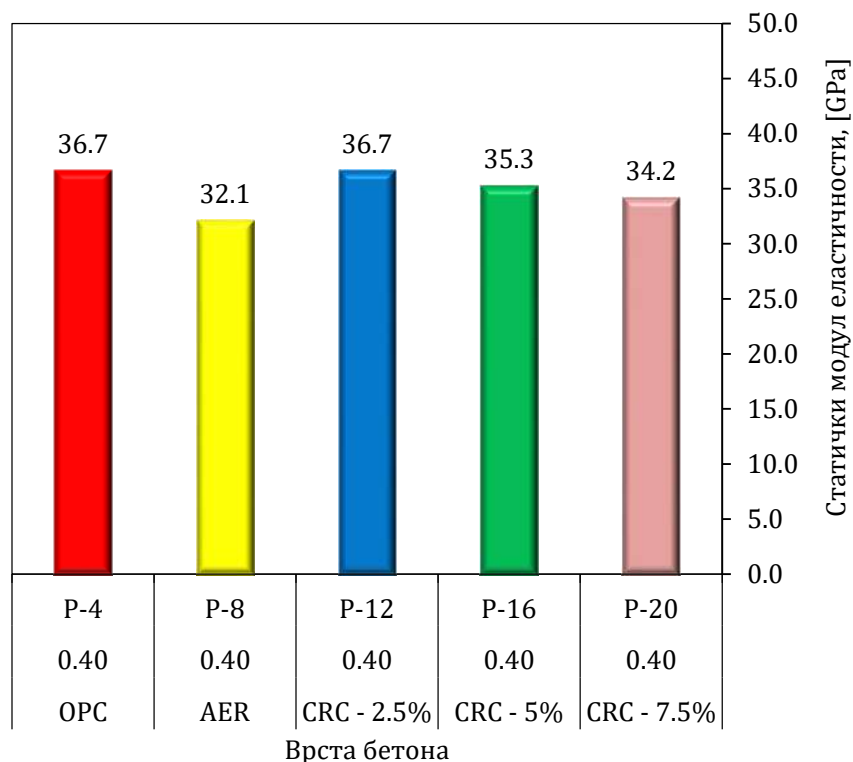
замрзавања/одмрзавања међу бетонским мешавинама. Почетна вредност је 39.93 GPa, док након 300 циклуса износи 39.41 GPa. Смањење износи 0.52 GPa, деградација од 1.3%, што је најмања вредност у поређењу са осталим мешавинама са додатком дробљене гуме.

- Бетон са 7.5% дробљене гуме (P-20) показује благу деградацију динамичког модула еластичности, са почетном вредности од 39.52 GPa, а након 300 циклуса 38.78 GPa. Смањење износи 0.75 GPa, што је деградација од 1.9%, указујући на врло добру отпорност на циклусе замрзавања/одмрзавања.
- Бетони са дробљеном гумом, посебно са већим процентима замене, показују већу отпорност на смањење динамичког модула еластичности у поређењу са обичним (референтним) бетоном, чинећи их погоднијим за употребу у условима где су чести циклуси замрзавања/одмрзавања.
- Гума има нижи динамички модул у поређењу са очврслим бетоном. Како се повећава замена ситног агрегата дробљеном гумом, динамички модул еластичности опада.
- Поред деформабилности честица дробљене гуме у структури бетона, ваздух који се формира током мешања, и то унутар и око честица дробљене гуме, доприноси великој отпорности бетона на циклусе замрзавања и одмрзавања [44,], [84], [94], [110], [111].
- Смањење динамичког модула еластичности као последица повећања замене ситног агрегата дробљеном гумом може се објаснити нижом специфичном тежином дробљене гуме у односу на природни ситни агрегат, што доводи до веће брзине проласка ултразвука [37].

4.3.8. Статички модул еластичности

Резултати испитивања статичког модула еластичности дати су у Табели IV-20.

Вредности статичког модула еластичности приказане су графички на Слици V-61.



Слика V-61 – Статички модул еластичности бетони $w/c=0.40$

Анализом резултата добијених испитивањем статичког модула еластичности ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

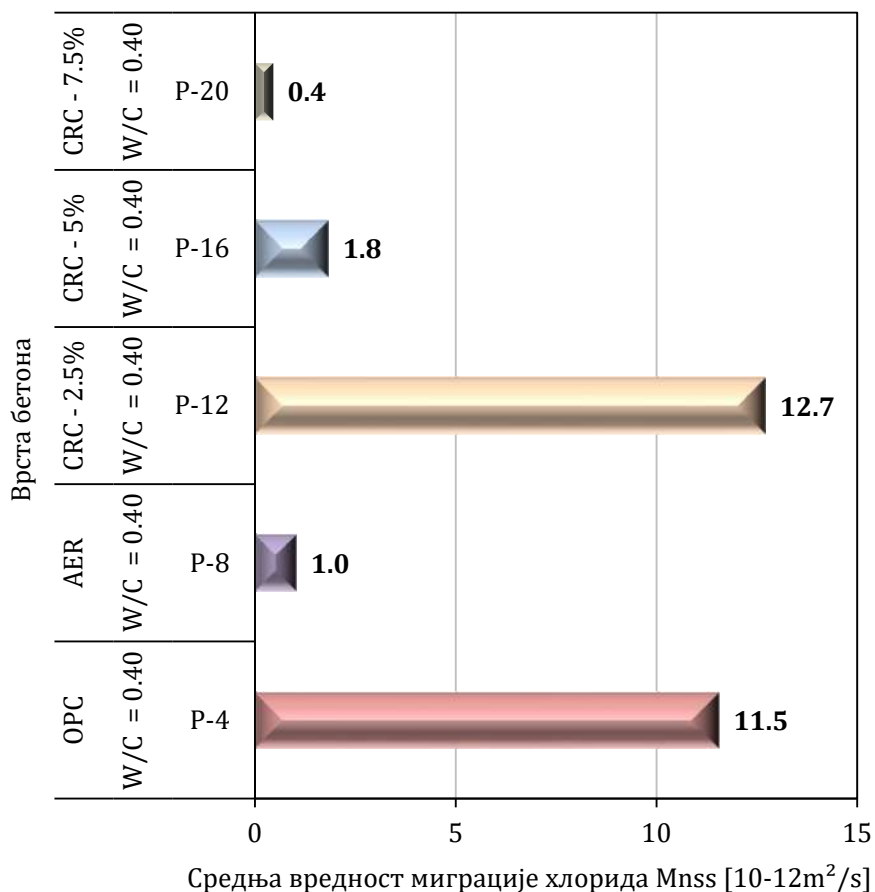
- На основу добијених вредности статичког модула еластичности, примећујемо да се вредности за бетонске мешавине P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20 крећу од 32.1 (GPa) до 36.7 (GPa), респективно. Такође се примећује смањење вредности статичког модула еластичности код P-8, P-16 и P-20 за 12.5%, 3.8% и 6.8% у односу на обичан (референтни) бетон (P-4). Међутим, код бетонске мешавине са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-12), добијена је идентична вредност статичког модула еластичности од 36.7 GPa као и код P-4. Ово су уједно и две највише постигнуте вредности статичког модула еластичности код ове групе бетона.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-8) и бетони са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-16 и P-20) имају

ниже вредности статичког модула еластичности у поређењу са обичним (референтним) бетоном (P-4), јер се услед увећаног формирања сферичних пора ваздуха (kod P-8) и убацивања еластичних дробљених гумених зрна (kod P-16 i P-20) у структури бетона смањује крутост агрегата, те и бетона. Вредност статичког модула еластичности код ових врста бетона мања је за 12.5%, 3.8% и 6.8% у односу на обични (референтни) бетон.

- Смањење статичког модула еластичности бетона са рециклираном гумом је последица мање отпорности гуме на деформације, односно ниже вредности модула еластичности гуме у односу на природни камени агрегат, као и слабије везе између зрна дробљене гуме и цементног камена, што је потврђено и у другим истраживањима [59], [62].

4.3.9. Коефицијент миграције хлорида

Резултати испитивања коефицијента миграције хлорида дати су у Табели IV-21. Добијене вредности коефицијента миграције хлорида приказане су графички на Слици V-62.



Слика V-62 – Коефицијент миграције хлорида бетони w/c=0.40

Анализом резултата добијених вредности коефицијената миграције хлорида ове групе бетона могу се извести следећи закључци:

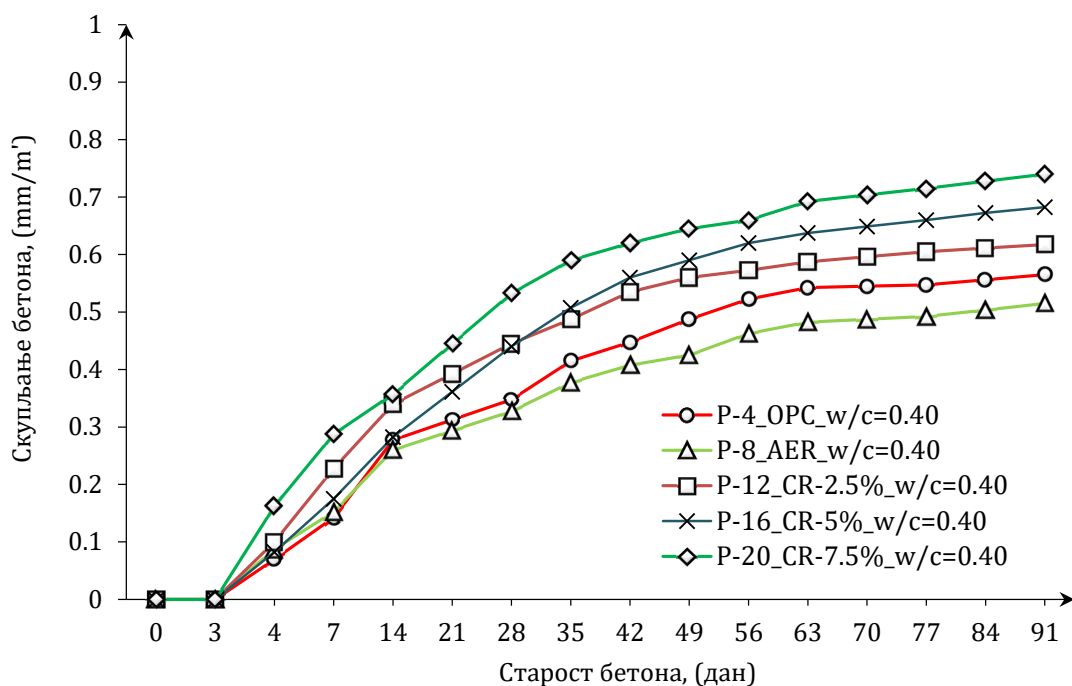
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида, уочавамо да вредности за P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20 варирају од 0.4 до 12.7 [10⁻¹² m²/s], респективно. Примећено је повећање вредности коефицијента миграције хлорида код P-12 за 10.1%, у односу на обичан (референтни) бетон (P-3), док се код бетона са хемијским додатком аеранта (P-8), и бетона са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-16 и P-20) вредност смањује за 91.2%, 84.3% и 96.2%, респективно.

- Најнижа вредност коефицијента миграције хлорида постигнута је код бетона са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-20), са коефицијентом од $0.4 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$. Присуство веће количине дробљене гуме у структури очврслог бетона позитивно утиче на смањење коефицијента миграције хлорида, јер већа количина гуме смањује дубину продирања хлорида.
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида можемо закључити да бетон са хемијским додатком (P-8), бетони са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-16 и P20), према дефинисаним критеријумима коефицијената миграције за појединачне и просечне вредности, задовољавају критеријуме за класу отпорности CL-3, односно класу изложености XD3, према Табели 10, тачке 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- На основу добијених вредности коефицијената миграције хлорида, можемо закључити да обичан (референтни) бетон (P-4) и бетон са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-12), имају сличне вредности коефицијента миграције хлорида, $11.5 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$ и $12.7 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$, и $11.4 [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$, респективно. Према дефинисаним критеријумима за коефицијенте миграције, ови бетони задовољавају тражене критеријуме за класу отпорности CL-1 и класу изложености XD1, наведене у Табели 10, тачка 5.3.2. стандарда SRPS U.M1.206:2023.
- Присуство дробљене гуме преко 5% у структури очврслог бетона спречава продирање хлоридних јона, што је потврђено и истраживањима која су показала да повећана присутност гумених зрна значајно смањује пермеабилност бетона за штетне супстанце.
- Побољшање отпорности бетона на продор хлоридних јона при замени 5% и 7,5% запремине ситног агрегата дробљеном гумом приписује се хидрофобним карактеристикама гуме, које успоравају улазак хлоридних јона у структуру бетона. Сличне закључке су изнели и аутори Thomas и сарадници [39], који су истраживали утицај замене ситног агрегата дробљеном гумом у распону од 2,5% до 20%. Утврђено је да бетон са 2,5–7,5% гумених честица показује мању дубину продирања хлоридних јона или једнаку оној код контролне мешавине.

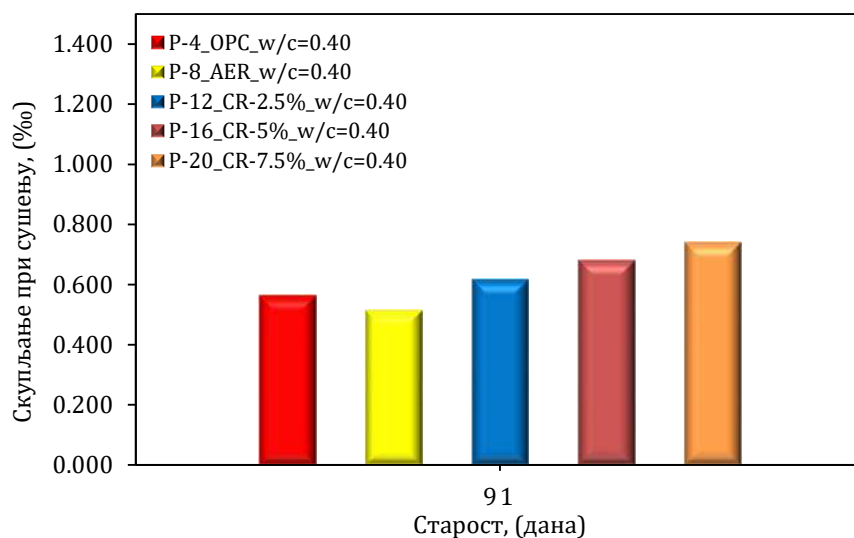
- Међутим, показало се да замена ситног агрегата од 2,5%, код ове групе бетона, није довољна да би се постигло значајно побољшање отпорности бетона на продор хлоридних јона.
- Према истраживању Zhu и сарадника [65], корозија арматурних шипки у бетону зависи од више фактора, због чега је степен корозије у контакту са хлоридном сољу превасходно одређен притиском финих пора у структури очврслог бетона. Додавање гуменог агрегата може, након промене контактнoг угла, променити притисак у порама и на тај начин смањити интензитет корозије челика.

4.3.10. Скупљање при сушењу

Резултати испитивања скупљања при сушењу свих врста бетона дате су у Табелама IV-22 до IV-26. Скупљање при сушењу бетона са приказано је графички на Слици V-63, а коначне вредности скупљања након 3 месеца испитивања на Слици V-64.



Слика V-63 – Скупљање при сушењу бетона $w/c=0.40$



Слика V-64 – Коначне вредности скупљања при сушењу бетона $w/c=0.40$ након 3 месеца испитивања

Анализом резултата на приказаним дијаграмима, могу се извести следећи закључци:

- У првим данима након уградње, сви бетони показују најизраженије скупљање које се постепено смањује. Након 28 дана, код бетонских мешавина P-4, P-8, P-12, P-16 и P-20, скупљање варира од -0.327 (‰) до -0.534 (‰), респективно. Након сса 60 дана, вредности скупљања се стабилизују и теже ка коначној вредности, не показујући значајне промене.
- Обичан (референтни) бетон (P-4) је након 91 дана имао скупљање од -0.569 (‰), са уједначеним трендом скупљања при сушењу до цца 60 дана. Након ове старости, вредности конвергирају ка коначној вредности.
- Бетон са хемијским додатком аеранта (P-8) након 91 дана имао је најмање скупљање од -0.515 (‰), што је мање за 9.4% у односу на обичан (референтни) бетон (P-4). Скупљање је такође најинтензивније у раним фазама, након чега се смањује током времена.
- Бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (P-12, P-16 и P-20), након 91 дана показали су скупљање од -0.620 до -0.742 (‰), респективно, што чини повећано скупљање за 9.0%, 21.4% и 30.3% у односу на обичан (референтни) бетон (P-4).

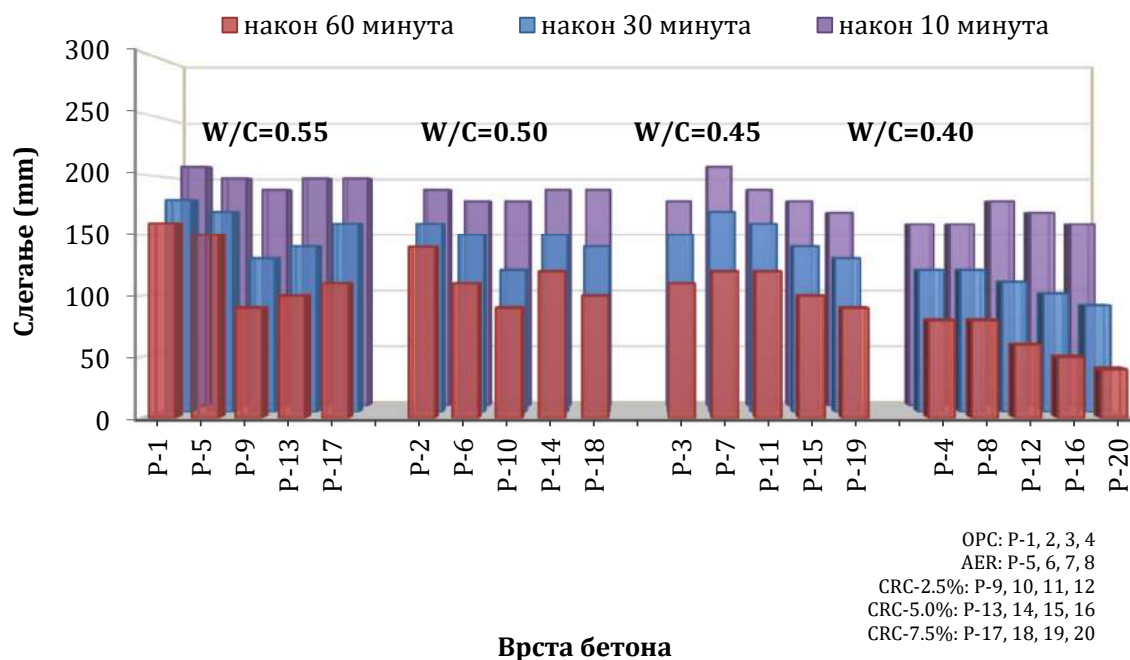
- Прегледом литературе пријављено је да је скупљење услед сушења бетона CRC веће у односу на референтну бетонску мешавину. Већи удео CR у бетонској мешавини узроковао је прекомерно скупљање при сушењу, што се може приписати повећаном броју ваздушних пора које омогућавају брже испаравање воде из бетонске мешавине [18], [58].

5. КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА

5.1. Свеж бетон

5.1.1. Конзистенција

Резултати мерења конзистенције методом слегања након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, код свих испитиваних врста бетона дати су у Табели IV-10, а графички приказани на Слици V-65.



Слика V-65 - Конзистенција испитиваних врста бетона

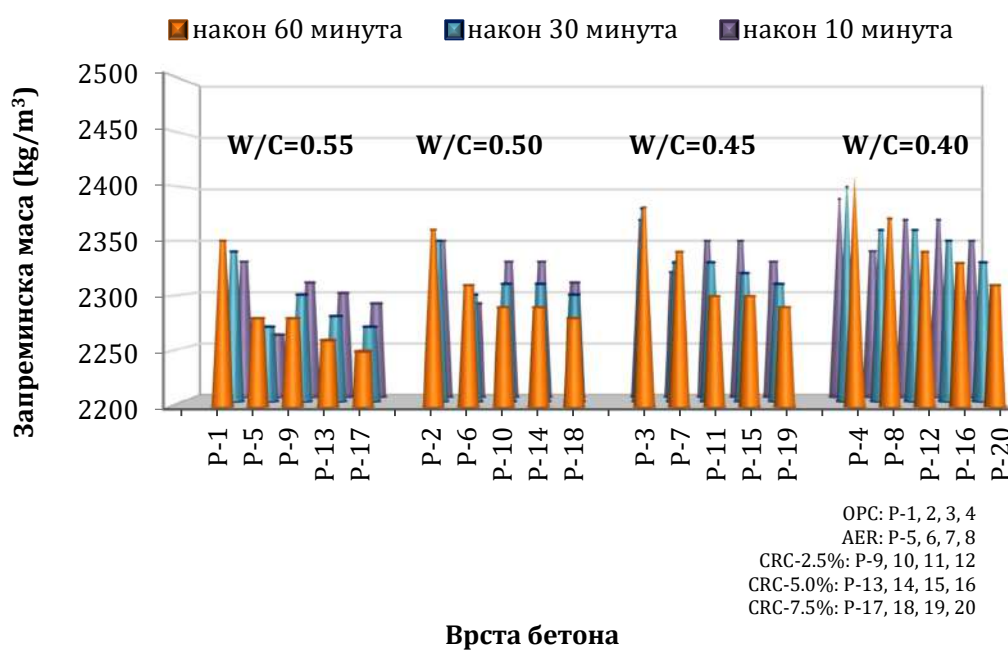
Анализом резултата добијених испитивањем конзистенције свих бетона, могу се извести следећи закључци:

- Конзистенција методом слегања свежег бетона опада са смањењем водоцементног односа (W/C),
- Повећање водоцементног односа (W/C) обично доводи до веће конзистенције бетона у првих 10 минута слегања, али након 30 и 60 минута ове разлике постају мање изражене.
- Бетони са нижим W/C имају тенденцију да брже губе своју флуидност, слегање и постају мање покретљиви након 30 и 60 минута.

- Бетони са 5% и 7.5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом, показују веће смањење конзистенције у поређењу са обичним (референтним) бетонима и бетонима са хемијским додатком аеранта, нарочито за ниже W/C односе.
- За већи водоцементни однос ($W/C=0.55$ и $W/C=0.50$), бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом у вредностима од 2.5%, 5% и 7.5% (CRC – 2.5%, CRC – 5% и CRC – 7.5%,) имају нешто нижу конзистенцију слегањем у поређењу са обичним (референтним) бетоном, али су генерално слични са бетонима са хемијским додатком аеранта (AER).
- Све бетонске мешавине су показивале висок ниво кохезије и повезаности. Приликом мерења слегања, није примећена сегрегација материјала, што је омогућило лако и ефикасно уграђивање бетона у калупе.

5.1.2. Запреминска маса

Резултати мерења запреминске масе након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, код свих испитиваних врста бетона дати су у Табели IV-11, а графички приказани на Слици V-66.



Слика V-66 – Запреминска маса свежег бетона испитиваних врста бетона

Анализом резултата добијених испитивањем запреминске масе свежег бетона, могу се извести следећи закључци:

- Општи тренд је да нижи водоцементни односи (ниже вредности W/C) обично доводе до веће запреминске масе бетона, што је последица мање количине воде у смеси и боље запреминске компактности материјала.
- Са смањењем водоцементног односа (нпр. од $W/C=0.55$ до $W/C=0.40$), запреминска маса бетона генерално расте након 10, 30 и 60 минута. То значи да бетон има већу густину и мању порозност при нижим W/C односима, што доприноси бољим механичким својствима.
- Добијене вредности запреминских маса код обичног (референтног) бетона (OPC) и бетона са додатком хемијског додатка аеранта (AER) након 30 и 60 минута показују растући тренд у односу на мерења запреминске масе свежег бетона 10 минута након додавања воде у бетонску мешавину. Код бетона са 2,5%, 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2,5%, CRC – 5,0% и CRC – 7,5%) добијене вредности запреминских маса показују опадајући тренд.
- Анализа података показује да водоцементни однос значајно утиче на запреминску масу бетона, при чему нижи W/C односи резултују већом запреминском масом.
- Бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC) и бетони са додатком хемијског додатка аеранта (AER), такође имају утицај на запреминску масу бетона, нарочито у комбинацији са различитим W/C односима. Утицај CRC и AER на запреминску масу бетона у свежем стању је претходно објашњен.

5.1.3. Садржај ваздуха

Резултати мерења садржаја ваздуха свежег бетона након 10, 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, код свих испитиваних врста бетона дати су у Табела IV-10, а графички приказани на Слици V-67.



Слика V-67 – Садржај ваздуха свежег бетона испитиваних врста бетона

Анализом резултата добијених испитивањем садржаја ваздуха свежег бетона, могу се извести следећи закључци:

- Општи тренд је да нижи водоцементни односи (мањи W/C) обично доводе до нижег садржаја ваздуха у свежег бетону, што је последица смањене количине воде у мешавини и боље запреминске компактности материјала, а уједно и мање порозности бетона. Ово понашање бетона примећено је и код врста бетона код којих је садржај ваздуха мерен након 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину.
- Добијене вредности садржаја ваздуха код обичног (референтног) бетона (OPC) и бетона са додатком хемијског додатка аеранта (AER) након 30 и 60 минута показују опадајући тренд у односу на мерења запреминске масе

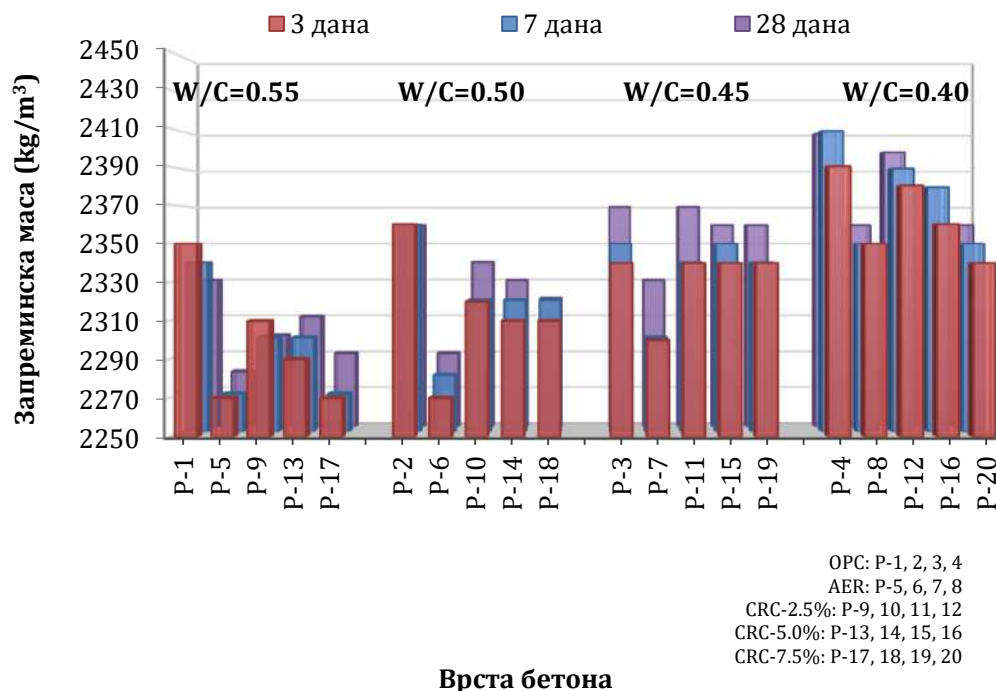
свежег бетона 10 минута након додавања воде у бетонску мешавину. Код бетона са 2,5%, 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2,5%, CRC – 5,0% и CRC – 7,5%) добијене вредности садржаја ваздуха показују растући тренд у односу на обичан (референтни) бетон (ОРС).

- Анализа података показује да водоцементни однос значајно утиче на садржај ваздуха у свежем бетону, при чему нижи W/C односи доводе до нижег садржаја ваздуха. Такође, повећањем садржаја дробљене гуме долази до повећања садржаја ваздуха у свежем бетону, о чему је претходно дискутовано.

5.2. Очврсли бетон

5.2.1. Запреминска маса

Резултати мерења запреминске масе код свих испитиваних врста бетона дати су у Табели VI-13, а графички приказани на Слици V-68.



Слика V-68 – Запреминска маса очврслог бетона испитиваних врста бетона

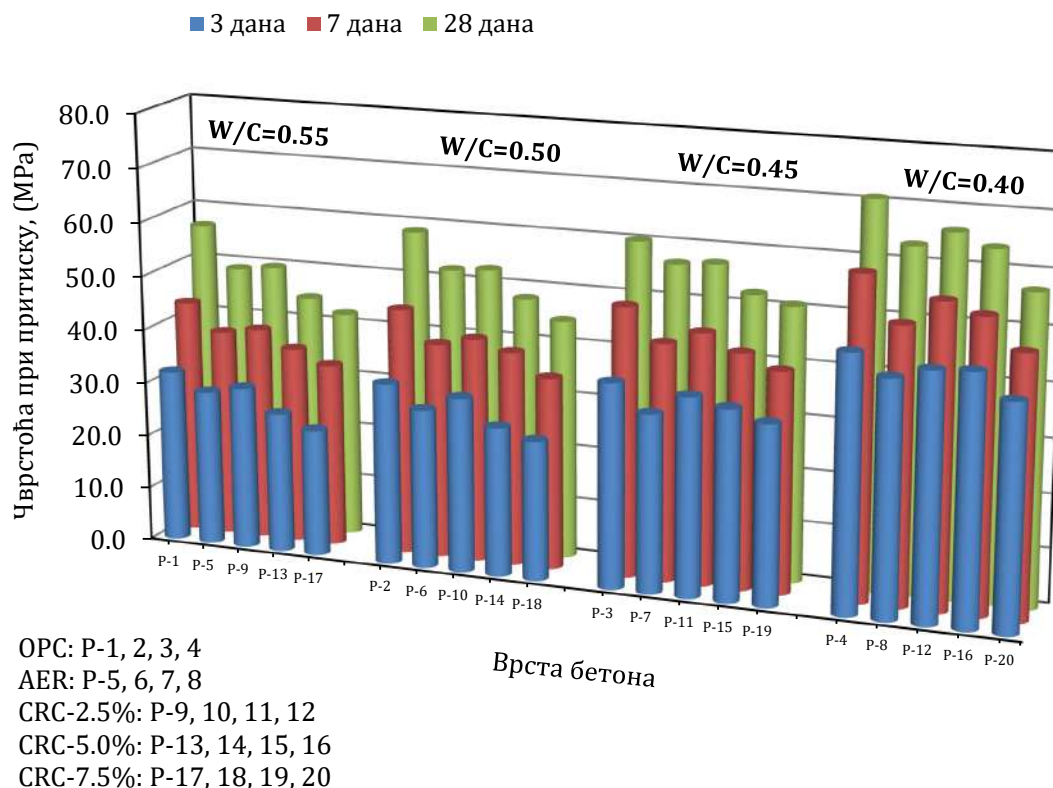
Анализом резултата добијених испитивањем запреминске масе очврслог бетона, могу се извести следећи закључци:

- Општи тренд је да нижи водоцементни односи (ниже вредности W/C) обично доводе до веће запреминске масе код свих бетона, што је последица мање количине воде у бетонској мешавини и боље запреминске компактности материјала.
- Генерално, бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2,5%, CRC – 5,0% и CRC – 7,5%) показују негативан утицај на запреминску масу очврслог бетона, јер се са повећањем садржаја гуме, запреминска маса смањује у односу на обичан (референтни) бетон (OPC).

- Анализа података показује да водоцементни однос значајно утиче на запреминску масу бетона, при чему нижи W/C односи доводе до веће запреминске масе. Поред тога, различите врсте додатака, као што су бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC) и бетони са додатком хемијског додатка аеранта (AER), такође имају утицај на запреминску масу бетона, нарочито у комбинацији са различитим W/C односима.

5.2.2. Чврстоћа при притиску

Резултати испитивања чврстоће при притиску свих врста бетона дати су у Табели IV-14. Резултати испитивања чврстоће бетона, приказани с обзиром на утицај запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом од 2.5%, 5% и 7.5% (CRC – 2.5%, CRC – 5.0% и CRC – 7.5%), у односу на водоцементни однос (W/C), приказани су графички на Слици V-69.



Слика V-69 - Чврстоћа при притиску бетона

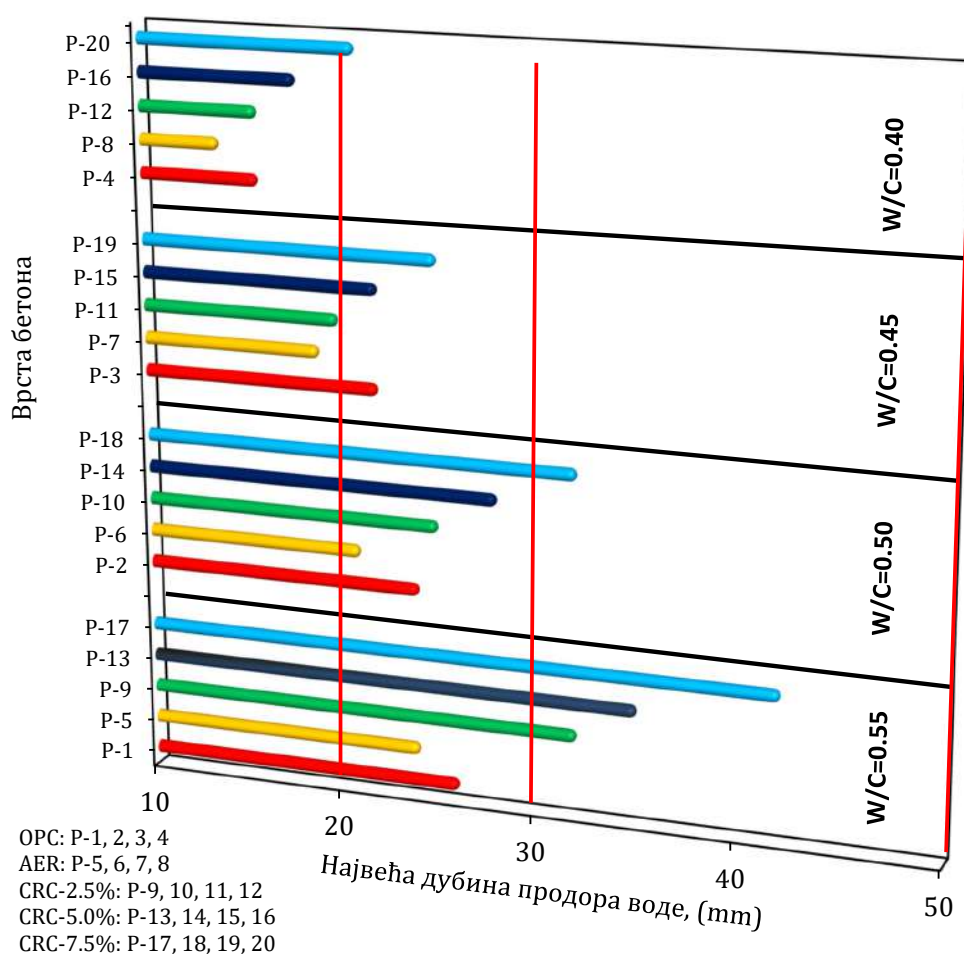
Анализом резултата приказаних на Слици V-69 може се закључити следеће:

- Општи тренд је да нижи водоцементни односи (ниже вредности W/C) обично доводе до веће чврстоће при притиску код свих бетона и у свим старостима, што се може приписати мањој општој порозности материјала и већем степену компактности. Највеће чврстоће при притиску добијене су код обичног (референтног) бетона (OPC) за сваку врсту бетона и са различитим водоцементним фактором (W/C). Генерално, најмање чврстоће при притиску у свим старостима, врстама бетона и примењеним водоцементним факторима постигао је бетон са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 7.5%).
- Бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%, CRC – 5.0% и CRC – 7.5%) показују негативан утицај на чврстоћу при притиску, јер се са повећањем садржаја гуме, чврстоћа при притиску смањује у односу на обичан (референтни) бетон (OPC), о чему је било дискутовано у претходним поглављима.
- Са друге стране, сви бетони са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%), у свим старостима и примењеним водоцементним односима (W/C), имају веће чврстоће при притиску у односу на бетон са хемијским додатком аеранта (AER). Међутим, бетони са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 5% и CRC – 7.5%) постигли су исте или ниже вредности чврстоће при притиску у свим старостима и примењеним водоцементним односима (W/C) у односу на бетон са аерантом.
- Највеће чврстоће при притиску при старости од 28 дана, које су постигнуте код бетона са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%, CRC – 5% и CRC – 7.5%), справљеним са водоцементним фактором $W/C = 0.40$, износиле су 66.0 МПа, 63.7 МПа и 56.8 МПа, респективно. Најниже вредности чврстоће при притиску код ових врста бетона постигнуте су са водоцементним односом $W/C = 0.55$, и износиле су 49.6 МПа, 44.4 МПа и 42.0 МПа.
- Анализа података показује да водоцементни однос (W/C) значајно утиче на чврстоћу при притиску бетона, при чему нижи W/C односи доводе до веће чврстоће при притиску. Поред тога, различите врсте додатака, као што су бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC) и бетони са додатком хемијског додатка аеранта (AER), у зависности од њихове примењене количине, имају велики утицај на смањење чврстоће при притиску од 10% до 25% у односу на обичан (референтни) бетон (OPC) и примењени водоцементни однос (W/C).
- С обзиром на постигнуте вредности чврстоће при притиску, може се закључити да је примена дробљене рециклиране гуме као запреминске

замене ситног агрегата у бетонским мешавинама могућа за справљање бетонских мешавина које ће се применити у бетонским конструкцијским елементима, чак и у нивоима супституције ситног агрегата од 7.5%.

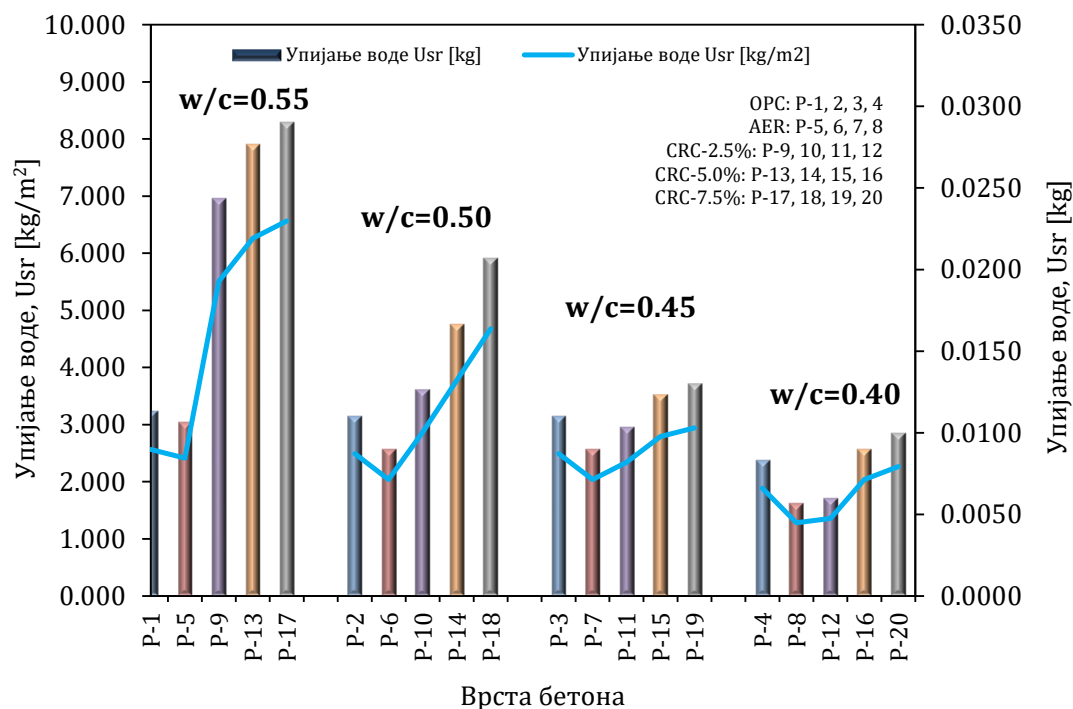
5.2.3. Водонепропустљивост бетона

Резултати испитивања водонепропустљивости свих врста бетона дати су у Табели IV-15. Добијене вредности највећих дубина продора воде под притиском у очврсли бетон приказане су у односу на водоцементне односе $W/C = 0,55$, $W/C = 0,50$, $W/C = 0,45$ и $W/C = 0,40$. Резултати су графички приказани на Слици V-70.



