



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



**Vesna Bulatović**

**SULFATNA OTPORNOST BETONA NA  
BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Novi Sad, 2017.**





УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Штампана грађа
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	Весна Булатовић
Ментор, <b>МН:</b>	Проф. др Мирјана Малешев Проф. др Мирослава Радека
Наслов рада, <b>НР:</b>	Сулфатна отпорност бетона на бази рециклираног агрегата
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски/Енглески
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2017.
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, 21000, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	12/448/206 /78/140/0/18
Научна област, <b>НО:</b>	Грађевинско инжењерство
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Теорија и технологија бетона
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Сулфатна отпорност, рециклирани агрегат од бетона, чврстоћа при притиску, експанзија, капиларно упијање, порозност, SEM, XRD, FTIR
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека ФТН
Важна напомена, <b>ВН:</b>	-
Извод, <b>ИЗ:</b>	У дисертацији су приказани резултати сопственог експерименталног истраживања сулфатне отпорности бетона са рециклираним агрегатом. Истраживање је засновано на компаративној анализи две групе бетона које се разликују у крупном агрегату, а у оквиру којих су варирани две врсте цемента и два водоцементна фактора. Сулфатна отпорност је проверавана након 3 и 6 месеци боравка у 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> и у 5% MgSO <sub>4</sub> . На очврслом бетону испитивани су капиларно упијање воде, промена дужине узорака, чврстоћа при притиску и урађене су микроструктурне анализе: MIP, SEM, BSE/EDS, XRD и FTIR. Истакнуто је да се применом крупног агрегата од рециклираног бетона и везива одговарајућег минералношког састава могу добити конструкцијски бетони, односно бетони са задовољавајућим механичким карактеристикама, али и са задовољавајућом трајношћу са аспекта сулфатне корозије.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	
Датум одбране, <b>ДО:</b>	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: др Властимир Радоњанин, ред. проф. Члан: др Гордана Топличкић-Ђурчић, ванред. проф. Члан: др Зоран Грдић, ред. проф. Члан, ментор: др Мирјана Малешев, ред. проф. Члан, ментор: др Мирослава Радека, ред. проф.
	Потпис ментора





## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Doctoral dissertation
Author, <b>AU</b> :	Vesna Bulatović
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. dr Mirjana Malešev Prof. dr Miroslava Radeka
Title, <b>TI</b> :	Sulfate resistance of concrete with recycled aggregate concrete
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian / English
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2017
Publisher, <b>PB</b> :	Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, 21000, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	12/448/206 /78/140/0/18
Scientific field, <b>SF</b> :	Civil Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Theory and technology of concrete
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Sulfate resistance, recycled concrete aggregate compressive strength, expansion, capillary adsorption, porosity, SEM, XRD, FTIR
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	This paper presents the experimental research results of the sulphate resistance of concrete with recycled aggregate. The research is based on a comparative analysis of two groups of concrete that differ in coarse aggregate types. Within these two concrete groups, two types of cement of the same class and two water/cement ratios have been varied. Sulphate resistance was examined after 3 and 6 months of immersion in 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> and 5% MgSO <sub>4</sub> . Capillary water absorption, sample length change and compressive strength were studied in hardened concrete and the following microstructural analyzes were performed: MIP, SEM, BSE/EDS, XRD and FTIR. It has been found that structural concrete with appropriate mechanical properties as well as with satisfactory durability from the aspect of sulphate corrosion can be obtained by combination of a coarse recycled concrete aggregate and a binder of an appropriate mineralogical composition.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: dr Vlastimir Radonjanin, full professor
	Member: dr Gordana Topličić Čurčin, associate professor
	Member: dr Zoran Grdić, full professor
	Member, Mentor: dr Mirjana Malešev, full professor
	Member, Mentor: dr Miroslava Radeka, full professor
	Mentor's sign









## REZIME

U radu je analizirana trajnost konstrukcijskih betona sa agregatom koji je dobijen usitnjavanjem starog betona sa posebnim akcentom na njihovu sulfatnu otpornost. U teorijsko-istraživačkom delu analizirani su mehanizmi sulfatne korozije betona. Dat je pregled i analiza aktuelnih istraživanja iz oblasti delovanja različitih sulfatnih rastvora na paste, maltere i betone, na osnovu koga je formirana baza podataka pomoću koje je definisan program sopstvenog eksperimentalnog istraživanja. Istraživanje sulfatne otpornosti betona sa recikliranim agregatom je zasnovano na komparativnoj analizi dve grupe betona koje se razlikuju u krupnom agregatu (rečni agregat i agregat dobijen usitnjavanjem "starog" betona), a u okviru kojih su varirani dve vrste cementa (CEM I i CEM III) i dva vodocementna faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ). Na taj način je dobijeno osam različitih betonskih mešavina, čija sulfatna otpornost je proveravana nakon 3 i 6 meseci boravka u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i u 5%  $\text{MgSO}_4$ . Na očvrslom betonu ispitivani su kapilarno upijanje vode, promena dužine uzoraka, čvrstoća pri pritisku i urađene su mikrostrukturne analize: MIP, SEM, BSE/EDS, XRD i FTIR. Sva navedena svojstva su merena pre početka izlaganja i nakon 3 i 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima. Ukupan broj uzoraka koji je ispitan iznosi 552, a za njihovu izradu je upotrebljeno cca  $1,0\text{m}^3$  betona. Analiza sulfatne otpornosti je urađena najpre u okviru betona spravljenih sa istom vrstom krupnog agregata, a zatim je izvršena i komparativna analiza betona sa rečnim i recikliranim krupnim agregatom. Definisan je uticaj vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora na promenu svojstava odabranih za ocenu sulfatne otpornosti i ocenjena je sulfatna otpornost ispitivanih vrsta betona. Za ocenu sulfatne otpornosti odabrane su promena čvrstoće pri pritisku i kriterijum koji je predložio Mehta i, ekspanzija uzoraka i kriterijum koji su predložili Miller i Manson. Identifikovane su i protumačene promene u strukturi betona i mineraloškom sastavu cementnog kamena do kojih dolazi usled dejstva sulfata, analizom rezultata dobijenih pomoću SEM, BSE/EDS, XRD i FTIR metoda. Na osnovu komparativne analize zaključeno je da vrsta agregata ima uticaja na sulfatnu otpornost, ali da je dominantniji uticaj vrste cementa. Betoni spravljeni sa CEM III imaju zadovoljavajuću sulfatnu otpornost za obe vrednosti  $w/c$ , obe vrste agregata i u oba sulfatna rastvora, tako da je zaključeno da se sulfatna otpornost postiže izborom ove vrste cementa. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa CEM I zavisi od vrednosti  $w/c$ , od vrste agregata ali i od vrste sulfatnog rastvora. Beton sa CEM I, recikliranim agregatom i višim  $w/c$  je osetljiviji na dejstvo rastvora natrijum sulfata i nema zadovoljavajuću otpornost nakon 6 meseci delovanja predmetnog rastvora. Da bi se postigli sulfatno-otporni betoni sa recikliranim agregatom i CEM I, mora se usvajati niži  $w/c$ . Na kraju rada je istaknuto da se primenom krupnog agregata od recikliranog betona i veziva odgovarajućeg mineraloškog sastava mogu dobiti konstrukcijski betoni, odnosno betoni sa zadovoljavajućim mehaničkim karakteristikama, ali i sa zadovoljavajućom trajnošću sa aspekta sulfatne korozije.

**Ključne reči:** beton, reciklirani agregat, sulfatna korozija, čvrstoća pri pritisku, ekspanzija.

## ABSTRACT

The paper analyzes the durability of structural concrete with aggregate obtained by grinding old concrete with a special emphasis on its sulphate resistance. In the theoretical research part, the mechanisms of concrete sulphate corrosion have been analyzed. An overview and the analysis of current research of the effect of various sulphate solutions on pastes, mortars and concretes have been provided here. This overview has helped the formation of a database which has enabled the program of experimental research to be defined. The investigation of sulphate resistance of concrete with recycled aggregate is based on a comparative analysis of two groups of concrete that differ in coarse aggregate (river aggregate and aggregate obtained by grinding the "old" concrete), in which two types of cement (CEM I and CEM III) and two water/cement ratios ( $w/c=0,55$  and  $w/c=0,38$ ) have been varied. In this way, eight different concrete mixtures were obtained, and their respective sulphate resistance was examined after the samples were immersed in 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and 5%  $\text{MgSO}_4$  for 3 and 6 months. Capillary water absorption, sample length change and compressive strength were studied in hardened concrete and the following microstructural analyzes were performed: MIP, SEM, BSE / EDS, XRD and FTIR. All of these properties were measured before the exposure and after 3 and 6 months of exposure to sulphate solutions. The total number of samples tested is 552, and about  $1,0\text{m}^3$  of concrete has been used for their production. The analysis of sulphate resistance was first carried out on the concretes with the same type of coarse aggregate, and then the comparative analysis of concretes with river and recycled coarse aggregate was performed. The influence of the type of cement, water/cement ratio and the type of sulphate solution on the change of properties selected for the assessment of sulphate resistance has been determined and the sulphate resistance of the tested concrete types has been estimated. For the evaluation of the sulphate resistance, the change in compressive strength was chosen and the criterion proposed by Mehta, as well as the expansion of the samples and the criteria proposed by Miller and Manson. The changes in the structure of concrete and the mineralogical composition of hardened cement paste, which were caused by sulfate attack, have been analyzed and interpreted by studying the results obtained by SEM, BSE / EDS, XRD and FTIR methods. Based on the comparative analysis, it has been concluded that the type of aggregate has an influence on sulphate resistance, but the influence of the cement type is more dominant. The concretes prepared with CEM III have satisfactory sulphate resistance for both  $w/c$  values, both types of aggregates, and in both sulphate solutions. Therefore, it is concluded that sulphate resistance is achieved by choosing this type of cement. The sulphate resistance of concretes prepared with CEM I depends on  $w/c$  values, the type of aggregate, and the type of sulphate solution. Concrete with CEM I, recycled concrete aggregate and higher  $w/c$  is more sensitive to the attack of sodium sulphate solution and it has no satisfactory resistance after 6 months of immersion in this solution. In order to achieve sulphate-resistant concrete with recycled aggregate and CEM I, a lower  $w/c$  must be chosen. At the end of the paper, it has been pointed out that with the application of the coarse aggregate from the recycled concrete and a binder of an appropriate mineralogical composition, structural concretes can be obtained, i.e. concretes with satisfactory mechanical characteristics, as well as with satisfactory durability from the aspect of sulphate corrosion.

**Key words:** concrete, recycled aggregate, sulphate corrosion, compressive strength, expansion.

# SADRŽAJ

<b>I UVOD.....</b>	<b>1</b>
1. Uvod.....	3
2. Potreba za istraživanjem .....	3
3. Predmet, cilj i metodologija istraživanja .....	4
4. Primenljivost rezultata istraživanja .....	6
5. Kratak prikaz sadržaja rada.....	7
<b>II TRAJNOST BETONA I POROZNOST CEMENTNOG KAMENA.....</b>	<b>9</b>
1. Uvod.....	11
2. Poroznost.....	13
2.1. Propustljivost betona.....	14
2.2. Vrste pora .....	16
3. Tehnike za proučavanje strukture pora.....	20
3.1. Živin porozimetar.....	20
<b>III PORTLAND CEMENT I CEMENTI SA DODATKOM ZGURE .....</b>	<b>25</b>
1. Uvod.....	27
2. Proces hidratacije portland cementa .....	29
3. Sulfatno otporni cementi prema EN 197-1.....	37
<b>IV AGREGAT OD RECIKLIRANOG BETONA I TRANZITNA ZONA.....</b>	<b>39</b>
1. Reciklirani agregat .....	41
2. Tranzitna zona .....	46
<b>V MIKROSTRUKTURA I FAZNI SASTAV CEMENTNOG KAMENA .....</b>	<b>49</b>
1. Skening elektronska mikroskopija .....	51
2. Karakteristični x-zraci i hemijska analiza .....	56
3. Analiza produkata hidratacije – upotreba dijagrama sa prikazom relativnih atomskih odnosa .....	57
4. Rendgenska difrakcija (X-Ray Diffraction, XRD).....	58
5. Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom - FTIR.....	60
<b>VI MEHANIZMI SULFATNE KOROZIJE BETONA .....</b>	<b>63</b>
1. Uvod.....	65
2. Produkti delovanja sulfata .....	68
2.1. Etringit.....	68
2.2. Gips.....	69
2.3. Taumasit .....	70
3. Mehanizmi sulfatne korozije .....	72
3.1. Mehanizam sulfatne korozije u slučaju kada sulfatni joni dolaze iz spoljašnje sredine - spoljašnje dejstvo sulfata-ESA .....	72

3.2. Mehanizam sulfatne korozije u slučaju kada su sulfatni joni uneseni sa komponentama betona - unutrašnje dejstvo sulfata-ISA.....	75
4. Hipoteze o delovanju produkata reakcije sulfatnih jona i produkata hidratacije cementa betona na beton/malter i konfuzija oko istog .....	77
5. Preporuke za poboljšanje otpornosti na dejstvo sulfata .....	81
6. Preporuke za poboljšanje otpornosti na dejstvo sulfata uvrštene u pravilnike i standarde .....	83

## **VII PRIKAZ I ANALIZA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI DEJSTVA SULFATA NA PASTE, MALTERE I BETONE .....**

1. Formiranje produkata pri delovanju sulfata .....	87
2. Malter/cementna pasta .....	90
2.1. Uticaj sastava cementa.....	90
2.2. Uticaj mineralnih dodataka.....	91
2.3. Uticaj vodocementnog/vodovezivnog faktora .....	93
2.4. Uticaj vrste i koncentracije rastvora .....	93
2.5. Uticaj primenjenog agregata .....	96
2.6. Uticaj drugih jona.....	97
3. Beton.....	97
3.1. Uticaj sastava cementa.....	97
3.2. Uticaj mineralnih dodataka.....	98
3.3. Uticaj veličine uzoraka.....	102
3.4. Uticaj vodocementnog/vodovezivnog faktora .....	102
3.5. Uticaj nege uzoraka.....	104
3.6. Uticaj vrste i koncentracije rastvora .....	105
3.7. Uticaj režima delovanja sulfata .....	107
3.8. pH vrednost.....	107
3.9. Uticaj primenjenog agregata .....	108

## **VIII EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE.....**

1. Uvod .....	113
2. Program eksperimentalnog istraživanja.....	113
3. Podaci o komponentnim materijalima .....	117
3.1. Cement.....	117
3.2. Agregat.....	117
3.3. Hemijski dodaci .....	122
3.4. Voda .....	123
4. Sastav betonskih mešavina .....	123
4.1. Primeri određivanja sastava betonskih mešavina.....	124
4.2. Sastav betonskih mešavina.....	126
5. Izrada betonskih mešavina i uzoraka .....	128
6. Režimi nege i izlaganja uzoraka agresivnim rastvorima .....	133
7. Ispitivana svojstva .....	136
7.1. Svojstva svežeg betona.....	136
7.2. Svojstva očvrslog betona .....	136