Слика V-70 – Највећа дубина продора воде под притиском у бетон

На основу добијених вредности количине упијања воде и израчунате средње вредности упијања воде по површини за све врсте бетона у односу на водоцементне односе $W/C = 0,55$, $W/C = 0,50$, $W/C = 0,45$ и $W/C = 0,40$, резултати су приказани у Табели IV-15. Резултати су такође графички приказани на Слици V-71.



Слика V-71 – Упијање воде под притиском у бетон

Анализом резултата приказаних на Слици V-70 и Слици V-71 може се закључити следеће:

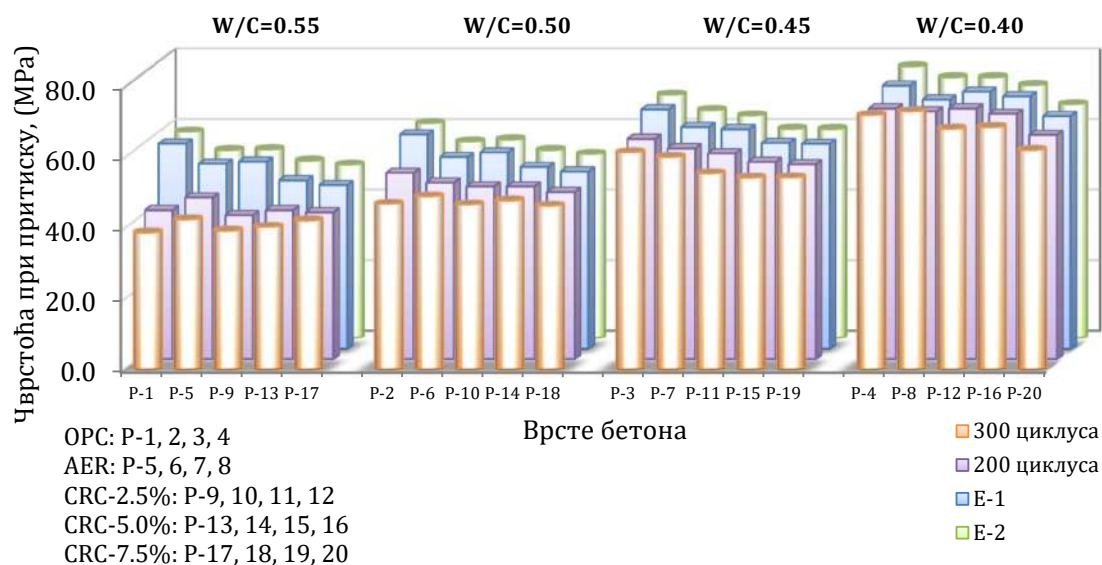
- Општи тренд је да нижи водоцементни односи (ниже вредности W/C) доводе до мање највеће дубине продора воде под притиском и упијања воде у бетон код свих бетона у старости од 28 дана, што је последица мање опште и капиларне порозности материјала. Највеће дубине продора воде под притиском и упијања воде добијене су код бетона са 2,5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом за сваку врсту бетона и са различитим водоцементним фактором (W/C). Генерално, најмање добијене вредности највеће дубине продора и упијене воде под притиском у старости од 28 дана за све врсте бетона и примењене водоцементне односе постигао је бетон са хемијским додатком аеранта (AER).
- Бетони са 2,5%, 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2,5%, CRC – 5,0% и CRC – 7,5%) показују негативан утицај на водонепропустљивост бетона, јер се са повећањем садржаја гуме у бетонској мешавини дубина продирања и упијања воде

под притиском повећавају у односу на обичан (референтни) бетон (ОРС), о чему је претходно дискутовано.

- Бетони са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%), са примењеним водоцементним односима $W/C=0.45$ и $W/C=0.40$, имају мање вредности највећих дубина продирања и упијања воде под притиском у односу на обичан (референтни) бетон (ОРС). Код бетона са 5% и 7.5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 5% и CRC – 7.5%), са повећањем садржаја дробљене гуме уочен је растући тренд добијених вредности највећих дубина продирања и упијања воде под притиском у очврсли бетон у односу на бетон са 2.5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%).
- Најмање добијене вредности највећих дубина продирања и упијања воде под притиском у очврсли бетон при старости од 28 дана, постигнуте су код бетона са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%) и бетона са хемијским додатком аеранта (AER), справљеним са водоцементним фактором $W/C = 0.40$, а износиле су: 14 mm и 16 mm за дубину и $1,283 \text{ kg/m}^2$ и 1.358 kg/m^2 , респективно. Највеће добијене вредности највећих дубина продирања и упијања воде под притиском у очврсли бетон при старости од 28 дана, постигнуте су са водоцементним односом $W/C = 0.55$ код бетона са 2.5%, 5% и 7.5%, запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%, 5% и 7.5%), и износиле су: 42 mm, 35 mm и 32 mm и 6.564 kg/m^2 , 6.262 kg/m^2 и 5.508 kg/m^2 , респективно.
- Анализа података показује да водоцементни однос (W/C) значајно утиче на водонепропустљивост бетона. Нижи W/C односи стварају мање повезане капиларне поре и обезбеђују компактнију структуру бетона, што резултира нижим вредностима дубина продирања воде под притиском и мањем упијању воде, чиме се добија бетон веће водонепропустљивости.

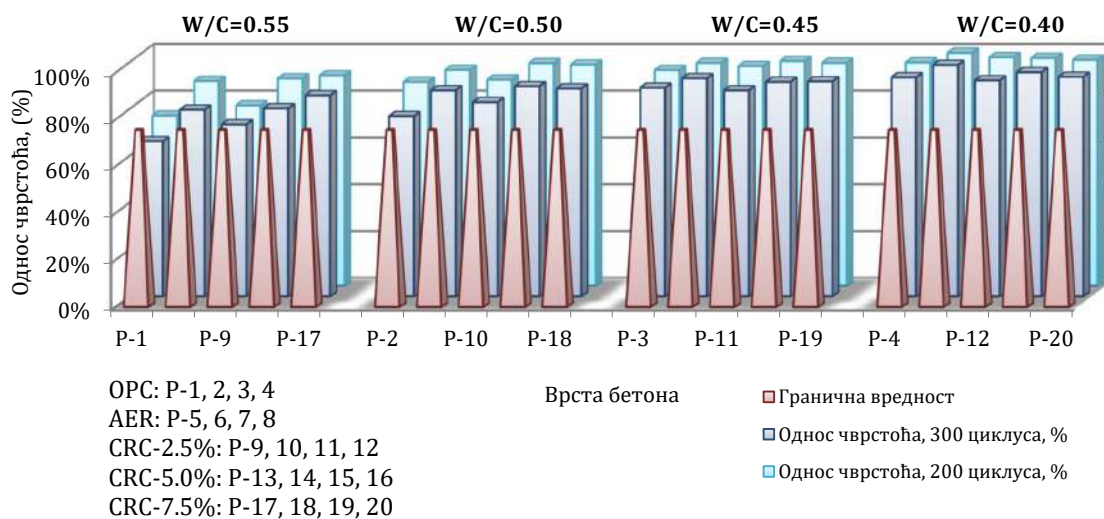
5.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза дати су у Табели IV-16. Резултати испитивања чврстоће при притиску еталонских узорака и узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања за све врсте бетона приказани су графички на Слици V-72.



Слика V-72 – Чврстоћа при притиску бетона еталона и након дејства мраза

Однос чврстоће при притиску узорака који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака за све врсте бетона приказан је графички на Слици V-73.



Слика V-73 – Однос чврстоћа узорка након дејства мраза и еталонских узорка свих врста бетона

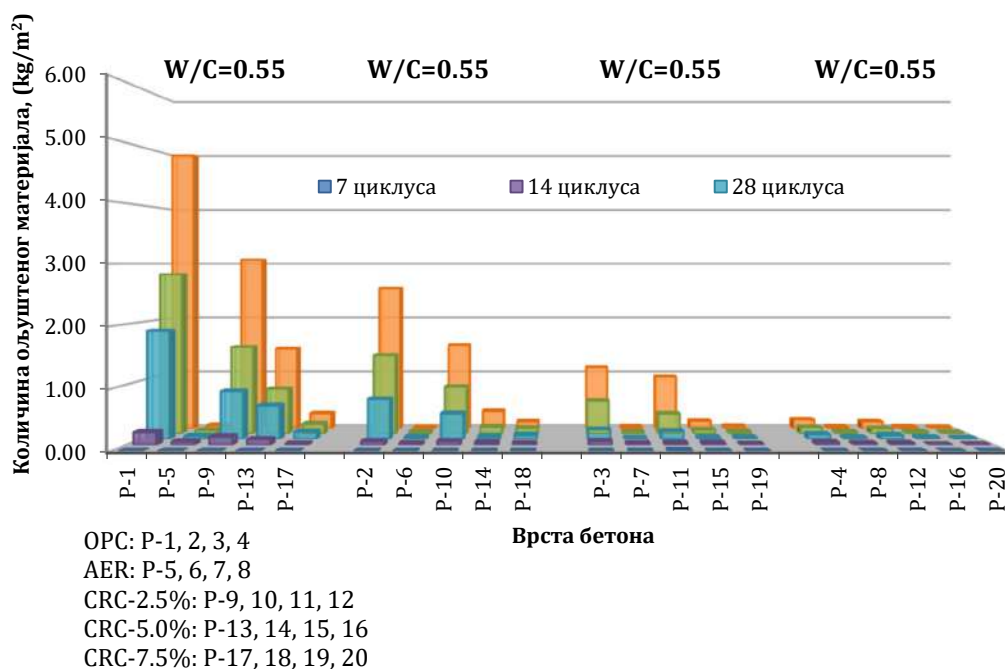
Анализом резултата добијених испитивањем чврстоће при притиску еталонских узорка и узорка који су изложени циклусима замрзавања/одмрзавања свих врста бетона могу се извести следећи закључци:

- На основу добијених вредности чврстоћа при притиску примећен је општи тренд да нижи водоцементни односи (ниже вредности W/C) доводе до веће чврстоће при притиску код свих бетона. Највеће чврстоће при притиску добијене су код еталонских узорка (Е-1 и Е-2) обичног (референтног) бетона (OPC) за сваку врсту бетона и са различитим водоцементним односима (W/C). Најнижу вредност чврстоће при притиску остварио је обичан (референтни) бетон (OPC) након 300 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, са примењеним водоцементним односом $W/C=0.55$. Однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорка након 200 и 300 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, код обичног (референтног) бетона, износи 73% и 66%, респективно, што не задовољава услов за најмањи однос чврстоће при притиску замрзаваних и еталонских узорка од 75% према Табели 11, тачке 5.3.3 стандарда SRPS U.M1.206:2023.

- Са друге стране, бетон са 2,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом повољно је утицао на одржавање чврстоће при притиску након 200 и 300 циклуса излагања замрзавању/одмрзавању, остварујући вредности од 77% и 73%, респективно, код бетона са примењеним водоцементним односом $(W/C) = 0,55$ у поређењу са обичним (референтним) бетоном (ОРС). Међутим, након 200 циклуса, услов односа чврстоће од минимум 75% је испуњен, док након 300 циклуса овај услов није био задовољен.
- На основу испитивања отпорности на замрзавање/одмрзавање, може се закључити да су бетони са 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом показали повољнији однос чврстоће узорака након 200 и 300 циклуса у поређењу са обичним (референтним) бетоном (ОРС) за све примењене водоцементне односе (W/C) . Ови бетони, у поређењу са бетоном са хемијским додатком аеранта (AER), постигли су боље резултате односа чврстоће, тј. отпорности на дејство мраза код свих бетона, осим код врсте бетона са примењеним водоцементним односом $W/C = 0.45$ и $W/C = 0.40$, где су постигли делимично ниже односе чврстоће.
- Све ово указује да су бетони са 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом отпорни на дејство мраза, те да је уз правилан одабир компонентних материјала приликом пројектовања бетонских мешавина могућа примена дробљене гуме у оваквим бетонским мешавинама за конструкцијске елементе који ће бити изложени дејству мраза.

5.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Резултати испитивања отпорности бетона на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање приказани су преко вредности количине ољуштеног материјала за све врсте бетона и дати у Табели IV-17. Резултати за све врсте бетона приказани су графички на Слици V-74.



Слика V-74 – Количина ољуштеног материјала свих врста бетона

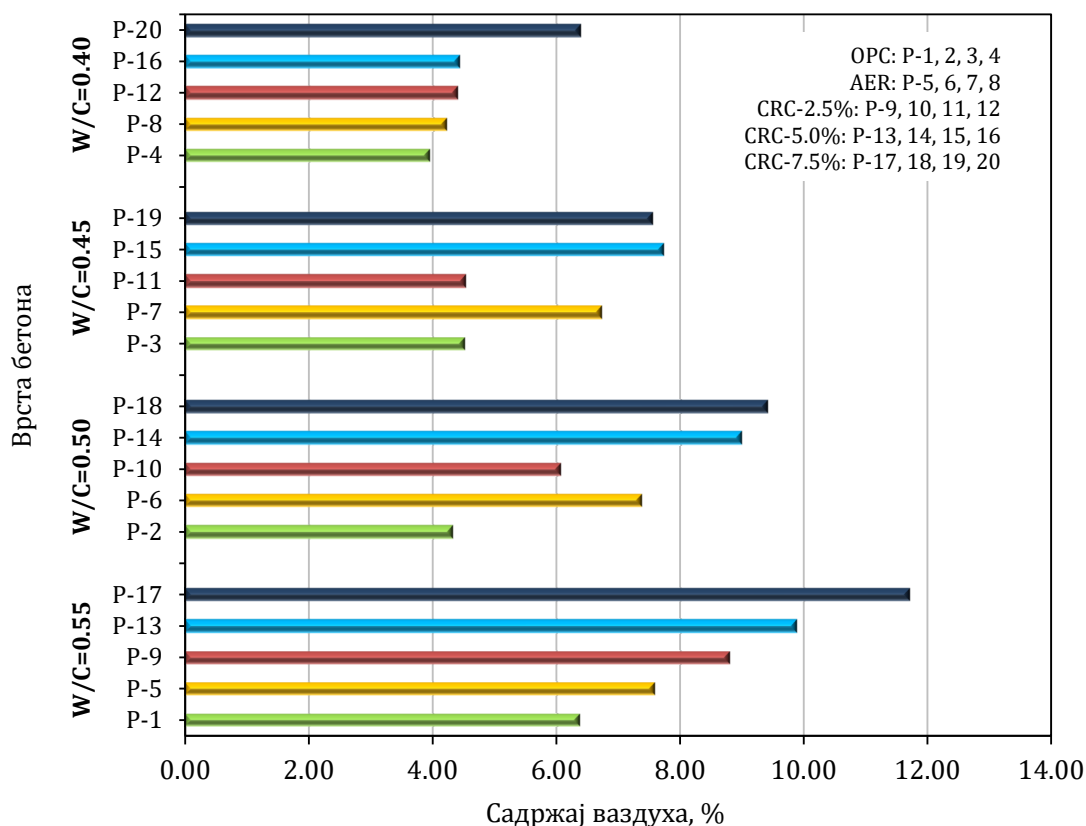
Анализом резултата добијених количина ољуштеног материјала са површина бетонских узорка за све групе бетона могу се извести следећи закључци:

- Општи тренд је да се са смањењем водоцементног односа (W/C) смањује количина ољуштеног материјала код свих врста бетона и примењених водоцементних односа.
- На основу добијених вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса, установљено је да су бетони са хемијским додатком аеранта (AER) и бетони са 2,5%, 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2,5%, CRC – 5% и CRC – 7,5%) показали ниже вредности количине ољуштеног материјала у односу на обичне (референтне) бетоне (OPC), код свих врста бетона, без обзира на водоцементни однос (W/C).

- Најниже вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса, постигао је бетон са 7.5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 7.5%), при свим водоцементним односима (W/C) у односу на бетоне са 2.5% и 5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом.
- Генерално, на основу добијених вредности количина ољуштеног материјала, може се закључити да бетони са хемијским додатком аеранта (AER) и бетон са запреминском заменом 7.5% (CRC – 7.5%) дробљене гуме ситног агрегата, задовољавају захтеване највеће дозвољене граничне вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања према Табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS U.M1.206:2023, код свих врста бетона, без обзира на водоцементни однос (W/C).
- Бетони са 5% и 7,5% дробљене е при вишим водоцементним односима, показују веће вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса, у поређењу са бетонима са хемијским додатком аеранта (AER), док са смањењем водоцементног односа показују ниже вредности.
- Све ово указује да су бетони са 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом отпорни на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање при водоцементним односима мањим од $W/C=0.55$. Уз правилан одабир компонентних материјала приликом пројектовања бетонских мешавина, могућа је примена дробљене гуме у оваквим бетонским мешавинама за конструкцијске елементе који ће бити изложени дејству мраза уз присуство соли за одмрзавање.

5.2.6. Карактеристике ваздушних пора у очврслом бетону

Резултати испитивања садржаја ваздуха у очврслом бетону за све врсте бетона приказани су у Табели IV-18. Графички приказ вредности садржаја ваздуха за све врсте бетона налази се на Слици V-75.



Слика V-75 – Количина ољуштеног материјала свих врста бетона

Анализом резултата добијених количина ољуштеног материјала са површинама бетонских узорака за све групе бетона могу се извести следећи закључци:

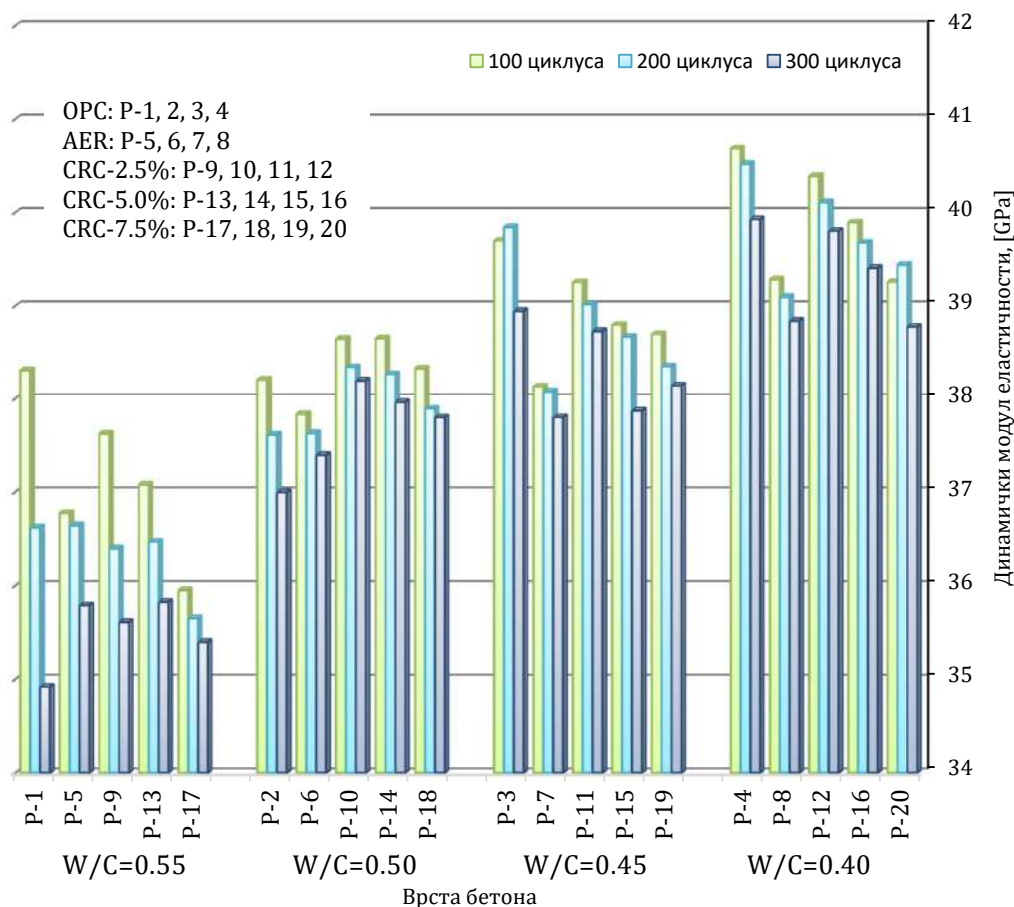
- Општи тренд је да се са смањењем водоцементног односа (W/C) смањује садржај ваздуха код свих врста бетона и примењених водоцементних односа.
- На основу добијених вредности садржаја ваздуха, установљено је да су обични (референтни) бетони показали ниже вредности садржаја ваздуха у односу на остале бетоне (AER и CRC), код свих врста бетона и водоцементних односа (W/C). Ово је и очекивано за ову врсту бетона.
- Примећен је тренд повећања садржаја ваздуха код свих бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC) при

различитим водоцементним односима (W/C), у поређењу са обичним (референтним) бетонима. Претпоставља се да је на повећање садржаја ваздуха утицао садржај дробљене гуме, око чијих се зрна формира одређена количина ваздушних пора које се, приликом мешања, задржавају на храпавој површини зрна дробљене гуме. Овај ефекат повећања садржаја ваздуха у бетону није уобичајен и потребно је додатно истражити да ли је продужено време мешања бетонске мешавине до 60 минута утицало на повећање садржаја ваздуха. Овом методом се не може утврдити ово дешавање у структури бетона, али додатним полирањем површине узорака и прегледом зрна дробљене гуме помоћу дигиталног микроскопа могуће је, макар визуелно, утврдити да ли постоје нагомилане поре око зрна гуме у структури бетона. Иако ово није било планирано у оквиру дисертације, сигурно ће бити део будућих истраживања својстава бетона са заменом ситног агрегата дробљеном гумом.

- Повећање количине дробљене рециклиране гуме (CR) резултира повећањем садржаја ваздуха у очврслом бетону за све врсте бетона и водоцементне односе (W/C), према резултатима истраживања.

5.2.7. Динамички модул еластичности

Резултати испитивања динамичког модула еластичности за све врсте бетона и водоцементне односе (W/C) приказани су у Табели IV-19. Вредности динамичког модула еластичности за све врсте бетона и водоцементне односе (W/C) приказане су графички на Слици V-76.



Слика V-76 – Динамички модул еластичности свих врста бетона

Анализом резултата динамичких модула еластичности за све групе бетона могу се извести следећи закључци:

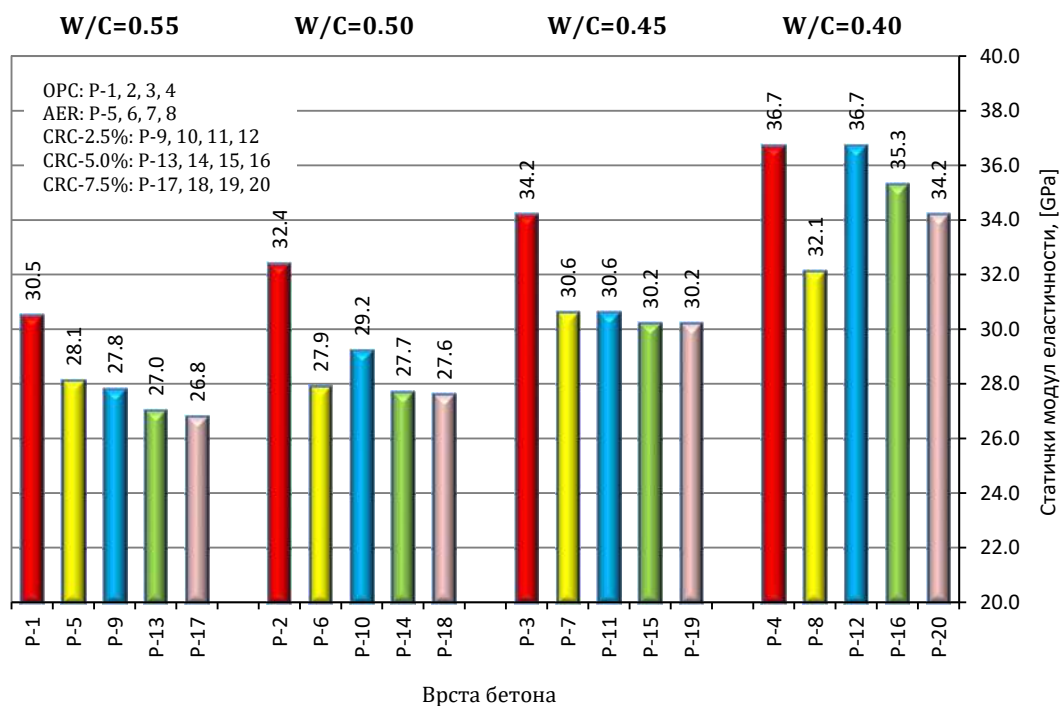
- Општи тренд је да се са смањењем водоцементног односа (W/C) повећава динамички модул еластичности код свих врста бетона и примењених водоцементних односа.
- Генерално, код свих врста бетона примећен је тренд смањења динамичког модула еластичности након 200 и 300 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања у поређењу са вредностима након 100 циклуса

наизменичног замрзавања/одмрзавања. Смањење динамичког модула указује на промене у структури бетона након одређеног броја циклуса замрзавања/одмрзавања.

- Највеће промене и падови динамичког модула еластичности забележени су након 200 и 300 циклуса код обичног (референтног) бетона са водоцементним односом $W/C=0.55$. Сви остали бетони имају умерене падове динамичког модула еластичности.
- Генерално, повећање количине дробљене рециклиране гуме (CR) резултира смањењем динамичког модула еластичности за све врсте бетона и водоцементне односе (W/C), према резултатима истраживања. Сама гума је еластична, те се њеним додавањем смањује крутост бетона, што је повезано и са чврстоћом при притиску и динамичким модулом еластичности.

5.2.8. Статички модул еластичности

Резултати испитивања статичког модула еластичности за све врсте бетона и водоцементне односе дати су у Табели IV-20. Вредности статичког модула еластичности за све врсте бетона и водоцементне односе приказане су графички на Слици V-77.



Слика V-77 – Статички модул еластичности за све врсте бетона

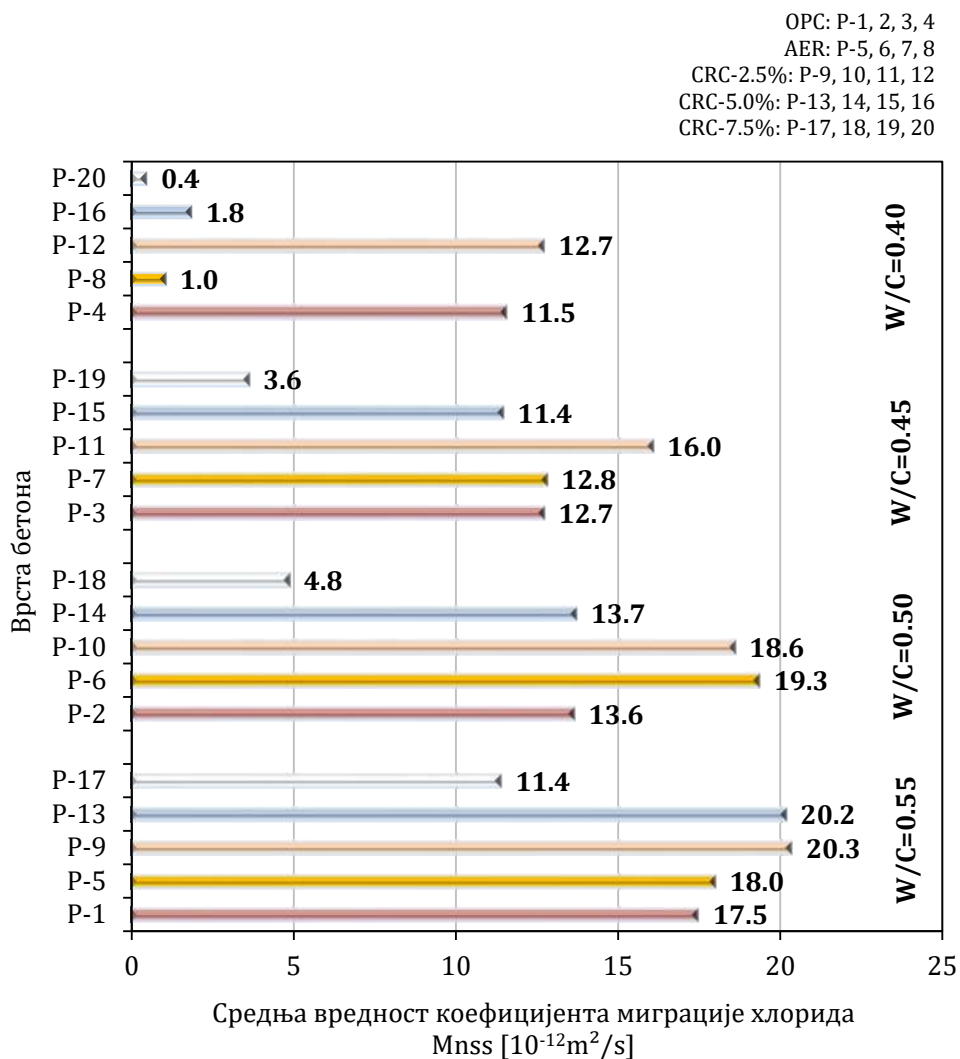
Анализом резултата добијених испитивањем статичког модула еластичности за све врсте бетона и водоцементне односе, могу се извести следећи закључци:

- Општи тренд је да се са смањењем водоцементног односа (W/C) повећава статички модул еластичности код свих врста бетона и примењених водоцементних односа.
- Највише вредности статичког модула еластичности бетона код свих бетона и водоцементних односа (W/C) постигао је обичан (референтни) бетон (OPC). Ово указује на високу крутост и отпорност на деформације.
- Уочавамо да је највиша добијена вредност статичког модула еластичности постигнута код обичног (референтног) бетона (P-1). Ово указује на високу крутост и отпорност на деформације.

- Сви бетони са хемијским додатком аеранта (AER) имају негативан утицај на статички модул еластичности у поређењу са обичним (референтним) бетоном (OPC), без обзира на водоцементни однос (W/C), јер се услед формирања сферичних микропора ваздуха у структури бетонске матрице смањује његова крутост.
- Уочено је да код свих врста бетона и водоцементних односа, повећањем садржаја дробљене гуме у бетонима са запреминском замјеном ситног агрегата долази до благог смањења вредности статичког модула еластичности у поређењу са обичним (референтним) бетоном (OPC).

5.2.9. Коефицијент миграције хлорида

Резултати испитивања коефицијента миграције хлорида за све врсте бетона и водоцементне односе дати су у Табели IV-21. Добијене вредности коефицијента миграције хлорида за све врсте бетона и водоцементне односе приказане су графички на Слици V-78.



Слика V-78 – Коефицијент миграције за све врсте бетона

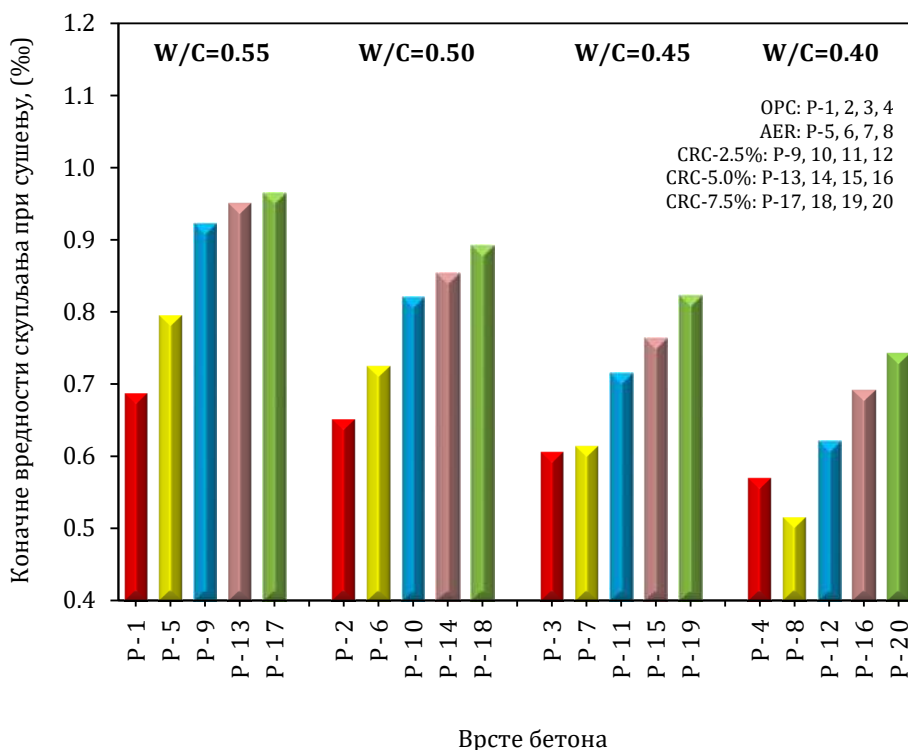
Анализом резултата добијених испитивањем коефицијента миграције хлорида за све врсте бетона и водоцементне односе, могу се извести следећи закључци:

- Општи тренд је да се са смањењем водоцементног односа (W/C) смањује коефицијент миграције хлорида код свих врста бетона и примењених водоцементних односа.

- Највише вредности коефицијента миграције хлорида код свих бетона и водоцементних односа (W/C) постигао је бетон са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%), а најниже вредности бетон са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом.
- Уочено је да код свих врста бетона и водоцементних односа, повећањем садржаја дробљене гуме у бетонима са запреминском заменом ситног агрегата, долази до смањења вредности коефицијента миграције хлорида у поређењу са обичним (референтним) бетоном (ОРС), о чему је дискутовано у претходним поглављима.

5.2.10. Скупљање бетона при сушењу

Резултати испитивања вредности скупљања при сушењу свих врста бетона и водоцементних односа дате су у Табелама IV-22 до IV-26. Коначне вредности скупљања при сушењу након 91 дана свих врста бетона и водоцементних односа приказане су графички на Слици V-79.



Слика V-79 - Коначне вредности скупљања при сушењу свих врста бетона након 91 дана испитивања

Анализом резултата на приказаном дијаграму, могу се извести следећи закључци:

- Општи тренд је да се са смањењем водоцементног односа (W/C) смањује скупљање при сушењу код свих врста бетона и примењених водоцементних односа.
- Генерално, обични (референтни) бетони (OPC), показују најмање вредности скупљања, осим при водоцементном односу $W/C=0.40$ где најнижу вредност скупљања при сушењу има бетон са хемијским додатком аеранта (AER).
- Бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%, CRC – 5% и CRC – 7.5%) негативно утичу на

скупљање при сушењу, јер се са повећањем садржаја дробљене рециклиране гуме повећава и скупљање при сушењу, у поређењу са обичним (референтним) бетоном (ОРС).

- То повећање може износити од 34% до 40% вредности скупљања у поређењу са обичним (референтним) бетоном (ОРС) за бетон са водоцементним односом $W/C=0.55$, што је и највеће у овом случају. Међутим, то повећање се смањује код бетона са водоцементним односом $W/C=0.40$, и креће се од 9% до 30% у поређењу са обичним (референтним) бетоном (ОРС).
- Бетони са додатком гуме имају негативан утицај на скупљање, јер се са повећањем количине дробљене гуме у структури очврслог бетона скупљање повећава у поређењу са обичним (референтним) бетонима. Међутим, на основу основне једначине за одређивање дилатације скупљања бетона услед сушења $\varepsilon_{cd,0}$, која је дата у Прилогу Б, тачка Б.2, стандарда SRPS EN 1992-1-1:2015, у којој учествују средња добијена вредност чврстоће при притиску, коефицијенти који зависе од класе цемента, релативна влажност средине, можемо закључити да су добијене коначне вредности скупљања бетона услед сушења код бетона са 2.5%, 5% и 7% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом, са примењеним водоцементним односом $W/C=0.50$ до $W/C=0.40$, у границама до 30%, што је дозвољено према т.3.1.4(6) стандарда SRPS EN 1992-1-1:2015.

VI ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА

1. УВОД

У оквиру овог поглавља приказани су резултати анализе својстава бетона са различитим водоцементним односима $W/C = 0.55, 0.50, 0.45$ и 0.40 ; обичних (референтних) бетона, бетона са хемијским додатком аеранта и бетона са запреминском заменом 2.5%, 5.0% и 7.5% ситног агрегата са дробљеном гумом. Изведени су закључци о могућој примени дробљене рециклиране гуме и правци даљих истраживања.

Могућност примене дробљене гуме у свежем и очврслом бетону проверавана је кроз следећа испитана својства:

Свеж бетон

- конзистенција методом слегања бетона,
- запреминска маса,
- садржај ваздуха.

Очврсли бетон

- запреминска маса,
- чврстоћа при притиску,
- водонепропустљивост и упијање воде бетона (дубина продора воде),
- отпорност на дејство мраза,
- отпорност на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање,
- карактеризација ваздушних пора у очврслом бетону ,
- динамички модул еластичности,
- статички модул еластичности,
- коефицијент миграције хлорида,
- скупљање бетона.

У наставку текста приказани су закључци по одабраним методама за проверу могућности примене дробљене гуме као запреминске замене ситног агрегата у поређењу са обичним (референтним) бетоном.

2. ПРИМЕНА ДРОБЉЕНЕ ГУМЕ У БЕТОНСКИМ МЕШАВИНАМА

2.1. Свеж бетон

2.1.1. Конзистенција

Бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), код свих врста бетона и водоцементних односа, припадају истој класи конзистенције слегањем S4 у односу на обичан (референтни) бетон. Повећање садржаја дробљене гуме утиче на смањење конзистенције слегањем. Пад конзистенције након 30 и 60 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину је већи код бетона са запреминском заменом дробљене гуме (CRC) код свих врста бетона и водоцементних односа у односу на обичан (референтни) бетон. Ово имплицира да је већа потреба за водом код бетона са дробљеном гумом, због мање специфичне масе гуме, чиме је и запреминска маса ових бетона нижа у односу на обичан (референтни) бетон (OPC).

2.1.2. Запреминска маса

Сви бетони са запреминском заменом дробљене гуме (CRC), са повећањем садржаја гуме имају нижу вредност запреминске масе свежег бетона у односу на обичан (референтни) бетон (OPC). Ово је очекивано, јер дробљена гума има мању специфичну масу од ситног агрегата.

Запреминска маса након 30 и 60 минута од момента додавања воде опада код свих бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), у односу на добијене почетне вредности након 10 минута. Ово се може објаснити повећањем садржаја ваздуха у свежем бетону.

2.1.3. Садржај ваздуха

Садржај ваздуха код свих бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), мерен након 10 минута од момента додавања воде у бетонску мешавину, повећан је при свим водоцементним односима (W/C).

Садржај ваздуха након 30 и 60 минута од момента додавања воде расте код свих бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), у односу на добијене почетне вредности након 10 минута. Претпоставља се да је на повећање садржаја ваздуха утицао садржај дробљене гуме, око чијих се зрна формира одређена количина ваздушних пора које се, приликом мешања, задржавају на храпавој површини зрна дробљене гуме.

Општи тренд је да бетони са нижим w/c односом обично имају мањи садржај ваздуха. Мањи садржај воде при справљању бетонске мешавине доприноси смањењу порозности структуре бетона, што касније указује на бољу компактност бетона и боље механичке карактеристике очврслог бетона.

2.2. Очврсли бетон

2.2.1. Запреминска маса

Сви бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), при примењеним водоцементним односима, показују смањење запреминске масе очврслог бетона како се повећава удео дробљене рециклиране гуме у свим испитиваним старостима. Ово је последица мање специфичне масе дробљене гуме у поређењу са ситним агрегатом.

2.2.2. Чврстоћа при притиску

Генерално, при свим испитиваним старостима, бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%, CRC – 5% и CRC – 7.5%) показују негативан утицај на чврстоћу при притиску, јер се са повећањем садржаја гуме, чврстоћа при притиску смањује у односу на обичан (референтни) бетон (OPC). Додатно, сви бетони са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%) имају већу чврстоћу при притиску у поређењу са бетоном са хемијским додатком аеранта (AER) за све старости и водоцементне односе (W/C). Насупрот томе, бетони са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 5% и CRC – 7.5%) имају исту или мању чврстоћу при притиску у поређењу са бетоном са хемијским додатком аеранта (AER) за све старости и водоцементне односе (W/C).

Такође, бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%, CRC – 5% и CRC – 7.5%) постигли су своје највише вредности чврстоће при притиску при старости од 28 дана када су имали водоцементни однос $W/C = 0.40$, са резултатима од 66.0 МПа, 63.7 МПа и 56.8 МПа. С друге стране, њихове најниже вредности чврстоће при притиску забележене су при водоцементном односу $W/C = 0.55$, са резултатима од 49.6 МПа, 44.4 МПа и 42.0 МПа.