8. Rezultati istraživanja.....	142
8.1. Svojstva svežeg betona.....	142
8.2. Svojstva očvrslog betona .....	143
<b>IX ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA.....</b>	<b>153</b>
1. Beton sa rečnim agregatom .....	155
1.1. Čvrstoća pri pritisku.....	155
1.2. Promena dužine .....	157
1.3. Kapilarno upijanje vode.....	160
1.4. Živina porozimetrija-ukupna poroznost, kritični prečnik i threshold.166	
1.5. Živina porozimetrija- kritični prečnik i "threshold" .....	167
1.6. Živina porozimetrija-raspodela pora po veličini.....	168
2. Beton sa recikliranim agregatom .....	172
2.1. Čvrstoća pri pritisku.....	172
2.2. Promena dužine .....	174
2.3. Kapilarno upijanje vode.....	177
2.4. Živina porozimetrija-ukupna poroznost, kritični prečnik i threshold.183	
2.5. Živina porozimetrija-raspodela pora po veličini.....	185
3. Komparativna analiza .....	188
3.1. Čvrstoća pri pritisku.....	188
3.2. Promena dužine .....	191
3.3. Kapilarno upijanje.....	196
3.4. Živina porozimetrija.....	200
3.5. Živina porozimetrija-raspodela pora po veličini.....	202
3.6. Rendgenska difrakcija (XRD).....	207
3.7. Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR)...	208
3.8. SEM-EDS analiza .....	210
3.9. BSE-EDS analiza .....	212
3.10. Interpretacija rezultata ispitivanja metodom faktorijalnog eksperimenta .....	217
3.11. Makroskopski pregled uzoraka i karakteristična oštećenja .....	234
3.12. Metode za ocenu sulfatne otpornosti betona .....	235
<b>X ZAKLJUČNA RAZMATRANJA i pravci daljeg istraživanja .....</b>	<b>241</b>
1. Uvod.....	243
2. Promena čvrstoće pri pritisku .....	243
3. Promena dužine (ekspanzija) .....	248
4. Kapilarno upijanje vode .....	252
5. Poroznost.....	259
6. XRD-EDS-FTIR.....	264
7. Faktorijalni eksperiment .....	266
8. Metode za ocenu sulfatne otpornosti betona.....	268
9. Pravci daljeg istraživanja.....	270
<b>XI LITERATURA .....</b>	<b>271</b>
<b>XII PRILOZI.....</b>	<b>285</b>

PRILOG 1	- Određivanje fizičko-mehaničkih svojstava cementa.....	286
PRILOG 2	- Određivanje svojstava agregata.....	288
PRILOG 3	- Granulometrijski sastav mešavine agregata.....	291
PRILOG 4	- Određivanje sastava betonskih mešavina.....	292
PRILOG 5	- Određivanje konzistencije.....	298
PRILOG 6	- Određivanje zapreminske mase svežeg betona.....	299
PRILOG 7	- Određivanje zapreminske mase očvrslog, prirodno vlažnog betona.....	301
PRILOG 8	- Određivanje čvrstoće pri pritisku.....	303
PRILOG 9	- Određivanje promene dužine betonskih uzoraka.....	310
PRILOG 10	- Određivanje upijanja vode pod pritiskom.....	359
PRILOG 11	- Određivanje kapilarnog upijanja vode.....	361
PRILOG 12	- Živina porozimetrija-dijagrami kumulativne krive utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini.....	390
PRILOG 13	- Živina porozimetrija-vrednosti poroznosti i rasporeda učešća pora.....	406
PRILOG 14	- Rezultati ispitivanja uzoraka metodom BSE-EDS.....	412
PRILOG 15	- Snimak brucita u SEM-EDS i BSE-EDS.....	428
PRILOG 16	- Preporuke za dobijanje sulfatno-otpornih betona prema standardima i pravilnicima.....	430
PRILOG 17	- Ispitivanje rečnog agregata, Institut IMS Beograd.....	433
PRILOG 18	- Ispitivanje recikliranog agregata na drobljivost-metoda LOS ANĐELES, Građevinski fakultet u Beogradu.....	447

## Spisak slika

Slika II.1 - Prikaz faktora koji utiču na trajnost betona.....	12
Slika II.2 - Faktori koji utiču na kretanje gasova, tečnosti i jona kroz beton.....	14
Slika II.3 – Opseg veličina pora i nazivi prema:1) IUPAC, 2) Mehta, 3) Mindess i 4) ref.....	18
Slika II.4- Kumulativna kriva utisnute žive prema veličini pora.....	22
Slika II.5 - Diferencijalni raspored pora prema veličini pora.....	22
Slika III.1– Formiranje produkata hidratacije kroz vreme prema.....	31
Slika III.2- Brzina razvoja toplote tokom hidratacije Portland cementa, prema.....	31
Slika III.3 – Hidratacija cementa u funkciji vremena prikazana pomoću termodinamičkog modeliranja .....	32
Slika III.4 - Zgura u različitim oblicima .....	34
Slika III.5 – Raspored pora po veličini u zavisnosti od količine zgure u cementu.....	35
Slika III.6– Ternarni dijagram za portland cement i dodatke.....	36
Slika IV.1 –Procesi usitnjavanja otpadnog materijala.....	41
Slika IV.2 –Izgled recikliranog agregata.....	42
Slika IV.3 - Šematski prikaz trantitne zone i zrna recikliranog agregata .....	46
Slika V.1 – Nastanak signala kod Skening elektronskog mikroskopa (SEM).....	51
Slika V.2 – Histogram, nijanse sive boje koje odgovaraju različitim produktima hidratacije .....	53
Slika V.3 – SEM snimak cementne paste sa CH, C-S-H i etringitom.....	54
Slika V.4 – Karakteristična slika cementne paste u procesu hidratacije, BSE režim .....	55
Slika V.5 – Spektar karakterističnih rendgenskih zraka za C-S-H gel sa veoma slabim pikovima koji se odnose na Mg, Al, S i Fe.....	56
Slika V.6 – Spektar karakterističnih rendgenskih zraka za etringit .....	56
Slika V.7 – Dijagram Al/Ca u funkciji od Si/Ca.....	57
Slika V.8 – Dijagram S/Ca u funkciji od Al/Ca .....	57
Slika V.9 - Prikaz difrakcije snopa rendgenskih zraka sa niza ekvidistantnih ravni kod kristala.....	58
Slika V.10 – Šematski prikaz XRD uređaja.....	59
Slika V.11 – Primer rendgenskog difraktograma .....	60
Slika V.12 - Šema FTIR spektrometra .....	61
Slika V.13 - Šema prevođenja interferograma u spektar.....	62
Slika VI.1– Uslovi potrebni za pojavu ESA, prema Collepari.....	73
Slika VI.2 – Postojanost soli mirabilite i thenardite u zavisnosti od RH i temperature .....	74
Slika VI.3 – Uslovi potrebni za pojavu ISA, prema Collepari.....	75
Slika VI.4 - Neophodni uslovi za pojavu DEF, prema Collepari.....	76
Slika VI.5a i VI.5b – Pretpostavljeni mehanizmi pri delovanju Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> odnosno MgSO <sub>4</sub> .....	80

<i>Slika VII.1a i VII.1b– Reakcije koje se javljaju između komponenti hidratizane cementne paste i rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> odnosno MgSO<sub>4</sub> .....</i>	<i>88</i>
<i>Slika VII.2 – Stabilnost odnosno nestabilnost jedinjenja zavisno od pH vrednosti .....</i>	<i>89</i>
<i>Slika VII.3 – Srednja vrednost ekspanzije uzoraka maltera sačinjenih od običnog portland cement u zavisnosti od količine C<sub>3</sub>A u njemu.....</i>	<i>90</i>
<i>Slika VII.4 - Promena dužine (ekspanzija) malterskih prizmica u sulfatnom rastvoru 10% MgSO<sub>4</sub>.....</i>	<i>92</i>
<i>Slika VII.5 - Šematski prikaz delovanja rastvora MgSO<sub>4</sub> i razvoj mikrostrukture u portland-cementnoj pasti .....</i>	<i>94</i>
<i>Slika VII.6 - Ekspanzije uzoraka izloženih Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub>, i obeležene faze kod uzoraka u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> .....</i>	<i>94</i>
<i>Slika VII.7 – Koncentracija sulfata koja je potrebna za prelazak kalcijum-hidroksida u gips ili singenit.....</i>	<i>95</i>
<i>Slika VII.8 - Ekspanzija prizmi u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1,5% SO<sub>3</sub>) .....</i>	<i>99</i>
<i>Slika VII.9 -Ekspanzija prizmi u rastvoru MgSO<sub>4</sub> (1,5% SO<sub>3</sub>).....</i>	<i>99</i>
<i>Slika VII.10- Promena dužine uzoraka od mikro-betona nakon potapanja u rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</i>	<i>102</i>
<i>Slika VII.11 – Procena nastanka različitih faza u uzorcima sa CEM III i dva vodocementna faktora, nakon što su betonski uzorci bili potopljeni u rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u trajanju od 357 dana.....</i>	<i>103</i>
<i>Slika VII.12 – Ekspanzija betonskih uzoraka.....</i>	<i>106</i>
<i>Slika VII.13 –Gubitak mase betonskih uzoraka u sulfatnom okruženju .....</i>	<i>108</i>
<i>Slika VIII.1– Način formiranja betonskih mešavina .....</i>	<i>115</i>
<i>Slika VIII.2– Izgled frakcija rečnog agregata.....</i>	<i>117</i>
<i>Slika VIII.3 – Granulometrijske krive frakcija rečnog agregata .....</i>	<i>118</i>
<i>Slika VIII.4- Postrojenje za drobljenje kamena u Fabrici betona .....</i>	<i>119</i>
<i>Slika VIII.5- Izgled "starog" betona pre i nakon usitnjavanja.....</i>	<i>120</i>
<i>Slika VIII.6- Frakcije recikliranog agregata (4/8mm i 8/16mm).....</i>	<i>120</i>
<i>Slika VIII.7 – Granulometrijske krive frakcija recikliranog agregata .....</i>	<i>121</i>
<i>Slika VIII.8 - Granulometrijska kriva mešavine sitnog i krupnog rečnog agregata i referentne krive.....</i>	<i>124</i>
<i>Slika VIII.9 - Granulometrijska kriva mešavine sitnog rečnog i krupnog recikliranog agregata i referentne krive.....</i>	<i>126</i>
<i>Slika VIII.10– Sipanje suvih komponenti u mešalicu .....</i>	<i>128</i>
<i>Slika VIII.11– Spravljena betonska mešavina.....</i>	<i>128</i>
<i>Slika VIII.12– Merenje sleganja betona.....</i>	<i>129</i>
<i>Slika VIII.13 – Pripremljeni kalupi za izradu betonskih kocki, ploča i prizmi.....</i>	<i>129</i>
<i>Slika VIII.14 – Pripremljeni kalupi za izradu betonskih cilindara .....</i>	<i>130</i>
<i>Slika VIII.15 – Pripremljeni kalupi sa reperima za izradu betonskih prizmi.....</i>	<i>130</i>
<i>Slika VIII.16– Ugrađivanje betona u kalupe.....</i>	<i>130</i>
<i>Slika VIII.17– Kompaktiranje betona .....</i>	<i>131</i>
<i>Slika VIII.18 – Beton ugrađen u kalupe.....</i>	<i>131</i>
<i>Slika VIII.19 – Uzorci nakon vađenja iz kalupa i obeležavanja.....</i>	<i>132</i>



<i>Slika VIII.20–Izgled uzoraka nakon zaštite epoksidnim premazom .....</i>	<i>132</i>
<i>Slika VIII.21–Sulfatne soli Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub>.....</i>	<i>134</i>
<i>Slika VIII.22–Kondicioniranje uzoraka tokom trajanja eksperimenta .....</i>	<i>134</i>
<i>Slika VIII.23–Uređaj za merenje pH vrednosti .....</i>	<i>135</i>
<i>Slika VIII.24- Merenje konzistencije metodom sleganja.....</i>	<i>136</i>
<i>Slika VIII.25- Određivanje čvrstoće pri pritisku.....</i>	<i>137</i>
<i>Slika VIII.26- Merenje promene dužine uzoraka prema UNI 11307.....</i>	<i>138</i>
<i>Slika VIII.27- Određivanje upijanje vode pod pritiskom.....</i>	<i>138</i>
<i>Slika VIII.28- Ispitivanje kapilarnog upijanja vode.....</i>	<i>139</i>
<i>Slika VIII.29- Priprema uzoraka za merenje poroznosti pomoću živine porozimetrije.....</i>	<i>140</i>
<i>Slika VIII.30- Uzorci za živinu porozimetriju.....</i>	<i>140</i>
<i>Slika VIII.31- Dvokomponentni niskoviskozni epoksid za zalivanje uzoraka za BSE-EDS .....</i>	<i>141</i>
<i>Slika VIII.32 – Skenirajući elektronski mikroskop .....</i>	<i>141</i>
<i>Slika VIII.33 - Avan sa tučkom i sito koji su korišćeni za pripremu uzoraka kod XRD i FTIR.....</i>	<i>142</i>
<i>Slika IX.1 - Čvrstoća pri pritisku betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za sve mešavine sa rečnim agregatom; .....</i>	<i>155</i>
<i>Slika IX.2 - Promena čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka sa rečnim agregatom u odnosu na etalonske uzorke pre potapanja u sulfatne rastvore; .....</i>	<i>156</i>
<i>Slika IX.3 - Promene čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka sa rečnim agregatom izloženih delovanju rastvora sulfata u odnosu na etalonske uzorke iste starosti; .....</i>	<i>156</i>
<i>Slika IX.4 - Promena dužine betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa rečnim agregatom; .....</i>	<i>157</i>
<i>Slika IX.5 - Promena dužine betonskih uzoraka sa rečnim agregatom; .....</i>	<i>160</i>
<i>Slika IX.6 - Kapilarno upijanje vode uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa rečnim agregatom; .....</i>	<i>161</i>
<i>Slika IX.7 - Kapilarno upijanje vode betonskih uzoraka sa rečnim agregatom;.....</i>	<i>164</i>
<i>Slika IX.8 - Promena čvrstoće pri pritisku i konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka kroz posmatrane periode (početni, 3 i 6 meseci) .....</i>	<i>165</i>
<i>Slika IX.9 - Promena ukupne poroznosti uzoraka betonskih mešavina od rečnog agregata po mešavinama .....</i>	<i>166</i>
<i>Slika IX.10- Raspodela pora po veličini za etalonske uzorke i uzorke izložene delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub> kod uzoraka sa rečnim agregatom, za oba perioda izlaganja.....</i>	<i>168</i>
<i>Slika IX.11 - Čvrstoća pri pritisku betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora, za sve mešavine sa recikliranim agregatom; .....</i>	<i>172</i>
<i>Slika IX.12 - Promena čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za sve mešavine sa rečnim agregatom; .....</i>	<i>173</i>
<i>Slika IX.13- Promene čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom izloženih delovanju rastvora sulfata u odnosu na etalonske uzorke;.....</i>	<i>173</i>