Најчешћа класа чврстоће при притиску која се примењује у конструкцијским елементима је C 25/30, тако да добијени резултати указују да је примена дробљене гуме у бетонским конструкцијским елементима могућа и оправдана.

2.2.3. Водонепропустљивост бетона

У зависности од количине запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC) и примењеног водоцементног односа (W/C), генерално можемо закључити да додавање дробљене гуме има негативан утицај на водонепропустљивост бетона, јер са његовом применом дубина продирања воде под притиском и упијање воде у бетону повећавају у односу на обичан (референтни) бетон (OPC).

Међутим, ово важи само за бетоне који имају водоцементни однос $W/C=0.55$ и $W/C=0.50$. Код бетонских мешавина са 5% и 7.5% запреминске замене дробљене гуме (CRC - 5% и CRC – 7.5%), са примењеним водоцементним односом $W/C=0.45$ и

$W/C=0.40$, дубина продирања воде под притиском и упијање воде у бетону се у односу на обичан референтни бетон смањују.

Адекватним одабиром компонентних материјала приликом пројектовања бетонских мешавина и применом оптималног водоцементног односа мањим од $W/C = 0,45$, можемо закључити да примена дробљене гуме у вредностима од 5% и 7.5% (CRC – 5% и CRC – 7.5%) има повољан утицај на дубину продирања воде под притиском и упијања воде. На основу образложеног, можемо констатовати да је примена оваквог бетона у конструкцијске елементе за које се захтева услов класе отпорности V-2 или V-3 могућа и оправдана.

2.2.4. Отпорност бетона на дејство мраза

Степен деградације бетона под дејством мраза (деструктивна метода) мери се анализом односа чврстоће при притиску бетонских узорака који су прошли кроз наизменичне циклусе замрзавања/одмрзавања и еталонских узорака. Отпорност бетона на мраз указује на оштећења у структури бетона узрокована овим циклусима. Бетон се сматра отпорним на мраз ако је однос чврстоће виши од 75%.

Бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2,5%) показали су добре резултате у одржавању чврстоће при притиску након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања. При водоцементном односу (W/C) = 0,55, ови бетони су постигли вредности од 77% и 73% у поређењу са обичним (референтним) бетоном (ОРС). Иако су након 200 циклуса задовољили минимални услов од 75% чврстоће, након 300 циклуса овај услов није био испуњен.

Бетони са 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом остварили су повољније резултате у погледу односа чврстоће након 200 и 300 циклуса замрзавања/одмрзавања у поређењу са обичним бетоном (ОРС) за све примењене водоцементне односе (W/C).

У поређењу са бетоном са хемијским додатком аеранта (AER), бетони са 5% и 7,5% замене показали су боље отпорност на дејство мраза, осим код бетона са водоцементним односом $W/C = 0,45$ и $W/C = 0,40$, где су имали нешто ниже односе чврстоће.

Ови резултати сугеришу да су бетони са 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом отпорни на дејство мраза. Уз правилан одабир компонентних материјала, ови бетони могу бити примењени у конструкцијске елементе изложене дејству мраза.

2.2.5. Отпорност бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

Бетон са 7,5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 7,5%) постигао је најниже количине ољуштеног материјала након 56 циклуса код

свих водоцементних односа (W/C), у поређењу са бетонима који имају 2.5% и 5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом.

На основу добијених вредности количина ољуштеног материјала, бетони са хемијским додатком аеранта (AER) и бетони са 7,5% запреминске замене дробљене гуме (CRC – 7,5%) задовољавају максималне дозвољене границе количине ољуштеног материјала након 56 циклуса наизменичног замрзавања/одмрзавања, према Табели 12, тачка 5.3.4 стандарда SRPS U.M1.206:2023, за све врсте бетона и водоцементне односе (W/C).

Бетони са 5% и 7,5% запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом, при вишим водоцементним односима, показују веће вредности количине ољуштеног материјала након 56 циклуса, у поређењу са бетонима са хемијским додатком аеранта (AER).

Ово указује да су бетони са 5% и 7,5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом (CRC) отпорни на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање при водоцементним односима мањим од $W/C = 0,55$.

Све ово указује на то да бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом (CRC) могу имати исту или бољу отпорност на дејство мраза уз присуство соли за одмрзавање у односу на бетоне са хемијским додатком аеранта (AER). Уз правилан одабир компонентних материјала приликом пројектовања бетонских мешавина, могућа је примена дробљене гуме у оваквим бетонским мешавинама за конструкцијске елементе који ће бити изложени дејству мраза уз присуство соли за одмрзавање.

2.2.6. Карактеристике ваздушних пора у очврслом бетону

На основу добијених вредности садржаја ваздуха, установљено је да се са повећањем запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC) повећава садржај ваздуха у очврслом бетону. Овај пораст се може објаснити повећаним уделом дробљене гуме, чија присутност доводи до формирања одређене количине ваздушних пора које остају задржане на храпавој површини зрна дробљене гуме током мешања. Овај феномен повећања садржаја ваздуха у бетону није типичан, те је потребно додатно истражити да ли је продужено време мешања бетонске мешавине до 60 минута имало утицаја на овај пораст код бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом. Овом методологијом није могуће потврдити присуство ових појава у структури бетона, али додатним полирањем

површине узорак и коришћењем дигиталног микроскопа могуће је визуелно идентификовати евентуалне нагомилане поре око зрна дробљене гуме у структури бетона. Иако ово није било планирано као део дисертације, свакако ће бити обухваћено у будућим истраживањима бетона са заменом ситног агрегата дробљеном гумом.

Повећање количине дробљене рециклиране гуме (CRC) резултира повећањем присуства ваздушних пора у очврслом бетону, независно од врсте бетона и примењеног водоцементног односа (W/C), према извршеним истраживањима.

2.2.7. Динамички модул еластичности

Повећање количине дробљене рециклиране гуме (CR) резултира смањењем динамичког модула еластичности за све врсте бетона и водоцементне односе (W/C) код бетона са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном рециклираном гумом (CRC). Ово је очекивано, јер је гума еластична, па њеним додавањем смањујемо крутост бетона, што је повезано и са чврстоћом при притиску и динамичким модулом еластичности бетона.

Међутим, мерења брзине проласка ултразвучног импулса код бетонских узорак са садржајем дробљене рециклиране гуме (CR) изложених наизменичном замрзавању/одмрзавању сваких 25 циклуса до 300 циклуса, ови бетони су показали мањи тренд опадања динамичког модула еластичности у односу на обичан (референтни) бетон (OPC). Ови резултати указују да бетони са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом (CRC) имају нижи динамички модул еластичности у поређењу са обичним (референтним) бетоном (OPC), али истовремено чине унутрашњу структуру бетона отпорнијом на дејство мраза, што су потврдила истраживања.

2.2.8. Статички модул еластичности

Повећање садржаја дробљене рециклиране гуме (CR) у бетонима са запреминском заменом ситног агрегата (CRC) узрокује благо смањење вредности статичког модула еластичности код најнижег примењеног водоцементног односа $W/C=0.40$ у поређењу са обичним (референтним) бетоном (OPC). Са повећањем водоцементног односа долази до већег смањења статичког модула еластичности. Ово је очекивано, јер је гума еластична, те њеним додавањем смањујемо крутост бетона, што је у вези и са чврстоћом при притиску и статичким модулом еластичности бетона.

Ипак, добијене вредности статичког модула еластичности одговарају вредностима које се користе код бетона носећих АБ конструкција.

2.2.9. Коефицијент миграције хлорида

Смањење пропуштања хлоридних јона у структуру бетона сматра се карактеристиком отпорности тог бетона на утицај хлоридних јона. Бетони са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), при примењеним водоцементним односима (W/C), показују тренд повећања дубине продора хлорида и коефицијента миграције хлорида у поређењу са обичним (референтним) бетоном (OPC). Међутим, бетони са 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC), при водоцементним односима $W/C=0.45$ и $W/C=0.40$, показују изузетно ниску пропустљивост хлоридних јона у структуру бетона, резултирајући мањим дубинама продора хлорида и нижим вредностима коефицијената миграције хлорида у поређењу са обичним (референтним) бетонима (OPC). Ово указује да правилним пројектовањем бетонских мешавина и одабиром компонентних материјала код бетона са запреминском замена дробљеном гумом (CRC) можемо допринети смањењу пропуштања хлоридних јона у структуру бетона.

2.2.10. Скупљање бетона при сушењу

Бетони са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом (CRC – 2.5%, CRC – 5% и CRC – 7.5%) показују већу склоност ка скупљању при сушењу како се повећава садржај дробљене рециклиране гуме у поређењу са обичним (референтним) бетоном (OPC).

Ипак, на основу израчунатих основних једначина за одређивање дилатације скупљања бетона услед сушења $\varepsilon_{cd,0}$, које су наведене у Прилогу Б, тачка Б.2, стандарда SRPS EN 1992-1-1:2015, а које узимају у обзир средњу вредност чврстоће при притиску, коефицијенте зависне од класе цемента и релативну влажност окружења, можемо закључити да коначне вредности скупљања бетона услед сушења, код бетона са 2.5%, 5% и 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом и водоцементним односом $W/C=0.50$ до $W/C=0.40$, остају унутар граница до 30%, што је дозвољено према т.3.1.4(6) стандарда SRPS EN 1992-1-1:2015.

2.2.11. Смернице за примену у бетону

На основу детаљно урађене анализе бетона који су направљени са локално доступним отпадним материјалом, дробљеном рециклираном гумом, могуће је

добити бетоне са задовољавајућим физичким и механичким својствима. Ови бетони се могу користити као замена за ситан агрегат у справљању бетона.

У зависности од захтеваних класа чврстоћа при притису, класа отпорности и класа изложености бетона, правилним пројектовањем бетонске мешавине уз одабир компатибилних компонентних материјала, дробљена рециклирана гума може се користити за справљање бетона. Следеће смернице треба узети у обзир за њену примену:

- За запреминску замену дробљене гуме од 2.5% до 7.5% (CRC – 2.5% и CRC – 5%) и примењени водоцементни однос од $W/C=0.55$ до $W/C=0.50$, могуће је применити ове бетоне са класама чврстоће при притиску које одговарају носећим елементима, статичким модулом еластичности бетона до 27 GPa, класом отпорности на водонепропусност бетона V-1 и V-2, отпорношћу на мраз класе M-1, и отпорношћу на хлориде класе CL-1.
- За запреминску замену дробљене гуме од 2.5% до 7.5% (CRC – 2.5% и CRC – 5%) и примењени водоцементни однос од $W/C=0.45$ до $W/C=0.40$, могуће је применити ове бетоне са класама чврстоће при притиску које одговарају носећим елементима, статичким модулом еластичности бетона до 37 GPa, класом отпорности на водонепропусност бетона V-2 и V-3, отпорношћу на мраз класе M-2, отпорношћу на мраз са солима за одмрзавање класе MS-2, и отпорношћу на хлориде класе CL-2 и CL-3.

3. ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

На основу добијених резултата, могуће је дефинисати више потенцијалних праваца даљег истраживања у области примене дробљене рециклиране гуме (CRC) у бетонским мешавинама.

1. Оптимизација мешавина и модификација површине гуме

Детаљнија истраживања треба да се усмере на побољшање интеракције дробљене гуме и цементне пасте кроз модификацију површине гуме. Потенцијална решења укључују третман гуме различитим хемијским средствима или премазима који би побољшали адхезију и смањили утицај гуме на смањење механичких карактеристика бетона.

2. Дуготрајна механичка својства

Истраживања у домену дуготрајне механичке отпорности, укључујући развој чврстоће при притиску, савијању и затезању у дужем временском периоду, могу пружити бољи увид у потенцијалну примену ових бетона у конструкцијским елементима. Потребно је испитати утицај хидратације цемента у комбинацији са присуством гуме током дужег временског периода.

3. Микроструктурна анализа и расподела ваздушних пора

Додатна анализа микроструктуре ових бетона, посебно у односу на формирање и дистрибуцију ваздушних пора око зрна дробљене гуме, може допринети бољем разумевању механизма који утичу на перформансе бетона. Коришћење техника као што су скенирајућа електронска микроскопија (SEM) и X-гау анализа може дати прецизније информације о структури.

4. Утицај на скупљање и течење бетона

Будућа истраживања треба да обухвате дуготрајни утицај дробљене гуме на скупљање и течење бетона. Посебно је важно испитати ефекат различитих запреминских замена гуме у комбинацији са различитим водоцементним односима и врстама цемента.

5. Унапређење отпорности на агресивне средине

Потребно је додатно истражити како бетон са дробљеном гумом реагује на различите агресивне средине, укључујући изложеност сулфатима, киселинама и високој влажности. Истраживања би могла обухватити и примену специјалних додатака који би побољшали трајност бетона у оваквим условима.

6. Испитивање динамичких оптерећења

С обзиром на повећану еластичност бетона са дробљеном гумом, потребно је детаљније испитати како се ова врста бетона понаша под динамичким оптерећењима, укључујући ударна и сеизмичка оптерећења. Ова истраживања би могла допринети његовој примени у конструкцијама изложеним вибрацијама и ударним силама.

7. Практична примена и развој смерница за пројектовање

Да би се омогућила широка примена ових бетона у грађевинској индустрији, неопходно је развити смернице и препоруке за њихово пројектовање и извођење. Додатна испитивања могу бити фокусирана на израду пробних конструкцијских елемената и њихово понашање у реалним условима експлоатације.

Ови правци истраживања представљају основу за даљи развој и унапређење бетонских мешавина са запреминском заменом ситног агрегата дробљеном гумом, како би се омогућила њихова шира примена у грађевинској индустрији, уз истовремено очување механичких перформанси и трајности бетона са дробљеном гумом.

VII ЛИТЕРАТУРА

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jure, R. i.-1.-1.-6. (2006). Betonske konstrukcije - Priručnik. Zagreb.
- [2] Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. Cement and Concrete Composites.
- [3] Siebel, E. &.-S.-T.-9. (n.d.).
- [4] Marchand, J.; Sellevold, E.J.; Pigeon, M. The deicer salt scaling deterioration of concrete—An overview. Am. Concrete Inst. 1994, 145, 1–46.
- [5] Pigeon, M. Frost Resistance. A CRitical Look. ACI SP 1994, 144, 141–158.
- [6] Jóźwiak-Niedźwiedzka, D. The counteracting of the concrete scaling problem by means of pre-wetted lightweight aggregate Part I-State of the art orig. Zapobieganie łuszczeniu powierzchni betonowych przy użyciu nawilżonego kruszywa lekkiego Cz. I-Stan wiedzy. Roads Bridg. Road Bridge Res. Inst. 2006, 2, 37–54.
- [7] Shang, H.S.; Cao, W.Q.; Wang, B. Effect of Fast Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Properties of Ordinary-Air-Entrained Concrete. Sci. World J. 2014, 2014, 1–7.
- [8] Z.P. Bazant, J.-C. Chern, A.M. Rosenberg, J.M. Gaidis Mathematical model for freeze-thaw durability of concrete J. Am. Ceram. Soc., 71 (1988), pp. 776-783,
- [9] Y.C. Guo, J.H. Zhang, G.M. Chen, Z.H. Xie, Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures, J Clean Prod, 72 (2014), pp. 193-203,
- [10] Etrma (2018), pp. 1-52, <http://www.etrma.org>,
- [11] A.A. Ghenni, M.A. ElGawady, J.J. Myers, Mechanical characterization of concrete masonry units manufactured with crumb rubber aggregate, ACI Mater J, 114 (2017), pp. 65-76,
- [12] M.K. Ismail, A.A.A. Hassan, Use of steel fibers to optimize self-consolidating concrete mixtures containing crumb rubber, ACI Mater J, 114 (2017), pp. 581-594,
- [13] K. Strukar, T. Kalman Šipoš, I. Miličević, R. Bušić, Potential use of rubber as aggregate in structural reinforced concrete element – a review, Eng Struct, 188 (2019), pp. 452-468,
- [14] H. Zhu, Crumb Rubber Concrete Bridge Deck, 39 (2017)
- [15] B.S. Thomas, R.C. Gupta, V. John Panicker, Experimental and modelling studies on high strength concrete containing waste tire rubber, Sustain Cities Soc, 19 (2015), pp. 68-73,
- [16] N.N. Hilal, Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content, Int J Sustain Built Environ, 6 (2017), pp. 191-206,
- [17] M.K. Batayneh, I. Marie, I. Asi, Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries, Waste Manag, 28 (2008), pp. 2171-2176,
- [18] I. Mohammadi, H. Khabbaz, Shrinkage performance of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements, Cement Concr Compos, 62 (2015), pp. 106-116,

- [19] S. Hesami, I. Salehi Hikouei, S.A.A. Emadi, Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber, *J Clean Prod*, 133 (2016), pp. 228-234,
- [20] N.F. Medina, D.F. Medina, F. Hernández-Olivares, M.A. Navacerrada, Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling, *Constr Build Mater*, 144 (2017), pp. 563-573,
- [21] K. Bisht, P.V. Ramana, Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete, *Constr Build Mater*, 155 (2017), pp. 811-817,
- [22] B.S. Thomas, R. Chandra Gupta, Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, *J Clean Prod*, 113 (2016), pp. 86-92,
- [23] A. Sofi, Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – a review, *Ain Shams Eng J*, 9 (2018), pp. 2691-2700,
- [24] S. Kaewunruen, R. Meesit, Sensitivity of crumb rubber particle sizes on electrical resistance of rubberised concrete, *Cogent Eng*, 3 (2016),
- [25] B.S. Mohammed, M. Adamu, Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica, *Constr Build Mater*, 159 (2018), pp. 234-251,
- [26] M. Gesoglu, E. Güneyisi, G. Khoshnaw, S. Ipek, Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers, *Constr Build Mater*, 73 (2014), pp. 19-24,
- [27] B.S. Thomas, R.C. Gupta, P. Kalla, L. Cseteneyi, Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates, *Constr Build Mater*, 59 (2014), pp. 204-212,
- [28] Q. Dong, B. Huang, X. Shu, Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent, *Constr Build Mater*, 48 (2013), pp. 116-123,
- [29] M.K. Ismail, A.A.A. Hassan, Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber, *J Clean Prod*, 125 (2016), pp. 282-295,
- [30] L. He, Y. Ma, Q. Liu, Y. Mu, Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete, *Constr Build Mater*, 120 (2016), pp. 403-407,
- [31] A.O. Atahan, A.Ö. Yücel, Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation, *Constr Build Mater*, 36 (2012), pp. 617-622,
- [32] P.K. Dehdezi, S. Erdem, M.A. Blankson, Physico-mechanical, microstructural and dynamic properties of newly developed artificial fly ash based lightweight aggregate - rubber concrete composite, *Compos B Eng*, 79 (2015), pp. 451-455,
- [33] M.M. Al-Tayeb, B.H. Abu Bakar, H.M. Akil, H. Ismail, Performance of rubberized and hybrid rubberized concrete structures under static and impact load conditions, *Exp Mech*, 53 (2013), pp. 377-384,
- [34] E. Khalil, M. Abd-Elmohsen, A.M. Anwar, Impact resistance of rubberized self-compacting concrete, *Water Sci*, 29 (2015), pp. 45-53,

- [35] M.K. Ismail, A.A.A. Hassan, Impact resistance and acoustic absorption capacity of self-consolidating rubberized concrete, *ACI Mater J*, 113 (2016), pp. 725-736,
- [36] X. Chen, Z. Liu, S. Guo, Y. Huang, W. Xu, Experimental study on fatigue properties of normal and rubberized self-compacting concrete under bending, *Constr Build Mater*, 205 (2019), pp. 10-20,
- [37] A.E. Richardson, K.A. Coventry, G. Ward, Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content, *J Clean Prod*, 23 (2012), pp. 96-103,
- [38] A. Richardson, K. Coventry, V. Edmondson, E. Dias, Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection (optimal particle size), *J Clean Prod*, 112 (2016), pp. 599-606,
- [39] B.S. Thomas, R.C. Gupta, V.J. Panicker, Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance, *J Clean Prod*, 112 (2016), pp. 504-513,
- [40] P. Sukontasukkul, Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel, *Constr Build Mater*, 23 (2009), pp. 1084-1092,
- [41] I. Marie, Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate – rubberized concrete. *Constr Build Mater*, 133 (2017), pp. 516-524,
- [42] A. Kashani, T.D. Ngo, P. Mendis, J.R. Black, A. Hajimohammadi, A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete, *J Clean Prod*, 149 (2017), pp. 925-935,
- [43] A.A. Aliabdo, A.E.M. Abd Elmoaty, M.M. Abdelbaset, Utilization of waste rubber in non-structural applications, *Constr Build Mater*, 91 (2015), pp. 195-207,
- [44] A.A. Aliabdo, A.E.M. Abd Elmoaty, M.M. Abdelbaset, Utilization of waste rubber in non-structural applications, *Constr Build Mater*, 91 (2015), pp. 195-207,
- [45] Z. Ghizdăveț, B.M. Ștefan, D. Nastac, O. Vasile, M. Bratu, Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix, *Constr Build Mater*, 124 (2016), pp. 755-763,
- [46] X. Wang, J. Xia, O. Nanayakkara, Y. Li, Properties of high-performance cementitious composites containing recycled rubber crumb, *Constr Build Mater*, 156 (2017), pp. 1127-1136,
- [47] R. Si, S. Guo, Q. Dai, Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles, *Constr Build Mater*, 153 (2017), pp. 496-505,
- [48] S. Mavridou, Integration of end-of-life tires in the life cycle of road construction, *Asphalt*, 38 (2010), pp. 1-66
- [49] Scrap Tire News, Scrap Tire News the source for news and information about the scrap tire and rubber recycling industry, (2016)
- [50] I. Mohammadi, H. Khabbaz, K. Vessalas, In-depth assessment of Crumb Rubber Concrete (CRC) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements, *Constr Build Mater*, 71 (2014), pp. 456-471,
- [51] J. Xie, J. Li, Z. Lu, Z. Li, C. Fang, L. Huang, et al., Combination effects of rubber and silica fume on the fracture behaviour of steel-fibre recycled aggregate concrete, *Constr Build Mater*, 203 (2019), pp. 164-173,

- [52] J. Xie, Y. Zheng, Y. Guo, R. Ou, Z. Xie, L. Huang, Effects of crumb rubber aggregate on the static and fatigue performance of reinforced concrete slabs, *Compos Struct*, 228 (2019),
- [53] M. Saberian, L. Shi, A. Sidiq, J. Li, S. Setunge, C.Q. Li, Recycled concrete aggregate mixed with crumb rubber under elevated temperature, *Constr Build Mater*, 222 (2019), pp. 119-129,
- [54] C. Xiaowei, H. Sheng, G. Xiaoyang, D. Wenhui, Crumb waste tire rubber surface modification by plasma polymerization of ethanol and its application on oil-well cement, *Appl Surf Sci*, 409 (2017), pp. 325-342,
- [55] C.Y. Chen, M.T. Lee, Application of crumb rubber in cement-matrix composite, *Materials*, 12 (2019), p. 529,
- [56] H. Zhang, M. Gou, X. Liu, X. Guan, Effect of rubber particle modification on properties of rubberized concrete, *J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed*, 29 (2014), pp. 763-768,
- [57] S. Kaewunruen, D. Li, Y. Chen, Z. Xiang, Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber, *Materials*, 11 (2018),
- [58] P. Sukontasukkul, K. Tiamlom, Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size, *Constr Build Mater*, 29 (2012), pp. 520-526,
- [59] E. Ganjian, M. Khorami, A.A. Maghsoudi, Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Constr Build Mater*, 23 (2009), pp. 1828-1836,
- [60] F. Aslani, A. Deghani, Z. Asif, Development of lightweight rubberized geopolymer concrete by using polystyrene and recycled crumb-rubber aggregates, *J Mater Civ Eng*, 32 (2020), Article 04019345,
- [61] F. Aslani, M. Khan, Properties of high-performance self-compacting rubberized concrete exposed to high temperatures, *J Mater Civ Eng*, 31 (2019),
- [62] R. Roychand, R.J. Gravina, Y. Zhuge, X. Ma, O. Youssf, J.E. Mills, A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete, *Constr Build Mater*, 237 (2020),
- [63] K. Formela, A. Hejna, Zedler, X. Colom, J. Cañavate, Microwave treatment in waste rubber recycling – recent advances and limitations, *Express Polym Lett*, 13 (2019), pp. 565-588,
- [64] G. Venkatesan, M. Saravanakumar, B.P. Kapgate, K. Rajkumar, Laboratory studies on strength behavior of concrete added with tire derived products, *Mater Today Proc*, 33 (2020 Jan 1), pp. 2665-2670,
- [65] H. Zhu, J. Liang, J. Xu, M. Bo, J. Li, B. Tang, Research on anti-chloride ion penetration property of crumb rubber concrete at different ambient temperatures, *Constr Build Mater*, 189 (2018), pp. 42-53,
- [66] Y. Yu, H. Zhu, Effects of rubber size on the cracking resistance of rubberized mortars, *Materials*, 12 (2019),
- [67] G. Ossola, A. Wojcik, UV modification of tire rubber for use in cementitious composites, *Cement Concr Compos*, 52 (2014), pp. 34-41,

- [68] K.B. Najim, M.R. Hall, Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete, *Constr Build Mater*, 27 (2012), pp. 521-530,
- [69] M. Nematzadeh, M. Mousavimehr, Residual compressive stress-strain relationship for hybrid recycled PET-crumb rubber aggregate concrete after exposure to elevated temperatures, *J Mater Civ Eng*, 31 (2019),
- [70] G. Yang, X. Chen, S. Guo, W. Xuan, Dynamic mechanical performance of self-compacting concrete containing crumb rubber under high strain rates, *KSCE J Civ Eng*, 23 (2019), pp. 3669-3681,
- [71] F.M.Z. Hossain, M. Shahjalal, K. Islam, M. Tiznobaik, M.S. Alam, Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber, *Constr Build Mater*, 225 (2019), pp. 983-996,
- [72] B.H. AbdelAleem, A.A.A. Hassan, Influence of synthetic fibers' type, length, and volume on enhancing the structural performance of rubberized concrete, *Constr Build Mater*, 229 (2019),
- [73] O. Onuaguluchi, D.K. Panesar, Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume, *J Clean Prod*, 82 (2014), pp. 125-131,
- [74] S. Salehuddin, N.L. Rahim, N. Mohamad Ibrahim, S.A.N. Tajri, M.Z. Zainol Abidin, The behaviour of rubber tyre as fine aggregate in concrete mix, *Appl Mech Mater*, 754-755 (2015), pp. 427-431,
- [75] O. Youssf, J.E. Mills, R. Hassanli, Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete, *Constr Build Mater*, 125 (2016), pp. 175-183,
- [76] A. Alsaif, L. Koutas, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements, *Constr Build Mater*, 172 (2018), pp. 533-543,
- [77] S. Ramdani, A. Guettala, M.L. Benmalek, J.B. Aguiar, Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder, *J Build Eng*, 21 (2019), pp. 302-311,
- [78] Z. Chen, L. Li, Z. Xiong, Investigation on the interfacial behaviour between the rubber-cement matrix of the rubberized concrete, *J Clean Prod*, 209 (2019), pp. 1354-1364,
- [79] R. Murugan, C. Natarajan, Investigation of the behaviour of concrete containing waste tire crumb rubber, *Adv. Struct. Eng. Mater*, Three, Springer India (2015), pp. 1795-1802,
- [80] A.S.M. Mendis, S. Al-Deen, M. Ashraf, Behaviour of similar strength crumbed rubber concrete (CRC) mixes with different mix proportions, *Constr Build Mater*, 137 (2017), pp. 354-366,
- [81] E. Sodupe-Ortega, E. Fraile-Garcia, J. Ferreira-Cabello, A. Sanz-Garcia, Evaluation of crumb rubber as aggregate for automated manufacturing of rubberized long hollow blocks and bricks, *Constr Build Mater*, 106 (2016), pp. 305-316,
- [82] B.S. Mohammed, N.J. Azmi, Failure mode and modulus elasticity of concrete containing recycled tire rubber, *J Solid Waste Technol Manag*, 37 (2011), pp. 16-24,

- [83] A.O. Adeboje, W.K. Kupolati, E.R. Sadiku, J.M. Ndambuki, C. Kambole, Experimental investigation of modified bentonite clay-crumb rubber concrete, *Constr Build Mater*, 233 (2020),
- [84] J. Wang, Q. Dai, R. Si, S. Guo, Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete, *J Clean Prod*, 234 (2019), pp. 1351-1364,
- [85] E.A.H. Alwesabi, B.H.A. Bakar, I.M.H. Alshaikh, H.M. Akil, Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel-polypropylene hybrid fibre, *Constr Build Mater*, 233 (2020),
- [86] M. Mousavimehr, M. Nematzadeh, Predicting post-fire behavior of crumb rubber aggregate concrete, *Constr Build Mater*, 229 (2019),
- [87] I. Marie, Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV, *J Clean Prod*, 116 (2016), pp. 217-222,
- [88] D.V. Bompa, A.Y. Elghazouli, Creep properties of recycled tyre rubber concrete, *Constr Build Mater*, 209 (2019), pp. 126-134,
- [89] F. Jokar, M. Khorram, G. Karimi, N. Hataf, Experimental investigation of mechanical properties of crumbed rubber concrete containing natural zeolite, *Constr Build Mater*, 208 (2019), pp. 651-658,
- [90] R. Wang, P. Gao, M. Tian, Y. Dai, Experimental study on mechanical and waterproof performance of lightweight foamed concrete mixed with crumb rubber, *Constr Build Mater*, 209 (2019), pp. 655-664,
- [91] B.S. Thomas, R.C. Gupta, Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber, *J Clean Prod*, 102 (2015), pp. 78-87,
- [92] A. Moustafa, M.A. Elgawady, Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber, *Constr Build Mater*, 93 (2015), pp. 249-256,
- [93] H. Su, J. Yang, T.C. Ling, G.S. Ghataora, S. Dirar, Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes, *J Clean Prod*, 91 (2015), pp. 288-296,
- [94] T. Gonen, Freezing-thawing and impact resistance of concretes containing waste crumb rubbers, *Constr Build Mater*, 177 (2018), pp. 436-442,
- [95] G. Girskas, D. Nagrockienė, Crushed rubber waste impact of concrete basic properties, *Constr Build Mater*, 140 (2017), pp. 36-42,
- [96] A. Alsaif, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides, *Constr Build Mater*, 188 (2018), pp. 130-142,
- [97] T.M. Pham, M. Elchalakani, H. Hao, J. Lai, S. Ameduri, T.M. Tran, Durability characteristics of lightweight rubberized concrete, *Constr Build Mater*, 224 (2019), pp. 584-599,
- [98] M. Bravo, J. De Brito, Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance, *J Clean Prod*, 25 (2012), pp. 42-50,

- [99] T. Gupta, S. Chaudhary, R.K. Sharma, Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate, *Constr Build Mater*, 73 (2014), pp. 562-574,
- [100] N. Oikonomou, S. Mavridou, The use of waste tyre rubber in civil engineering works. *Sustain. Constr. Mater*, Elsevier Ltd. (2009), pp. 213-238,
- [101] A. Yilmaz, N. Degirmenci, Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials, *Waste Manag*, 29 (2009), pp. 1541-1546,
- [102] N. Segre, I. Joekes, A.D. Galves, J.A. Rodrigues, Rubber-mortar composites: effect of composition on properties, *J Mater Sci*, 39 (2004), pp. 3319-3327,
- [103] O. Rezaifar, M. Hasanzadeh, M. Gholhaki, Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: optimization using Response Surface Method, *Constr Build Mater*, 123 (2016), pp. 59-68,
- [104] M. Gesolu, E. Güneyisi, Permeability properties of self-compacting rubberized concretes, *Constr Build Mater*, 25 (2011), pp. 3319-3326,
- [105] K.A. Bani-Hani, A. Senouci, Using waste tire crumb rubber as an alternative aggregate for concrete pedestrian blocks, *Jordan J Civ Eng*, 9 (2015), pp. 400-409,
- [106] J. Wang, Q. Dai, S. Guo, R. Si, Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlays, *Constr Build Mater*, 203 (2019), pp. 469-480,
- [107] T. Gupta, S. Chaudhary, R.K. Sharma, Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume, *J Clean Prod*, 112 (2016), pp. 702-711,
- [108] B. Muñoz-Sánchez, M.J. Arévalo-Caballero, M.C. Pacheco-Menor, Influence of acetic acid and calcium hydroxide treatments of rubber waste on the properties of rubberized mortars, *Mater Struct Constr*, 50 (2017), pp. 1-16,
- [109] B.S. Thomas, S. Kumar, P. Mehra, R.C. Gupta, M. Joseph, L.J. Csetenyi, Abrasion resistance of sustainable green concrete containing waste tire rubber particles, *Constr Build Mater*, 124 (2016), pp. 906-909,
- [110] A. Alsaif, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Freeze-thaw resistance of steel fibre reinforced rubberised concrete, *Constr Build Mater*, 195 (2019), pp. 450-458,
- [111] N.P. Pham, A. Toumi, A. Turatsinze, Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite, *Constr Build Mater*, 207 (2019), pp. 528-534,
- [112] A. Baricevic, M. Pezer, M. Jelcic Rukavina, M. Serdar, N. Stirmer, Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete, *Constr Build Mater*, 176 (2018), pp. 135-144,
- [113] B.S. Thomas, R.C. Gupta, P. Mehra, S. Kumar, Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment, *Constr Build Mater*, 83 (2015), pp. 320-326,
- [114] T. Gupta, S. Siddique, R.K. Sharma, S. Chaudhary, Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment, *Constr Build Mater*, 217 (2019), pp. 283-291,

- [115] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume, *Mater Struct Constr*, 40 (2007), pp. 953-964,
- [116] A.A. Gheni, H.H. Alghazali, M.A. ElGawady, J.J. Myers, D. Feys, Durability properties of cleaner cement mortar with by-products of tire recycling, *J Clean Prod*, 213
- [117] G. Li, Z. Wang, C.K.Y. Leung, S. Tang, J. Pan, W. Huang, et al., Properties of rubberized concrete modified by using silane coupling agent and carboxylated SBR, *J Clean Prod*, 112 (2016), pp. 797-807,
- [118] SRPS EN 12350-1:2019, Ispitivanje svežeg betona – Deo 1: Uzimanje uzoraka i opšta aparatura,
- [119] SRPS EN 12390-2:2019, Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 2: Izrada i negovanje uzoraka za ispitivanje čvrstoće,
- [120] SRPS EN 12350-7:2019, Ispitivanje svežeg betona – Deo 7: Sadržaj vazduha – Metode pritiska,
- [121] SRPS EN 12350-2:2019, Ispitivanje svežeg betona – Deo 2: Ispitivanje sleganja,
- [122] SRPS EN 12350-6:2019, Ispitivanje svežeg betona – Deo 6: Zapreminska masa,
- [123] SRPS EN 12390-1:2021, Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 1: Oblik, dimenzije i ostali zahtevi za uzorke i kalupe,
- [124] SRPS EN 12390-7:2019, Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 7: Zapreminska masa očvrsllog betona,
- [125] SRPS EN 12390-3:2019, Ispitivanje očvrsllog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje,
- [126] SRPS EN 12390-8:2019, Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom,
- [127] SRPS U.M1.206:2023, Prilog D, Beton — Beton – Smernice i pravila za primenu nacionalnih tehničkih zahteva za proizvodnju betonakoji se ugrađuje u betonske, armiranobetonske i prethodno napregnute konstrukcije
- [128] SRPS U.M1.206:2013, Prilog O, Beton — Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost — Pravila za primenu standarda SRPS EN 206,
- [129] SRPS EN 480-11:2010, Dodaci betonu, malteru i injekcionoj masi - Metode ispitivanja - Deo 11: Određivanje karakteristika vazdušnih pora u očvrslom betonu,
- [130] SRPS EN 12504-4:2021, Ispitivanje betona u konstrukcijama – Deo 4: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa,
- [131] SRPS EN 12390-13:2021, Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 13: Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri pritisku,
- [132] SRPS EN 12390-18:2021, Ispitivanje očvrsllog betona – Deo 18: Određivanje koeficijenta migracije hlorida,
- [133] SRPS U.M1.029:1983, Beton - Određivanje zapreminskih deformacija,
- [134] SRPS U.M1.206, Beton — Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost — Pravila za primenu standarda, 2013

-
- [135] Pravilnik o kvalitetu cementa, "Službeni glasnik RS", br. 34 od 12. aprila 2013, 44 od 26. aprila 2014.
- [136] SRPS EN 196-1:2017, Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Određivanje čvrstoće,
- [137] SRPS EN 196-3:2017, Metode ispitivanja cementa – Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine,
- [138] SRPS EN 196-6:2019, Metode ispitivanja cementa – Deo 6: Određivanje finoće mliva,
- [139] Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente,
- [140] Pravilnik o tehničkim zahtevima za frakcionisani agregat za beton i asfalt, "Sl. glasnik RS", br. 78/2020,
- [141] SRPS ISO 6783:1999-povučen, Krupni agregati za beton - ODREĐIVANJE STVARNE ZAPREMINSKE MASE I UPIJANJA VODE - Metoda pomoću hidrostatičke vage,
- [142] SRPS ISO 7033:1999-povučen, Sitni i krupni agregati za beton - ODREĐIVANJE STVARNE ZAPREMINSKE MASE I UPIJANJA VODE - Piknometarska metoda,

VIII ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1: Одређивање хемијско-физичко-механичких својстава цемента

Табела VIII-1. Хемијска својства употребљеног цемента

Својство	Врста цемента CEM I 42,5R	Критеријум
Нерастворени остатак [%]	0.23	≤ 5,0
Губитак жарењем [%]	3.55	≤ 5,0
Садржај SO ₃ [%]	3,01	≤ 4,0
Садржај хрома (C _{г,VI}) [%]	0,014	≤ 0,10

Табела VIII-2. Физичка својства употребљеног цемента

Својство	Врста цемента CEM I 42,5R
Финоћа млива, остатак на сити 0.09 mm, [%]	0.1
Специфична површина (Blaine), [cm ² /g]	4320
Специфична маса [g/cm ³]	3,01
Стандардна конзистенција [%]	28,4
Почетак вазивања [min]	150
Крај вазивања [min]	200
Сталност запремине (Le Chatelier) [mm]	0

Табела VIII-3. Механичка својства употребљеног цемента

Врста цемента	Чврстоћа при притиску [MPa]				Чврстоћа на затезање при савијању [MPa]			
	1 дана	3 дана	7 дана	28 дана	1 дана	3 дана	7 дана	28 дана
CEM I 42,5R	24.9	39.3	48.0	60.8	5.5.	7.4	8.5	8.6

Табела VIII-4. Хемијски састав цемента (%)

Параметар	Јединица	CEM I 42,5R
SiO ₂	%	19.83
Al ₂ O ₃	%	4.26
Fe ₂ O ₃	%	2.51
CaO	%	63.41
MgO	%	1.67
SO ₃	%	2.80
S ²⁻	%	0.00
Na ₂ O	%	0.25
K ₂ O	%	0.78
Cl ⁻	%	0.030
MnO	%	0.08

Табела VIII-5. Минералошки састав цемента*) (%)

Параметар	Јединица	CEM I 42,5R
C ₃ S	%	59.97
C ₂ S	%	14.86
C ₃ A	%	8.30
C ₄ AF	%	6.98
CaCO ₃	%	4.82
Гипс	%	2.47
Полухидрат	%	1.12
SO ₃	%	3.10
Аморфна фаза	%	0.41
Остало	%	1.07

Напомена: *) Резултати испитивања добијени помоћу XRD методе спроведени су у лабораторији за цемент у фабрици цемента „Lafarge BFC“ у Беочину.