Slika IX.14- Promena dužine betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa recikliranim agregatom;.....	175
Slika IX.15- Promena dužine betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom;.....	177
Slika IX.16- Kapilarno upijanje vode uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa recikliranim agregatom; a) CEM I, RA, w/c=0,55 nakon 3 meseca, b) CEM I, RA, w/c=0,38 nakon 3 meseca, c) CEM III, RA, w/c=0,55 nakon 3 meseca, d) CEM III, RA, w/c=0,38 nakon 3 meseca, e) CEM I, RA, w/c=0,55 nakon 6 meseci, f) CEM I, RA, w/c=0,38 nakon 6 meseci, g) CEM III, RA, w/c=0,55 nakon 6 meseci, h) CEM III, RA, w/c=0,38 nakon 6 meseci.....	178
Slika IX.17- Kapilarno upijanje vode betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom; .....	181
Slika IX.18- Promena čvrstoće pri pritisku i konačnih vrednosti kapilarnog upijanja etalonskih uzoraka kroz posmatrane periode (početni, 3 i 6 meseci) .....	183
Slika IX.19- Promena ukupne poroznosti uzoraka betonskih mešavina od recikliranog agregata, po mešavinama.....	184
Slika IX.20 - Raspodela pora po veličini za etalonske uzorke i uzorke izložene delovanju rastvora $\text{Na}_2\text{SO}_4$ i $\text{MgSO}_4$ kod uzoraka sa recikliranim agregatom, za oba perioda izlaganja.....	186
Slika IX.21- Promena čvrstoće betona pri pritisku kod betonskih uzoraka po vrsti agregata za sve rastvore; .....	188
Slika IX.22- Relativna promena čvrstoće pri pritisku kod svih betonskih uzoraka u odnosu na etalone iste starosti; a) u rastvoru $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) u rastvoru $\text{MgSO}_4$ .....	190
Slika IX.23- Relativna promena čvrstoće betona pri pritisku kod svih betonskih uzoraka u odnosu na početne čvrstoće; a) u rastvoru $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) u rastvoru $\text{MgSO}_4$ .....	191
Slika IX.24- Upporedni prikaz promene dužine betonskih uzoraka po vrsti agregata u svim rastvorima; .....	192
Slika IX.25- Poređenje vrednosti promene dužine betonskih uzoraka po vrsti agregata za oba sulfatna rastvora; a) nakon 3 meseca, b) nakon 6 meseci .....	194
Slika IX.26- Poređenje vrednosti promene dužine betonskih uzoraka po sulfatnim rastvorima; a) nakon 3 meseca, b) nakon 6 meseci.....	195
Slika IX.27- Poređenje vrednosti promene dužine uzoraka betonskih mešavina po periodu izloženosti sulfatnim rastvorima; a) u rastvoru $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) u rastvoru $\text{MgSO}_4$ .....	195
Slika IX.28- Kinetika kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka svih mešavina; .....	196
Slika IX.29- Poređenje maksimalnih vrednosti kapilarnog upijanja betonskih uzoraka po periodu izlaganja delovanja sulfatnog rastvora; a) rastvor $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) rastvor $\text{MgSO}_4$ .....	199
Slika IX.30- Poređenje maksimalnih vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka po vrsti agregata u oba sulfatna rastvora; a) nakon 3 meseca, b) nakon 6 meseci.....	200
Slika IX.31- Promena ukupne poroznosti uzoraka svih betonskih mešavina u rastvorima $\text{Na}_2\text{SO}_4$ i $\text{MgSO}_4$ .....	201
Slika IX.32- Upporedna raspodela pora po veličini za uzorke sa rečnim i recikliranim agregatom u $\text{Na}_2\text{SO}_4$ za period od 3 i 6 meseci.....	203
Slika IX.33- Raspodela pora po veličini za sve uzorke sa rečnim i recikliranim agregatom u $\text{Na}_2\text{SO}_4$ za periode od 3 i 6 meseci.....	205
Slika IX.34- Raspodela pora po veličini za sve uzorke sa rečnim i recikliranim agregatom u $\text{MgSO}_4$ za periode od 3 i 6 meseci.....	206
Slika IX.35- Kumulativni prikaz učešća pora kod uzoraka u rastvoru $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;.....	207

<i>Slika IX.36- Kumulativni prikaz učešća pora kod uzoraka u rastvoru MgSO<sub>4</sub>.....</i>	<i>207</i>
<i>Slika IX.37 - XRD podaci etalonskih uzoraka i uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora nakon 6 meseci; .....</i>	<i>207</i>
<i>Slika IX.38 – FTIR rezultati etalonskih uzoraka i uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 6 meseci .....</i>	<i>209</i>
<i>Slika IX.39 -Dekonvolucija asimetričnih Si-O veza u C-S-H gelu (FTIR analiza) za etalonske uzorke izložene delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 6 meseci .....</i>	<i>210</i>
<i>Slika IX.40 - SEM slika uzoraka izloženih delovanju Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</i>	<i>211</i>
<i>Slika IX.41 -Slika uzoraka izloženih delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</i>	<i>211</i>
<i>Slika IX.42 – SEM slika uzoraka izloženih delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub>.....</i>	<i>212</i>
<i>Slika IX.43 - SEM slika uzoraka izloženih delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub>.....</i>	<i>212</i>
<i>Slika IX.44– Atomski odnos Si/Ca prikazan u odnosu na rastojanje od površine uzorka .....</i>	<i>213</i>
<i>Slika IX.45 – Atomski odnos Al/Ca u funkciji Si/Ca kod paste sa CEM I pri starosti od 28 dana .....</i>	<i>213</i>
<i>Slika IX.46 – Atomski odnosi S/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca za etalonske uzorke i one izložene delovanju sulfatnih ratsvora nakon 6 meseci.....</i>	<i>215</i>
<i>Slika IX.47 - Grafički model tro-parametarskog faktorijalnog eksperimenta .....</i>	<i>218</i>
<i>Slika IX.48 - Izgled uzoraka NRPC1 nakon 5 meseci boravka u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</i>	<i>234</i>
<i>Slika IX.49 - Izgled uzoraka NNPC1 nakon 6 meseci boravka u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.....</i>	<i>234</i>
<i>Slika IX.50 - Izled uzoraka MRPC1 nakon 6 meseci boravka u rastvoru MgSO<sub>4</sub>.....</i>	<i>235</i>
<i>Slika X.1 - Promena čvrstoće pri pritisku uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara .....</i>	<i>244</i>
<i>Slika X.2 - Promena čvrstoće pri pritisku uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara.....</i>	<i>246</i>
<i>Slika X.3 - Vrednosti promene dužine uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara .....</i>	<i>249</i>
<i>Slika X.4 - Vrednosti promene dužine uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara.....</i>	<i>250</i>
<i>Slika X.5 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara .....</i>	<i>254</i>
<i>Slika X.6 - Vrednostikoefficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara .....</i>	<i>255</i>
<i>Slika X.7 - Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara.....</i>	<i>257</i>
<i>Slika X.8 - Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara .....</i>	<i>258</i>
<i>Slika X.9 – Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na promenu dužine uzoraka izloženih delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u trajanju 3 i 6 meseci.....</i>	<i>267</i>
<i>Slika X.10 - Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na promenu dužine uzoraka izloženih delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub> u trajanju 3 i 6 meseci .....</i>	<i>267</i>