ПРИЛОГ 2: Одређивање својстава агрегата, природног фракционисаног каменог агрегата

Табела VIII-6. Гранулометријски састав фракционисаног природног каменог агрегата 0/4 mm

	Дно	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
$a_{i/1}$ [g]	27.2	58.7	315.8	114.6	119.8	122.7	12.0	0	0	0
$a_{i/2}$ [g]	25.0	58.7	333.1	133.2	136.2	141.4	32.0	0	0	0
a_i [g]	26.1	58.7	324.4	123.9	128.0	132.1	22.0	0	0	0
O_i [%]	3.2	7.2	39.8	15.2	15.7	16.2	2.7	0	0	0
P_i [%]	-	3.2	10.4	50.2	65.4	81.1	97.3	100	100	100
Y_i [%]	-	3	10	50	65	81	97	100	100	100

Табела VIII-7. Гранулометријски састав фракционисаног природног каменог агрегата 4/8

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	33.3	-	-	-	-	138.3	1313.5	154.3	0	0
$a_{i/2}$ [g]	32.9	-	-	-	-	136.8	1331.1	170.4	0	0
a_i [g]	33.1	-	-	-	-	137.5	1322.3	162.4	0	0
O_i [%]	2.1	-	-	-	-	8.3	79.8	9.8	0	0
P_i [%]	-	-	-	-	-	2.1	10.4	90.2	100	100
Y_i [%]	-	-	-	-	-	2	10	90	100	100

Табела VIII-8. Гранулометријски састав фракционисаног природног каменог агрегата 8/16

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	71.1	-	-	-	-	-	133.6	2802.8	203.1	0
$a_{i/2}$ [g]	70.9	-	-	-	-	-	131.0	2819.5	222.9	0
a_i [g]	71.0	-	-	-	-	-	132.3	2811.2	213.0	0
O_i [%]	2.2	-	-	-	-	-	4.1	87.1	6.6	0
P_i [%]	-	-	-	-	-	-	2.2	6.3	93.4	100
Y_i [%]	-	-	-	-	-	-	2	6	93	100

Модул финоће ситног агрегата (фракције 0/4 mm) износи

$$M = \frac{\sum P_i}{100} = \frac{\sum (100 - Y_i)}{100} = 3,08$$

Табела VIII-9. Физичка својства речног агрегата

Својство	Прилог Правилника или Стандарду	Резултат		
		0/4mm	4/8mm	8/16mm
Садржај ситних честица (мокро сејање) [%]	Правилник – Прилог III-K [140]	0.7	0.0	0.0
Облик зрна	Правилник – Прилог III-S [140]	-	0.24	0.26
Запреминска маса водом засићеног, површински сувог узорка [kg/m³]	SRPS ISO 6873 SRPS ISO 7033 [141, 142]	2635	2645	2660
Упијање воде [%]	SRPS ISO 6873 SRPS ISO 7033 [141, 142]	1.0	0.9	0.9

ПРИЛОГ 3: Одређивање својстава дробљене рециклиране гуме*Табела VIII-10. Гранулометријски састав дробљене рециклиране гуме, фракције 0/1 mm*

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$a_{i/1}$ [g]	2.8	4.6	32.8	652.7	70.2	0	0	0	0	0
$a_{i/2}$ [g]	2.0	4.9	50.9	671.3	87.8	0	0	0	0	0
a_i [g]	2.4	4.7	41.9	662.0	79.0	0	0	0	0	0
O_i [%]	0.3	0.6	5.3	83.8	10.0	0	0	0	0	0
P_i [%]	-	0.3	0.9	6.2	90.0	100	100	100	100	100
Y_i [%]	-	0	1	6	90	100	100	100	100	100

Табела VIII-11. Хемијски састав дробљене рециклиране гуме фракције 0/1 mm

Хемијски састав дробљене рециклиране гуме	
Губитак жарењем на 1000°C, %	89.22
SiO ₂ , %	2.78
Al ₂ O ₃ , %	0.45
Fe ₂ O ₃ , %	0.3
CaO, %	0.3
MgO, %	0.43
Na ₂ O, %	<0.003
K ₂ O, %	0.06
SO ₃ , %	3.75
P ₂ O ₅ , %	0.03
Zn, %	2.23

Табела VIII-12. Елементи у траговима у дробљеној рециклираној гуми

Елементи у траговима, mg/kg	Co	Cu	Mn	Ni	Pb
Дробљена рециклирана гума, фракција 0/1 mm	182.7	187.7	5.9	4.9	22.0

Табела VIII-13. Запреминска маса дробљене рециклиране гуме, фракције 0/1 mm

Дробљена рециклирана гума	Запреминска маса [g/cm ³]
Фракција 0/1 mm	1130

ПРИЛОГ 4: Одређивање битних карактеристика хемијских додатака**А. Хемијски додаток суперпластификатор: „Sika ViscoCrete 4077“***Табела VIII-14. Резултати испитивања утицаја хемијског додатка бетону на битне карактеристике цементне пасте и малтера*

Битна карактеристика		Перформанса	
		Контролна мешавина	Испитна мешавина
Количина додатка, % (m/m) на цемент		-	1,2
Вода потребна за стандардну конзистенцију малтера, %		0,54	0,46
Време везивања малтера, min			
- почетак		220	420
- свршетак		280	720
Распростирање малтера на потесном столу, mm		216	>250
Садржај ваздуха у %		7,4	7,8
Повећање садржаја ваздуха у односу на еталон, %		-	+0,4
Смањење количине потребне воде, %		-	19,1
Чврстоћа, МПа			
- савојна:	1 дан	5,5±0,1	5,5±0,1
	3 дана	7,4±0,7	7,4±0,7
	7 дана	8,6±0,4	8,6±0,4
	28 дана	8,6±0,8	8,6±0,8
- притисна:	1 дан	24,9±1,0	24,9±1,0
	3 дана	39,3±1,7	39,3±1,7
	7 дана	48,0±1,2	48,0±1,2
	28 дана	60,8±1,1	60,8±1,1
Притисна чврстоћа, % од контролне мешавине			
	1 дан	-	64,3
	3 дана	-	105,6
	7 дана	-	104,0
	28 дана	-	101,6

В. Хемијски додаток - аерант: „Sika Control AER 100 RS“

Табела VIII-15. Испитивање утицаја хемијског додатка бетону на битне карактеристике цементне пасте и малтера

Битна карактеристика		Перформанса	
		Контролна мешавина	Испитна мешавина
Количина додатка, % (m/m) на цемент		-	0.025%
Вода потребна за стандардну конзистенцију малтера, %		0,54	0,53
Време везивања малтера, min			
- почетак		230	260
- свршетак		290	320
Распростирање малтера на потесном столу, mm		206	231
Садржај ваздуха у %		9.0	14.9
Повећање садржаја ваздуха у односу на еталон, %		-	+5.9
Смањење количине потребне воде, %		-	5.0
Чврстоћа, МПа			
- савојна:	1 дан	4.8±0.5	4.6±0.4
	3 дана	5.7±0.5	5.4±0.1
	7 дана	7.4±0.4	6.8±0.6
	28 дана	7.5±0.6	7.5±0.4
- притисна:	1 дан	21.0±0.6	16.6±0.7
	3 дана	33.3±1.5	24.4±0.7
	7 дана	38.8±1.0	32.2±0.8
	28 дана	46.5±1.0	40.4±1.3
Притисна чврстоћа, % од контролне мешавине			
	1 дан	-	79.0
	3 дана	-	73.3
	7 дана	-	83.0
	28 дана	-	86.9

ПРИЛОГ 5: Одређивање гранулометријског састава мешавине агрегата

А. Обични (референтни) бетони Р-1 до Р-4

На основу визуелног прегледа више свежих бетонских мешавина, одабран је гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција:

$$X_{0/4} = 0.45$$

$$X_{4/8} = 0.15$$

$$X_{8/16} = 0.40$$

Табела VIII-16. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне Р1 до Р-4

	Дно	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i0/4}$	0	3	10	50	65	81	97	100	100	100
$Y_{i4/8}$	0	0	0	0	0	2	10	90	100	100
$Y_{i8/16}$	0	0	0	0	0	0	2	6	93	100
Y_M	0	1	5	23	29	37	46	61	97	100
A16	0	0	5	7	12	21	36	60	100	100
B16	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100
C16	0	0	18	34	49	62	74	88	100	100

В. Бетони са хемијским додатком аеранта Р-5 до Р-8

На основу визуелног прегледа више свежих бетонских мешавина, одабран је гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција:

$$X_{0/4} = 0.45$$

$$X_{4/8} = 0.15$$

$$X_{8/16} = 0.40$$

Табела VIII-17. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне Р-5 до Р-8

	Дно	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i,0/4}$	0	3	10	50	65	81	97	100	100	100
$Y_{i,4/8}$	0	0	0	0	0	2	10	90	100	100
$Y_{i,8/16}$	0	0	0	0	0	0	2	6	93	100
Y_M	0	1	5	23	29	37	46	61	97	100
A16	0	0	5	7	12	21	36	60	100	100
B16	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100
C16	0	0	18	34	49	62	74	88	100	100

С. Бетоне са 2.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом Р-9 до Р-12

На основу визуелног прегледа више свежих бетонских мешавина, одабран је гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција:

$$X_{0/1} = 0.005$$

$$X_{0/4} = 0.445$$

$$X_{4/8} = 0.15$$

$$X_{8/16} = 0.40$$

Табела VIII-18. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне Р-9 до Р-12

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i,0/1}$	0	0	1	6	90	100	100	100	100	100
$Y_{i,0/4}$	0	3	10	50	65	81	97	100	100	100
$Y_{i,4/8}$	0	0	0	0	0	2	10	90	100	100
$Y_{i,8/16}$	0	0	0	0	0	0	2	6	93	100
Y_M	0	1	4	22	29	37	46	61	97	100
A16	0	0	5	7	12	21	36	60	100	100
B16	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100
C16	0	0	18	34	49	62	74	88	100	100

D. Бетони са 5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом P-13 до P-16

На основу визуелног прегледа више свежих бетонских мешавина, одабран је гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција:

$$X_{0/1} = 0.01$$

$$X_{0/4} = 0.44$$

$$X_{4/8} = 0.15$$

$$X_{8/16} = 0.40$$

Табела VIII-19. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне P-13 до P-16

	Дно	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i,0/1}$	0	0	1	6	90	100	100	100	100	100
$Y_{i,0/4}$	0	3	10	50	65	81	97	100	100	100
$Y_{i,4/8}$	0	0	0	0	0	2	10	90	100	100
$Y_{i,8/16}$	0	0	0	0	0	0	2	6	93	100
Y_M	0	1	4	22	29	37	46	61	97	100
A16	0	0	5	7	12	21	36	60	100	100
B16	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100
C16	0	0	18	34	49	62	74	88	100	100

Е. Бетони са 7.5% запреминске замене ситног агрегата дробљеном гумом Р-17 до Р-20

На основу визуелног прегледа више свежих бетонских мешавина, одабран је гранулометријски састав мешавине агрегата са следећим учешћем фракција:

$$X_{0/1} = 0.015$$

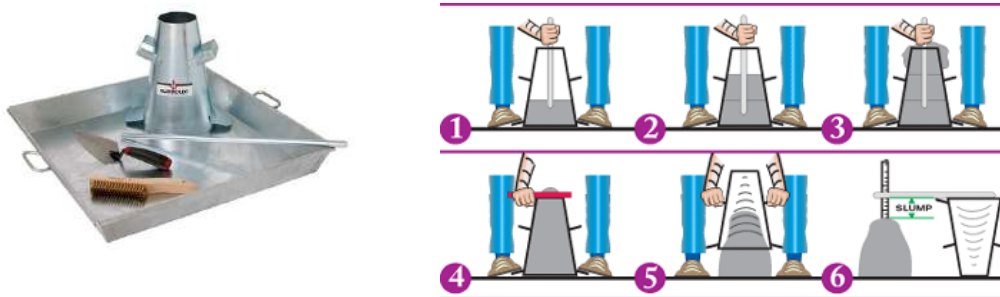
$$X_{0/4} = 0.435$$

$$X_{4/8} = 0.15$$

$$X_{8/16} = 0.40$$

Табела VIII-20. Гранулометријски састав мешавине агрегата за бетоне Р-17 до Р-20

	Дно	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$Y_{i,0/1}$	0	0	1	6	90	100	100	100	100	100
$Y_{i,0/4}$	0	3	10	50	65	81	97	100	100	100
$Y_{i,4/8}$	0	0	0	0	0	2	10	90	100	100
$Y_{i,8/16}$	0	0	0	0	0	0	2	6	93	100
Y_M	0	1	4	22	29	37	46	61	97	100
A16	0	0	5	7	12	21	36	60	100	100
B16	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100
C16	0	0	18	34	49	62	74	88	100	100

ПРИЛОГ 6: Одређивање конзистенције методом слегања

Слика VIII-1 - Прибор за мерење конзистенције бетона Абрамсов конус са илустрацијом поступка мерења

Табела VIII-21. Конзистенција методом слегања, запреминска маса, садржај ваздуха

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Конзистенција методом слегања (mm)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Обични (референтни) бетони	P-1	W/C=0.55	210	180	160
	P-2	W/C=0.50	190	160	140
	P-3	W/C=0.45	180	150	110
	P-4	W/C=0.40	160	120	80
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	W/C=0.55	200	170	150
	P-6	W/C=0.50	180	150	110
	P-7	W/C=0.45	210	170	120
	P-8	W/C=0.40	160	120	80
Бетони са 2.5% дробљене гуме	P-9	W/C=0.55	190	130	90
	P-10	W/C=0.50	180	120	90
	P-11	W/C=0.45	190	160	120
	P-12	W/C=0.40	180	110	60
Бетони са 5% дробљене гуме	P-13	W/C=0.55	200	140	100
	P-14	W/C=0.50	190	150	120
	P-15	W/C=0.45	180	140	100
	P-16	W/C=0.40	170	100	50
Бетони са 7.5% дробљене гуме	P-17	W/C=0.55	200	160	110
	P-18	W/C=0.50	190	140	100
	P-19	W/C=0.45	170	130	90
	P-20	W/C=0.40	160	90	40

ПРИЛОГ 7: Одређивање запреминске масе свежег бетона

Запреминска маса свежег бетона је израчуната према изразу:

$$\gamma_{b,sv} = \frac{m_{k,pun} - m_k}{V_k} = \frac{m_{b,sv}}{V_k}$$

где су:

- m_k – маса празног калупа
- $m_{k,pun}$ – маса пуног калупа
- $m_{b,sv}$ – маса свежег бетона
- V_k – Запремина калупа (калуп облика цилиндра запремине 0.008 m^3).



Слика VIII-2 - Поступак мерења запреминске масе свежег бетона

Табела VIII-22. Одређивање запреминске масе обичних (референтних) бетона

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Запреминска маса (kg/m ³)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Обичани (референтни) бетони	P-1	W/C=0.55	2330	2340	2350
	P-2	W/C=0.50	2350	2350	2360
	P-3	W/C=0.45	2370	2380	2380
	P-4	W/C=0.40	2390	2400	2410

Табела VIII-23 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са хемијским додатком аеранта

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Запреминска маса (kg/m ³)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	W/C=0.55	2260	2270	2280
	P-6	W/C=0.50	2290	2300	2310
	P-7	W/C=0.45	2320	2330	2340
	P-8	W/C=0.40	2340	2360	2370

Табела VIII-24 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 2.5% дробљеном рециклираном гумом

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Запреминска маса (kg/m ³)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Бетони са 2.5% дробљеном гумом	P-9	W/C=0.55	2310	2300	2280
	P-10	W/C=0.50	2330	2310	2290
	P-11	W/C=0.45	2350	2330	2300
	P-12	W/C=0.40	2370	2360	2340

Табела VIII-25 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 5% дробљеном рециклираном гумом

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Запреминска маса (kg/m ³)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Betoni sa 5% drobljenom gumom	P-13	W/C=0.55	2300	2280	2260
	P-14	W/C=0.50	2330	2310	2290
	P-15	W/C=0.45	2350	2320	2300
	P-16	W/C=0.40	2370	2350	2330

Табела VIII-26 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 7.5% дробљеном рециклираном гумом

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Запреминска маса (kg/m ³)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Бетони са 7.5% дробљеном гумом	P-17	W/C=0.55	2290	2270	2250
	P-18	W/C=0.50	2310	2300	2280
	P-19	W/C=0.45	2330	2310	2290
	P-20	W/C=0.40	2350	2330	2310

ПРИЛОГ 8: Одређивање садржаја ваздуха свежег бетона

Садржај ваздуха се израчуната према изразу:

$$A_c = A_1 - G$$

где су:

- A_c – израчуната вредност садржаја ваздуха у порозиметру,
- A_1 – измерена вредност садржаја ваздуха у узорку свежег бетона (%),
- G – корекциони фактор агрегата, $G=0$

Табела VIII-27 - Одређивање садржаја ваздуха обичних (референтних) бетона

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Садржај ваздуха (%)		
			након 10 min	nakon 30 min	nakon 60 min
Обичани (референтни) бетони	P-1	W/C=0.55	2.3	2.1	2.0
	P-2	W/C=0.50	2.2	2.0	1.9
	P-3	W/C=0.45	2.1	2.0	1.8
	P-4	W/C=0.40	2.1	2.0	1.7

Табела VIII-28 - Одређивање садржаја ваздуха свежег бетона код бетона са хемијским додатком аеранта

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Садржај ваздуха (%)		
			након 10 min	nakon 30 min	nakon 60 min
Бетони са хемијским додатком аеранта	P-5	W/C=0.55	5.4	5.2	5.0
	P-6	W/C=0.50	6.0	5.8	5.5
	P-7	W/C=0.45	5.4	5.2	5.0
	P-8	W/C=0.40	5.0	4.5	4.0

Табела VIII-29 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 2.5% дробљеном рециклираном гумом

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Садржај ваздуха (%)		
			након 10 min	nakon 30 min	nakon 60 min
Бетони са 2.5% дробљеном гумом	P-9	W/C=0.55	3.2	3.6	4.1
	P-10	W/C=0.50	3.1	3.4	3.6
	P-11	W/C=0.45	2.8	3.0	3.1
	P-12	W/C=0.40	2.5	2.7	2.9

Табела VIII-30 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 5% дробљеном рециклираном гумом

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Садржај ваздуха (%)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Бетони са 5% дробљеном гумом	P-13	W/C=0.55	3.8	4.2	4.8
	P-14	W/C=0.50	3.2	3.6	3.9
	P-15	W/C=0.45	2.6	3.2	3.5
	P-16	W/C=0.40	2.6	2.8	3.1

Табела VIII-31 - Одређивање запреминске масе свежег бетона са 7.5% дробљеном рециклираном гумом

Врста бетона	Ознака мешавине	Водоцементни однос, W/C	Садржај ваздуха (%)		
			након 10 min	након 30 min	након 60 min
Бетони са 7.5% дробљеном гумом	P-17	W/C=0.55	4.2	4.8	5.1
	P-18	W/C=0.50	3.3	3.7	4.0
	P-19	W/C=0.45	3.1	3.4	3.7
	P-20	W/C=0.40	2.8	3.2	3.5

ПРИЛОГ 9:**Одређивање запреминске масе очврслог бетона****SRPS EN 12390-7**

Запреминска маса очврслог бетона је срачуната према изразу:

$$D = \frac{m_s}{V}$$

где су:

- D – запреминска маса $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- m_s – маса бетонске коцке у водом засићеном стању (kg)
- V – запремина бетонске коцке добијена рачунањем преко декларисаних мера (m^3)

Одређивање чврстоће при притиску очврслог бетона**SRPS EN 12390-3**

Чврстоћа при притиску очврслог бетона је срачуната према изразу:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

где су:

- f_c – чврстоћа при притиску, у МПа $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$
- F – максимална сила лома (N);
- A_c – површина попречног пресека узорка на коју делује сила притиска, израчуната на основу назначене величине узорка према EN 12390-1 (mm^2)

Табела -VIII-32. Чврстоћа при притиску обичног (референтног) бетона

Старост (дана)	Ознака узорка	w/c	Дужина (mm)	Ширина (mm)	Висина (mm)	Маса, m _s (g)	Запремина, V (m ³)	Запреминска маса, D (kg/m ³)		Сила, F (kN)	Површина, A _c (mm ²)	Чврстоћа при притиску, f _c (MPa)	
								појединачна	средња			појединачна	средња
3	P-1/1	0.55	150	150	150	7935	0.003375	2351		725.8	22500	32.3	32.0
	P-1/2		150	150	150	7960	0.003375	2359	2350	715.2	22500	31.8	
7	P-1/3		150	150	150	7905	0.003375	2342		986.5	22500	43.8	43.4
	P-1/4		150	150	150	7876	0.003375	2334	2340	966.2	22500	42.9	
28	P-1/5		150	150	150	7872	0.003375	2332		1288.8	22500	57.3	56.5
	P-1/6		150	150	150	7895	0.003375	2339	2340	1254.1	22500	55.7	
3	P-2/1	0.50	150	150	150	7959	0.003375	2358		768.4	22500	34.2	33.7
	P-2/2		150	150	150	7927	0.003375	2349	2350	745.9	22500	33.2	
7	P-2/3		150	150	150	7967	0.003375	2361		1018.3	22500	45.3	45.7
	P-2/4		150	150	150	7956	0.003375	2357	2360	1037.9	22500	46.1	
28	P-2/5		150	150	150	7972	0.003375	2362		1329.2	22500	59.1	58.5
	P-2/6		150	150	150	7991	0.003375	2368	2360	1302.7	22500	57.9	
3	P-3/1	0.45	150	150	150	7898	0.003375	2340		866.4	22500	38.5	37.9
	P-3/2		150	150	150	7952	0.003375	2356	2350	839.2	22500	37.3	
7	P-3/3		150	150	150	7945	0.003375	2354		1132.8	22500	50.3	49.9
	P-3/4		150	150	150	7977	0.003375	2364	2360	1111.9	22500	49.4	
28	P-3/5		150	150	150	7985	0.003375	2366		1362.1	22500	60.5	60.1
	P-3/6		150	150	150	7998	0.003375	2370	2370	1342.8	22500	59.7	
3	P-4/1	0.40	150	150	150	8067	0.003375	2390		1070.2	22500	47.6	47.2
	P-4/2		150	150	150	8052	0.003375	2386	2390	1055.4	22500	46.9	
7	P-4/3		150	150	150	8142	0.003375	2412		1338.7	22500	59.5	59.3
	P-4/4		150	150	150	8153	0.003375	2416	2410	1329.6	22500	59.1	
28	P-4/5		150	150	150	8135	0.003375	2410		1603.4	22500	71.3	70.8
	P-4/6		150	150	150	8148	0.003375	2414	2410	1583.5	22500	70.4	

Табела VIII-33 - Чврстоћа при притиску бетона са додатком хемијског додатка аеранта

Старост (дана)	Ознака узорка	w/c	Дужина (mm)	Ширина (mm)	Висина (mm)	Маса, m _s (g)	Запремина, V (m ³)	Запреминска маса, D (kg/m ³)		Сила, F (kN)	Површина, A _c (mm ²)	Чврстоћа при притиску, f _c (MPa)	
								појединачна	средња			pojedinačna	srednja
3	P-5/1	0.55	150	150	150	7645	0.003375	2265	2270	638.4	22500	28.4	28.8
	P-5/2	0.55	150	150	150	7675	0.003375	2274		658.7	22500	29.3	
7	P-5/3	0.55	150	150	150	7670	0.003375	2273	2270	854.7	22500	38.0	38.4
	P-5/4	0.55	150	150	150	7652	0.003375	2267		874.9	22500	38.9	
28	P-5/5	0.55	150	150	150	7685	0.003375	2277	2280	1085.2	22500	48.2	48.8
	P-5/6	0.55	150	150	150	7705	0.003375	2283		1112.2	22500	49.4	
3	P-6/1	0.50	150	150	150	7658	0.003375	2269	2270	680.1	22500	30.2	29.5
	P-6/2	0.50	150	150	150	7672	0.003375	2273		648.7	22500	28.8	
7	P-6/3	0.50	150	150	150	7705	0.003375	2283	2280	888.3	22500	39.5	39.9
	P-6/4	0.50	150	150	150	7694	0.003375	2280		907.5	22500	40.3	
28	P-6/5	0.50	150	150	150	7735	0.003375	2292	2290	1181.0	22500	52.5	52.0
	P-6/6	0.50	150	150	150	7755	0.003375	2298		1159.8	22500	51.5	
3	P-7/1	0.45	150	150	150	7767	0.003375	2301	2300	745.7	22500	33.1	32.9
	P-7/2	0.45	150	150	150	7782	0.003375	2306		736.6	22500	32.7	
7	P-7/3	0.45	150	150	150	7772	0.003375	2303	2300	980.3	22500	43.6	43.8
	P-7/4	0.45	150	150	150	7764	0.003375	2300		992.3	22500	44.1	
28	P-7/5	0.45	150	150	150	7873	0.003375	2333	2330	1292.2	22500	57.4	56.5
	P-7/6	0.45	150	150	150	7825	0.003375	2319		1250.8	22500	55.6	
3	P-8/1	0.40	150	150	150	7942	0.003375	2353	2350	983.5	22500	43.7	43.4
	P-8/2	0.40	150	150	150	7928	0.003375	2349		967.9	22500	43.0	
7	P-8/3	0.40	150	150	150	7935	0.003375	2351	2350	1137.6	22500	50.6	50.9
	P-8/4	0.40	150	150	150	7940	0.003375	2353		1152.1	22500	51.2	
28	P-8/5	0.40	150	150	150	7952	0.003375	2356	2360	1428.2	22500	63.5	63.1
	P-8/6	0.40	150	150	150	7947	0.003375	2355		1410.8	22500	62.7	

Табела VIII-34 - Чврстоћа при притиску бетона са запреминском заменом 2.5% ситног агрегата дробљеном гумом

Старост (дана)	Ознака узорка	w/c	Дужина (mm)	Ширина (mm)	Висина (mm)	Маса, m _s (g)	Запремина, V (m ³)	Запреминска маса, D (kg/m ³)		Сила, F (kN)	Површина, A _c (mm ²)	Чврстоћа при притиску, f _c (MPa)	
								појединачна	средња			pojedinačna	srednja
3	P-9/1	0.55	150	150	150	7786	0.003375	2307		669.2	22500	29.7	30.2
	P-9/2	0.55	150	150	150	7802	0.003375	2312	2310	691.7	22500	30.7	
7	P-9/3	0.55	150	150	150	7772	0.003375	2303		882.4	22500	39.2	39.5
	P-9/4	0.55	150	150	150	7758	0.003375	2299	2300	895.0	22500	39.8	
28	P-9/5	0.55	150	150	150	7768	0.003375	2302		1124.8	22500	50.0	49.6
	P-9/6	0.55	150	150	150	7752	0.003375	2297	2300	1109.3	22500	49.3	
3	P-10/1	0.50	150	150	150	7822	0.003375	2318		718.9	22500	32.0	32.4
	P-10/2	0.50	150	150	150	7845	0.003375	2324	2320	739.2	22500	32.9	
7	P-10/3	0.50	150	150	150	7831	0.003375	2320		925.5	22500	41.1	41.5
	P-10/4	0.50	150	150	150	7843	0.003375	2324	2320	941.2	22500	41.8	
28	P-10/5	0.50	150	150	150	7907	0.003375	2343		1192.2	22500	53.0	52.6
	P-10/6	0.50	150	150	150	7892	0.003375	2338	2340	1175.8	22500	52.3	
3	P-11/1	0.45	150	150	150	7899	0.003375	2340		830.1	22500	36.9	36.7
	P-11/2	0.45	150	150	150	7905	0.003375	2342	2340	823.5	22500	36.6	
7	P-11/3	0.45	150	150	150	7915	0.003375	2345		1052.1	22500	46.8	46.4
	P-11/4	0.45	150	150	150	7893	0.003375	2339	2340	1034.2	22500	46.0	
28	P-11/5	0.45	150	150	150	8010	0.003375	2373		1295.9	22500	57.6	57.1
	P-11/6	0.45	150	150	150	7988	0.003375	2367	2370	1272.5	22500	56.6	
3	P-12/1	0.40	150	150	150	8033	0.003375	2380		1031.8	22500	45.9	45.4
	P-12/2	0.40	150	150	150	8024	0.003375	2377	2380	1010.7	22500	44.9	
7	P-12/3	0.40	150	150	150	8075	0.003375	2393		1256.0	22500	55.8	55.6
	P-12/4	0.40	150	150	150	8083	0.003375	2395	2390	1247.1	22500	55.4	
28	P-12/5	0.40	150	150	150	8112	0.003375	2404		1498.2	22500	66.6	66.0
	P-12/6	0.40	150	150	150	8100	0.003375	2400	2400	1472.9	22500	65.5	

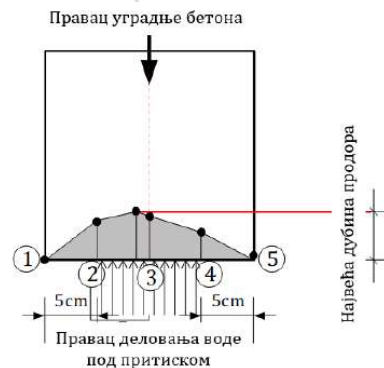
Табела VIII-35 - Чврстоћа при притиску бетона са запреминском заменом 5.0% ситног агрегата дробљеном гумом

Старост (дана)	Ознака узорка	w/c	Дужина (mm)	Ширина (mm)	Висина (mm)	Маса, m _s (g)	Запремина, V (m ³)	Запреминска маса, D (kg/m ³)		Сила, F (kN)	Површина, A _c (mm ²)	Чврстоћа при притиску, f _c (MPa)	
								појединачна	средња			pojedinačna	srednja
3	P-13/1	0.55	150	150	150	7744	0.003375	2294		601.2	22500	26.7	
	P-13/2	0.55	150	150	150	7732	0.003375	2291	2290	571.8	22500	25.4	26.1
7	P-13/3	0.55	150	150	150	7784	0.003375	2306		830.6	22500	36.9	
	P-13/4	0.55	150	150	150	7771	0.003375	2303	2300	810.3	22500	36.0	36.5
28	P-13/5	0.55	150	150	150	7795	0.003375	2310		1016.4	22500	45.2	
	P-13/6	0.55	150	150	150	7783	0.003375	2306	2310	982.7	22500	43.7	44.4
3	P-14/1	0.50	150	150	150	7811	0.003375	2314		635.5	22500	28.2	
	P-14/2	0.50	150	150	150	7799	0.003375	2311	2310	610.5	22500	27.1	27.7
7	P-14/3	0.50	150	150	150	7851	0.003375	2326		884.3	22500	39.3	
	P-14/4	0.50	150	150	150	7839	0.003375	2323	2320	900.3	22500	40.0	39.7
28	P-14/5	0.50	150	150	150	7863	0.003375	2330		1055.7	22500	46.9	
	P-14/6	0.50	150	150	150	7850	0.003375	2326	2330	1095.2	22500	48.7	47.8
3	P-15/1	0.45	150	150	150	7913	0.003375	2344		802.1	22500	35.6	
	P-15/2	0.45	150	150	150	7900	0.003375	2341	2340	785.2	22500	34.9	35.3
7	P-15/3	0.45	150	150	150	7952	0.003375	2356		987.5	22500	43.9	
	P-15/4	0.45	150	150	150	7940	0.003375	2353	2350	964.2	22500	42.9	43.4
28	P-15/5	0.45	150	150	150	7964	0.003375	2360		1175.8	22500	52.3	
	P-15/6	0.45	150	150	150	7952	0.003375	2356	2360	1173.1	22500	52.1	52.2
3	P-16/1	0.40	150	150	150	7980	0.003375	2364		1048.2	22500	46.6	
	P-16/2	0.40	150	150	150	7968	0.003375	2361	2360	1012.7	22500	45.0	45.8
7	P-16/3	0.40	150	150	150	8054	0.003375	2386		1232.0	22500	54.8	
	P-16/4	0.40	150	150	150	8041	0.003375	2383	2380	1180.2	22500	52.5	53.6
28	P-16/5	0.40	150	150	150	8032	0.003375	2380		1409.4	22500	62.6	
	P-16/6	0.40	150	150	150	8019	0.003375	2376	2380	1457.2	22500	64.8	63.7

Табела VIII-36 - Чврстоћа при притиску бетона са запреминском заменом 7.5% ситног агрегата дробљеном гумом

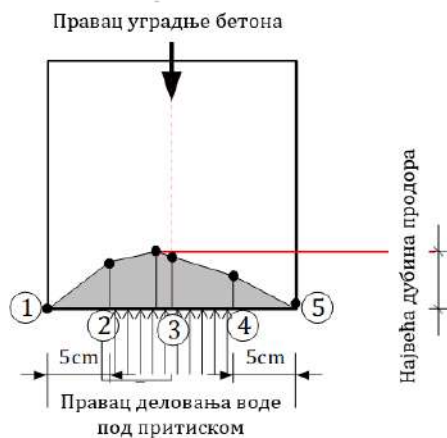
Старост (дана)	Ознака узорка	w/c	Дужина (mm)	Ширина (mm)	Висина (mm)	Маса, m _s (g)	Запремина, V (m ³)	Запреминска маса, D (kg/m ³)		Сила, F (kN)	Површина, A _c (mm ²)	Чврстоћа при притиску, f _c (MPa)	
								појединачна	средња			pojedinačna	srednja
3	P-17/1	0.55	150	150	150	7662	0.003375	2270	2270	523.8	22500	23.3	23.6
	P-17/2	0.55	150	150	150	7675	0.003375	2274		540.1	22500	24.0	
7	P-17/3	0.55	150	150	150	7658	0.003375	2269	2270	760.5	22500	33.8	34.0
	P-17/4	0.55	150	150	150	7684	0.003375	2277		770.4	22500	34.2	
28	P-17/5	0.55	150	150	150	7741	0.003375	2294	2290	948.6	22500	42.2	42.0
	P-17/6	0.55	150	150	150	7732	0.003375	2291		940.7	22500	41.8	
3	P-18/1	0.50	150	150	150	7815	0.003375	2316	2310	589.3	22500	26.2	25.9
	P-18/2	0.50	150	150	150	7796	0.003375	2310		575.6	22500	25.6	
7	P-18/3	0.50	150	150	150	7849	0.003375	2326	2320	821.3	22500	36.5	35.6
	P-18/4	0.50	150	150	150	7824	0.003375	2318		779.2	22500	34.6	
28	P-18/5	0.50	150	150	150	7832	0.003375	2321	2320	992.2	22500	44.1	44.3
	P-18/6	0.50	150	150	150	7855	0.003375	2327		1002.1	22500	44.5	
3	P-19/1	0.45	150	150	150	7912	0.003375	2344	2340	765.2	22500	34.0	33.3
	P-19/2	0.45	150	150	150	7901	0.003375	2341		732.7	22500	32.6	
7	P-19/3	0.45	150	150	150	7907	0.003375	2343	2340	902.3	22500	40.1	40.8
	P-19/4	0.45	150	150	150	7920	0.003375	2347		932.5	22500	41.4	
28	P-19/5	0.45	150	150	150	7995	0.003375	2369	2360	1130.9	22500	50.3	50.7
	P-19/6	0.45	150	150	150	7966	0.003375	2360		1150.2	22500	51.1	
3	P-20/1	0.40	150	150	150	7905	0.003375	2342	2340	939.3	22500	41.7	41.3
	P-20/2	0.40	150	150	150	7921	0.003375	2347		919.6	22500	40.9	
7	P-20/3	0.40	150	150	150	7952	0.003375	2356	2350	1085.2	22500	48.2	47.9
	P-20/4	0.40	150	150	150	7944	0.003375	2354		1070.1	22500	47.6	
28	P-20/5	0.40	150	150	150	7965	0.003375	2360	2360	1270.0	22500	56.4	56.8
	P-20/6	0.40	150	150	150	7976	0.003375	2363		1284.2	22500	57.1	

ПРИЛОГ 10: Одређивање дубине продирања воде под притиском



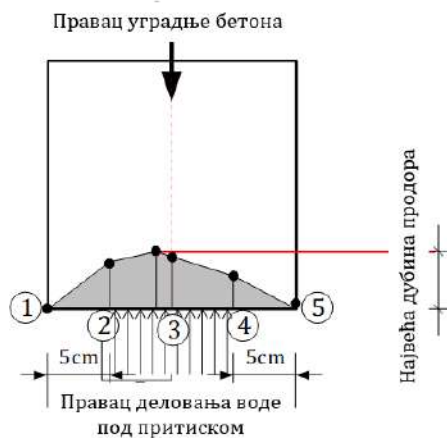
Табела VIII-37 - Обичан (референтни) бетон - Одређивање дубине продора воде под притиском

Ознака узорка	Старост [дана]	w/c	Маса пре испитивања [g]	Маса после испитивања [g]	Појединачне дубине продора воде [mm]					Највећа дубина продора воде [mm]
					T1	T2	T3	T4	T5	
P-1 / 7	28	0.55	7902	7912	5	12	23	15	6	23
P-1 / 8			7916	7929	7	14	26	17	8	26
P-1 / 9			7912	7923	6	13	24	14	7	24
P-2 / 7	28	0.50	7865	7877	7	14	24	12	5	24
P-2 / 8			7903	7913	3	10	20	8	2	20
P-2 / 9			7872	7883	4	11	22	10	4	22
P-3 / 7	28	0.45	7948	7960	4	10	22	11	6	22
P-3 / 8			7934	7944	4	11	20	6	3	20
P-3 / 9			7941	7952	5	12	22	13	5	22
P-4 / 7	28	0.40	7993	8001	2	6	13	5	1	13
P-4 / 8			7978	7987	3	8	16	6	2	16
P-4 / 9			7982	7990	4	10	15	8	1	15



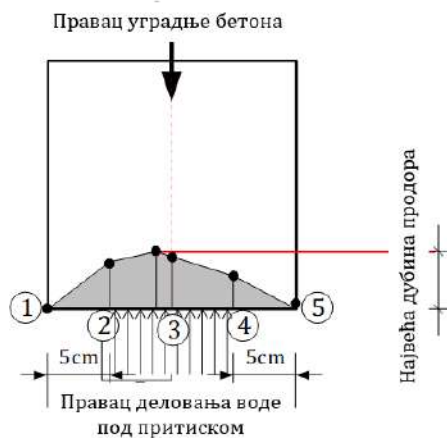
Табела VIII-38 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са хемијским додатком аеранта

Ознака узорка	Старост [дана]	w/c	Маса пре испитивања [g]	Маса после испитивања [g]	Појединачне дубине продора воде [mm]					Највећа дубина продора воде [mm]
					T1	T2	T3	T4	T5	
P-5 / 7	32	0.55	7663	7675	7	15	24	16	8	24
P-5 / 8			7731	7740	4	10	16	9	3	16
P-5 / 9			7685	7696	4	12	22	15	6	22
P-6 / 7	32	0.50	7665	7672	2	6	12	8	3	12
P-6 / 8			7673	7684	6	14	21	15	7	21
P-6 / 9			7670	7679	4	9	16	10	5	16
P-7 / 7	32	0.45	7720	7730	6	10	19	12	6	19
P-7 / 8			7611	7619	5	8	14	9	4	14
P-7 / 9			7652	7661	5	9	17	11	7	17
P-8 / 7	32	0.40	7810	7816	4	10	14	11	5	14
P-8 / 8			7916	7921	2	9	13	12	3	13
P-8 / 9			7848	7854	3	8	14	11	3	14



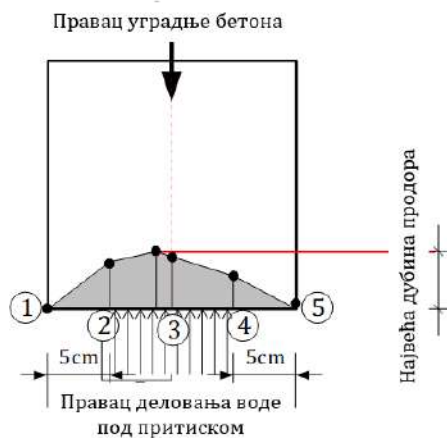
Табела VIII-39 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са додатком 2.5 % гуме

Ознака узорка	Старост [дана]	w/c	Маса пре испитивања [g]	Маса после испитивања [g]	Појединачне дубине продора воде [mm]					Највећа дубина продора воде [mm]	
					T1	T2	T3	T4	T5		
P-9 / 7	36	0.55	7845	7868	10	19	35	21	12	35	42
P-9 / 8			7834	7869	11	22	42	26	15	42	
P-9 / 9			7842	7871	12	22	38	20	9	38	
P-10 / 7	36	0.50	7889	7910	11	21	32	20	15	32	32
P-10 / 8			7857	7877	9	15	25	14	8	25	
P-10 / 9			7875	7896	10	18	28	16	9	28	
P-11 / 7	36	0.45	7842	7854	5	13	22	11	4	22	25
P-11 / 8			7913	7927	6	16	25	15	7	25	
P-11 / 9			7901	7914	5	14	23	13	5	23	
P-12 / 7	36	0.40	8082	8093	4	11	21	10	3	21	21
P-12 / 8			8010	8020	3	9	20	10	4	20	
P-12 / 9			7994	8003	4	8	20	11	3	20	



Табела VIII-40 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са додатком 5% гуме

Ознака узорка	Старост [дана]	w/c	Маса пре испитивања [g]	Маса после испитивања [g]	Појединачне дубине продора воде [mm]					Највећа дубина продора воде [mm]	
					T1	T2	T3	T4	T5		
P-13 / 7	40	0.55	7819	7844	5	11	22	12	6	22	35
P-13 / 8			7803	7830	11	22	35	24	12	35	
P-13 / 9			7800	7831	9	16	28	17	8	28	
P-14 / 7	40	0.50	7852	7873	10	17	28	16	11	28	28
P-14 / 8			7873	7886	8	14	28	15	10	28	
P-14 / 9			7862	7878	10	16	26	18	11	26	
P-15 / 7	40	0.45	7904	7918	3	9	22	10	4	22	22
P-15 / 8			7917	7928	2	8	19	9	3	19	
P-15 / 9			7910	7922	3	10	20	8	2	20	
P-16 / 7	40	0.40	7948	7957	3	8	16	5	2	16	18
P-16 / 8			8012	8023	3	8	18	6	2	18	
P-16 / 9			8024	8031	2	7	15	7	1	15	



Табела VIII-41 - Одређивање дубине продора воде под притиском - Бетони са додатком 7.5 %

Ознака узорка	Старост [дана]	w/c	Маса пре испитивања [g]	Маса после испитивања [g]	Појединачне дубине продора воде [mm]					Највећа дубина продора воде [mm]
					T1	T2	T3	T4	T5	
P-17 / 7	44	0.55	7632	7660	11	21	32	23	12	32
P-17 / 8			7671	7692	8	13	27	14	9	27
P-17 / 9			7635	7659	12	21	31	20	11	31
P-18 / 7	44	0.50	7833	7846	7	17	25	15	6	25
P-18 / 8			7842	7854	4	10	22	12	6	22
P-18 / 9			7845	7858	6	12	23	11	5	23
P-19 / 7	44	0.45	7865	7877	3	9	20	11	4	20
P-19 / 8			7896	7904	2	6	16	9	3	16
P-19 / 9			7908	7919	4	10	19	8	3	19
P-20 / 7	44	0.40	7895	7900	3	8	16	9	4	16
P-20 / 8			7989	7996	5	11	12	8	6	12
P-20 / 9			7992	7998	2	7	15	8	3	15

ПРИЛОГ 11: Одређивање динамичког модула еластичности бетона

Динамички модула еластичности је одређен мерењем времена потребног за пролазак ултразвука кроз бетонски узорак и рачунањем брзине ултразвука. Веза између динамичког модула еластичности и брзине ултразвука дата је изразом:

$$E_d = v^2 \cdot \gamma_b$$

где су:

- E_d – динамички модул еластичности,
- v – брзина ултразвука,
- γ_b – запреминска маса бетона.