Slika X.11 – Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na koeficijent kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju 3 i 6 meseci.....268

Slika X.12 - Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na promenu dužine uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$  u trajanju 3 i 6 meseci .....268

## Spisak tabela

Tabela II.1- Vreme koje je potrebno da pore postanu diskontinualne, u zavisnosti od vodocementnog faktora .....	15
Tabela II.2- Klasifikacija pora prema IUPAc, Mehta, Mindess i byg R268 .....	19
Tabela III.1- Hemijske reakcije prilikom termičke obrade sirovina kod proizvodnje cementa .....	27
Tabela III.2- Skraćenice za osnovna jedinjenja u hemiji cementa.....	28
Tabela III.3 – Prosečan mineraloški sastav cementnog klinkera .....	29
Tabela III.4 - Uticaj na životnu sredinu pri zameni dela cementa zgurom ili letećim pepelom (Slag Cement Association" .....	33
Tabela III.5 - Uobičajen sastav cementnog klinkera i dodataka cementu .....	37
Tabela III.6 - Sedam tipova sulfatno otpornih cemenata .....	38
Tabela III.7- Dodatni zahtevi za sulfatno otporne cemente .....	38
Tabela VI.1- Zapremine molekula nekoliko jedinjenja koji mogu postojati u betonu.....	79
Tabela VIII.1- Pregled oblika, veličine i potrebnog broja uzoraka za jednu vrstu betona .....	116
Tabela VIII.2- Deo rezultati ispitivanja rečnog agregata.....	119
Tabela VIII.3- Rezultati ispitivanja recikliranog agregata.....	122
Tabela VIII.4.- Osnovni podaci o primenjenim superplastifikatorima.....	122
Tabela VIII.5- Oznake betonskih mešavina .....	123
Tabela VIII.6-Količine komponentnih materijala u $1\text{m}^3$ betona.....	127
Tabela VIII.7- Opis režima kondicioniranja uzoraka .....	133
Tabela VIII.8- Svojstva svežeg betona .....	142
Tabela VIII.9- Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 28 dana (pre potapanja u sulfatne rastvore) .....	143
Tabela VIII.10 - Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku nakon 3 meseca držanja u sulfatnom rastvoru .....	143
Tabela VIII.11 - Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku nakon 6 meseci držanja u sulfatnom rastvoru .....	144
Tabela VIII.12- Promena dužine betonskih uzoraka sa rečnim agregatom [mm/m] .....	144
Tabela VIII.13- Promena dužine betonskih uzoraka sa rečnim agregatom [mm/m]-nastavak.....	145
Tabela VIII.14 - Promena dužine betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom [mm/m] .....	145
Tabela VIII.15 – Promena dužine betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom [mm/m]-nastavak.....	146
Tabela VIII.16 – Upijanje vode i dubina prodora vode pod pritiskom .....	147

Tabela VIII.17- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode uzoraka pre potapanja u sulfatne rastvore.....	148
Tabela VIII.18- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom nakon 3 meseca držanja u sulfatnom rastvoru .....	148
Tabela VIII.19- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom nakon 6 meseci držanja u sulfatnom rastvoru.....	149
Tabela VIII.20- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom nakon 3 meseca držanja u sulfatnom rastvoru.....	149
Tabela VIII.21- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom nakon 6 meseci držanja u sulfatnom rastvoru.....	150
Tabela VIII.22- Vrednosti ukupne poroznosti određene preko živine porozimetrije kod uzoraka sa rečnim agregatom.....	150
Tabela VIII.23- Vrednosti ukupne poroznosti određene preko živine porozimetrije kod uzoraka sa recikliranim agregatom.....	150
Tabela VIII.24- Vrednosti "threshold" i kritičnog prečnika kod uzoraka sa rečnim agregatom .....	151
Tabela VIII.25- Vrednosti "threshold" i kritičnog prečnika kod uzoraka sa recikliranim agregatom .....	151
Tabela IX.1 - Stvarne vrednosti ekspanzije za uzorke sa rečnim agregatom .....	158
Tabela IX.2 - Parametri za testiranje uzoračke varijanse i aritmetičke sredine .....	159
Tabela IX.3 - Parametri za testiranje uzoračke varijanse i aritmetičke sredine .....	159
Tabela IX.4 - Koeficijenti kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom, etaloni i nakon 3 i 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima .....	163
Tabela IX.5 - Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka sa rečnim agregatom [kg/m <sup>2</sup> ] .....	163
Tabela IX.6 - Vrednosti kapilarnog upijanja vode $U_v$ [kg/m <sup>2</sup> ] i odgovarajućih čvrstoća pri pritisku $f_p$ [MPa], betonski uzorci sa rečnim agregatom .....	165
Tabela IX.7 - Stvarne vrednosti ekspanzije za uzorke sa recikliranim agregatom .....	175
Tabela IX.8 – Parametri za testiranje varijansi i aritmetičke sredine uzoraka.....	176
Tabela IX.9 – Rezultati statističkog testa.....	176
Tabela IX.10- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom, etaloni i nakon 3 i 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima .....	180
Tabela IX.11- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom [kg/m <sup>2</sup> ].....	180
Tabela IX.12 - Vrednosti kapilarnog upijanja vode [kg/m <sup>2</sup> ] i odgovarajućih čvrstoća pri pritisku [MPa] , betonski uzorci sa recikliranim agregatom .....	182
Tabela IX.13 - Razlike između odgovarajućih čvrstoća pri pritisku [MPa] , betonskih uzoraka sa rečnim i recikliranim agregatom.....	189
Tabela IX.14 - Aproksimacija rezultata pravom linijom - nagibi pravih linija .....	193
Tabela IX.15 - Izmerene vrednosti ekspanzije u mm/m (‰)etalonskih uzoraka i uzoraka potopljenih u rastvore natrijum sulfata i magnezijum sulfata nakon 3 i 6 meseci.....	193