Табела VIII-42. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-1)

Број циклауса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.79	149.95	149.87	7962	37.3	3366	2365	4018	38.19
25	150.09	150.10	149.95	7962	37.3	3378	2357	4020	38.09
50	149.97	149.94	150.02	7962	37.1	3373	2360	4044	38.59
75	149.98	149.90	150.01	7952	37.3	3372	2358	4022	38.14
100	149.94	149.89	149.96	7945	37.2	3370	2357	4031	38.31
125	149.82	149.94	149.88	7932	37.5	3367	2356	3997	37.63
150	149.91	150.16	149.90	7932	37.6	3374	2351	3987	37.36
175	149.92	149.87	149.89	7932	37.8	3368	2355	3965	37.04
200	149.98	149.93	149.90	7932	38.0	3371	2353	3945	36.62
225	149.96	149.84	149.90	7932	38.3	3368	2355	3914	36.07
250	149.95	149.94	149.91	7932	38.4	3370	2353	3904	35.87
275	149.87	149.99	149.90	7932	38.5	3370	2354	3894	35.68
300	149.97	150.05	149.91	7932	38.9	3373	2351	3854	34.92

Табела VIII-43. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-2)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.92	149.79	149.74	7942	36.8	3362	2362	4069	39.11
25	149.94	150.08	149.64	7940	36.9	3367	2358	4055	38.78
50	150.22	149.83	149.87	7930	37	3373	2351	4051	38.57
75	149.83	149.89	149.86	7920	37.1	3365	2353	4039	38.40
100	149.79	149.94	149.9	7921	37.2	3367	2353	4030	38.20
125	150.16	150.23	149.95	7925	37.3	3383	2343	4020	37.86
150	149.81	150.10	150.01	7927	37.4	3373	2350	4011	37.81
175	150.04	150.03	150.02	7922	37.4	3377	2346	4011	37.74
200	150.18	149.90	150.4	7917	37.5	3386	2338	4011	37.61
225	150.13	149.76	150.04	7920	37.5	3373	2348	4001	37.58
250	149.98	149.76	150.05	7928	37.6	3370	2352	3991	37.46
275	149.77	150.21	150.09	7930	37.7	3377	2349	3981	37.22
300	150.12	150.13	150.12	7936	37.8	3383	2346	3971	36.99

Табела VIII-44. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-3)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μ s)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.90	150.07	150.02	7985	36.5	3375	2366	4110	39.97
25	150.24	149.85	150.02	7987	36.5	3378	2365	4110	39.95
50	149.79	150.10	150.01	7990	36.5	3373	2369	4110	40.01
75	149.75	150.02	150.01	7985	36.5	3370	2369	4110	40.02
100	150.01	149.93	150.02	7972	36.6	3374	2363	4099	39.70
125	150.09	150.09	150.01	7967	36.5	3379	2358	4110	39.82
150	150.02	150.25	150.02	7962	36.5	3381	2355	4110	39.78
175	150.03	149.92	150.02	7960	36.5	3374	2359	4110	39.85
200	150.15	149.78	150.01	7958	36.5	3374	2359	4110	39.84
225	150.12	149.83	150.01	7956	36.5	3374	2358	4110	39.83
250	149.95	150.18	150.00	7956	36.5	3378	2355	4110	39.78
275	150.14	149.82	150.00	7955	36.8	3374	2358	4076	39.17
300	150.11	150.00	150.09	7955	36.9	3379	2354	4067	38.94

Табела VIII-45. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - обичан (референтни) бетон (P-4)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	150.08	149.78	149.85	8026	36.1	3369	2383	4151	41.05
25	149.82	149.82	149.23	8020	36.2	3350	2394	4122	40.69
50	150.08	150.21	149.82	8013	36.2	3378	2372	4139	40.64
75	150.14	150.18	149.94	8013	36.2	3381	2370	4142	40.66
100	150.20	150.05	149.94	8014	36.2	3379	2371	4142	40.68
125	150.06	150.14	149.99	8016	36.2	3379	2372	4143	40.72
150	149.81	149.84	149.91	8023	36.3	3365	2384	4130	40.66
175	150.23	150.10	149.92	8020	36.3	3381	2372	4130	40.47
200	150.08	150.06	150.02	8015	36.3	3379	2372	4133	40.52
225	150.01	150.23	149.95	8018	36.4	3379	2373	4120	40.26
250	150.15	150.04	149.89	8022	36.5	3377	2375	4107	40.06
275	150.18	149.80	149.92	8023	36.6	3373	2379	4096	39.91
300	149.75	150.09	149.8	8025	36.6	3367	2383	4093	39.93

Табела VIII-46. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-5)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.85	150.13	149.88	7788	37.2	3372	2310	4029	37.49
25	150.08	150.12	149.66	7643	37.2	3372	2267	4023	36.69
50	150.18	150.13	149.71	7638	37.2	3375	2263	4024	36.65
75	149.75	150.22	149.77	7636	37.2	3369	2266	4026	36.74
100	149.79	150.17	149.98	7632	37.2	3373	2262	4032	36.77
125	150.11	149.90	149.98	7632	37.4	3375	2261	4010	36.37
150	149.82	150.00	149.74	7640	37.3	3365	2270	4014	36.59
175	149.77	149.83	149.85	7632	37.4	3363	2270	4007	36.44
200	150.21	149.91	149.82	7621	37.2	3374	2259	4027	36.64
225	149.76	150.15	149.85	7632	37.2	3370	2265	4028	36.75
250	149.91	150.18	149.88	7641	37.3	3374	2264	4018	36.56
275	149.84	149.87	149.92	7640	37.5	3367	2269	3998	36.27
300	150.13	150.00	149.93	7640	37.7	3376	2263	3977	35.79

Табела VIII-47. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула – бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-6)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.82	150.17	150.12	7774	36.9	3377	2302	4068	38.10
25	149.98	150.20	150.11	7775	36.9	3382	2299	4068	38.05
50	149.92	150.15	150.12	7777	36.9	3379	2301	4068	38.09
75	150.21	150.15	150.11	7772	37.0	3386	2296	4057	37.78
100	150.13	149.96	150.1	7768	37.0	3379	2299	4057	37.83
125	150.14	149.91	150.09	7763	37.1	3378	2298	4046	37.61
150	149.78	149.77	150.08	7760	37.1	3367	2305	4045	37.72
175	150.20	150.03	150.07	7758	37.1	3382	2294	4045	37.54
200	149.83	150.00	150.08	7755	37.1	3373	2299	4045	37.63
225	149.91	150.25	150.09	7753	37.1	3381	2293	4046	37.53
250	149.81	149.98	150.08	7752	37.2	3372	2299	4034	37.42
275	149.85	150.02	150.08	7750	37.3	3374	2297	4024	37.19
300	149.79	150.04	150.09	7749	37.2	3373	2297	4035	37.39

Табела VIII-48. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-7)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μ s)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	150.22	150.06	149.98	7814	36.9	3381	2311	4064	38.18
25	150.11	150.11	149.95	7814	36.9	3379	2313	4064	38.19
50	150.14	150.00	149.98	7813	36.9	3378	2313	4064	38.21
75	149.99	150.21	149.97	7812	36.9	3379	2312	4064	38.19
100	150.02	150.22	149.92	7805	36.9	3379	2310	4063	38.13
125	149.81	150.23	149.98	7795	36.9	3375	2309	4064	38.15
150	150.13	149.82	149.99	7790	36.9	3374	2309	4065	38.15
175	150.19	150.18	149.99	7785	36.9	3383	2301	4065	38.02
200	150.10	149.98	149.99	7782	36.9	3377	2305	4065	38.08
225	150.22	150.17	150.02	7780	36.9	3384	2299	4066	38.00
250	150.13	150.15	150.04	7780	36.9	3382	2300	4066	38.03
275	149.80	149.87	150.04	7778	36.9	3368	2309	4066	38.18
300	150.16	150.18	150.05	7777	37.0	3384	2298	4055	37.80

Табела VIII-49. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком хемијског додатка аеранта (P-8)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μ s)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.94	150.01	149.97	7874	36.3	3373	2334	4131	39.84
25	150.01	149.96	149.95	7814	36.2	3373	2316	4142	39.75
50	149.86	149.94	149.98	7813	36.3	3370	2318	4132	39.58
75	149.86	149.96	149.97	7812	36.3	3370	2318	4131	39.56
100	150.11	149.77	149.92	7805	36.4	3371	2316	4119	39.28
125	149.87	149.78	149.98	7795	36.4	3367	2315	4120	39.31
150	150.09	150.21	149.99	7790	36.4	3382	2304	4121	39.11
175	150.10	149.87	149.99	7785	36.4	3374	2307	4121	39.18
200	150.11	150.13	149.99	7782	36.4	3380	2302	4121	39.09
225	149.89	149.99	150.02	7780	36.4	3373	2307	4121	39.18
250	149.98	150.05	150.04	7780	36.4	3377	2304	4122	39.15
275	149.85	150.10	150.04	7778	36.4	3375	2305	4122	39.16
300	150.20	150.16	150.05	7777	36.5	3384	2298	4111	38.84

Табела VIII-50. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-9)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	150.22	149.90	149.72	7835	37.0	3371	2324	4046	38.05
25	149.93	150.17	149.82	7830	37.0	3373	2321	4049	38.06
50	149.96	150.19	149.93	7826	37.0	3377	2318	4052	38.05
75	149.80	149.85	149.89	7823	37.1	3365	2325	4040	37.95
100	150.07	150.05	149.85	7823	37.2	3374	2318	4028	37.62
125	150.15	149.77	149.79	7820	37.4	3369	2322	4005	37.24
150	149.85	150.21	149.75	7819	37.6	3371	2320	3983	36.80
175	150.00	149.99	149.82	7815	37.8	3371	2319	3963	36.42
200	150.17	149.92	149.85	7813	37.8	3374	2316	3964	36.40
225	150.02	149.89	149.87	7808	37.9	3370	2317	3954	36.23
250	150.08	150.00	149.92	7802	38.0	3375	2312	3945	35.98
275	149.95	149.92	149.99	7795	38.0	3372	2312	3947	36.02
300	150.10	149.86	150.02	7792	38.2	3375	2309	3927	35.61

Табела VIII-51. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-10)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.75	150.23	150.00	7871	36.7	3375	2332	4087	38.96
25	149.76	150.03	149.99	7871	36.7	3370	2336	4087	39.01
50	150.01	150.07	149.99	7866	36.7	3377	2329	4087	38.91
75	150.17	149.94	150.01	7866	36.8	3378	2329	4076	38.70
100	150.03	150.21	150.01	7862	36.8	3381	2326	4076	38.64
125	150.03	150.19	150.01	7862	36.8	3380	2326	4076	38.65
150	150.05	150.03	150.02	7868	36.9	3377	2330	4066	38.51
175	149.87	149.99	150.02	7860	36.9	3372	2331	4066	38.53
200	150.25	150.24	150.03	7855	36.9	3387	2319	4066	38.34
225	150.02	150.20	150.04	7855	36.9	3381	2323	4066	38.41
250	150.08	150.17	150.05	7854	36.9	3382	2322	4066	38.40
275	149.90	149.86	150.06	7854	37	3371	2330	4056	38.32
300	150.08	150.23	150.09	7855	37	3384	2321	4056	38.19

Табела VIII-52. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-11)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	150.15	150.13	149.96	7941	36.5	3380	2349	4108	39.65
25	150.17	150.07	149.96	7938	36.5	3380	2349	4108	39.65
50	149.96	149.98	149.97	7937	36.5	3373	2353	4109	39.72
75	149.82	149.84	149.97	7935	36.6	3367	2357	4098	39.57
100	150.10	149.92	149.98	7932	36.7	3375	2350	4087	39.25
125	149.82	150.07	149.98	7931	36.7	3372	2352	4087	39.28
150	150.05	149.86	149.98	7928	36.7	3373	2351	4087	39.26
175	150.01	149.78	150.02	7925	36.8	3371	2351	4077	39.07
200	150.15	149.80	150.03	7921	36.8	3375	2347	4077	39.01
225	149.80	149.95	150.03	7918	36.8	3370	2349	4077	39.05
250	149.81	150.13	150.05	7915	36.8	3375	2345	4077	38.99
275	149.96	150.24	150.07	7911	36.9	3381	2340	4067	38.70
300	150.09	149.87	150.11	7902	36.9	3377	2340	4068	38.73

Табела VIII-53. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-12)

Број циклауса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μ s)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.87	149.88	149.81	8076	36.5	3365	2400	4104	40.43
25	149.99	150.11	149.7	8070	36.4	3370	2394	4113	40.50
50	149.87	150.06	149.82	8068	36.4	3370	2394	4116	40.56
75	150.20	149.87	149.89	8065	36.5	3374	2390	4107	40.31
100	150.00	149.77	149.88	8065	36.5	3367	2395	4106	40.39
125	149.77	149.82	149.88	8065	36.5	3363	2398	4106	40.44
150	150.00	149.95	149.88	8069	36.6	3371	2393	4095	40.14
175	150.16	149.79	149.9	8065	36.6	3372	2392	4096	40.12
200	150.03	149.94	149.96	8059	36.6	3373	2389	4097	40.11
225	149.98	149.78	149.92	8065	36.7	3368	2395	4085	39.96
250	150.11	150.08	149.9	8078	36.7	3377	2392	4084	39.91
275	150.06	150.08	150.22	8077	36.7	3383	2387	4093	40.00
300	149.86	150.21	150.24	8076	36.8	3382	2388	4083	39.80

Табела VIII-54. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-13)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	150.02	150.10	149.79	7915	37.7	3373	2347	3973	37.04
25	149.75	150.10	149.80	7911	37.7	3367	2350	3973	37.10
50	149.87	150.23	149.80	7907	37.7	3373	2344	3973	37.02
75	150.18	150.01	149.81	7907	37.7	3375	2343	3974	36.99
100	149.80	149.78	149.82	7892	37.7	3362	2348	3974	37.08
125	150.23	150.06	149.83	7886	37.8	3378	2335	3964	36.68
150	149.82	150.04	149.82	7875	37.8	3368	2338	3963	36.73
175	149.89	150.16	149.85	7872	37.9	3373	2334	3954	36.49
200	150.23	149.86	149.85	7870	37.9	3374	2333	3954	36.47
225	149.90	150.06	149.85	7869	38.0	3371	2335	3943	36.30
250	150.15	149.98	149.86	7865	38.0	3375	2330	3944	36.25
275	150.05	149.98	149.85	7868	38.1	3372	2333	3933	36.09
300	150.17	150.08	149.86	7862	38.2	3377	2328	3923	35.83

Табела VIII-55. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-14)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μ s)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	150.17	150.24	149.71	7927	36.9	3378	2347	4057	38.63
25	149.89	149.84	149.59	7928	36.9	3360	2360	4054	38.78
50	150.23	150.18	149.65	7912	36.9	3376	2343	4056	38.54
75	150.20	149.94	149.55	7904	36.9	3368	2347	4053	38.55
100	149.83	149.93	149.54	7905	36.9	3359	2353	4053	38.65
125	150.05	149.83	149.57	7909	36.9	3363	2352	4053	38.64
150	150.16	150.19	149.56	7918	37.1	3373	2348	4031	38.15
175	149.87	150.00	149.55	7915	37.1	3362	2354	4031	38.26
200	149.86	149.82	149.54	7907	37.1	3357	2355	4031	38.26
225	149.81	149.85	149.65	7912	37.2	3359	2355	4023	38.11
250	149.81	150.03	149.78	7925	37.2	3366	2354	4026	38.16
275	149.94	150.25	149.65	7926	37.2	3371	2351	4023	38.05
300	149.86	149.81	149.56	7928	37.3	3358	2361	4010	37.96

Табела VIII-56. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-15)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μ s)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.95	149.92	149.92	8019	37	3370	2379	4052	39.06
25	150.15	149.88	149.91	8019	37	3374	2377	4052	39.02
50	149.98	149.97	149.89	8018	37	3371	2378	4051	39.03
75	149.78	150.07	149.92	8012	37	3370	2378	4052	39.03
100	149.80	150.05	149.95	8004	37.1	3370	2375	4042	38.79
125	149.99	150.18	149.95	7999	37.1	3378	2368	4042	38.69
150	149.87	150.16	149.96	7995	37.1	3375	2369	4042	38.71
175	149.98	150.08	149.98	7991	37.2	3376	2367	4032	38.47
200	150.15	149.97	150.03	7988	37.1	3378	2364	4044	38.67
225	150.12	149.84	150.04	7986	37.3	3375	2366	4023	38.29
250	150.04	149.95	150.08	7986	37.3	3377	2365	4024	38.29
275	149.97	150.15	150.08	7982	37.3	3380	2362	4024	38.24
300	150.20	149.76	150.1	7980	37.5	3376	2364	4003	37.87

Табела VIII-57. Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-16)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μ s)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.83	149.97	149.54	8037	36.6	3360	2392	4086	39.93
25	149.95	150.13	149.52	8025	36.7	3366	2384	4074	39.57
50	150.11	149.90	149.67	8019	36.5	3368	2381	4101	40.03
75	149.83	150.19	149.86	8011	36.6	3372	2376	4095	39.83
100	149.79	149.96	149.84	8011	36.6	3366	2380	4094	39.89
125	150.17	149.92	149.81	8011	36.6	3373	2375	4093	39.79
150	150.10	150.12	150.02	8020	36.6	3380	2373	4099	39.86
175	150.04	150.24	149.95	8017	36.6	3380	2372	4097	39.81
200	150.06	149.78	149.85	8015	36.7	3368	2380	4083	39.67
225	149.81	150.02	149.82	8012	36.7	3367	2379	4082	39.65
250	149.90	150.11	149.8	8012	36.7	3371	2377	4082	39.60
275	149.79	149.76	149.8	8011	36.8	3361	2384	4071	39.50
300	149.96	149.93	149.8	8009	36.8	3368	2378	4071	39.41

Табела VIII-58 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-17)

Број циклауса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.90	149.83	150.02	7669	37.6	3369	2276	3990	36.23
25	149.92	149.79	150.01	7670	37.6	3369	2277	3990	36.24
50	149.93	149.92	150.02	7670	37.6	3372	2275	3990	36.21
75	150.22	149.81	150.03	7668	37.7	3376	2271	3980	35.97
100	149.81	150.07	150.01	7658	37.7	3373	2271	3979	35.95
125	150.11	150.06	150.02	7647	37.7	3379	2263	3979	35.83
150	150.21	149.92	150.03	7645	37.7	3379	2263	3980	35.84
175	149.82	149.93	150.05	7642	37.8	3370	2267	3970	35.73
200	150.20	149.84	150.05	7640	37.8	3377	2262	3970	35.65
225	149.88	149.82	150.06	7638	37.8	3370	2267	3970	35.72
250	150.13	150.17	150.07	7638	37.9	3383	2258	3960	35.40
275	149.90	149.75	150.08	7635	37.9	3369	2266	3960	35.54
300	150.08	150.17	150.09	7635	37.9	3383	2257	3960	35.40

Табела VIII-59 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-18)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	150.23	149.82	149.77	7867	37	3371	2334	4048	38.24
25	150.14	149.93	149.65	7855	37	3369	2332	4045	38.14
50	149.90	149.94	149.63	7854	36.9	3363	2335	4055	38.40
75	149.82	149.98	149.73	7851	37.1	3364	2334	4036	38.01
100	149.79	150.16	149.72	7882	37	3367	2341	4046	38.33
125	150.19	150.06	149.7	7853	36.9	3374	2328	4057	38.31
150	149.82	149.96	149.76	7852	37.2	3365	2334	4026	37.82
175	150.02	149.94	149.88	7848	37.2	3371	2328	4029	37.79
200	149.76	149.75	149.92	7844	37.2	3362	2333	4030	37.89
225	150.16	149.98	149.82	7850	37.2	3374	2327	4027	37.74
250	149.96	149.80	149.7	7860	37.1	3363	2337	4035	38.06
275	149.86	149.90	149.8	7858	37.1	3365	2335	4038	38.07
300	149.88	150.13	149.81	7856	37.2	3371	2331	4027	37.80

Табела VIII-60 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-19)

Број цикла	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.91	149.94	149.97	7852	36.8	3371	2329	4075	38.69
25	150.21	149.94	150.03	7852	36.8	3379	2324	4077	38.62
50	149.77	150.24	150.05	7852	36.8	3376	2326	4077	38.66
75	150.21	149.89	150.06	7850	36.8	3378	2324	4078	38.64
100	149.99	149.79	150.07	7845	36.8	3372	2327	4078	38.69
125	150.09	149.76	150.09	7842	36.9	3373	2325	4067	38.46
150	150.16	150.23	150.11	7840	36.9	3386	2315	4068	38.31
175	149.99	149.78	150.11	7837	36.9	3372	2324	4068	38.46
200	149.99	150.16	150.11	7835	36.9	3381	2317	4068	38.35
225	149.80	149.87	150.12	7832	36.9	3370	2324	4068	38.46
250	149.76	150.14	150.12	7830	36.9	3376	2320	4068	38.39
275	150.05	149.91	150.12	7829	37	3377	2318	4057	38.17
300	150.00	150.00	150.13	7826	37	3378	2317	4058	38.14

Табела VIII-61 - Брзина проласка ултразвучног таласа и одређивање динамичког модула - бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-20)

Број циклуса	b (mm)	h (mm)	L (mm)	m (g)	t (μs)	V (cm ³)	γ (kg/m ³)	v (m/s)	E _d (GPa)
0	149.76	150.15	149.97	7852	36.4	3372	2328	4120	39.52
25	149.94	150.13	150.03	7852	36.4	3377	2325	4122	39.50
50	149.96	149.98	150.05	7852	36.4	3375	2327	4122	39.54
75	150.12	149.85	150.06	7850	36.5	3376	2325	4111	39.31
100	149.89	150.19	150.07	7845	36.5	3378	2322	4112	39.26
125	150.01	149.91	150.09	7842	36.5	3375	2323	4112	39.29
150	150.05	149.76	150.11	7840	36.5	3373	2324	4113	39.31
175	150.03	149.98	150.11	7837	36.5	3378	2320	4113	39.24
200	149.92	150.14	150.11	7835	36.4	3379	2319	4124	39.44
225	149.88	149.99	150.12	7832	36.5	3375	2321	4113	39.26
250	150.15	149.96	150.12	7830	36.6	3380	2316	4102	38.97
275	149.96	149.82	150.12	7829	36.6	3373	2321	4102	39.05
300	150.20	149.78	150.13	7826	36.7	3377	2317	4091	38.78

ПРИЛОГ 12: Одређивање скупљања при сушењу бетона*Табела VIII-62 - Скупљање обичног (референтног) бетона*

Ознака бетона	Узорак број	Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')															
		0	3	4	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
P-1	1	0	0	-0.140	-0.279	-0.397	-0.456	-0.499	-0.550	-0.571	-0.626	-0.626	-0.659	-0.649	-0.667	-0.674	-0.685
	2	0	0	-0.131	-0.282	-0.403	-0.443	-0.497	-0.549	-0.586	-0.640	-0.627	-0.650	-0.659	-0.665	-0.668	-0.687
	3	0	0	-0.129	-0.290	-0.413	-0.458	-0.494	-0.556	-0.589	-0.626	-0.641	-0.649	-0.652	-0.667	-0.674	-0.690
P-2	1	0	0	-0.116	-0.226	-0.351	-0.402	-0.451	-0.493	-0.528	-0.570	-0.591	-0.632	-0.624	-0.627	-0.627	-0.656
	2	0	0	-0.107	-0.233	-0.342	-0.406	-0.450	-0.505	-0.542	-0.563	-0.604	-0.615	-0.621	-0.633	-0.630	-0.643
	3	0	0	-0.107	-0.230	-0.346	-0.406	-0.446	-0.493	-0.537	-0.570	-0.605	-0.617	-0.620	-0.630	-0.629	-0.655
P-3	1	0	0	-0.089	-0.199	-0.314	-0.359	-0.404	-0.445	-0.486	-0.527	-0.567	-0.568	-0.584	-0.574	-0.587	-0.608
	2	0	0	-0.103	-0.203	-0.311	-0.355	-0.389	-0.438	-0.484	-0.527	-0.553	-0.580	-0.569	-0.578	-0.601	-0.608
	3	0	0	-0.098	-0.201	-0.316	-0.352	-0.394	-0.444	-0.490	-0.532	-0.554	-0.565	-0.583	-0.588	-0.590	-0.599
P-4	1	0	0	-0.075	-0.134	-0.271	-0.321	-0.349	-0.421	-0.454	-0.483	-0.531	-0.544	-0.548	-0.539	-0.560	-0.571
	2	0	0	-0.060	-0.150	-0.285	-0.317	-0.341	-0.421	-0.443	-0.485	-0.514	-0.548	-0.538	-0.539	-0.565	-0.568
	3	0	0	-0.078	-0.140	-0.287	-0.307	-0.351	-0.420	-0.440	-0.492	-0.529	-0.541	-0.537	-0.550	-0.562	-0.568
Температура ваздуха (°C)		21.2	20.5	20.6	19.6	18.9	19.2	20.9	20.8	19.2	20.4	19.1	21.1	18.9	19.3	20.9	19.0
Релативна влажност ваздуха (%)		40.7	39.5	41.2	40.6	39.7	39.4	40.5	39.4	40.8	39.0	39.3	40.5	38.9	40.9	39.9	40.4

Табела VIII-63 - Скупљање бетона са додатком хемијског додатка аеранта

Ознака бетона	Узорак број	Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')															
		0	3	4	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
P-5	1	0	0	-0.128	-0.220	-0.386	-0.454	-0.551	-0.625	-0.690	-0.706	-0.732	-0.767	-0.761	-0.774	-0.789	-0.794
	2	0	0	-0.117	-0.236	-0.387	-0.465	-0.542	-0.624	-0.684	-0.720	-0.732	-0.754	-0.762	-0.764	-0.784	-0.788
	3	0	0	-0.127	-0.224	-0.372	-0.454	-0.545	-0.624	-0.691	-0.716	-0.732	-0.759	-0.766	-0.767	-0.781	-0.803
P-6	1	0	0	-0.138	-0.215	-0.376	-0.418	-0.461	-0.546	-0.579	-0.597	-0.635	-0.651	-0.666	-0.687	-0.707	-0.719
	2	0	0	-0.133	-0.221	-0.368	-0.418	-0.472	-0.530	-0.572	-0.610	-0.633	-0.665	-0.667	-0.678	-0.699	-0.728
	3	0	0	-0.148	-0.213	-0.373	-0.422	-0.468	-0.547	-0.570	-0.609	-0.620	-0.654	-0.661	-0.683	-0.698	-0.728
P-7	1	0	0	-0.100	-0.188	-0.296	-0.356	-0.404	-0.473	-0.530	-0.551	-0.555	-0.558	-0.577	-0.582	-0.607	-0.606
	2	0	0	-0.106	-0.197	-0.295	-0.356	-0.394	-0.470	-0.528	-0.549	-0.567	-0.558	-0.568	-0.596	-0.603	-0.619
	3	0	0	-0.109	-0.180	-0.303	-0.358	-0.397	-0.482	-0.531	-0.550	-0.551	-0.566	-0.579	-0.588	-0.611	-0.617
P-8	1	0	0	-0.087	-0.156	-0.262	-0.304	-0.336	-0.370	-0.416	-0.417	-0.455	-0.485	-0.495	-0.492	-0.505	-0.510
	2	0	0	-0.092	-0.146	-0.260	-0.295	-0.321	-0.375	-0.412	-0.428	-0.457	-0.490	-0.483	-0.484	-0.501	-0.514
	3	0	0	-0.080	-0.146	-0.258	-0.285	-0.323	-0.376	-0.399	-0.428	-0.459	-0.486	-0.479	-0.485	-0.498	-0.522
Температура ваздуха (°C)		21.2	20.5	20.6	19.6	18.9	19.2	20.9	20.8	19.2	20.4	19.1	21.1	18.9	19.3	20.9	19.0
Релативна влажност ваздуха (%)		40.7	39.5	41.2	40.6	39.7	39.4	40.5	39.4	40.8	39.0	39.3	40.5	38.9	40.9	39.9	40.4

Табела VIII-64 - Скупљање бетона са додатком 2.5 % гуме

Ознака бетона	Узорак број	Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')															
		0	3	4	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
P-9	1	0	0	-0.173	-0.345	-0.472	-0.578	-0.670	-0.719	-0.779	-0.829	-0.851	-0.874	-0.877	-0.878	-0.896	-0.922
	2	0	0	-0.184	-0.347	-0.461	-0.575	-0.678	-0.715	-0.773	-0.819	-0.841	-0.874	-0.874	-0.885	-0.911	-0.917
	3	0	0	-0.184	-0.345	-0.472	-0.582	-0.684	-0.725	-0.773	-0.813	-0.855	-0.882	-0.883	-0.896	-0.893	-0.926
P-10	1	0	0	-0.155	-0.318	-0.417	-0.489	-0.572	-0.622	-0.689	-0.702	-0.772	-0.771	-0.801	-0.791	-0.811	-0.827
	2	0	0	-0.155	-0.313	-0.417	-0.491	-0.566	-0.618	-0.671	-0.692	-0.770	-0.780	-0.805	-0.797	-0.813	-0.816
	3	0	0	-0.147	-0.315	-0.416	-0.479	-0.569	-0.637	-0.676	-0.706	-0.764	-0.779	-0.787	-0.803	-0.819	-0.819
P-11	1	0	0	-0.114	-0.265	-0.366	-0.420	-0.500	-0.574	-0.595	-0.629	-0.645	-0.672	-0.680	-0.698	-0.710	-0.716
	2	0	0	-0.127	-0.259	-0.371	-0.423	-0.499	-0.564	-0.591	-0.617	-0.654	-0.664	-0.679	-0.698	-0.703	-0.716
	3	0	0	-0.129	-0.270	-0.357	-0.420	-0.500	-0.559	-0.594	-0.614	-0.659	-0.666	-0.678	-0.706	-0.698	-0.712
P-12	1	0	0	-0.109	-0.223	-0.340	-0.392	-0.442	-0.484	-0.535	-0.551	-0.580	-0.595	-0.588	-0.600	-0.612	-0.624
	2	0	0	-0.103	-0.223	-0.343	-0.384	-0.439	-0.482	-0.539	-0.560	-0.581	-0.583	-0.598	-0.599	-0.611	-0.614
	3	0	0	-0.097	-0.228	-0.337	-0.389	-0.445	-0.479	-0.529	-0.552	-0.567	-0.580	-0.586	-0.610	-0.614	-0.623
Температура ваздуха (°C)		21.2	20.5	20.6	19.6	18.9	19.2	20.9	20.8	19.2	20.4	19.1	21.1	18.9	19.3	20.9	19.0
Релативна влажност ваздуха (%)		40.7	39.5	41.2	40.6	39.7	39.4	40.5	39.4	40.8	39.0	39.3	40.5	38.9	40.9	39.9	40.4

Табела VIII-65 - Скупљање бетона са додатком 5 % гуме

Ознака бетона	Узорак број	Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')															
		0	3	4	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
P-13	1	0	0	-0.167	-0.340	-0.458	-0.571	-0.675	-0.754	-0.820	-0.871	-0.883	-0.889	-0.904	-0.927	-0.947	-0.953
	2	0	0	-0.172	-0.342	-0.457	-0.568	-0.675	-0.757	-0.829	-0.860	-0.878	-0.896	-0.913	-0.927	-0.929	-0.950
	3	0	0	-0.153	-0.331	-0.464	-0.563	-0.672	-0.753	-0.821	-0.855	-0.887	-0.898	-0.901	-0.921	-0.929	-0.948
P-14	1	0	0	-0.101	-0.245	-0.363	-0.462	-0.560	-0.666	-0.724	-0.765	-0.788	-0.810	-0.810	-0.840	-0.848	-0.849
	2	0	0	-0.096	-0.238	-0.370	-0.464	-0.556	-0.655	-0.731	-0.775	-0.788	-0.790	-0.813	-0.838	-0.838	-0.860
	3	0	0	-0.087	-0.242	-0.353	-0.460	-0.562	-0.667	-0.717	-0.758	-0.775	-0.800	-0.808	-0.840	-0.844	-0.853
P-15	1	0	0	-0.092	-0.231	-0.313	-0.409	-0.504	-0.571	-0.621	-0.674	-0.704	-0.721	-0.731	-0.735	-0.755	-0.764
	2	0	0	-0.089	-0.224	-0.326	-0.398	-0.500	-0.562	-0.640	-0.667	-0.689	-0.732	-0.741	-0.740	-0.758	-0.761
	3	0	0	-0.076	-0.227	-0.317	-0.401	-0.487	-0.569	-0.635	-0.667	-0.698	-0.734	-0.726	-0.736	-0.758	-0.766
P-16	1	0	0	-0.083	-0.183	-0.281	-0.351	-0.445	-0.509	-0.560	-0.595	-0.622	-0.640	-0.658	-0.652	-0.671	-0.692
	2	0	0	-0.075	-0.171	-0.280	-0.360	-0.446	-0.499	-0.550	-0.590	-0.621	-0.639	-0.657	-0.661	-0.667	-0.690
	3	0	0	-0.075	-0.172	-0.279	-0.371	-0.439	-0.515	-0.558	-0.596	-0.612	-0.634	-0.650	-0.660	-0.667	-0.691
Температура ваздуха (°C)		21.2	20.5	20.6	19.6	18.9	19.2	20.9	20.8	19.2	20.4	19.1	21.1	18.9	19.3	20.9	19.0
Релативна влажност ваздуха (%)		40.7	39.5	41.2	40.6	39.7	39.4	40.5	39.4	40.8	39.0	39.3	40.5	38.9	40.9	39.9	40.4

Табела VIII-66 - Скупљање бетона са додатком 7.5 % гуме

Ознака бетона	Узорак број	Старост (дана) / Промена дужине (mm/m')															
		0	3	4	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91
P-17	1	0	0	-0.226	-0.401	-0.524	-0.601	-0.703	-0.758	-0.802	-0.847	-0.878	-0.898	-0.916	-0.938	-0.959	-0.964
	2	0	0	-0.217	-0.399	-0.519	-0.608	-0.693	-0.765	-0.805	-0.840	-0.876	-0.903	-0.918	-0.946	-0.955	-0.962
	3	0	0	-0.212	-0.415	-0.521	-0.613	-0.697	-0.759	-0.800	-0.854	-0.884	-0.906	-0.925	-0.946	-0.959	-0.969
P-18	1	0	0	-0.198	-0.355	-0.469	-0.570	-0.655	-0.702	-0.746	-0.758	-0.802	-0.828	-0.843	-0.863	-0.877	-0.895
	2	0	0	-0.197	-0.349	-0.483	-0.553	-0.658	-0.694	-0.738	-0.767	-0.787	-0.840	-0.853	-0.859	-0.881	-0.893
	3	0	0	-0.204	-0.359	-0.470	-0.569	-0.642	-0.707	-0.733	-0.770	-0.793	-0.841	-0.844	-0.858	-0.879	-0.887
P-19	1	0	0	-0.189	-0.329	-0.447	-0.538	-0.615	-0.665	-0.679	-0.706	-0.743	-0.769	-0.795	-0.794	-0.818	-0.825
	2	0	0	-0.188	-0.323	-0.447	-0.530	-0.609	-0.658	-0.678	-0.712	-0.736	-0.775	-0.802	-0.808	-0.808	-0.827
	3	0	0	-0.194	-0.331	-0.440	-0.522	-0.609	-0.658	-0.675	-0.702	-0.727	-0.769	-0.807	-0.797	-0.807	-0.818
P-20	1	0	0	-0.160	-0.292	-0.348	-0.441	-0.540	-0.588	-0.615	-0.636	-0.659	-0.698	-0.707	-0.709	-0.737	-0.740
	2	0	0	-0.154	-0.280	-0.349	-0.437	-0.531	-0.587	-0.624	-0.646	-0.655	-0.683	-0.711	-0.714	-0.730	-0.742
	3	0	0	-0.158	-0.286	-0.354	-0.436	-0.531	-0.595	-0.611	-0.638	-0.662	-0.696	-0.695	-0.722	-0.735	-0.743
Температура ваздуха (°C)		21.2	20.5	20.6	19.6	18.9	19.2	20.9	20.8	19.2	20.4	19.1	21.1	18.9	19.3	20.9	19.0
Релативна влажност ваздуха (%)		40.7	39.5	41.2	40.6	39.7	39.4	40.5	39.4	40.8	39.0	39.3	40.5	38.9	40.9	39.9	40.4

PRILOG 13:**Испитивање отпорности бетона на дејство мраза деструктивним испитивањем****SRPS U.M1.206:PRILOG D**

Резултат испитивања се изражава преко односа просечне чврстоће при притиску узорака излаганих наизменичним циклусима замрзавања и одмрзавања и просечне чврстоће при притиску узорака еталона (који нису излагани циклусима замрзавања и одмрзавања) одређене при еквивалентној старости:

$$\Delta f = \left(\frac{f_c}{f_e} \right) * 100$$

где су:

- Δf – однос чврстоћа, (%);
- f_c – просечна вредност чврстоће при притиску узорака излаганих наизменичним циклусима замрзавања и одмрзавања (МПа);
- f_e – просечна вредност чврстоће при притиску узорака еталона која нису била излаганих наизменичним циклусима замрзавања и одмрзавања (МПа).

Еквивалентна старост бетона, T_e , одређује се због успореног прираста чврстоће при притиску за време замрзавања, за три циклуса замрзавања/одмрзавања у току 24 часа:

$$T_e = a + 0,2 \cdot n$$

где су:

a – старост узорака на почетку испитивања, у данима,

n – број циклуса наизменичног замрзавања и одмрзавања (100, 200 циклуса или нека друга захтевана вредност).