Tabela IX.16 - Izmerene vrednosti konačnog upijanja vode u kg/m <sup>2</sup> etalonskih uzoraka i uzoraka potopljenih u rastvore natrijum sulfata i magnezijum sulfata nakon 3 i 6 meseci .....	198
Tabela IX.17 - Opis uticajnih faktora i mogući nivo njihovog razmatranja .....	218
Tabela IX.18 - Vrednosti bezdimenzionih veličina $x_i$ i njihovih proizvoda .....	219
Tabela IX.19 - Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , u zavisnosti od analiziranih parametara .....	221
Tabela IX.20 - Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , u zavisnosti od analiziranih parametara .....	222
Tabela IX.21 - Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru MgSO <sub>4</sub> , u zavisnosti od analiziranih parametara .....	222
Tabela IX.22 - Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru MgSO <sub>4</sub> , u zavisnosti od analiziranih parametara .....	223
Tabela IX.23 - Koeficijenti polinoma za zavisnost " $\epsilon = f(Z_1, Z_2, Z_3)$ " .....	223
Tabela IX.24 - Vrednosti sračunatih testnih karakteristika .....	225
Tabela IX.25 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	226
Tabela IX.26 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	226
Tabela IX.27 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora MgSO <sub>4</sub> .....	227
Tabela IX.28 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora MgSO <sub>4</sub> .....	227
Tabela IX.29 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , u zavisnosti od analiziranih parametara .....	228
Tabela IX.30 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , u zavisnosti od analiziranih parametara .....	228
Tabela IX.31 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru MgSO <sub>4</sub> u zavisnosti od analiziranih parametara .....	229
Tabela IX.32 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru MgSO <sub>4</sub> u zavisnosti od analiziranih parametara .....	229
Tabela IX.33 - Koeficijenti polinoma za zavisnost " $A = f(Z_1, Z_2, Z_3)$ " .....	230
Tabela IX.34 - Vrednosti sračunatih testnih karakteristika .....	231
Tabela IX.35 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	232
Tabela IX.36 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	233
Tabela IX.37 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora MgSO <sub>4</sub> .....	233
Tabela IX.38 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora MgSO <sub>4</sub> .....	233

<i>Tabela IX.39– Vrednosti za ocenu slufatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 3 meseca u 5% rastvor natrijum sulfata.....</i>	<i>236</i>
<i>Tabela IX.40 – Vrednosti za ocenu slufatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 6 meseci u 5% rastvor natrijum sulfata.....</i>	<i>236</i>
<i>Tabela IX.41 – Vrednosti za ocenu slufatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 3 meseca u 5% rastvor magnezijum sulfata.....</i>	<i>236</i>
<i>Tabela IX.42 – Vrednosti za ocenu slufatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 6 meseci u 5% rastvor magnezijum sulfata .....</i>	<i>237</i>
<i>Tabela IX.43 - Rezultati korelacionih analiza .....</i>	<i>238</i>

## TERMINI I DEFINICIJE

---

<b>Beton</b> (Concrete)	Materijal dobijen mešanjem cementa, krupnog i sitnog agregata i vode, sa ili bez prisustva mineralnih i hemijskih dodataka, koji poprima svoja svojstva hidratacijom cementa.
<b>Trajnost</b> (Durability)	Sposobnost materijala da se odupre različitim uticajima iz okruženja i da zadrži željene karakteristike.
<b>Vek upotrebe</b> (Working life)	Vremenski period tokom kojeg će karakteristike betona u konstrukciji biti održane na nivou saglasnom sa ispunjenjem zahtevanih performansi konstrukcije, uz ispunjenje uslova pravilnog održavanja.
<b>Mikrostruktura</b> (Microstructure)	Prostorni raspored aglomerisanih grupa atoma od kojih je sastavljen materijal i posmatra se pomoću mikroskopa.
<b>Makrostruktura</b> (Macrostructure)	Prostorni raspored strukturnih elemenata, koji se mogu videti golim okom ili pri malim uvećanjima unutrašnjih ili površinski delova materijala.
<b>Pasta</b> (Paste)	Sastavni deo betonske smeše koji sadrži praškastu komponentu, vodu, vazduh i hemijske dodatke, ukoliko su primenjeni.
<b>Malter</b> (Mortar)	Sastavni deo betonske smeše koji sadrži pastu i zrna agregata manja od 4mm.
<b>Tranzitna zona, prelazna zona, kontaktna površina</b> (Transition zone, Interfacial transition zone)	Kontaktni sloj na granici osnovnih strukturnih elemenata betona, agregata i cementnog kamena.
<b>Propustljivost</b> (Permeability)	Proces pri kojem dolazi do transporta čestica iz jednog dela materijala u drugi zbog hidrauličnog gradijenta. Ukoliko se transportuju čestice vode, reč je o vodopropusnosti a ukoliko se transportuju čestice gasa, reč je o gasopropusnosti.
<b>Održanje i zaštita životne sredine</b> (Maintenance and environmental protection)	Sistem zaštite životne sredine čine mere, uslovi i instrumenti za: 1) održivo upravljanje, očuvanje prirodne ravnoteže, celovitosti, raznovrsnosti i kvaliteta prirodnih vrednosti i uslova za opstanak svih živih bića; 2) sprečavanje, kontrolu, smanjivanje i sanaciju svih oblika zagađivanja životne sredine.
<b>Održivi razvoj</b> (Sustainable Development)	Način ljudskog razvoja određen socijalnim, ekonomskim i ekološkim ciljevima, prema kojem se resursi koriste sistematično, tako da postoji ravnoteža između društvenog, industrijskog i tehničko-tehnološkog razvoja sa jedne strane i očuvanja i unapređenja životne sredine sa druge strane, koja treba da služi ne samo potrebama sadašnjeg društva, nego i budućim generacijama.
<b>Uticaji sredine</b> (Environmental actions)	Hemijska i fizička dejstva kojima je izložen beton, koja rezultuju uticajem na beton ili armaturu, odnosno ugrađeni metal, a ne smatraju se opterećenjem pri projektovanju konstrukcije.
<b>Struktura materijala</b> (Structure of material)	Prostorni raspored izgrađivačkih jedinica od kojih je sastavljen materijal. Postoji nekoliko nivoa na kojim se može posmatrati struktura materijala: subatomske nivo, nivo atoma, mikro nivo i makro nivo.
<b>Vodocementni faktor</b> (Water/cement ratio)	Odnos mase efektivne količine vode i mase cementa u svežem stanju.



<b>Ukupna količina vode</b> (Total water content)	Dozirana voda plus voda koja je već sadržana u zrnima agregata i na njihovoj površini, plus voda u hemijskim i mineralnim dodacima korišćenim u obliku paste, i voda koja je rezultat dodatog leda ili zagrevanja parom.
<b>Efektivna količina vode</b> (Effective water content)	Razlika između ukupne količine vode u svežem betonu i količine vode koju upiju zrna agregata.
<b>Karakteristična čvrstoća betona</b> (Characteristic strength of concrete)	Vrednost čvrstoće ispod koje se može očekivati najviše 5% vrednosti svih rezultata ispitivanja čvrstoće koja se odnosi na određenu količinu razmatranog betona.
<b>pH vrednost</b> (pH value)	Mera aktivnosti vodonikovih jona ( $H^+$ ) u rastvoru i na taj način se određuje da li je dati rastvor kiselog ili baznog karaktera. PH vrednost je bezdimenziona veličina, za poređenje se kopristi skala koja obuhvata vrednosti 0 do 14. Za kisele rastvore pH vrednost je manja od 7 ( $pH < 7$ ) a za bazne veća od 7 ( $pH > 7$ ).
<b>Korozija materijala</b> (Corrosion of materials)	Degradacija materijala koja se ispoljava u formi razaranja strukture i smanjivanja mehaničkih svojstava materijala, a nastaje kao posledica fizičkih i/ili hemijskih procesa na relaciji materijal-sredina.
<b>Fluid</b> (Fluid)	Zajednički naziv za tečnosti i gasove. Karakteriše ih velika pokretljivost i sloboda kretanja molekula.
<b>Pora</b> (Pore)	Prazan prostor u betonu. Mogu biti različitog oblika i porekla.
<b>Jon</b> (Ion)	Naelektrisana čestica. Negativno naelektrisan jon se zove anjon a pozitivno naelektrisan jon se naziva katjon.
<b>Hidratacija</b> (Hydration reaction)	Hemijsko-fizički proces pri kojem dolazi do očvršćavanja cementa.
<b>Difuzija</b> (Difusion)	Kretanje gasa ili pare kroz pore i pukotine u materijalu, a nastaje kao posledica razlike pritiska gasa ili pare na površinama koje ograničavaju taj materijal (zbog težnje gasa ili pare da zauzme ravnotežno stanje i postigne izotropnost u celom prostoru). Izražava se putem koeficijenta propustljivosti.
<b>Apsorpcija</b> (Absorption)	Pojava da supstanca iz jedne faze prolazi kroz graničnu površinu i u drugoj fazi se više ili manje jednolično raspoređuje u koncentraciji većoj nego što je u unutrašnjosti prve faze. U betonu apsorpcija se odnosi na ulazak tečnosti usled dejstva kapilarnih sila.
<b>Propustljivost</b> (Permeability)	Proces pri kojem se supstance transportuju iz jednog dela materijala u drugi zbog hidrauličnog gradijenta. Ako je supstanca koja se transportuje voda, reč je o vodopropusnosti, a ako je supstanca koja se transportuje gas, reč je o gasopropusnosti.
<b>Jonska difuzija</b> (Diffusion of ions)	Kretanje jona putem difuzije.
<b>Poroznost</b> (Porosity)	Poroznost je mera koja pokazuje udeo praznog prostora u materijalu i obično se izražava u %.
<b>Hemijski vezana voda</b> (Chemically bound water)	Ili kristalna voda, koja je zbog svoje polarnosti, preko hidroksilnih grupa vezana jonskim vezama sa komponentama suve materije. Može se smatrati da ova voda ulazi u hemijski sastav jedinjenja i ne može da se odstrani bez narušavanja hemijske prirode jedinjenja.
<b>Slobodna voda</b> (Free water)	Ili nevezana voda, koja ne ulazi u hemijski sastav jedinjenja i može se odstraniti bez narušavanja hemijske prirode jedinjenja.