Табела VIII-67 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-1)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	средња	
Е	P-1	10	0.55	a+40		1450.2	64.5		73%
		11				1463.0	65.0	58.0	
		12				1001.8	44.5		
		13				863.8	38.4		
		14				1020.9	45.4	42.1	
200 циклуса	P-1	15	0.55	a+67		957.1	42.5		
		16				1164.5	51.8		
		17				1335.2	59.3	58.4	
		18				1442.3	64.1		
		19				944.3	42.0		
300 циклуса	P-1	20	0.55	a+100		761.3	33.8	38.7	66%
		21				906.6	40.3		

Табела VIII-68 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-2)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-2	10	0.5	a+40		1434.2	63.7		87%
		11				1272.2	56.5	60.6	
		12				1384.1	61.5		
		13				1096.2	48.7		
		14				1137.2	50.5	52.7	
200 циклуса	P-2	15	0.5	a+67		1322.8	58.8		
		16				1436.2	63.8		
		17				1296.8	57.6	60.8	
		18				1370.9	60.9		
		19				985.2	43.8		
300 циклуса	P-2	20	0.5	a+100		1114.5	49.5	46.8	77%
		21				1059.0	47.1		

Табела VIII-69 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-3)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-3	10	0.45	a+40		1527.0	67.9		92%
		11				1488.5	66.2	67.7	
		12				1554.2	69.1		
		13				1297.9	57.7		
		14				1367.6	60.8	62.3	
200 циклуса	P-3	15	0.45	a+67		1539.8	68.4		89%
		16				1539.0	68.4		
		17				1452.6	64.6	68.9	
		18				1659.2	73.7		
		19				1297.7	57.7		
300 циклуса	P-3	20	0.45	a+100		1474.1	65.5	61.4	
		21				1372.7	61.0		

Табела VIII-70 - Испитивање на дејство мраза обичног (референтног) бетона (P-4)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-4	10	0.4	a+40		1787.7	79.5		95%
		11				1720.6	76.5	74.4	
		12				1513.7	67.3		
		13				1523.8	67.7		
		14				1665.7	74.0	70.9	
		15				1596.6	71.0		
Е	P-4	16	0.4	a+60		1731.5	77.0		94%
		17				1664.9	74.0	76.9	
		18				1794.4	79.8		
		19				1608.7	71.5		
		20				1586.9	70.5	71.9	
		21				1660.5	73.8		

Табела VIII-71 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-5)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	средња	
Е	P-5	10	0.55	a+40		1064.9	47.3		87%
		11				1064.3	47.3	52.3	
		12				1401.1	62.3		
		13				903.6	40.2		
		14				1032.7	45.9	45.7	
200 циклуса	P-5	15	0.55	a+67		1148.5	51.0		
Е	P-5	16	0.55	a+60		1276.3	56.7		80%
		17				1155.1	51.3	53.2	
		18				1159.6	51.5		
		19				909.0	40.4		
		20				863.9	38.4	42.4	
300 циклуса	P-5	21				1089.1	48.4		

Табела VIII-72 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-6)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-6	10	0.5	a+40		1266.6	56.3		92%
		11				1212.2	53.9	54.2	
		12				1179.7	52.4		
		13				1166.1	51.8		
		14				1144.0	50.8	49.9	
200 циклуса	P-6	15	0.5	a+67		1059.5	47.1		
		16				1156.6	51.4		
		17				1327.2	59.0	55.6	
		18				1269.2	56.4		
		19				1087.1	48.3		
300 циклуса	P-6	20	0.5	a+100		1144.2	50.9	48.9	88%
		21				1069.8	47.5		

Табела VIII-73 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-7)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-7	10	0.45	a+40		1401.1	62.3		95%
		11				1475.6	65.6	62.7	
		12				1355.6	60.2		
		13				1408.6	62.6		
		14				1272.8	56.6	59.6	
200 циклуса	P-7	15	0.45	a+67		1341.6	59.6		
		16				1531.4	68.1		
		17				1532.7	68.1	64.5	
		18				1289.7	57.3		
		19				1401.0	62.3		
300 циклуса	P-7	20	0.45	a+100		1313.5	58.4	60.1	93%
		21				1342.3	59.7		

Табела VIII-74 - Испитивање на дејство мраза бетона са хемијским додатком аерантом (P-8)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %		
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja			
Е	P-8	10	0.4	a+40	1494.3	66.4	99%				
		11			1711.1	76.1		70.5			
		12			1553.3	69.0					
		13			1599.9	71.1					
		200 циклуса			14	0.4		a+67	1652.3	73.4	70.1
		15			1478.9	65.7					
Е	P-8	16	0.4	a+60	1759.0	78.2	99%				
		17			1749.6	77.8		73.8			
		18			1473.0	65.5					
		19			1672.5	74.3					
		300 циклуса			20	0.4		a+100	1534.9	68.2	73.0
		21			1717.3	76.3					

Табела VIII-75 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-9)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-9	10	0.55	a+40		1216.4	54.1		77%
		11				1195.7	53.1	52.9	
		12				1158.6	51.5		
		13				921.3	40.9		
		14				987.5	43.9	40.7	
200 циклуса	P-9	15	0.55	a+67		838.4	37.3		
		16				1263.1	56.1		
		17				1146.4	51.0	53.4	
		18				1195.0	53.1		
		19				877.7	39.0		
300 циклуса	P-9	20	0.55	a+100		830.4	36.9	39.2	73%
		21				937.9	41.7		

Табела VIII-76 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-10)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-10	10	0.5	a+40		1289.7	57.3		88%
		11				1188.5	52.8	55.5	
		12				1268.0	56.4		
		13				1106.8	49.2		
		14				1120.6	49.8	48.8	
200 циклуса	P-10	15	0.5	a+67		1067.8	47.5		
		16				1343.2	59.7		
		17				1324.5	58.9	56.2	
		18				1125.8	50.0		
		19				1048.6	46.6		
300 циклуса	P-10	20	0.5	a+100		1104.4	49.1	46.6	83%
		21				992.1	44.1		

Табела VIII-77 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-11)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-11	10	0.45	a+40	1438.3	63.9	94%		
		11			1286.1	57.2		62.1	
		12			1467.3	65.2			
		13			1238.7	55.1			
		14			1340.6	59.6		58.2	
		15			1349.2	60.0			
200 циклуса	P-11	16	0.45	a+67	1484.1	66.0	88%		
		17			1369.5	60.9		63.0	
		18			1398.9	62.2			
		19			1281.9	57.0			
		20			1345.1	59.8		55.4	
		21			1112.5	49.4			

Табела VIII-78 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 2.5 % дробљене гуме (P-12)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-12	10	0.4	a+40		1600.1	71.1		98%
		11				1748.6	77.7	72.7	
		12				1558.6	69.3		
		13				1659.2	73.7		
		14				1553.8	69.1	70.9	
200 циклуса	P-12	15	0.4	a+67		1572.6	69.9		
		16				1568.2	69.7		
		17				1750.2	77.8	73.8	
		18				1663.1	73.9		
		19				1479.6	65.8		
300 циклуса	P-12	20	0.4	a+100		1426.2	63.4	68.1	92%
		21				1689.2	75.1		

Табела VIII-79 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-13)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-13	10	0.55	a+40		1131.7	50.3		88%
		11				1094.6	48.6	47.6	
		12				986.8	43.9		
		13				974.1	43.3		
		14				1003.4	44.6	42.1	
200 циклуса	P-13	15	0.55	a+67		864.2	38.4		
		16				1194.0	53.1		
		17				1199.1	53.3	50.2	
		18				995.4	44.2		
		19				980.1	43.6		
300 циклуса	P-13	20	0.55	a+100		838.6	37.3	40.3	80%
		21				901.6	40.1		

Табела VIII-80 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-14)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-14	10	0.5	a+40		1184.6	52.6		95%
		11				1244.7	55.3	51.4	
		12				1040.2	46.2		
		13				1054.6	46.9		
		14				1010.1	44.9	48.8	
200 циклуса	P-14	15	0.5	a+67		1230.5	54.7		
		16				1158.4	51.5		
		17				1156.4	51.4	53.2	
		18				1276.3	56.7		
		19				1036.0	46.0		
300 циклуса	P-14	20	0.5	a+100		1019.3	45.3	47.7	90%
		21				1166.7	51.9		

Табела VIII-81 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-15)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	средња	
Е	P-15	10	0.45	a+40		1265.2	56.2		96%
		11				1222.2	54.3	58.2	
		12				1441.1	64.1		
		13				1257.0	55.9		
		14				1175.4	52.2	55.8	
200 циклуса	P-15	15	0.45	a+67		1334.1	59.3		
		16				1266.1	56.3		
		17				1274.2	56.6	59.2	
		18				1455.7	64.7		
		19				1156.1	51.4		
300 циклуса	P-15	20	0.45	a+100		1282.6	57.0	54.2	92%
		21				1221.8	54.3		

Табела VIII-82 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 5 % дробљене гуме (P-16)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	Δf %
Е	P-16	10	0.4	a+40	1625.5	72.2	97%		
		11			1537.6	68.3		71.4	
		12			1656.5	73.6			
		13			1585.1	70.4			
		14			1586.4	70.5		69.4	
		15			1512.1	67.2			
200 циклуса	P-16	16	0.4	a+67	1657.9	73.7	96%		
		17			1529.4	68.0		71.6	
		18			1645.7	73.1			
		19			1554.0	69.1			
		20			1527.4	67.9		68.5	
		21			1545.4	68.7			

Табела VIII-83 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-17)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-17	10	0.55	a+40		1050.8	46.7		90%
		11				1064.6	47.3	46.3	
		12				1006.5	44.7		
		13				1010.0	44.9		
		14				979.4	43.5	41.5	
200 циклуса	P-17	15	0.55	a+67		811.8	36.1		
		16				1146.6	51.0		
		17				1066.0	47.4	49.1	
		18				1098.3	48.8		
		19				905.4	40.2		
300 циклуса	P-17	20	0.55	a+100		1024.1	45.5	42.1	86%
		21				912.3	40.5		

Табела VIII-84 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-18)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-18	10	0.5	a+40		1173.4	52.2		94%
		11				1155.7	51.4	50.1	
		12				1052.7	46.8		
		13				958.8	42.6		
		14				1168.6	51.9	47.3	
200 циклуса	P-18	15	0.5	a+67		1063.4	47.3		
Е	P-18	16	0.5	a+60		1131.2	50.3		89%
		17				1268.7	56.4	52.1	
		18				1116.8	49.6		
		19				985.0	43.8		
		20				1013.3	45.0	46.2	
300 циклуса	P-18	21	0.5	a+100		1123.5	49.9		

Табела VIII-85 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-19)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
Е	P-19	10	0.45	a+40		1370.9	60.9		95%
		11				1254.8	55.8	58.0	
		12				1285.9	57.2		
		13				1197.2	53.2		
		14				1311.4	58.3	55.1	
200 циклуса	P-19	15	0.45	a+67		1210.6	53.8		
		16				1416.9	63.0		
		17				1374.4	61.1	59.2	
		18				1201.4	53.4		
		19				1252.0	55.6		
300 циклуса	P-19	20	0.45	a+100		1138.9	50.6	54.3	92%
		21				1274.4	56.6		

Табела VIII-86 - Испитивање на дејство мраза бетона са додатком 7.5 % дробљене гуме (P-20)

Испитивање	Ознака бетона	Узорак број	w/c	Старост (дана)		Сила лома (kN)	Чврстоћа при притиску (MPa)		Однос чврстоћа Δf %
				стварна	еквивал.		појединачна	srednja	
E	P-20	10	0.4	a+40		1528.0	67.9		96%
		11				1474.8	65.5	65.8	
		12				1438.8	63.9		
		13				1508.1	67.0		
		14				1502.6	66.8	63.4	
200 ciklusa	P-20	15	0.4	a+67		1270.6	56.5		
E	P-20	16	0.4	a+60		1556.3	69.2		94%
		17				1569.7	69.8	66.2	
		18				1342.5	59.7		
		19				1340.9	59.6		
		20				1319.2	58.6	62.1	
300 ciklusa	P-20	21	0.4	a+100		1530.3	68.0		

ПРИЛОГ 14: Одређивање отпорности бетона на дејство мраза (уз присуство соли за одмрзавање)

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3$$

S_n – маса ољуспалог материјала са испитне површине, $\left(\frac{kg}{m^2}\right)$

$m_{s,n}$ – кумулативна маса сувог ољуспалог материјала после n -тог циклуса, са тачношћу 0.1 (g)

A - укупна површина испитне површине, рачуната из мерених дужина пре постављања лепка или силиконске гуме око ивице, заокружено са тачношћу од 100 mm².

Табела VIII-87 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање - обичног (референтног) бетона

Ознака бетона	Узорак број	w/c	Мере испитне површине		Маса ољуспалог материјала, $m_{s,n}$ (g)				
			дужина l	ширина b	7 циклуса	14 циклуса	28 циклуса	42 циклуса	56 циклуса
			(mm)	(mm)					
P-1	22	0.55	149.7	150.0	0.0	5.1	42.1	63.3	112.3
	23		148.6	150.6	0.0	5.3	41.8	63.4	111.4
	24		149.2	149.3	0.0	3.6	40.7	62.0	109.9
P-2	22	0.50	151.3	149.8	0.0	1.8	16.0	31.6	58.7
	23		151.4	151.4	0.0	1.4	16.0	31.9	59.3
	24		149.6	151.3	0.0	0.7	14.7	31.3	56.3
P-3	22	0.45	150.9	150.1	0.0	1.8	4.3	13.5	25.9
	23		149.1	149.2	0.0	1.7	3.8	12.9	25.2
	24		150.1	149.8	0.0	0.6	3.0	12.6	24.1
P-4	22	0.40	151.2	148.8	0.0	1.0	1.9	2.6	3.7
	23		150.9	150.9	0.0	1.0	1.9	2.6	3.8
	24		151.4	149.0	0.0	0.9	1.8	2.5	3.6

Табела VIII-88 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање -
бетони са хемијским додатком аеранта

Ознака бетона	Узорак број	w/c	Мере испитне површине		Маса ољуспалог материјала, $m_{s,n}$ (g)				
			дужина	ширина	7 циклуса	14 циклуса	28 циклуса	42 циклуса	56 циклуса
			l (mm)	b (mm)					
P-5	22	0.55	149.5	149.5	0.0	1.4	1.8	2.0	1.8
	23		150.9	151.0	0.0	1.5	1.7	2.0	1.5
	24		149.1	149.8	0.0	0.8	0.1	0.1	0.7
P-6	22	0.50	149.2	150.7	0.0	0.7	0.6	0.6	0.9
	23		148.6	150.7	0.0	0.3	1.0	0.8	0.6
	24		150.9	149.9	0.0	0.4	0.7	0.5	0.3
P-7	22	0.45	150.6	151.0	0.0	0.5	0.3	1.0	0.8
	23		148.6	149.4	0.0	0.6	0.7	0.5	0.8
	24		150.9	150.2	0.0	0.5	0.3	0.6	0.6
P-8	22	0.40	148.6	148.9	0.0	0.7	0.7	0.6	0.8
	23		149.2	149.2	0.0	0.4	0.7	0.7	0.7
	24		149.3	150.7	0.0	0.3	0.8	0.8	0.8

Табела VIII-89 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање -
бетони са додатком 2.5% дробљене гуме

Ознака бетона	Узорак број	w/c	Мере испитне површине		Маса ољуспалог материјала, $m_{s,n}$ (g)				
			дужина l	ширина b	7	14	28	42	56
			(mm)	(mm)	циклуса	циклуса	циклуса	циклуса	циклуса
P-9	22	0.55	149.7	150.4	0.0	3.5	19.0	35.1	69.7
	23		150.9	151.3	0.0	3.6	19.5	35.1	70.6
	24		149.4	148.5	0.0	2.2	17.0	33.3	67.3
P-10	22	0.50	151.1	150.4	0.0	1.9	10.4	19.4	34.9
	23		149.7	150.3	0.0	1.9	10.1	19.5	35.1
	24		149.6	149.7	0.0	0.1	9.0	17.3	33.1
P-11	22	0.45	149.1	149.1	0.3	0.6	3.1	7.9	21.3
	23		150.7	150.7	0.4	0.7	3.1	8.4	21.5
	24		150.4	150.9	0.1	0.7	2.8	7.4	21.3
P-12	22	0.40	149.3	149.0	0.0	0.8	1.7	2.8	2.8
	23		151.4	150.5	0.0	0.7	1.9	2.6	3.1
	24		150.5	150.2	0.0	0.2	1.1	0.8	2.4

Табела VIII-90 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање -
бетони са додатком 5% дробљене гуме

Ознака бетона	Узорак број	w/c	Мере испитне површине		Маса ољуспалог материјала, $m_{s,n}$ (g)				
			дужина l (mm)	ширина b (mm)	7 циклуса	14 циклуса	28 циклуса	42 циклуса	56 циклуса
P-13	22	0.55	149.1	149.7	0.0	2.5	13.4	18.0	32.6
	23		148.7	150.5	0.0	2.4	13.4	17.8	32.9
	24		150.9	149.7	0.0	1.4	12.2	17.6	32.4
P-14	22	0.50	149.9	150.6	0.0	0.7	1.2	3.4	7.5
	23		150.2	149.3	0.0	1.4	1.6	3.3	7.7
	24		150.4	149.7	0.0	0.2	0.2	1.5	6.2
P-15	22	0.45	149.6	150.3	0.0	0.9	0.8	2.3	3.6
	23		150.8	149.4	0.0	0.8	1.2	1.9	3.3
	24		148.5	150.0	0.0	0.4	0.1	0.5	2.3
P-16	22	0.40	148.6	150.4	0.0	0.1	0.7	0.8	0.8
	23		150.2	151.0	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7
	24		150.4	150.4	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7

Табела VIII-91 - Отпорност на дејство мраза уз присуство солу за одмрзавање -
бетони са додатком 7.5% дробљене гуме

Ознака бетона	Узорак број	w/c	Мере испитне површине		Маса ољуспалог материјала, $m_{s,n}$ (g)				
			дужина l	ширина b	7	14	28	42	56
			(mm)	(mm)	циклуса	циклуса	циклуса	циклуса	циклуса
P-17	22	0.55	150.2	150.2	0.0	0.5	2.8	4.0	6.3
	23		149.6	150.8	0.0	0.5	2.8	4.0	6.3
	24		151.0	149.2	0.0	0.3	2.7	3.9	6.1
P-18	22	0.50	149.9	150.8	0.0	0.6	1.6	2.2	2.9
	23		148.9	150.0	0.0	0.5	1.6	2.2	2.8
	24		151.2	149.6	0.0	0.4	1.5	2.1	2.7
P-19	22	0.45	148.8	149.0	0.0	0.3	0.7	0.9	1.0
	23		150.7	150.3	0.0	0.3	0.7	0.9	1.0
	24		150.5	149.6	0.0	0.3	0.6	0.7	0.9
P-20	22	0.40	149.2	149.9	0.0	0.2	0.5	0.5	0.6
	23		151.5	150.5	0.0	0.1	0.5	0.5	0.7
	24		149.6	149.1	0.0	0.0	0.4	0.4	0.5

ПРИЛОГ 15: Карактеристика ваздушних пора у очврслом бетону

Одређивање садржаја и дистрибуције ваздушних пора у очврслом бетону урађена је помоћу уређаја Репид Аир 457. Припрема узорка и испитивање спроведено је према EN 480-11. Помоћу аутоматизованог уређаја Rapid Air 457, врши се микроскопска анализа скенирањем површине узорка, која је припремљена полирањем, матирањем и попињавањем пора са баријум сулфатом. Поре се анализирају у смислу њиховог броја, величине и дистрибуције. Подаци у табелама су добијени према следећим формулама.

15.1.1. Садржај ваздуха (A):

Садржај ваздуха представља проценат запремине бетона који заузимају ваздушне поре:

$$A = \left(\frac{V_p}{V_{total}} \right) \times 100$$

где је:

- V_p - запремина ваздушних пора
- V_{total} - укупна запремина бетона

15.1.2. Фактор размака између пора (Средња раздаљина између пора) ($\bar{L}$):

Средња раздаљина између пора се рачуна како би се проценила просечна удаљеност између суседних ваздушних пора:

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

- n - укупан број пора детектованих дуж линије,
- L_i - удаљеност између суседних пора.

15.1.3. Специфична површина пора (C):

Специфична површина пора представља укупну површину свих пора по јединици запремине бетона.

$$S = \frac{A}{\bar{d}}$$

где је:

- A – садржај ваздуха израчунат у %,
- $\bar{d}$ – просечан пречник пора.

15.1.4. Запремина пора (V_p):

Укупна запремина свих пора може се израчунати помоћу пречника пора.

$$V_p = \sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^3}{6}$$

где је:

- d_i – пречник сваке појединачне поре.

15.1.5. Укупна површина поре по јединици запремине (P):

Овај параметар се користи за додатну дистрибуцију пора у бетону.

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^3}{4V_{total}}$$

где је:

- $\bar{d}$ – просечан пречник пора.

Табела VIII-92 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Обичан (референтни) бетон – (P-1)

Класа	Ширина пора по класи mikroni	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора mm ⁻¹	Наиђена фракција mm ²	Потенцијални укупни mm ⁻³	Поре по класи mm ⁻³	Запремина пора mm ³	Садржај ваздуха %	Садржај ваздуха кумулативно %
1	0-10	169	0.1408	0.0001178	1195.52915	658.970	5.24E-07	0.035	0.03
2	15-20	177	0.1475	0.0002749	536.55875	347.516	4.19E-06	0.146	0.18
3	25-30	98	0.0817	0.0004320	189.04321	97.079	1.41E-05	0.137	0.32
4	35-40	65	0.0542	0.0005890	91.96378	37.235	3.35E-05	0.125	0.44
5	45-50	49	0.0408	0.0007461	54.72904	21.514	6.54E-05	0.141	0.58
6	55-60	36	0.0300	0.0009032	33.21523	10.169	1.13E-04	0.115	0.70
7	65-80	63	0.0525	0.0022780	23.04653	10.142	2.68E-04	0.272	0.97
8	85-100	45	0.0375	0.0029060	12.90434	5.830	5.24E-04	0.306	1.27
9	105-120	30	0.0250	0.0035340	7.07414	0.869	9.05E-04	0.079	1.35
10	125-140	31	0.0258	0.0041630	6.20546	0.118	1.44E-03	0.017	1.37
11	145-160	35	0.0292	0.0047910	6.08780	3.012	2.14E-03	0.645	2.01
12	165-180	20	0.0167	0.0054190	3.07560	0.871	3.05E-03	0.266	2.28
13	185-200	16	0.0133	0.0060470	2.20495	0.208	4.19E-03	0.087	2.37
14	205-220	16	0.0133	0.0066760	1.99720	0.970	5.58E-03	0.541	2.91
15	225-240	9	0.0075	0.0073040	1.02683	-0.444	7.24E-03	-0.321	2.59
16	245-260	14	0.0117	0.0079330	1.47065	0.887	9.20E-03	0.816	3.40
17	265-280	6	0.0050	0.0085610	0.58404	0.131	1.15E-02	0.150	3.55
18	285-300	5	0.0042	0.0091890	0.45344	0.162	1.41E-02	0.228	3.78
19	305-350	9	0.0075	0.0257200	0.29160	-0.046	2.24E-02	-0.102	3.68
20	355-400	12	0.0100	0.0296500	0.33727	0.213	3.35E-02	0.714	4.39
21	405-450	5	0.0042	0.0335800	0.12408	0.035	4.77E-02	0.168	4.56
22	455-500	4	0.0033	0.0375000	0.08889	0.073	6.54E-02	0.480	5.04
23	505-1000	11	0.0092	0.5910000	0.01551	0.013	5.24E-01	0.679	5.72
24	1005-1500	3	0.0025	0.9830000	0.00254	0.003	1.77E+00	0.450	6.17
25	1505-2000	0	0.0000	1.3760000	0.00000	0.000	4.19E+00	0.000	6.17
26	2005-2500	0	0.0000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	6.17
27	2505-3000	0	0.0000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	6.17
28	3005-4000	0	0.0000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	6.17

Табела VIII-93 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Обичан (референтни) бетон – (P-2)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	77	0.06417	0.0001178	544.70855	308.259	5.24E-07	0.016	0.02
2	15-20	78	0.06500	0.0002749	236.44962	112.993	4.19E-06	0.047	0.06
3	25-30	64	0.05333	0.0004320	123.45679	76.767	1.41E-05	0.108	0.17
4	35-40	33	0.02750	0.0005890	46.68930	19.883	3.35E-05	0.067	0.24
5	45-50	24	0.02000	0.0007461	26.80606	6.508	6.54E-05	0.043	0.28
6	55-60	22	0.01833	0.0009032	20.29820	9.324	1.13E-04	0.105	0.39
7	65-80	30	0.02500	0.0022780	10.97454	6.386	2.68E-04	0.171	0.56
8	85-100	16	0.01333	0.0029060	4.58821	1.994	5.24E-04	0.105	0.66
9	105-120	11	0.00917	0.0035340	2.59385	0.792	9.05E-04	0.072	0.73
10	125-140	9	0.00750	0.0041630	1.80159	0.758	1.44E-03	0.109	0.84
11	145-160	6	0.00500	0.0047910	1.04362	-0.340	2.14E-03	-0.073	0.77
12	165-180	9	0.00750	0.0054190	1.38402	0.971	3.05E-03	0.296	1.07
13	185-200	3	0.00250	0.0060470	0.41343	-0.460	4.19E-03	-0.193	0.87
14	205-220	7	0.00583	0.0066760	0.87378	0.303	5.58E-03	0.169	1.04
15	225-240	5	0.00417	0.0073040	0.57046	-0.270	7.24E-03	-0.195	0.85
16	245-260	8	0.00667	0.0079330	0.84037	0.548	9.20E-03	0.504	1.35
17	265-280	3	0.00250	0.0085610	0.29202	-0.071	1.15E-02	-0.081	1.27
18	285-300	4	0.00333	0.0091890	0.36275	0.071	1.41E-02	0.100	1.37
19	305-350	9	0.00750	0.0257200	0.29160	0.123	2.24E-02	0.275	1.65
20	355-400	6	0.00500	0.0296500	0.16863	0.045	3.35E-02	0.149	1.80
21	405-450	5	0.00417	0.0335800	0.12408	0.013	4.77E-02	0.062	1.86
22	455-500	5	0.00417	0.0375000	0.11111	0.104	6.54E-02	0.681	2.54
23	505-1000	5	0.00417	0.5910000	0.00705	0.004	5.24E-01	0.192	2.73
24	1005-1500	4	0.00333	0.9830000	0.00339	0.002	1.77E+00	0.386	3.12
25	1505-2000	2	0.00167	1.3760000	0.00121	0.001	4.19E+00	0.310	3.43
26	2005-2500	1	0.00083	1.7690000	0.00047	0.000	8.18E+00	-0.245	3.18
27	2505-3000	2	0.00167	2.1620000	0.00077	0.001	1.41E+01	1.087	4.27
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	4.27

Табела VIII-94 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Обичан (референтни) бетон – (P-3)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	57	0.0475	0.0001178	403.22581	221.341	5.24E-07	0.012	0.01
2	15-20	60	0.0500	0.0002749	181.88432	112.440	4.19E-06	0.047	0.06
3	25-30	36	0.0300	0.0004320	69.44444	18.511	1.41E-05	0.026	0.08
4	35-40	36	0.0300	0.0005890	50.93379	26.362	3.35E-05	0.088	0.17
5	45-50	22	0.0183	0.0007461	24.57222	6.119	6.54E-05	0.040	0.21
6	55-60	20	0.0167	0.0009032	18.45291	0.894	1.13E-04	0.010	0.22
7	65-80	48	0.0400	0.0022780	17.55926	8.956	2.68E-04	0.240	0.46
8	85-100	30	0.0250	0.0029060	8.60289	4.830	5.24E-04	0.253	0.72
9	105-120	16	0.0133	0.0035340	3.77287	-1.432	9.05E-04	-0.130	0.59
10	125-140	26	0.0217	0.0041630	5.20458	2.074	1.44E-03	0.299	0.89
11	145-160	18	0.0150	0.0047910	3.13087	1.747	2.14E-03	0.374	1.26
12	165-180	9	0.0075	0.0054190	1.38402	0.419	3.05E-03	0.128	1.39
13	185-200	7	0.0058	0.0060470	0.96467	-0.408	4.19E-03	-0.171	1.22
14	205-220	11	0.0092	0.0066760	1.37308	-0.224	5.58E-03	-0.125	1.09
15	225-240	14	0.0117	0.0073040	1.59730	1.072	7.24E-03	0.776	1.87
16	245-260	5	0.0042	0.0079330	0.52523	-0.253	9.20E-03	-0.233	1.63
17	265-280	8	0.0067	0.0085610	0.77873	0.325	1.15E-02	0.374	2.01
18	285-300	5	0.0042	0.0091890	0.45344	0.194	1.41E-02	0.274	2.28
19	305-350	8	0.0067	0.0257200	0.25920	0.119	2.24E-02	0.266	2.55
20	355-400	5	0.0042	0.0296500	0.14053	0.091	3.35E-02	0.305	2.85
21	405-450	2	0.0017	0.0335800	0.04963	-0.017	4.77E-02	-0.081	2.77
22	455-500	3	0.0025	0.0375000	0.06667	0.050	6.54E-02	0.325	3.10
23	505-1000	12	0.0100	0.5910000	0.01692	0.015	5.24E-01	0.798	3.89
24	1005-1500	2	0.0017	0.9830000	0.00170	0.000	1.77E+00	0.086	3.98
25	1505-2000	2	0.0017	1.3760000	0.00121	0.001	4.19E+00	0.508	4.49
26	2005-2500	0	0.0000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	4.49
27	2505-3000	0	0.0000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	4.49
28	3005-4000	0	0.0000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	4.49

Табела VIII-95 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Обичан (референтни) бетон – (P-4)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	99	0.0825	0.0001178	700.33956	397.199	5.24E-07	0.021	0.02
2	15-20	100	0.0833	0.0002749	303.14054	214.406	4.19E-06	0.090	0.11
3	25-30	46	0.0383	0.0004320	88.73457	36.386	1.41E-05	0.051	0.16
4	35-40	37	0.0308	0.0005890	52.34861	22.192	3.35E-05	0.074	0.24
5	45-50	27	0.0225	0.0007461	30.15682	3.400	6.54E-05	0.022	0.26
6	55-60	29	0.0242	0.0009032	26.75672	13.587	1.13E-04	0.154	0.41
7	65-80	36	0.0300	0.0022780	13.16945	2.272	2.68E-04	0.061	0.47
8	85-100	38	0.0317	0.0029060	10.89699	4.059	5.24E-04	0.213	0.69
9	105-120	29	0.0242	0.0035340	6.83833	2.234	9.05E-04	0.202	0.89
10	125-140	23	0.0192	0.0041630	4.60405	1.821	1.44E-03	0.262	1.15
11	145-160	16	0.0133	0.0047910	2.78300	0.630	2.14E-03	0.135	1.28
12	165-180	14	0.0117	0.0054190	2.15292	0.224	3.05E-03	0.068	1.35
13	185-200	14	0.0117	0.0060470	1.92933	0.806	4.19E-03	0.338	1.69
14	205-220	9	0.0075	0.0066760	1.12343	1.009	5.58E-03	0.563	2.25
15	225-240	1	0.0008	0.0073040	0.11409	-0.411	7.24E-03	-0.298	1.96
16	245-260	5	0.0042	0.0079330	0.52523	0.233	9.20E-03	0.215	2.17
17	265-280	3	0.0025	0.0085610	0.29202	0.292	1.15E-02	0.336	2.51
18	285-300	0	0.0000	0.0091890	0.00000	-0.292	1.41E-02	-0.411	2.10
19	305-350	9	0.0075	0.0257200	0.29160	0.151	2.24E-02	0.338	2.43
20	355-400	5	0.0042	0.0296500	0.14053	0.141	3.35E-02	0.471	2.90
21	405-450	0	0.0000	0.0335800	0.00000	-0.089	4.77E-02	-0.424	2.48
22	455-500	4	0.0033	0.0375000	0.08889	0.076	6.54E-02	0.498	2.98
23	505-1000	9	0.0075	0.5910000	0.01269	0.013	5.24E-01	0.665	3.64
24	1005-1500	0	0.0000	0.9830000	0.00000	0.000	1.77E+00	0.000	3.64
25	1505-2000	0	0.0000	1.3760000	0.00000	0.000	4.19E+00	-0.197	3.45
26	2005-2500	1	0.0008	1.7690000	0.00047	0.000	8.18E+00	0.385	3.83
27	2505-3000	0	0.0000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	3.83
28	3005-4000	0	0.0000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	3.83

Табела VIII-96. Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (P-5)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	172	0.14333	0.0001178	1216.75156	749.915	5.24E-07	0.039	0.04
2	15-20	154	0.12833	0.0002749	466.83643	243.071	4.19E-06	0.102	0.14
3	25-30	116	0.09667	0.0004320	223.76543	76.623	1.41E-05	0.108	0.25
4	35-40	104	0.08667	0.0005890	147.14205	37.684	3.35E-05	0.126	0.38
5	45-50	98	0.08167	0.0007461	109.45807	51.331	6.54E-05	0.336	0.71
6	55-60	63	0.05250	0.0009032	58.12666	20.813	1.13E-04	0.235	0.95
7	65-80	102	0.08500	0.0022780	37.31343	16.093	2.68E-04	0.431	1.38
8	85-100	74	0.06167	0.0029060	21.22046	8.959	5.24E-04	0.469	1.85
9	105-120	52	0.04333	0.0035340	12.26184	2.854	9.05E-04	0.258	2.11
10	125-140	47	0.03917	0.0041630	9.40828	3.147	1.44E-03	0.453	2.56
11	145-160	36	0.03000	0.0047910	6.26174	1.187	2.14E-03	0.254	2.81
12	165-180	33	0.02750	0.0054190	5.07474	2.456	3.05E-03	0.749	3.56
13	185-200	19	0.01583	0.0060470	2.61838	1.370	4.19E-03	0.574	4.14
14	205-220	10	0.00833	0.0066760	1.24825	-0.805	5.58E-03	-0.449	3.69
15	225-240	18	0.01500	0.0073040	2.05367	1.003	7.24E-03	0.726	4.41
16	245-260	10	0.00833	0.0079330	1.05046	0.369	9.20E-03	0.340	4.75
17	265-280	7	0.00583	0.0085610	0.68138	-0.316	1.15E-02	-0.364	4.39
18	285-300	11	0.00917	0.0091890	0.99757	0.674	1.41E-02	0.950	5.34
19	305-350	10	0.00833	0.0257200	0.32400	0.212	2.24E-02	0.474	5.81
20	355-400	4	0.00333	0.0296500	0.11242	0.038	3.35E-02	0.127	5.94
21	405-450	3	0.00250	0.0335800	0.07445	-0.059	4.77E-02	-0.281	5.66
22	455-500	6	0.00500	0.0375000	0.13333	0.126	6.54E-02	0.826	6.48
23	505-1000	5	0.00417	0.5910000	0.00705	0.005	5.24E-01	0.236	6.72
24	1005-1500	3	0.00250	0.9830000	0.00254	0.002	1.77E+00	0.343	7.06
25	1505-2000	1	0.00083	1.3760000	0.00061	0.001	4.19E+00	0.254	7.32
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	7.32
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	7.32
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	7.32

Табела VIII-97 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (P-6)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	48	0.04000	0.0001178	339.55857	106.140	5.24E-07	0.006	0.01
2	15-20	77	0.06417	0.0002749	233.41821	171.690	4.19E-06	0.072	0.08
3	25-30	32	0.02667	0.0004320	61.72840	5.135	1.41E-05	0.007	0.08
4	35-40	40	0.03333	0.0005890	56.59310	25.319	3.35E-05	0.085	0.17
5	45-50	28	0.02333	0.0007461	31.27373	-1.942	6.54E-05	-0.013	0.16
6	55-60	36	0.03000	0.0009032	33.21523	12.364	1.13E-04	0.140	0.30
7	65-80	57	0.04750	0.0022780	20.85162	7.947	2.68E-04	0.213	0.51
8	85-100	45	0.03750	0.0029060	12.90434	3.001	5.24E-04	0.157	0.67
9	105-120	42	0.03500	0.0035340	9.90379	-0.305	9.05E-04	-0.028	0.64
10	125-140	51	0.04250	0.0041630	10.20898	6.208	1.44E-03	0.894	1.53
11	145-160	23	0.01917	0.0047910	4.00056	-0.152	2.14E-03	-0.032	1.50
12	165-180	27	0.02250	0.0054190	4.15206	2.085	3.05E-03	0.636	2.14
13	185-200	15	0.01250	0.0060470	2.06714	1.069	4.19E-03	0.448	2.58
14	205-220	8	0.00667	0.0066760	0.99860	-0.713	5.58E-03	-0.398	2.19
15	225-240	15	0.01250	0.0073040	1.71139	0.661	7.24E-03	0.479	2.67
16	245-260	10	0.00833	0.0079330	1.05046	0.272	9.20E-03	0.250	2.92
17	265-280	8	0.00667	0.0085610	0.77873	0.235	1.15E-02	0.270	3.18
18	285-300	6	0.00500	0.0091890	0.54413	0.317	1.41E-02	0.447	3.63
19	305-350	7	0.00583	0.0257200	0.22680	-0.139	2.24E-02	-0.310	3.32
20	355-400	13	0.01083	0.0296500	0.36537	0.241	3.35E-02	0.808	4.13
21	405-450	5	0.00417	0.0335800	0.12408	0.057	4.77E-02	0.274	4.40
22	455-500	3	0.00250	0.0375000	0.06667	0.043	6.54E-02	0.279	4.68
23	505-1000	17	0.01417	0.5910000	0.02397	0.021	5.24E-01	1.078	5.76
24	1005-1500	4	0.00333	0.9830000	0.00339	0.003	1.77E+00	0.493	6.25
25	1505-2000	1	0.00083	1.3760000	0.00061	0.001	4.19E+00	0.254	6.51
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	-0.315	6.19
27	2505-3000	1	0.00083	2.1620000	0.00039	0.000	1.41E+01	0.116	6.31
28	3005-4000	2	0.00167	5.5020000	0.00030	0.000	3.35E+01	1.015	7.32

Табела VIII-98 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (P-7)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	103	0.08583	0.0001178	728.63611	331.522	5.24E-07	0.017	0.02
2	15-20	131	0.10917	0.0002749	397.11410	169.491	4.19E-06	0.071	0.09
3	25-30	118	0.09833	0.0004320	227.62346	88.970	1.41E-05	0.125	0.21
4	35-40	98	0.08167	0.0005890	138.65308	40.364	3.35E-05	0.135	0.35
5	45-50	88	0.07333	0.0007461	98.28888	19.864	6.54E-05	0.130	0.48
6	55-60	85	0.07083	0.0009032	78.42486	31.966	1.13E-04	0.361	0.84
7	65-80	127	0.10583	0.0022780	46.45888	19.216	2.68E-04	0.515	1.36
8	85-100	95	0.07917	0.0029060	27.24249	12.151	5.24E-04	0.637	1.99
9	105-120	64	0.05333	0.0035340	15.09149	3.882	9.05E-04	0.351	2.34
10	125-140	56	0.04667	0.0041630	11.20986	8.775	1.44E-03	1.264	3.61
11	145-160	14	0.01167	0.0047910	2.43512	-0.333	2.14E-03	-0.071	3.54
12	165-180	18	0.01500	0.0054190	2.76804	1.528	3.05E-03	0.466	4.00
13	185-200	9	0.00750	0.0060470	1.24028	0.367	4.19E-03	0.154	4.16
14	205-220	7	0.00583	0.0066760	0.87378	0.189	5.58E-03	0.106	4.26
15	225-240	6	0.00500	0.0073040	0.68456	-0.366	7.24E-03	-0.265	4.00
16	245-260	10	0.00833	0.0079330	1.05046	0.466	9.20E-03	0.429	4.42
17	265-280	6	0.00500	0.0085610	0.58404	0.221	1.15E-02	0.254	4.68
18	285-300	4	0.00333	0.0091890	0.36275	0.233	1.41E-02	0.329	5.01
19	305-350	4	0.00333	0.0257200	0.12960	0.073	2.24E-02	0.164	5.17
20	355-400	2	0.00167	0.0296500	0.05621	-0.018	3.35E-02	-0.061	5.11
21	405-450	3	0.00250	0.0335800	0.07445	0.052	4.77E-02	0.249	5.36
22	455-500	1	0.00083	0.0375000	0.02222	0.011	6.54E-02	0.072	5.43
23	505-1000	8	0.00667	0.5910000	0.01128	0.010	5.24E-01	0.547	5.98
24	1005-1500	1	0.00083	0.9830000	0.00085	0.001	1.77E+00	0.150	6.13
25	1505-2000	0	0.00000	1.3760000	0.00000	0.000	4.19E+00	0.000	6.13
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	6.13
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	-0.214	5.92
28	3005-4000	1	0.00083	5.5020000	0.00015	0.000	3.35E+01	0.507	6.42

Табела VIII-99 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са хемијским додатком аеранта – (Р-8)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	51	0.04250	0.0001178	360.78098	206.179	5.24E-07	0.011	0.01
2	15-20	51	0.04250	0.0002749	154.60167	63.938	4.19E-06	0.027	0.04
3	25-30	47	0.03917	0.0004320	90.66358	55.293	1.41E-05	0.078	0.12
4	35-40	25	0.02083	0.0005890	35.37068	11.915	3.35E-05	0.040	0.16
5	45-50	21	0.01750	0.0007461	23.45530	5.002	6.54E-05	0.033	0.19
6	55-60	20	0.01667	0.0009032	18.45291	1.259	1.13E-04	0.014	0.20
7	65-80	47	0.03917	0.0022780	17.19344	11.171	2.68E-04	0.299	0.50
8	85-100	21	0.01750	0.0029060	6.02202	0.363	5.24E-04	0.019	0.52
9	105-120	24	0.02000	0.0035340	5.65931	3.658	9.05E-04	0.331	0.85
10	125-140	10	0.00833	0.0041630	2.00176	0.784	1.44E-03	0.113	0.96
11	145-160	7	0.00583	0.0047910	1.21756	-0.166	2.14E-03	-0.036	0.93
12	165-180	9	0.00750	0.0054190	1.38402	0.695	3.05E-03	0.212	1.14
13	185-200	5	0.00417	0.0060470	0.68905	0.065	4.19E-03	0.027	1.17
14	205-220	5	0.00417	0.0066760	0.62413	0.624	5.58E-03	0.348	1.52
15	225-240	0	0.00000	0.0073040	0.00000	-0.630	7.24E-03	-0.456	1.06
16	245-260	6	0.00500	0.0079330	0.63028	0.436	9.20E-03	0.401	1.46
17	265-280	2	0.00167	0.0085610	0.19468	-0.259	1.15E-02	-0.298	1.16
18	285-300	5	0.00417	0.0091890	0.45344	0.356	1.41E-02	0.502	1.67
19	305-350	3	0.00250	0.0257200	0.09720	-0.156	2.24E-02	-0.349	1.32
20	355-400	9	0.00750	0.0296500	0.25295	0.154	3.35E-02	0.515	1.83
21	405-450	4	0.00333	0.0335800	0.09927	0.010	4.77E-02	0.049	1.88
22	455-500	4	0.00333	0.0375000	0.08889	0.068	6.54E-02	0.443	2.32
23	505-1000	15	0.01250	0.5910000	0.02115	0.018	5.24E-01	0.931	3.25
24	1005-1500	4	0.00333	0.9830000	0.00339	0.003	1.77E+00	0.493	3.75
25	1505-2000	1	0.00083	1.3760000	0.00061	0.001	4.19E+00	0.254	4.00
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	4.00
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	-0.214	3.79
28	3005-4000	1	0.00083	5.5020000	0.00015	0.000	3.35E+01	0.507	4.30

Табела VIII-100 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-9)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	136	0.11333	0.0001178	962.08263	564.969	5.24E-07	0.030	0.03
2	15-20	131	0.10917	0.0002749	397.11410	154.059	4.19E-06	0.065	0.09
3	25-30	126	0.10500	0.0004320	243.05556	108.647	1.41E-05	0.153	0.25
4	35-40	95	0.07917	0.0005890	134.40860	41.704	3.35E-05	0.140	0.39
5	45-50	83	0.06917	0.0007461	92.70428	26.274	6.54E-05	0.172	0.56
6	55-60	72	0.06000	0.0009032	66.43047	16.313	1.13E-04	0.184	0.74
7	65-80	137	0.11417	0.0022780	50.11706	24.882	2.68E-04	0.667	1.41
8	85-100	88	0.07333	0.0029060	25.23515	8.965	5.24E-04	0.470	1.88
9	105-120	69	0.05750	0.0035340	16.27051	7.863	9.05E-04	0.712	2.59
10	125-140	42	0.03500	0.0041630	8.40740	2.146	1.44E-03	0.309	2.90
11	145-160	36	0.03000	0.0047910	6.26174	1.495	2.14E-03	0.320	3.22
12	165-180	31	0.02583	0.0054190	4.76718	2.838	3.05E-03	0.866	4.09
13	185-200	14	0.01167	0.0060470	1.92933	0.307	4.19E-03	0.128	4.21
14	205-220	13	0.01083	0.0066760	1.62273	-0.089	5.58E-03	-0.049	4.16
15	225-240	15	0.01250	0.0073040	1.71139	0.976	7.24E-03	0.707	4.87
16	245-260	7	0.00583	0.0079330	0.73533	-0.043	9.20E-03	-0.040	4.83
17	265-280	8	0.00667	0.0085610	0.77873	0.325	1.15E-02	0.374	5.21
18	285-300	5	0.00417	0.0091890	0.45344	0.065	1.41E-02	0.091	5.30
19	305-350	12	0.01000	0.0257200	0.38880	0.164	2.24E-02	0.367	5.66
20	355-400	8	0.00667	0.0296500	0.22485	0.051	3.35E-02	0.171	5.84
21	405-450	7	0.00583	0.0335800	0.17371	0.151	4.77E-02	0.723	6.56
22	455-500	1	0.00083	0.0375000	0.02222	0.001	6.54E-02	0.007	6.56
23	505-1000	15	0.01250	0.5910000	0.02115	0.019	5.24E-01	0.975	7.54
24	1005-1500	3	0.00250	0.9830000	0.00254	0.001	1.77E+00	0.236	7.78
25	1505-2000	2	0.00167	1.3760000	0.00121	0.001	4.19E+00	0.508	8.28
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	-0.315	7.97
27	2505-3000	1	0.00083	2.1620000	0.00039	0.000	1.41E+01	0.543	8.51
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	8.51

Табела VIII-101 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-10)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	165	0.13750	0.0001178	1167.23260	527.606	5.24E-07	0.028	0.03
2	15-20	211	0.17583	0.0002749	639.62653	365.707	4.19E-06	0.153	0.18
3	25-30	142	0.11833	0.0004320	273.91975	94.237	1.41E-05	0.133	0.31
4	35-40	127	0.10583	0.0005890	179.68308	84.745	3.35E-05	0.284	0.60
5	45-50	85	0.07083	0.0007461	94.93812	26.662	6.54E-05	0.174	0.77
6	55-60	74	0.06167	0.0009032	68.27576	33.157	1.13E-04	0.375	1.15
7	65-80	96	0.08000	0.0022780	35.11853	19.633	2.68E-04	0.526	1.67
8	85-100	54	0.04500	0.0029060	15.48520	7.704	5.24E-04	0.404	2.08
9	105-120	33	0.02750	0.0035340	7.78155	0.375	9.05E-04	0.034	2.11
10	125-140	37	0.03083	0.0041630	7.40652	2.710	1.44E-03	0.390	2.50
11	145-160	27	0.02250	0.0047910	4.69631	1.774	2.14E-03	0.380	2.88
12	165-180	19	0.01583	0.0054190	2.92182	1.682	3.05E-03	0.513	3.39
13	185-200	9	0.00750	0.0060470	1.24028	0.117	4.19E-03	0.049	3.44
14	205-220	9	0.00750	0.0066760	1.12343	0.667	5.58E-03	0.372	3.81
15	225-240	4	0.00333	0.0073040	0.45637	-0.069	7.24E-03	-0.050	3.76
16	245-260	5	0.00417	0.0079330	0.52523	0.039	9.20E-03	0.035	3.80
17	265-280	5	0.00417	0.0085610	0.48670	0.215	1.15E-02	0.247	4.05
18	285-300	3	0.00250	0.0091890	0.27206	0.078	1.41E-02	0.110	4.16
19	305-350	6	0.00500	0.0257200	0.19440	0.054	2.24E-02	0.121	4.28
20	355-400	5	0.00417	0.0296500	0.14053	0.091	3.35E-02	0.305	4.58
21	405-450	2	0.00167	0.0335800	0.04963	0.027	4.77E-02	0.131	4.71
22	455-500	1	0.00083	0.0375000	0.02222	0.014	6.54E-02	0.090	4.80
23	505-1000	6	0.00500	0.5910000	0.00846	0.006	5.24E-01	0.310	5.11
24	1005-1500	3	0.00250	0.9830000	0.00254	0.002	1.77E+00	0.343	5.46
25	1505-2000	1	0.00083	1.3760000	0.00061	0.001	4.19E+00	0.254	5.71
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	5.71
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	5.71
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	5.71

Табела VIII-102 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-11)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	75	0.06250	0.0001178	530.56027	354.739	5.24E-07	0.019	0.02
2	15-20	58	0.04833	0.0002749	175.82151	102.519	4.19E-06	0.043	0.06
3	25-30	38	0.03167	0.0004320	73.30247	6.806	1.41E-05	0.010	0.07
4	35-40	47	0.03917	0.0005890	66.49689	25.171	3.35E-05	0.084	0.16
5	45-50	37	0.03083	0.0007461	41.32601	17.337	6.54E-05	0.113	0.27
6	55-60	26	0.02167	0.0009032	23.98878	10.454	1.13E-04	0.118	0.39
7	65-80	37	0.03083	0.0022780	13.53526	5.219	2.68E-04	0.140	0.53
8	85-100	29	0.02417	0.0029060	8.31613	4.072	5.24E-04	0.213	0.74
9	105-120	18	0.01500	0.0035340	4.24448	0.641	9.05E-04	0.058	0.80
10	125-140	18	0.01500	0.0041630	3.60317	0.994	1.44E-03	0.143	0.94
11	145-160	15	0.01250	0.0047910	2.60906	1.071	2.14E-03	0.229	1.17
12	165-180	10	0.00833	0.0054190	1.53780	-0.529	3.05E-03	-0.161	1.01
13	185-200	15	0.01250	0.0060470	2.06714	1.318	4.19E-03	0.552	1.56
14	205-220	6	0.00500	0.0066760	0.74895	0.407	5.58E-03	0.227	1.79
15	225-240	3	0.00250	0.0073040	0.34228	-0.393	7.24E-03	-0.285	1.50
16	245-260	7	0.00583	0.0079330	0.73533	0.541	9.20E-03	0.497	2.00
17	265-280	2	0.00167	0.0085610	0.19468	-0.259	1.15E-02	-0.298	1.70
18	285-300	5	0.00417	0.0091890	0.45344	0.129	1.41E-02	0.183	1.89
19	305-350	10	0.00833	0.0257200	0.32400	0.155	2.24E-02	0.348	2.23
20	355-400	6	0.00500	0.0296500	0.16863	0.119	3.35E-02	0.399	2.63
21	405-450	2	0.00167	0.0335800	0.04963	-0.017	4.77E-02	-0.081	2.55
22	455-500	3	0.00250	0.0375000	0.06667	0.051	6.54E-02	0.335	2.89
23	505-1000	11	0.00917	0.5910000	0.01551	0.014	5.24E-01	0.724	3.61
24	1005-1500	2	0.00167	0.9830000	0.00170	-0.001	1.77E+00	-0.129	3.48
25	1505-2000	4	0.00333	1.3760000	0.00242	0.002	4.19E+00	1.015	4.50
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	4.50
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	4.50
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	4.50

Табела VIII-103 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 2.5 % дробљене гуме – (P-12)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	154	0.12833	0.0001178	1089.41709	671.083	5.24E-07	0.035	0.04
2	15-20	138	0.11500	0.0002749	418.33394	264.013	4.19E-06	0.111	0.15
3	25-30	80	0.06667	0.0004320	154.32099	70.846	1.41E-05	0.100	0.25
4	35-40	59	0.04917	0.0005890	83.47482	36.564	3.35E-05	0.122	0.37
5	45-50	42	0.03500	0.0007461	46.91060	18.309	6.54E-05	0.120	0.49
6	55-60	31	0.02583	0.0009032	28.60201	12.140	1.13E-04	0.137	0.63
7	65-80	45	0.03750	0.0022780	16.46181	8.719	2.68E-04	0.234	0.86
8	85-100	27	0.02250	0.0029060	7.74260	1.140	5.24E-04	0.060	0.92
9	105-120	28	0.02333	0.0035340	6.60253	3.800	9.05E-04	0.344	1.26
10	125-140	14	0.01167	0.0041630	2.80247	0.715	1.44E-03	0.103	1.37
11	145-160	12	0.01000	0.0047910	2.08725	1.318	2.14E-03	0.282	1.65
12	165-180	5	0.00417	0.0054190	0.76890	-0.471	3.05E-03	-0.144	1.50
13	185-200	9	0.00750	0.0060470	1.24028	0.367	4.19E-03	0.154	1.66
14	205-220	7	0.00583	0.0066760	0.87378	0.760	5.58E-03	0.424	2.08
15	225-240	1	0.00083	0.0073040	0.11409	-0.411	7.24E-03	-0.298	1.78
16	245-260	5	0.00417	0.0079330	0.52523	-0.156	9.20E-03	-0.144	1.64
17	265-280	7	0.00583	0.0085610	0.68138	0.591	1.15E-02	0.679	2.32
18	285-300	1	0.00083	0.0091890	0.09069	-0.071	1.41E-02	-0.101	2.22
19	305-350	5	0.00417	0.0257200	0.16200	0.021	2.24E-02	0.048	2.27
20	355-400	5	0.00417	0.0296500	0.14053	0.041	3.35E-02	0.138	2.40
21	405-450	4	0.00333	0.0335800	0.09927	0.055	4.77E-02	0.261	2.67
22	455-500	2	0.00167	0.0375000	0.04444	0.026	6.54E-02	0.171	2.84
23	505-1000	13	0.01083	0.5910000	0.01833	0.016	5.24E-01	0.827	3.66
24	1005-1500	3	0.00250	0.9830000	0.00254	0.003	1.77E+00	0.450	4.11
25	1505-2000	0	0.00000	1.3760000	0.00000	0.000	4.19E+00	0.000	4.11
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	-0.315	3.80
27	2505-3000	1	0.00083	2.1620000	0.00039	0.000	1.41E+01	0.543	4.34
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	4.34

Табела VIII-104 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-13)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	103	0.08583	0.0001178	728.63611	473.998	5.24E-07	0.025	0.02
2	15-20	84	0.07000	0.0002749	254.63805	113.820	4.19E-06	0.048	0.07
3	25-30	73	0.06083	0.0004320	140.81790	47.439	1.41E-05	0.067	0.14
4	35-40	66	0.05500	0.0005890	93.37861	45.351	3.35E-05	0.152	0.29
5	45-50	43	0.03583	0.0007461	48.02752	5.586	6.54E-05	0.037	0.33
6	55-60	46	0.03833	0.0009032	42.44169	20.493	1.13E-04	0.232	0.56
7	65-80	60	0.05000	0.0022780	21.94908	7.324	2.68E-04	0.196	0.76
8	85-100	51	0.04250	0.0029060	14.62491	8.022	5.24E-04	0.420	1.18
9	105-120	28	0.02333	0.0035340	6.60253	2.199	9.05E-04	0.199	1.38
10	125-140	22	0.01833	0.0041630	4.40388	0.577	1.44E-03	0.083	1.46
11	145-160	22	0.01833	0.0047910	3.82662	0.290	2.14E-03	0.062	1.52
12	165-180	23	0.01917	0.0054190	3.53694	1.745	3.05E-03	0.532	2.05
13	185-200	13	0.01083	0.0060470	1.79152	-0.081	4.19E-03	-0.034	2.02
14	205-220	15	0.01250	0.0066760	1.87238	0.047	5.58E-03	0.026	2.04
15	225-240	16	0.01333	0.0073040	1.82548	0.460	7.24E-03	0.333	2.38
16	245-260	13	0.01083	0.0079330	1.36560	0.587	9.20E-03	0.540	2.92
17	265-280	8	0.00667	0.0085610	0.77873	-0.037	1.15E-02	-0.043	2.87
18	285-300	9	0.00750	0.0091890	0.81619	0.330	1.41E-02	0.466	3.34
19	305-350	15	0.01250	0.0257200	0.48600	0.205	2.24E-02	0.459	3.80
20	355-400	10	0.00833	0.0296500	0.28106	0.033	3.35E-02	0.110	3.91
21	405-450	10	0.00833	0.0335800	0.24816	0.004	4.77E-02	0.018	3.93
22	455-500	11	0.00917	0.0375000	0.24444	0.206	6.54E-02	1.350	5.28
23	505-1000	27	0.02250	0.5910000	0.03807	0.029	5.24E-01	1.506	6.78
24	1005-1500	11	0.00917	0.9830000	0.00933	0.006	1.77E+00	1.007	7.79
25	1505-2000	6	0.00500	1.3760000	0.00363	0.003	4.19E+00	1.128	8.92
26	2005-2500	2	0.00167	1.7690000	0.00094	0.001	8.18E+00	0.455	9.37
27	2505-3000	1	0.00083	2.1620000	0.00039	0.000	1.41E+01	0.543	9.92
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	9.92

Табела VIII-105 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-14)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	190	0.15833	0.0001178	1344.08602	874.218	5.24E-07	0.046	0.05
2	15-20	155	0.12917	0.0002749	469.86783	246.102	4.19E-06	0.103	0.15
3	25-30	116	0.09667	0.0004320	223.76543	104.920	1.41E-05	0.148	0.30
4	35-40	84	0.07000	0.0005890	118.84550	64.116	3.35E-05	0.215	0.51
5	45-50	49	0.04083	0.0007461	54.72904	6.751	6.54E-05	0.044	0.56
6	55-60	52	0.04333	0.0009032	47.97756	20.175	1.13E-04	0.228	0.78
7	65-80	76	0.06333	0.0022780	27.80217	10.023	2.68E-04	0.269	1.05
8	85-100	62	0.05167	0.0029060	17.77931	4.103	5.24E-04	0.215	1.27
9	105-120	58	0.04833	0.0035340	13.67666	7.271	9.05E-04	0.658	1.93
10	125-140	32	0.02667	0.0041630	6.40564	0.840	1.44E-03	0.121	2.05
11	145-160	32	0.02667	0.0047910	5.56599	1.414	2.14E-03	0.303	2.35
12	165-180	27	0.02250	0.0054190	4.15206	0.845	3.05E-03	0.258	2.61
13	185-200	24	0.02000	0.0060470	3.30743	1.310	4.19E-03	0.549	3.16
14	205-220	16	0.01333	0.0066760	1.99720	0.400	5.58E-03	0.223	3.38
15	225-240	14	0.01167	0.0073040	1.59730	-1.134	7.24E-03	-0.821	2.56
16	245-260	26	0.02167	0.0079330	2.73121	1.563	9.20E-03	1.438	4.00
17	265-280	12	0.01000	0.0085610	1.16809	0.715	1.15E-02	0.822	4.82
18	285-300	5	0.00417	0.0091890	0.45344	-0.195	1.41E-02	-0.274	4.54
19	305-350	20	0.01667	0.0257200	0.64800	0.198	2.24E-02	0.444	4.99
20	355-400	16	0.01333	0.0296500	0.44969	0.226	3.35E-02	0.758	5.75
21	405-450	9	0.00750	0.0335800	0.22335	0.134	4.77E-02	0.641	6.39
22	455-500	4	0.00333	0.0375000	0.08889	0.061	6.54E-02	0.397	6.78
23	505-1000	20	0.01667	0.5910000	0.02820	0.025	5.24E-01	1.300	8.08
24	1005-1500	4	0.00333	0.9830000	0.00339	0.003	1.77E+00	0.493	8.58
25	1505-2000	1	0.00083	1.3760000	0.00061	0.001	4.19E+00	0.254	8.83
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	8.83
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	8.83
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	8.83

Табела VIII-106 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-15)

Класа	Ширина пора по класи mikroni	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора mm ⁻¹	Наиђена фракција mm ²	Потенцијални укупни mm ⁻³	Поре по класи mm ⁻³	Запремина пора mm ³	Садржај ваздуха %	Садржај ваздуха кумулативно %
1	0-10	111	0.09250	0.0001178	785.22920	445.712	5.24E-07	0.023	0.02
2	15-20	112	0.09333	0.0002749	339.51740	187.125	4.19E-06	0.078	0.10
3	25-30	79	0.06583	0.0004320	152.39198	47.695	1.41E-05	0.067	0.17
4	35-40	74	0.06167	0.0005890	104.69723	49.968	3.35E-05	0.167	0.34
5	45-50	49	0.04083	0.0007461	54.72904	3.984	6.54E-05	0.026	0.36
6	55-60	55	0.04583	0.0009032	50.74550	11.603	1.13E-04	0.131	0.49
7	65-80	107	0.08917	0.0022780	39.14252	19.643	2.68E-04	0.526	1.02
8	85-100	68	0.05667	0.0029060	19.49989	10.304	5.24E-04	0.540	1.56
9	105-120	39	0.03250	0.0035340	9.19638	3.391	9.05E-04	0.307	1.87
10	125-140	29	0.02417	0.0041630	5.80511	-1.152	1.44E-03	-0.166	1.70
11	145-160	40	0.03333	0.0047910	6.95749	3.267	2.14E-03	0.699	2.40
12	165-180	24	0.02000	0.0054190	3.69072	1.899	3.05E-03	0.579	2.98
13	185-200	13	0.01083	0.0060470	1.79152	-0.081	4.19E-03	-0.034	2.95
14	205-220	15	0.01250	0.0066760	1.87238	0.960	5.58E-03	0.535	3.48
15	225-240	8	0.00667	0.0073040	0.91274	0.177	7.24E-03	0.128	3.61
16	245-260	7	0.00583	0.0079330	0.73533	0.346	9.20E-03	0.318	3.93
17	265-280	4	0.00333	0.0085610	0.38936	-0.245	1.15E-02	-0.282	3.65
18	285-300	7	0.00583	0.0091890	0.63482	0.278	1.41E-02	0.393	4.04
19	305-350	11	0.00917	0.0257200	0.35640	0.132	2.24E-02	0.295	4.33
20	355-400	8	0.00667	0.0296500	0.22485	0.150	3.35E-02	0.504	4.84
21	405-450	3	0.00250	0.0335800	0.07445	-0.014	4.77E-02	-0.069	4.77
22	455-500	4	0.00333	0.0375000	0.08889	0.064	6.54E-02	0.415	5.18
23	505-1000	18	0.01500	0.5910000	0.02538	0.021	5.24E-01	1.108	6.29
24	1005-1500	5	0.00417	0.9830000	0.00424	0.004	1.77E+00	0.643	6.93
25	1505-2000	1	0.00083	1.3760000	0.00061	0.001	4.19E+00	0.254	7.19
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	-0.001	8.18E+00	-0.631	6.56
27	2505-3000	2	0.00167	2.1620000	0.00077	0.001	1.41E+01	1.087	7.64
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	7.64

Табела VIII-107 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-16)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	80	0.06667	0.0001178	565.93096	365.858	5.24E-07	0.019	0.02
2	15-20	66	0.05500	0.0002749	200.07275	107.480	4.19E-06	0.045	0.06
3	25-30	48	0.04000	0.0004320	92.59259	35.999	1.41E-05	0.051	0.11
4	35-40	40	0.03333	0.0005890	56.59310	23.086	3.35E-05	0.077	0.19
5	45-50	30	0.02500	0.0007461	33.50757	16.900	6.54E-05	0.111	0.30
6	55-60	18	0.01500	0.0009032	16.60762	4.170	1.13E-04	0.047	0.35
7	65-80	34	0.02833	0.0022780	12.43781	4.122	2.68E-04	0.110	0.46
8	85-100	29	0.02417	0.0029060	8.31613	3.600	5.24E-04	0.189	0.65
9	105-120	20	0.01667	0.0035340	4.71609	1.914	9.05E-04	0.173	0.82
10	125-140	14	0.01167	0.0041630	2.80247	0.193	1.44E-03	0.028	0.85
11	145-160	15	0.01250	0.0047910	2.60906	0.610	2.14E-03	0.131	0.98
12	165-180	13	0.01083	0.0054190	1.99914	0.483	3.05E-03	0.147	1.13
13	185-200	11	0.00917	0.0060470	1.51590	1.017	4.19E-03	0.426	1.55
14	205-220	4	0.00333	0.0066760	0.49930	0.043	5.58E-03	0.024	1.58
15	225-240	4	0.00333	0.0073040	0.45637	-0.174	7.24E-03	-0.126	1.45
16	245-260	6	0.00500	0.0079330	0.63028	0.241	9.20E-03	0.222	1.67
17	265-280	4	0.00333	0.0085610	0.38936	0.208	1.15E-02	0.239	1.91
18	285-300	2	0.00167	0.0091890	0.18138	-0.013	1.41E-02	-0.018	1.89
19	305-350	6	0.00500	0.0257200	0.19440	0.026	2.24E-02	0.058	1.95
20	355-400	6	0.00500	0.0296500	0.16863	0.094	3.35E-02	0.316	2.27
21	405-450	3	0.00250	0.0335800	0.07445	-0.037	4.77E-02	-0.175	2.09
22	455-500	5	0.00417	0.0375000	0.11111	0.094	6.54E-02	0.616	2.71
23	505-1000	12	0.01000	0.5910000	0.01692	0.015	5.24E-01	0.798	3.51
24	1005-1500	2	0.00167	0.9830000	0.00170	0.000	1.77E+00	0.086	3.59
25	1505-2000	2	0.00167	1.3760000	0.00121	0.001	4.19E+00	0.508	4.10
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	4.10
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	-0.214	3.89
28	3005-4000	1	0.00083	5.5020000	0.00015	0.000	3.35E+01	0.507	4.39

Табела VIII-108 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-17)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	326	0.27167	0.0001178	2306.16865	1230.020	5.24E-07	0.064	0.06
2	15-20	355	0.29583	0.0002749	1076.14890	618.973	4.19E-06	0.259	0.32
3	25-30	237	0.19750	0.0004320	457.17593	185.529	1.41E-05	0.262	0.59
4	35-40	192	0.16000	0.0005890	271.64686	101.875	3.35E-05	0.341	0.93
5	45-50	152	0.12667	0.0007461	169.77170	53.518	6.54E-05	0.350	1.28
6	55-60	126	0.10500	0.0009032	116.25332	48.211	1.13E-04	0.545	1.82
7	65-80	186	0.15500	0.0022780	68.04214	35.351	2.68E-04	0.947	2.77
8	85-100	114	0.09500	0.0029060	32.69098	16.892	5.24E-04	0.885	3.65
9	105-120	67	0.05583	0.0035340	15.79891	4.989	9.05E-04	0.452	4.11
10	125-140	54	0.04500	0.0041630	10.80951	4.896	1.44E-03	0.705	4.81
11	145-160	34	0.02833	0.0047910	5.91387	2.531	2.14E-03	0.542	5.35
12	165-180	22	0.01833	0.0054190	3.38316	0.903	3.05E-03	0.275	5.63
13	185-200	18	0.01500	0.0060470	2.48057	1.732	4.19E-03	0.726	6.35
14	205-220	6	0.00500	0.0066760	0.74895	-0.734	5.58E-03	-0.410	5.94
15	225-240	13	0.01083	0.0073040	1.48321	1.063	7.24E-03	0.770	6.71
16	245-260	4	0.00333	0.0079330	0.42019	-0.456	9.20E-03	-0.419	6.29
17	265-280	9	0.00750	0.0085610	0.87607	0.332	1.15E-02	0.382	6.68
18	285-300	6	0.00500	0.0091890	0.54413	-0.104	1.41E-02	-0.146	6.53
19	305-350	20	0.01667	0.0257200	0.64800	0.283	2.24E-02	0.633	7.16
20	355-400	13	0.01083	0.0296500	0.36537	0.092	3.35E-02	0.310	7.47
21	405-450	11	0.00917	0.0335800	0.27298	0.095	4.77E-02	0.454	7.93
22	455-500	8	0.00667	0.0375000	0.17778	0.151	6.54E-02	0.987	8.91
23	505-1000	19	0.01583	0.5910000	0.02679	0.023	5.24E-01	1.226	10.14
24	1005-1500	4	0.00333	0.9830000	0.00339	0.002	1.77E+00	0.386	10.52
25	1505-2000	2	0.00167	1.3760000	0.00121	0.001	4.19E+00	0.508	11.03
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	-0.315	10.72
27	2505-3000	1	0.00083	2.1620000	0.00039	0.000	1.41E+01	0.543	11.26
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	11.26

Табела VIII-109 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-18)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	147	0.12250	0.0001178	1039.89813	533.653	5.24E-07	0.028	0.03
2	15-20	167	0.13917	0.0002749	506.24470	336.492	4.19E-06	0.141	0.17
3	25-30	88	0.07333	0.0004320	169.75309	45.248	1.41E-05	0.064	0.23
4	35-40	88	0.07333	0.0005890	124.50481	64.191	3.35E-05	0.215	0.45
5	45-50	54	0.04500	0.0007461	60.31363	3.110	6.54E-05	0.020	0.47
6	55-60	62	0.05167	0.0009032	57.20402	21.720	1.13E-04	0.245	0.71
7	65-80	97	0.08083	0.0022780	35.48434	14.837	2.68E-04	0.398	1.11
8	85-100	72	0.06000	0.0029060	20.64694	5.084	5.24E-04	0.266	1.38
9	105-120	66	0.05500	0.0035340	15.56310	8.757	9.05E-04	0.793	2.17
10	125-140	34	0.02833	0.0041630	6.80599	1.240	1.44E-03	0.179	2.35
11	145-160	32	0.02667	0.0047910	5.56599	2.952	2.14E-03	0.632	2.98
12	165-180	17	0.01417	0.0054190	2.61426	0.547	3.05E-03	0.167	3.15
13	185-200	15	0.01250	0.0060470	2.06714	0.320	4.19E-03	0.134	3.28
14	205-220	14	0.01167	0.0066760	1.74755	-0.192	5.58E-03	-0.107	3.17
15	225-240	17	0.01417	0.0073040	1.93958	0.364	7.24E-03	0.263	3.44
16	245-260	15	0.01250	0.0079330	1.57570	-0.274	9.20E-03	-0.252	3.19
17	265-280	19	0.01583	0.0085610	1.84947	0.852	1.15E-02	0.980	4.17
18	285-300	11	0.00917	0.0091890	0.99757	0.285	1.41E-02	0.402	4.57
19	305-350	22	0.01833	0.0257200	0.71280	0.347	2.24E-02	0.778	5.35
20	355-400	13	0.01083	0.0296500	0.36537	0.192	3.35E-02	0.642	5.99
21	405-450	7	0.00583	0.0335800	0.17371	0.018	4.77E-02	0.087	6.07
22	455-500	7	0.00583	0.0375000	0.15556	0.122	6.54E-02	0.796	6.87
23	505-1000	24	0.02000	0.5910000	0.03384	0.030	5.24E-01	1.551	8.42
24	1005-1500	5	0.00417	0.9830000	0.00424	0.004	1.77E+00	0.643	9.06
25	1505-2000	1	0.00083	1.3760000	0.00061	0.001	4.19E+00	0.254	9.32
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	9.32
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	9.32
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	9.32

Табела VIII-110 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-19)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	103	0.08583	0.0001178	728.63611	313.334	5.24E-07	0.016	0.02
2	15-20	137	0.11417	0.0002749	415.30253	270.627	4.19E-06	0.113	0.13
3	25-30	75	0.06250	0.0004320	144.67593	48.468	1.41E-05	0.068	0.20
4	35-40	68	0.05667	0.0005890	96.20826	41.479	3.35E-05	0.139	0.34
5	45-50	49	0.04083	0.0007461	54.72904	15.055	6.54E-05	0.098	0.44
6	55-60	43	0.03583	0.0009032	39.67375	6.384	1.13E-04	0.072	0.51
7	65-80	91	0.07583	0.0022780	33.28944	18.378	2.68E-04	0.493	1.00
8	85-100	52	0.04333	0.0029060	14.91168	5.008	5.24E-04	0.262	1.26
9	105-120	42	0.03500	0.0035340	9.90379	2.497	9.05E-04	0.226	1.49
10	125-140	37	0.03083	0.0041630	7.40652	4.276	1.44E-03	0.616	2.10
11	145-160	18	0.01500	0.0047910	3.13087	0.209	2.14E-03	0.045	2.15
12	165-180	19	0.01583	0.0054190	2.92182	1.544	3.05E-03	0.471	2.62
13	185-200	10	0.00833	0.0060470	1.37809	0.005	4.19E-03	0.002	2.62
14	205-220	11	0.00917	0.0066760	1.37308	0.118	5.58E-03	0.066	2.69
15	225-240	11	0.00917	0.0073040	1.25502	0.415	7.24E-03	0.300	2.99
16	245-260	8	0.00667	0.0079330	0.84037	0.062	9.20E-03	0.057	3.04
17	265-280	8	0.00667	0.0085610	0.77873	-0.128	1.15E-02	-0.147	2.90
18	285-300	10	0.00833	0.0091890	0.90688	0.486	1.41E-02	0.685	3.58
19	305-350	13	0.01083	0.0257200	0.42120	0.253	2.24E-02	0.566	4.15
20	355-400	6	0.00500	0.0296500	0.16863	-0.005	3.35E-02	-0.017	4.13
21	405-450	7	0.00583	0.0335800	0.17371	0.107	4.77E-02	0.511	4.64
22	455-500	3	0.00250	0.0375000	0.06667	0.033	6.54E-02	0.215	4.86
23	505-1000	24	0.02000	0.5910000	0.03384	0.030	5.24E-01	1.596	6.45
24	1005-1500	4	0.00333	0.9830000	0.00339	0.002	1.77E+00	0.386	6.84
25	1505-2000	2	0.00167	1.3760000	0.00121	0.001	4.19E+00	0.310	7.15
26	2005-2500	1	0.00083	1.7690000	0.00047	0.000	8.18E+00	0.385	7.53
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	7.53
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	7.53

Табела VIII-111 - Одређивање распореда ваздушних пора у очврслом бетону – Бетон са додатком 5 % дробљене гуме – (P-20)

Класа	Ширина пора по класи	Забележен број пора по класи	Фреквенција пора	Наиђена фракција	Потенцијални укупни	Поре по класи	Запремина пора	Садржај ваздуха	Садржај ваздуха кумулативно
	mikroni		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
1	0-10	73	0.06083	0.0001178	516.41200	264.805	5.24E-07	0.014	0.01
2	15-20	83	0.06917	0.0002749	251.60664	155.156	4.19E-06	0.065	0.08
3	25-30	50	0.04167	0.0004320	96.45062	14.391	1.41E-05	0.020	0.10
4	35-40	58	0.04833	0.0005890	82.05999	37.383	3.35E-05	0.125	0.22
5	45-50	40	0.03333	0.0007461	44.67676	1.312	6.54E-05	0.009	0.23
6	55-60	47	0.03917	0.0009032	43.36433	25.805	1.13E-04	0.292	0.52
7	65-80	48	0.04000	0.0022780	17.55926	3.508	2.68E-04	0.094	0.62
8	85-100	49	0.04083	0.0029060	14.05139	3.912	5.24E-04	0.205	0.82
9	105-120	43	0.03583	0.0035340	10.13960	4.134	9.05E-04	0.374	1.20
10	125-140	30	0.02500	0.0041630	6.00528	2.527	1.44E-03	0.364	1.56
11	145-160	20	0.01667	0.0047910	3.47874	0.711	2.14E-03	0.152	1.71
12	165-180	18	0.01500	0.0054190	2.76804	1.666	3.05E-03	0.508	2.22
13	185-200	8	0.00667	0.0060470	1.10248	-1.644	4.19E-03	-0.689	1.53
14	205-220	22	0.01833	0.0066760	2.74616	0.578	5.58E-03	0.323	1.86
15	225-240	19	0.01583	0.0073040	2.16776	0.907	7.24E-03	0.657	2.51
16	245-260	12	0.01000	0.0079330	1.26056	0.579	9.20E-03	0.533	3.05
17	265-280	7	0.00583	0.0085610	0.68138	0.047	1.15E-02	0.054	3.10
18	285-300	7	0.00583	0.0091890	0.63482	0.278	1.41E-02	0.393	3.49
19	305-350	11	0.00917	0.0257200	0.35640	0.103	2.24E-02	0.232	3.72
20	355-400	9	0.00750	0.0296500	0.25295	0.079	3.35E-02	0.265	3.99
21	405-450	7	0.00583	0.0335800	0.17371	0.018	4.77E-02	0.087	4.08
22	455-500	7	0.00583	0.0375000	0.15556	0.133	6.54E-02	0.870	4.95
23	505-1000	16	0.01333	0.5910000	0.02256	0.020	5.24E-01	1.049	5.99
24	1005-1500	3	0.00250	0.9830000	0.00254	0.003	1.77E+00	0.450	6.44
25	1505-2000	0	0.00000	1.3760000	0.00000	0.000	4.19E+00	0.000	6.44
26	2005-2500	0	0.00000	1.7690000	0.00000	0.000	8.18E+00	0.000	6.44
27	2505-3000	0	0.00000	2.1620000	0.00000	0.000	1.41E+01	0.000	6.44
28	3005-4000	0	0.00000	5.5020000	0.00000	0.000	3.35E+01	0.000	6.44

ПРИЛОГ 16: Одређивање статичког модула еластичности

Статички модул еластичности ($E_{c,s}$) израчунава се као однос напона и деформације према следећој формули, која је дата у

SRPS EN 12390-13 (Метод Б):

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}}$$

где:

- $E_{c,s}$ је статички модул еластичности (GPa).
- $\Delta\sigma$ је промена напона између два изабрана нивоа оптерећења (MPa).
- $\Delta\varepsilon$ је промена аксијалне деформације између та два нивоа оптерећења (бездимензионална величина).

Табела VIII-112 - Одређивање статичког модула еластичности – Обични (референтни) бетони

Ознака бетона	Узорак број	w/c	h	D	ms	V	D (kg/m ³)		F	Ac	f _c (MPa)		σ _a ^m	σ _p ^m	ε _{p,2}	ε _{a,3}	E _{c,s} (GPa)	
			(mm)	(mm)	(g)	(m ³)	појед.	средња	(kN)	(mm ²)	појед.	средња	(MPa)	(MPa)	(‰)	(‰)	појед.	средња
P-1	1	0.55	292.2	150.0	12047	5.1636	2333	2330	931.0	17671	52.7	52.5	-	-	-	-	-	30.5
	2		299.7	150.0	12325	5.2961	2327		926.2	17671	52.4		-	-	-	-	-	
	3		295.2	150.0	12133	5.2166	2326	2330	920.7	17671	52.1	51.8	0.5	17.4	0.0279	0.5807	30.51	
	4		292.7	150.0	12090	5.1724	2337		911.3	17671	51.6		0.5	17.4	0.0273	0.5807	30.48	
P-2	1	0.5	295.3	150.0	12253	5.2184	2348	2350	1029.5	17671	58.3	58.2	-	-	-	-	-	32.4
	2		296.6	150.0	12330	5.2414	2352		1028.1	17671	58.2		-	-	-	-	-	
	3		295.0	150.0	12211	5.2131	2342	2340	1014.3	17671	57.4	57.0	0.5	19.1	0.0251	0.6001	32.41	
	4		291.2	150.0	12056	5.1459	2343		1001.6	17671	56.7		0.5	19.1	0.0261	0.6028	32.31	
P-3	1	0.45	291.8	150.0	12190	5.1565	2364	2370	1071.4	17671	60.6	60.7	-	-	-	-	-	34.2
	2		295.3	150.0	12363	5.2184	2369		1073.2	17671	60.7		-	-	-	-	-	
	3		294.5	150.0	12333	5.2042	2370	2360	1063.8	17671	60.2	60.0	0.5	20.1	0.0235	0.5956	34.20	
	4		298.6	150.0	12447	5.2767	2359		1057.9	17671	59.9		0.5	20.1	0.0250	0.5967	34.23	
P-4	1	0.4	297.2	150.0	12494	5.2520	2379	2380	1224.9	17671	69.3	69.4	-	-	-	-	-	36.7
	2		292.3	150.0	12275	5.1654	2376		1227.0	17671	69.4		-	-	-	-	-	
	3		290.6	150.0	12247	5.1353	2385	2380	1210.5	17671	68.5	68.7	0.5	22.8	0.0056	0.6133	36.75	
	4		299.9	150.0	12593	5.2997	2376		1215.9	17671	68.8		0.5	22.8	0.0051	0.6155	36.58	

Табела VIII-113 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са хемијским додатком аерантом

Ознака бетона	Узорак број	w/c	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>m_s</i>	<i>V</i>	<i>D (kg/m³)</i>		<i>F</i>	<i>Ac</i>	<i>f_{c, cyl} (MPa)</i>		σ_a^m	σ_p^m	$\epsilon_{p,2}$	$\epsilon_{a,3}$	<i>E_{c,s} (GPa)</i>	
			(mm)	(mm)	(g)	(m³)	појед.	средња	(kN)	(mm²)	појед.	средња	(MPa)	(MPa)	(‰)	(‰)	појед.	средња
P-5	1	0.55	299.7	150.0	12033	5.2961	2272	2270	878.1	17671	49.7	48.6	-	-	-	-	-	28.1
	2		291.1	150.0	11702	5.1442	2275		838.0	17671	47.4		-	-	-	-	-	
	3		292.0	150.0	11727	5.1601	2273	2270	857.0	17671	48.5	48.9	0.5	16.3	0.0278	0.5900	28.09	
	4		294.7	150.0	11854	5.2078	2276		870.2	17671	49.2		0.5	16.3	0.0296	0.5897	28.19	
P-6	1	0.5	299.1	150.0	12072	5.2855	2284	2290	899.9	17671	50.9	50.0	-	-	-	-	-	27.9
	2		297.0	150.0	12024	5.2484	2291		868.3	17671	49.1		-	-	-	-	-	
	3		292.1	150.0	11810	5.1618	2288	2280	888.9	17671	50.3	49.9	0.5	16.6	0.0477	0.6258	27.89	
	4		295.5	150.0	11894	5.2219	2278		873.6	17671	49.4		0.5	16.6	0.0481	0.6239	28.00	
P-7	1	0.45	293.2	150.0	12036	5.1813	2323	2330	936.8	17671	53.0	53.8	-	-	-	-	-	30.6
	2		292.1	150.0	12020	5.1618	2329		966.3	17671	54.7		-	-	-	-	-	
	3		298.3	150.0	12237	5.2714	2321	2320	957.8	17671	54.2	55.0	0.5	18.3	0.0235	0.6052	30.64	
	4		296.7	150.0	12200	5.2431	2327		984.7	17671	55.7		0.5	18.3	0.0218	0.6041	30.60	
P-8	1	0.4	296.8	150.0	12357	5.2449	2356	2350	1063.7	17671	60.2	60.1	-	-	-	-	-	32.1
	2		292.6	150.0	12160	5.1707	2352		1060.8	17671	60.0		-	-	-	-	-	
	3		298.9	150.0	12470	5.2820	2361	2360	1053.2	17671	59.6	60.1	0.5	20.0	0.0056	0.6133	32.12	
	4		295.8	150.0	12332	5.2272	2359		1069.6	17671	60.5		0.5	20.0	0.0032	0.6105	32.14	

Табела VIII-114 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са додатком 2.5% дробљене гуме

Ознака бетона	Узорак број	w/c	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>m_s</i>	<i>V</i>	<i>D (kg/m³)</i>		<i>F</i>	<i>A_c</i>	<i>f_{c, cyl} (MPa)</i>		σ_a^m	σ_p^m	$\epsilon_{p,2}$	$\epsilon_{a,3}$	<i>E_{c,s} (GPa)</i>	
			(mm)	(mm)	(g)	(m³)	појед.	средња	(kN)	(mm²)	појед.	средња	(MPa)	(MPa)	(‰)	(‰)	појед.	средња
P-9	1	0.55	290.0	150.0	11746	5.1247	2292	2290	852.2	17671	48.2	49.1	-	-	-	-	-	27.8
	2		297.7	150.0	12044	5.2608	2289		883.1	17671	50.0		-	-	-	-	-	
	3		292.8	150.0	11854	5.1742	2291	2290	869.4	17671	49.2	48.5	0.5	16.2	0.0477	0.6126	27.74	
	4		296.1	150.0	11973	5.2325	2288		845.1	17671	47.8		0.5	16.2	0.0489	0.6119	27.83	
P-10	1	0.5	297.1	150.0	12228	5.2502	2329	2330	926.0	17671	52.4	52.6	-	-	-	-	-	29.2
	2		290.6	150.0	11966	5.1353	2330		934.3	17671	52.9		-	-	-	-	-	
	3		296.1	150.0	12173	5.2325	2326	2320	924.2	17671	52.3	52.2	0.5	17.4	0.0332	0.6123	29.18	
	4		292.0	150.0	11988	5.1601	2323		920.2	17671	52.1		0.5	17.4	0.0332	0.6102	29.28	
P-11	1	0.45	296.3	150.0	12347	5.2361	2358	2360	1005.4	17671	56.9	57.1	-	-	-	-	-	30.6
	2		299.1	150.0	12472	5.2855	2360		1013.9	17671	57.4		-	-	-	-	-	
	3		298.0	150.0	12455	5.2661	2365	2370	993.1	17671	56.2	56.6	0.5	18.9	0.0301	0.6311	30.54	
	4		298.5	150.0	12478	5.2749	2366		1006.0	17671	56.9		0.5	18.9	0.0314	0.6309	30.61	
P-12	1	0.4	298.2	150.0	12631	5.2696	2397	2400	1069.5	17671	60.5	60.1	-	-	-	-	-	36.7
	2		299.2	150.0	12674	5.2873	2397		1056.2	17671	59.8		-	-	-	-	-	
	3		298.7	150.0	12610	5.2785	2389	2390	1083.2	17671	61.3	62.0	0.5	20.7	0.0299	0.5787	36.72	
	4		293.2	150.0	12406	5.1813	2394		1106.3	17671	62.6		0.5	20.6	0.0296	0.5785	36.71	

Табела VIII-115 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са додатком 5% дробљене гуме

Ознака бетона	Узорак број	w/c	<i>h</i>	<i>D</i>	<i>m_s</i>	<i>V</i>	<i>D (kg/m³)</i>		<i>F</i>	<i>A_c</i>	<i>f_{c, cyl} (MPa)</i>		σ_a^m	σ_p^m	$\epsilon_{p,2}$	$\epsilon_{a,3}$	<i>E_{c,s} (GPa)</i>	
			(mm)	(mm)	(g)	(m ³)	појед.	средња	(kN)	(mm ²)	појед.	средња	(MPa)	(MPa)	(‰)	(‰)	појед.	средња
P-13	1	0.55	294.9	150.0	12163	5.2113	2334	2340	815.6	17671	46.2	46.3	-	-	-	-	-	27.0
	2		298.9	150.0	12342	5.2820	2337		819.5	17671	46.4		-	-	-	-	-	
	3		295.8	150.0	12159	5.2272	2326	2330	802.3	17671	45.4	44.8	0.5	14.9	0.0838	0.6152	27.16	
	4		296.3	150.0	12243	5.2361	2338		781.3	17671	44.2		0.5	14.9	0.0819	0.6179	26.93	
P-14	1	0.5	294.1	150.0	12177	5.1972	2343	2340	830.8	17671	47.0	47.5	-	-	-	-	-	27.7
	2		297.4	150.0	12310	5.2555	2342		847.8	17671	48.0		-	-	-	-	-	
	3		297.9	150.0	12340	5.2643	2344	2340	855.3	17671	48.4	48.5	0.5	16.2	0.0652	0.6291	27.75	
	4		295.8	150.0	12237	5.2272	2341		857.1	17671	48.5		0.5	16.2	0.0640	0.6308	27.61	
P-15	1	0.45	298.7	150.0	12447	5.2785	2358	2360	941.8	17671	53.3	52.6	-	-	-	-	-	30.2
	2		294.1	150.0	12234	5.1972	2354		918.5	17671	52.0		-	-	-	-	-	
	3		299.1	150.0	12488	5.2855	2363	2360	920.7	17671	52.1	52.3	0.5	17.4	0.0746	0.6335	30.28	
	4		291.5	150.0	12131	5.1512	2355		926.7	17671	52.4		0.5	17.4	0.0748	0.6359	30.16	
P-16	1	0.4	295.1	150.0	12417	5.2148	2381	2380	1072.5	17671	60.7	59.3	-	-	-	-	-	35.3
	2		291.4	150.0	12223	5.1495	2374		1022.5	17671	57.9		-	-	-	-	-	
	3		295.3	150.0	12409	5.2184	2378	2380	1047.9	17671	59.3	59.3	0.5	19.8	0.0318	0.5785	35.25	
	4		291.7	150.0	12294	5.1548	2385		1048.9	17671	59.4		0.5	19.8	0.0311	0.5770	35.31	

Табела VIII-116 - Одређивање статичког модула еластичности – Бетони са додатком 7.5% дробљене гуме

Ознака бетона	Узорак број	w/c	h	D	m_s	V	$D \text{ (kg/m}^3\text{)}$		F	A_c	$f_c, \text{cyl (MPa)}$		σ_a^m	σ_p^m	$\epsilon_{p,2}$	$\epsilon_{a,3}$	$E_{c,s} \text{ (GPa)}$	
			(mm)	(mm)	(g)	(m ³)	појед.	средња	(kN)	(mm ²)	појед.	средња	(MPa)	(MPa)	(‰)	(‰)	појед.	средња
P-17	1	0.55	292.1	150.0	11779	5.1618	2282	2280	770.9	17671	43.6	44.1	-	-	-	-	-	26.8
	2		298.1	150.0	12042	5.2679	2286		788.3	17671	44.6		-	-	-	-	-	
	3		297.6	150.0	11973	5.2590	2277	2280	786.4	17671	44.5	44.4	0.5	14.8	0.0802	0.6152	26.74	
	4		297.7	150.0	12016	5.2608	2284		783.7	17671	44.3		0.5	14.8	0.0795	0.6131	26.81	
P-18	1	0.5	293.4	150.0	11982	5.1848	2311	2310	853.8	17671	48.3	47.5	-	-	-	-	-	27.6
	2		295.7	150.0	12039	5.2255	2304		825.3	17671	46.7		-	-	-	-	-	
	3		296.3	150.0	12069	5.2361	2305	2310	844.7	17671	47.8	48.6	0.5	16.2	0.0616	0.6291	27.64	
	4		295.3	150.0	12100	5.2184	2319		871.3	17671	49.3		0.5	16.2	0.0605	0.6274	27.66	
P-19	1	0.45	291.7	150.0	12088	5.1548	2345	2340	894.5	17671	50.6	51.4	-	-	-	-	-	30.2
	2		294.3	150.0	12166	5.2007	2339		920.7	17671	52.1		-	-	-	-	-	
	3		294.8	150.0	12199	5.2095	2342	2340	913.6	17671	51.7	52.3	0.5	17.4	0.0722	0.6355	30.06	
	4		290.3	150.0	12029	5.1300	2345		934.4	17671	52.9		0.5	17.4	0.0746	0.6332	30.31	
P-20	1	0.4	297.6	150.0	12374	5.2590	2353	2360	1054.8	17671	59.7	58.8	-	-	-	-	-	34.2
	2		299.4	150.0	12488	5.2908	2360		1022.2	17671	57.8		-	-	-	-	-	
	3		292.4	150.0	12133	5.1671	2348	2350	1032.0	17671	58.4	57.8	0.5	19.3	0.0222	0.5710	34.21	
	4		291.3	150.0	12115	5.1477	2353		1011.4	17671	57.2		0.5	19.3	0.0228	0.5728	34.13	

Ознаке у табелама:
 h – висина цилиндра,
 d – пречник цилиндра,
 m_s – маса цилиндра,
 V – запремина цилиндра,

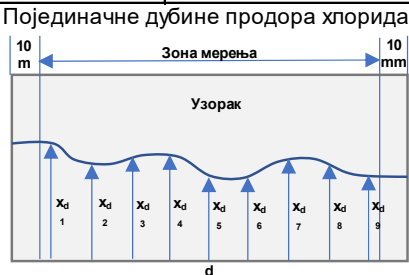
D – Запреминска маса,
 F – највиша забележена вредност силе,
 A_c – површина цилиндра,
 $f_{c, \text{cyl}}$ – чврстоћа при притиску цилиндра,

σ_p^m – почетни напон,
 σ_a^m – крајњи напон,
 $\epsilon_{p,2}$ – почетна деформација,
 $\epsilon_{a,3}$ – крајња деформација,

ПРИЛОГ 17: Одређивање коефицијента миграције хлорида

А. Обични (референтни) бетони

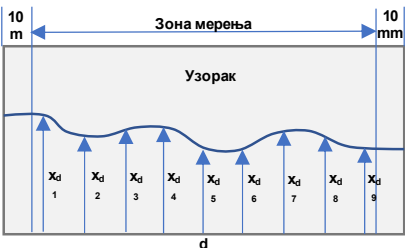
Табела VIII-117 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-1)

Ознака узорка			P-1 / 25				P-1 / 26				P-1 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h^* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.4	50.4	50.5	50.5	50.5	50.4	50.4	50.2	50.6	50.4	50.6
		средња	50.4				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		98.9				99.1				99.0			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	34	41		33	38		36	34			
			xd2	35	40		34	43		33	44			
			xd3	39	39		37	38		38	40			
			xd4	37	37		40	37		38	38			
			xd5	40	35		44	37		45	40			
			xd6	39	35		38	34		36	37			
			xd7	41	37		43	34		42	37			
			xd8	44	31		42	34		44	35			
			xd9	38	29		37	27		40	29			
			Просечна дубина продора хлорида, x_d [±0,5 mm]*			37.5				37.5				38.0
Највећа дубина продора хлорида, $x_{\max}$ [±1 mm]			45.2											
Коефицијент миграције хлорида, M_{nss} [×10-12m²/s] $M_{nss} = (R \cdot T / z F E) \cdot (x_d - \alpha \sqrt{x_d}) / t$	појединачни		17.4				17.4				17.6			
	средњи		17.5											
	највећи		17.6											

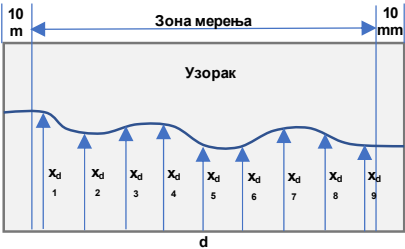
Табела VIII-118 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-2)

Ознака узорка			P-2 / 25				P-2 / 26				P-2 / 27			
Димензије испитних узорка	Висина, h^* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.5	50.6	50.5	50.6	50.6	50.6	50.6	50.2	50.2	50.4	50.6
		средња	50.5				50.6				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.0				98.8				99.1			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	31	32		33		29		32		26	
			xd2	30	30		30		29		28		26	
			xd3	29	29		25		26		29		22	
			xd4	28	30		32		32		32		30	
			xd5	30	30		33		32		33		29	
			xd6	29	30		31		28		30		31	
			xd7	29	31		30		28		33		28	
			xd8	29	29		30		30		26		32	
			xd9	30	30		32		28		32		25	
Просечна дубина продора хлорида, x_d [±0,5 mm]*			30.0				30.0				29.0			
Највећа дубина продора хлорида, $x_{\max}$ [±1 mm]			33.2											
Коефицијент миграције хлорида, M_{nss} [×10-12m²/s] $M_{nss} = (R \cdot T / z F E) \cdot (x_d - \alpha \sqrt{x_d}) / t$		појединачни	13.8				13.8				13.3			
		средњи	13.6											
		највећи	13.8											

Табела VIII-119 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-3)

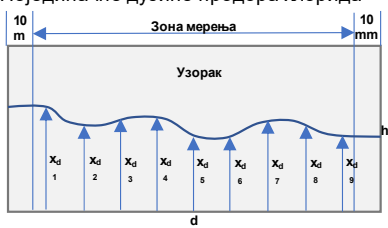
Ознака узорка			P-3 / 25				P-3 / 26				P-3 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h^* [±0,1 mm]	појединачна	50.6	50.5	50.5	50.6	50.5	50.4	50.4	50.4	50.6	50.6	50.6	50.6
		средња	50.6				50.4				50.6			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				98.9				98.8			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	10	34		10	33		7	32			
			xd2	26	33		30	33		30	32			
			xd3	30	30		30	31		29	33			
			xd4	31	30		29	28		27	31			
			xd5	32	29		32	29		33	26			
			xd6	31	29		31	32		29	34			
			xd7	31	28		35	30		32	28			
			xd8	33	19		35	20		32	21			
			xd9	32	5		34	6		31	6			
			Просечна дубина продора хлорида, x_d [±0,5 mm]*			27.5				28.0				27.5
Највећа дубина продора хлорида, x_{max} [±1 mm]			34.9											
Коефицијент миграције хлорида, M_{nss} [×10-12m²/s] $M_{nss}=(R \cdot T / z F \cdot E) \cdot (x_d - \alpha \sqrt{x_d}) / t$		појединачни	12.6				12.9				12.6			
		средњи	12.7											
		највећи	12.9											

Табела VIII-120 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Обичан (референтни) бетон (P-4)

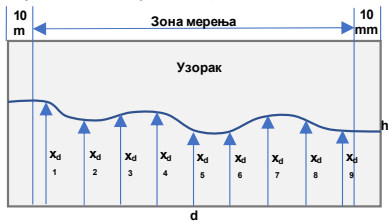
Ознака узорка			P-4 / 25				P-4 / 26				P-4 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h^* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.5	50.5	50.6	50.4	50.4	50.6	50.5	50.6	50.4	50.3	50.2
		средња	50.5				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.0				98.8				99.1			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	24	15		24		18		22		18	
			xd2	23	26		23		24		24		21	
			xd3	26	27		24		25		27		27	
			xd4	29	28		29		29		29		30	
			xd5	28	29		26		31		22		34	
			xd6	26	31		29		29		28		30	
			xd7	28	26		31		24		27		25	
			xd8	26	24		26		21		23		20	
			xd9	16	24		17		21		16		24	
			Просечна дубина продора хлорида, x_d [±0,5 mm]*			25.5				25.0				25.0
Највећа дубина продора хлорида, x_{max} [±1 mm]			33.9											
Коефицијент миграције хлорида, M_{nss} [×10-12m²/s] $M_{nss}=(R \cdot T/z F \cdot E) \cdot (x_d-\alpha \sqrt{x_d})/t$		појединачни	11.7				11.5				11.5			
		средњи	11.5											
		највећи	11.7											

В. Бетони са хемијским додатком аеранта

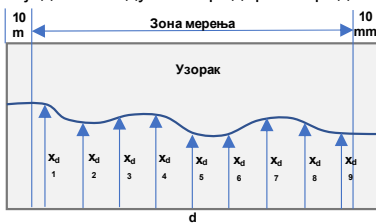
Табела VIII-121 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-5)

Ознака узорка			P-5 / 25				P-5 / 26				P-5 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.5	50.4	50.5	50.5	50.4	50.4	50.6	50.6	50.2	50.5	50.6	50.5
		средња	50.5				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		98.9				99.0				98.8			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	41		37		40		38		42		34
			xd2	45		35		44		33		47		30
			xd3	43		38		41		39		38		38
			xd4	39		37		36		36		35		33
			xd5	36		36		32		38		32		41
			xd6	34		33		32		33		35		37
			xd7	38		41		41		43		45		42
			xd8	37		49		36		53		34		56
			xd9	36		39		38		36		41		33
			Просечна дубина продора хлорида, xd [±0,5 mm]*			38.5				38.0				38.5
Највећа дубина продора хлорида, xmax [±1 mm]							56.0							
Коефицијент миграције хлорида, Mnss [×10-12m²/s] Mnss=(R·T/z·F·E)·(xd-α√xd)/t		појединачни	18.0				17.8				18.0			
		средњи	18.0											
		највећи	18.0											

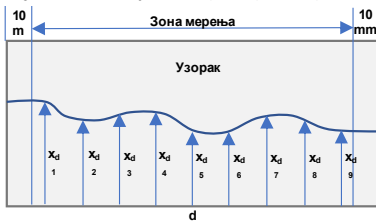
Табела VIII-122 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-6)

Ознака узорка			P-6 / 25				P-6 / 26				P-6 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.5	50.5	50.4	50.4	50.4	50.4	50.5	50.5	50.5	50.5	50.2	50.3
		средња	50.4				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.0				98.8				99.1			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	27	36		24		40		23		36	
			xd2	30	40		33		37		35		36	
			xd3	32	37		30		39		27		40	
			xd4	35	39		33		36		33		37	
			xd5	37	38		37		41		36		40	
			xd6	38	36		39		38		40		35	
			xd7	39	30		42		30		44		31	
			xd8	38	30		36		29		35		28	
			xd9	39	25		40		26		36		26	
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			35.0				35.0				34.5
Највећа дубина продора хлорида, x _{max} [±1 mm]			44.0											
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [×10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/zF·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	19.4				19.5				19.1			
		средњи	19.3											
		највећи	19.5											

Табела VIII-123 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-7)

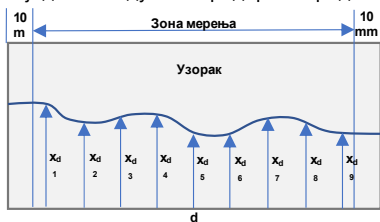
Ознака узорка			P-7 / 25				P-7 / 26				P-7 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.6	50.5	50.5	50.5	50.5	50.6	50.4	50.4	50.3	50.5	50.3	50.4
		средња	50.5				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				98.9				98.9			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	15	32		18		31		15		32	
			xd2	19	31		18		34		15		31	
			xd3	25	31		29		32		29		32	
			xd4	31	33		26		30		22		28	
			xd5	29	32		32		33		32		32	
			xd6	30	33		30		37		34		34	
			xd7	31	29		26		29		29		29	
			xd8	29	21		30		25		32		28	
			xd9	29	17		28		14		28		14	
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			27.5				28.0				27.5
Највећа дубина продора хлорида, x _{max} [±1 mm]			36.6											
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [×10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/z·F·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	12.7				12.9				12.7			
		средњи	12.8											
		највећи	12.9											

Табела VIII-124 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са хемијским додатком аеранта (P-8)

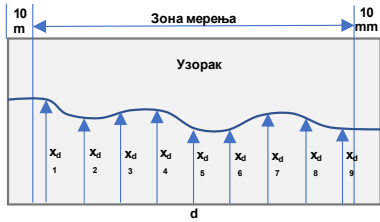
Ознака узорка			P-8 / 25				P-8 / 26				P-8 / 27			
Димензије испитних узорка	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.4	50.4	50.4	50.5	50.4	50.5	50.4	50.6	50.3	50.4	50.6
		средња	50.4				50.5				50.5			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				98.8				98.8			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	2	5		4		9		8		5	
			xd2	4	4		0		4		5		3	
			xd3	4	1		1		2		4		5	
			xd4	4	1		6		2		6		8	
			xd5	2	8		7		8		5		5	
			xd6	3	4		2		9		13		1	
			xd7	3	3		0		4		7		6	
			xd8	2	4		0		7		4		7	
			xd9	0	5		3		3		4		3	
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			3.5				4.0				5.5
Највећа дубина продора хлорида, x _{тах} [±1 mm]			12.7											
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [x10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/z·F·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	0.8				0.9				1.3			
		средњи	1.0											
		највећи	1.3											

С. Бетони са додатком 2.5% дробљене гуме

Табела VIII-125 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-9)

Ознака узорка			P-9 / 25				P-9 / 26				P-9 / 27			
Димензије испитних узорка	Висина, h^* [$\pm 0,1$ mm]	појединачна	50.6	50.5	50.4	50.6	50.4	50.4	50.5	50.5	50.4	50.4	50.4	50.5
		средња	50.5				50.5				50.4			
	Пречник, d [$\pm 0,1$ mm]	99.1				98.9				98.8				
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	38		33	38		33		33		38	
			xd2	38		38	38		38		38		38	
			xd3	36		39	36		39		39		36	
			xd4	32		38	32		38		38		32	
			xd5	36		39	36		39		39		36	
			xd6	36		35	36		35		35		36	
			xd7	35		36	35		36		36		35	
			xd8	32		35	32		35		35		32	
			xd9	33		35	33		35		35		33	
			Просечна дубина продора хлорида, x_d [$\pm 0,5$ mm]*			36.0				36.0				36.0
Највећа дубина продора хлорида, x_{max} [± 1 mm]							39.1							
Коефицијент миграције хлорида, M_{nss} [$\times 10^{-12} m^2/s$] $M_{nss} = (R \cdot T / z \cdot F \cdot E) \cdot (x_d - \alpha \sqrt{x_d}) / t$		појединачни	20.4				20.3				20.3			
		средњи	20.3											
		највећи	20.4											

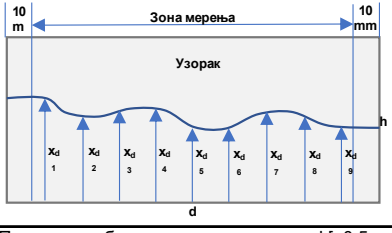
Табела VIII-126. Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-10)

Ознака узорка			P-10 / 25				P-10 / 26				P-10 / 27			
Димензије испитних узорка	Висина, h*	појединачна	50.4	50.4	50.4	50.4	50.4	50.4	50.5	50.6	50.2	50.3	50.3	50.6
	[±0,1 mm]	средња	50.4				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		98.9				99.1				98.8			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	32		33		32		33		33		32
			xd2	32		35		32		35		35		32
			xd3	30		32		30		32		33		30
			xd4	31		35		31		35		36		31
			xd5	36		37		36		37		37		36
			xd6	35		35		35		35		34		35
			xd7	36		30		36		30		29		36
			xd8	32		38		32		38		38		32
			xd9	33		33		33		33		33		33
			Просечна дубина продора хлорида, xd [±0,5 mm]*			33.5				33.5				33.5
Највећа дубина продора хлорида, xmax [±1 mm]							38.3							
Коефицијент миграције хлорида, Mnss [×10-12m²/s] Mnss=(R·T/zF·E)·(xd-α√xd)/t		појединачни	18.6				18.6				18.5			
		средњи					18.6							
		највећи					18.6							

Табела VIII-127 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-11)

Ознака узорка			P-11 / 25				P-11 / 26				P-11 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.6	50.5	50.6	50.6	50.4	50.4	50.5	50.6	50.4	50.3	50.6	50.5
		средња	50.6				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				99.0				98.9			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	18	32		19		33		34		16	
			xd2	25	31		23		32		30		26	
			xd3	29	33		28		34		35		29	
			xd4	30	30		28		32		34		30	
			xd5	30	32		28		33		31		29	
			xd6	32	33		32		32		31		34	
			xd7	32	28		33		27		26		32	
			xd8	33	20		31		20		19		34	
			xd9	32	15		31		16		17		34	
			Просечна дубина продора хлорида, xd [±0,5 mm]*			28.5				28.5				29.0
Највећа дубина продора хлорида, xmax [±1 mm]			35.2											
Коефицијент миграције хлорида, Mnss [x10-12m²/s] Mnss=(R·T/z·F·E)·(xd-α√xd)/t		појединачни	16.0				15.9				16.2			
		средњи	16.0											
		највећи	16.2											

Табела VIII-128 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 2.5% дробљене гуме (P-12)

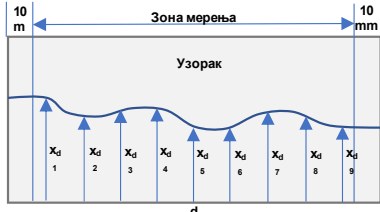
Ознака узорка			P-12 / 25				P-12 / 26				P-12 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.4	50.4	50.6	50.5	50.5	50.5	50.6	50.4	50.5	50.3	50.6
		средња	50.5				50.5				50.5			
	Пречник, d [±0,1 mm]		98.9				98.9				98.9			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	24	27		22	29		27	25			
			xd2	28	30		29	31		31	28			
			xd3	26	27		25	27		29	28			
			xd4	28	26		27	24		26	30			
			xd5	30	29		29	31		29	29			
			xd6	24	31		22	33		34	23			
			xd7	25	29		27	29		29	24			
			xd8	26	29		28	28		26	26			
			xd9	26	30		25	31		29	25			
			Просечна дубина продора хлорида, xd [±0,5 mm]*			27.5				27.5				27.5
Највећа дубина продора хлорида, xmax [±1 mm]			33.9											
Коефицијент миграције хлорида, Mnss [x10-12m²/s] Mnss=(R·T/z·F·E)·(xd-α√xd)/t		појединачни	12.7				12.7				12.7			
		средњи	12.7											
		највећи	12.7											

D. Бетони са додатком 5% дробљене гуме

Табела VIII-129 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-13)

Ознака узорка			P-13 / 25				P-13 / 26				P-13 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.6	50.6	50.5	50.6	50.6	50.4	50.6	50.2	50.6	50.2	50.5
		средња	50.5				50.6				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				99.1				99.1			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	31		32		33		30		29		33
			xd2	34		34		35		35		34		34
			xd3	35		36		36		38		39		34
			xd4	33		35		31		36		34		33
			xd5	34		39		36		41		41		33
			xd6	38		36		37		38		36		38
			xd7	40		37		41		36		38		41
			xd8	39		35		41		36		34		40
			xd9	40		33		40		35		37		41
			Просечна дубина продора хлорида, xd [±0,5 mm]*			35.5				36.5				36.0
Највећа дубина продора хлорида, xmax [±1 mm]							41.3							
Коефицијент миграције хлорида, Mnss [×10-12m²/s] Mnss=(R·T/zF·E)·(xd-α√xd)/t		појединачни	19.9				20.4				20.1			
		средњи	20.2											
		највећи	20.4											

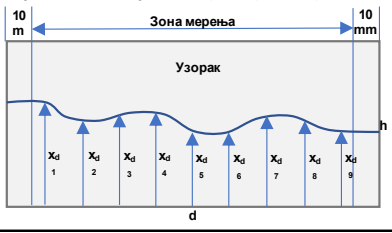
Табела VIII-130 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-14)

Ознака узорка			P-14 / 25				P-14 / 26				P-14 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.5	50.5	50.4	50.6	50.6	50.4	50.6	50.6	50.3	50.3	50.2	50.2
		средња	50.5				50.6				50.2			
	Пречник, d [±0,1 mm]		98.9				99.1				99.2			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	2		31	3		29		30		0	
			xd2	33		31	33		29		28		32	
			xd3	36		32	36		33		32		34	
			xd4	32		31	31		29		29		30	
			xd5	30		33	30		31		31		31	
			xd6	31		33	29		34		36		29	
			xd7	32		33	34		31		30		30	
			xd8	30		31	28		31		29		30	
			xd9	29		28	30		29		27		28	
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			30.0				29.5				28.5
Највећа дубина продора хлорида, x _{max} [±1 mm]							36.0							
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [×10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/zF·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	14.0				13.8				13.2			
		средњи					13.7							
		највећи					14.0							

Табела VIII-131 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-15)

Ознака узорка			P-15 / 25				P-15 / 26				P-15 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h*	појединачна	50.4	50.6	50.4	50.6	50.4	50.5	50.5	50.5	50.3	50.5	50.5	50.4
	[±0,1 mm]	средња	50.5				50.5				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		98.9				98.9				98.8			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	32	6		31	6		7	31			
			xd2	30	21		28	19		18	32			
			xd3	29	24		29	22		23	28			
			xd4	28	27		28	28		29	30			
			xd5	27	30		29	32		35	26			
			xd6	24	33		26	31		33	24			
			xd7	21	30		19	28		28	20			
			xd8	17	30		19	29		31	16			
			xd9	6	29		6	31		32	5			
			Просечна дубина продора хлорида, xd [±0,5 mm]*			24.5				24.5				25.0
Највећа дубина продора хлорида, xmax [±1 mm]			34.6											
Коефицијент миграције хлорида, Mnss [x10-12m²/s] Mnss=(R·T/z·F·E)·(xd-α√xd)/t		појединачни	11.3				11.3				11.6			
		средњи	11.4											
		највећи	11.6											

Табела VIII-132 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 5% дробљене гуме (P-16)

Ознака узорка			P-16 / 25				P-16 / 26				P-16 / 27				
Димензије испитних узорка	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.5	50.4	50.4	50.5	50.6	50.6	50.6	50.4	50.4	50.3	50.6	50.5	
		средња	50.5				50.6				50.5				
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				98.8				99.0				
Појединачне дубине продора хлорида															
			xd1	12		11		13		12		12		12	
			xd2	15		10		17		9		8		17	
			xd3	16		11		15		12		10		15	
			xd4	11		12		10		11		9		9	
			xd5	14		14		12		16		15		14	
			xd6	15		12		16		13		12		17	
			xd7	19		12		20		14		16		19	
			xd8	12		10		13		11		9		10	
			xd9	13		11		14		9		7		11	
Просечна дубина продора хлорида, xd [±0,5 mm]*			13.0				13.0				12.5				
Највећа дубина продора хлорида, xmax [±1 mm]			19.0												
Коефицијент миграције хлорида, Mnss [x10-12m²/s] Mnss=(R·T/z·F·E)·(xd-α√xd)/t		појединачни	5.8				5.5				5.5				
		средњи	5.6												
		највећи	5.8												

Е. Бетони са додатком 7.5% дробљене гуме

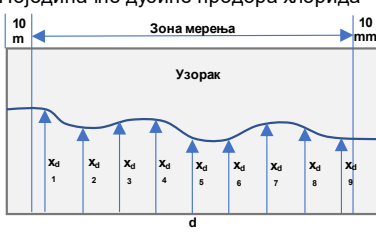
Табела VIII-133 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-17)

Ознака узорка			P-17 / 25				P-17 / 26				P-17 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h*	појединачна	50.4	50.4	50.5	50.6	50.5	50.5	50.4	50.4	50.3	50.6	50.2	50.6
	[±0,1 mm]	средња	50.5				50.4				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]	99.0				98.9				99.0				
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	29	20		30		18		17		31	
			xd2	27	23		25		23		22		26	
			xd3	26	25		25		26		25		28	
			xd4	25	25		23		27		25		25	
			xd5	24	24		23		23		24		24	
			xd6	22	23		20		22		21		22	
			xd7	25	23		27		22		21		27	
			xd8	27	26		28		27		27		25	
			xd9	29	28		28		26		26		31	
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			25.0				24.5				25.0
Највећа дубина продора хлорида, x _{max} [±1 mm]			31.3											
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [×10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/zF·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	11.5				11.2				11.4			
		средњи	11.4											
		највећи	11.5											

Табела VIII-134 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-18)

Ознака узорка			P-18 / 25				P-18 / 26				P-18 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h*	појединачна	50.4	50.6	50.4	50.4	50.6	50.6	50.5	50.6	50.2	50.6	50.6	50.2
	[±0,1 mm]	средња	50.4				50.6				50.4			
	Пречник, d [±0,1 mm]		98.9				98.9				99.1			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	20	18		18		20		20		18	
			xd2	21	25		21		27		28		19	
			xd3	22	19		20		21		20		24	
			xd4	23	20		22		22		24		22	
			xd5	24	23		25		22		21		26	
			xd6	19	21		21		23		23		18	
			xd7	20	20		20		19		21		18	
			xd8	23	21		24		23		23		25	
			xd9	18	21		17		22		22		17	
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			21.0				21.5				21.5
Највећа дубина продора хлорида, x _{max} [±1 mm]							28.3							
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [x10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/z·F·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	4.8				4.9				4.9			
		средњи					4.8							
		највећи					4.9							

Табела VIII-135 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-19)

Ознака узорка			P-19 / 25				P-19 / 26				P-19 / 27			
Димензије испитних узорка	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.6	50.6	50.4	50.5	50.5	50.4	50.6	50.6	50.4	50.4	50.4
		средња	50.5				50.5				50.5			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				98.9				98.8			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	10		19	10		17	16		9		
			xd2	16		15	14		17	17		16		
			xd3	23		17	23		15	16		21		
			xd4	24		16	23		16	13		24		
			xd5	18		16	17		15	13		16		
			xd6	15		20	14		18	16		17		
			xd7	18		15	17		17	15		16		
			xd8	19		12	19		11	10		17		
			xd9	19		7	17		7	8		18		
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			16.5				16.0				15.5
Највећа дубина продора хлорида, x _{max} [±1 mm]			24.2											
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [×10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/z·F·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	3.7				3.6				3.5			
		средњи	3.6											
		највећи	3.7											

Табела VIII-136 - Одређивање коефицијента миграције хлорида - Бетон са додатком 7.5% дробљене гуме (P-20)

Ознака узорка			P-20 / 25				P-20 / 26				P-20 / 27			
Димензије испитних узорака	Висина, h* [±0,1 mm]	појединачна	50.4	50.6	50.5	50.4	50.5	50.6	50.6	50.5	50.6	50.3	50.5	50.4
		средња	50.5				50.6				50.5			
	Пречник, d [±0,1 mm]		99.1				98.9				99.0			
Појединачне дубине продора хлорида			xd1	5		4	5		4	3		4		
			xd2	5		3	7		2	2		4		
			xd3	5		4	5		3	3		4		
			xd4	5		4	3		6	7		7		
			xd5	3		5	1		3	4		3		
			xd6	4		7	6		8	6		3		
			xd7	3		6	2		5	7		1		
			xd8	5		7	4		8	9		3		
			xd9	4		5	4		5	4		4		
			Просечна дубина продора хлорида, x _d [±0,5 mm]*			4.5				4.5				4.5
Највећа дубина продора хлорида, x _{тах} [±1 mm]			8.8											
Коефицијент миграције хлорида, M _{nss} [x10-12m²/s] M _{nss} =(R·T/z·F·E)·(x _d -α√x _d)/t		појединачни	1.8				1.8				1.8			
		средњи	1.8											
		највећи	1.8											

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Утицај дробљене рециклиране гуме на отпорност бетона на дејство мраза.
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Институт ИМС ад – Београд, Централна лабораторија за испитивање материјала, б) - в) -
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање је реализовано у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Грађевинарство, у оквиру докторских академских студија на Факултету техничких наука у Новом Саду, Универзитета у Новом Саду.
1. Опис података
1.1 Врста студије <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> <u>Doktorska disertacija</u> 1.2 Врсте података а) квантитативни б) квалитативни 1.3. Начин прикупљања података а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту <u>Литературни извори</u> ж) мапа, навести врсту _____ з) остало: описати <u>Лабораторијска експериментална истраживања</u>

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека .xlsx
- b) SPSS фајл, датотека _____
- c) PDF фајл, датотека .pdf
- d) Текст фајл, датотека .doc, .docx
- e) JPG фајл, датотека .jpg, .tiff, .png
- f) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли велики број
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) велики број

1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је _____
- б) варијабле које се више пута мере односе се на _____
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

- a) Да
- б) Не

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени

а) експеримент, навести тип Експериментално испитивање утицаја дробљене гуме на својства свежег и очврслог бетона, физичко-механичка својстава и трајности бетона.

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип Анализа доступне литературе из области интраживања.

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Дигитална хидраулична преса са опсегом до 3000 kN, произвођача UTEST, Турска, тип UTEST – UTC 4880, фабрички бр. 17/001379, CONTROLS, Italy, тип C 6652, фабрички бр. 12013161, дигитална вага, опсега до 60 kg/1g, произвођача Radwag из Пољске, тип WLC 60/C2/K, дигитална вага опсега до 20 kg/0.1g, произвођача Radwag из Пољске, тип WLC 20/A2, дигитална вага, опсега до 15 kg/1g, произвођача Керн из Немачке, тип FBK 15K1A WC0705485, дигитална вага, опсега до 2100g/0.01g, произвођача Керн из Немачке, тип PLJ 2100-2NM WL090255, дигитално мерило дужине до 300 mm/0.01 mm, произвођача MIB из Немачке, бр. Gx07072600, дигитално мерило дужине до 150 mm/0.01 mm, произвођача MIB из Немачке, бр. Gx17033622, дигитални микроскоп за карактеризацију ваздушних Rapid Air 457, произвођача Germann Instruments из Немачке, Уређај за аплицирање напона са ћелијама за испитивање бетона на продор хлорида, напон од 5 до 60 V, произвођач Proove it, Germann Instruments, фабрички бр. 11362, Хладњача за бетон , запремине 2 m³, температурног опсега од -25°C до +25°C, произвођач ВЕС-ЕЛЕКТРО, Сопот, клима кабинет комора за замрзавање и одмрзавање Schleibinger Gerate из Немачке, температурног опсега од -25°C до +95°C, Уређај за одређивање брзине проласка ултразвучног таласа са сондама од 55 kHz, произвођача Impact Test Equipment – Енглеска, уређај за испитивање продирања воде под притиском до 10 bara, произвођача Controls, Италија, фабрички бр. 19001749 и 19004895, индуктивни претварач (екстензометар) је осетљивости 0.02 (μm), са напајањем од 10 (V), и са максималним ходом од ±1.5 (mm), произвођача Controls из Италије и деформетар тачности 0.001 mm, произвођача Käfer из Немачке.

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података Да **Не**

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података Описати

У овом раду представљени подаци потичу из различитих експерименталних испитивања. Њихов квалитет је осигуран избором адекватног броја узорака, што омогућава примену статистичких метода приликом обраде резултата. Поступак испитивања је утврђен важећим стандардима, техничким прописима или релевантном стручном литературом. Верификација добијених података извршена је анализом и поређењем резултата експерименталних мерења са подацима из претходних истраживања у овој области.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу

Контрола уноса података је подразумевала физичку проверу, што је био задатак докторанда. Анализа уноса података је такође била задатак докторанда, али је праћена и усмеравања од стране ментора рада.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а) Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) Не

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром Да **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача Да **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. а друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално – без прераде

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Marko Stojanović, marko.stojanovic@institutims.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Marko Stojanović, marko.stojanovic@institutims.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Marko Stojanović, marko.stojanovic@institutims.rs