<b>Gelske pore</b> (Gel pores)	Prisutne su u C-S-H gelu, veličine do nekoliko nanometara i ne učestvuju u transportnim procesima.
<b>Kapilarne pore</b> (Capillary pores)	Nastale su na mestima koja nisu ispunjena produktima hidratacije i njihova količina zavisi od količine upotrebljene vode. Veće pore mogu učestvovati u transportu supstanci kroz materijal. Obično su veličine 5nm-1000nm.
<b>"Hollow shell pore"</b>	Pore unutar hidratisanog dela zrna cementa, veličine 1-15 $\mu$ m (1000-15000nm).
<b>"Ing-bottle pore"</b>	Kada je pora povezana sa spoljašnjom srdinom ili drugom porom preko suženja koje se često ponaša kao vrat-suženje.
<b>Vazdušne pore</b> (Air voids)	Najkrupnije pore u cementnom kamenu. Mogu se javiti u dva oblika: zarobljeni i uvučeni vazduh.
<b>Zarobljeni vazduh</b> (Entrapped air)	Vazdušne šupljine u betonu koje nisu namerno formirane.
<b>Uvučeni vazduh</b> (Entrained air)	Mikroskopski sitni vazdušni mehurići namerno uvučeni u beton tokom mešanja, korišćenjem površinski aktivnih agensa; tipični prečnici ovih mehurića sfernog ili skoro sfernog oblika jesu između 10 $\mu$ m (10000nm) i 300 $\mu$ m (300000nm).
<b>Agregat</b> (Aggregate)	Zrnasti, granulisani mineralni materijal pogodan za upotrebu pri izradi betona. Mogu biti prirodni ili veštčki, a takođe i reciklirani od materijala prethodno korišćenih za građenje.
<b>Sitan agregat</b> (Fine aggregate)	Agregat veličine do 4mm.
<b>Krupan agregat</b> (Coarse aggregate)	Agregat veličine preko 4mm.
<b>Reciklirani agregat</b> (Recycled aggregate)	Agregat koji je nastao iz prerade neorganskog materijala i koji je prethodno već korišćen.
<b>Agregat od recikliranog betona</b> (Recycled Concrete Aggregate)	Agregat koji je nastao iz prerade prethodno eksploatisanog betona, tj. starog otpadnog i demoliranog betona.
<b>Mikropore</b> (Micropores)	Pore koje su prema IUPAC nomenklaturi veličine do 2nm.
<b>Mezopore</b> (Mesopores)	Pore koje su prema IUPAC nomenklaturi veličine od 2nm do 50nm.
<b>Makropore</b> (Macropores)	Pore koje su prema IUPAC nomenklaturi veličine preko 50nm.
<b>Otvorene pore</b> (Open pores)	Pore koje su međusobno povezane i omogućavaju transport fluida kroz materijal.
<b>Zatvorene pore</b> (Closed pores)	Pore koje si izolovane i ne učestvuju u transportnim procesima.
<b>Kritični prečnik pore</b> (Critical pore size)	Maksimalni prečnik pora koji je kontinualan ili najčešće pojavljiv kod međusobno povezanih pora koji omogućava maksimalni protok.
<b>"Threshold"</b>	Prečnik pora iznad koje se utisne mala količina žive a odmah ispod znatna količine iste ili minimalni prečnik koji je kontinualan kroz cementnu pastu.

<b>Portland cementni klinker</b> (Portland clinker)	Veštački kameni materijal koji se dobija pečenjem krečnjaka i gline u odnosu 3:1 na temperaturi 1350°C-1450°C. Njegovim mlevenjem se dobija cement.
<b>Svež beton</b> (Fresh concrete)	Beton koji je u potpunosti izmešan i koji se još uvek može zbijati odabranom metodom.
<b>Očvršli beton</b> (Hardened concrete)	Beton koji je u očvrslom stanju i koji je postigao određenu čvrstoću.
<b>Beton projektovanog sastava</b> (Prescribed concrete)	Beton za koji su proizvođači, putem odgovarajuće specifikacije, zadali sastav i komponente, pri čemu je proizvođač odgovoran za proizvodnju betona zadanog sastava.
<b>Hemijski dodatak</b> (Admixture)	Hemijska materija koja se tokom procesa spravljanja betona dodaje u malim količinama u odnosu na masu cementa radi modifikovanja svojstava svežeg ili očvrsllog betona.
<b>Mineralni dodatak</b> (Addition)	Fino usitnjen materijal mineralnog porekla, koji se dodaje betonu radi poboljšanja određenih svojstava ili radi dobijanja specijalnih svojstava (postoje dva tipa mineralnih dodataka: <i>tip I</i> -inertni ili poluinertni i <i>tip II</i> -pucolanski ili latentno hidraulični).
<b>Intersticijalni defekt</b> (Interstitial defect)	Tačkasti defekt u rešetki kristala koji nastaje smeštanjem atoma u prazan prostor između atoma osnovne rešetke-intersticijalni atom.
<b>Granulisana zgura</b> (Granulated slag)	Nemetalni proizvod koji se dobija kao nusproizvod u visokim pećima prilikom proizvodnje čelika. Koristi se kao zamena cementa u vidu mineralnog dodatka i ima hidraulična svojstva koja se ogledaju u mogućnosti direktnog reagovanja sa vodom i formiranja materijala sa hidrauličnim svojstvom.
<b>Leteći pepeo</b> (Fly ash)	Nemetalni proizvod koji se dobija kao nusproizvod u visokim pećima prilikom proizvodnje čelika. Koristi se kao zamena cementa u vidu mineralnog dodatka i može imati hidraulična ili pucolanska svojstva, zavisno od sastava.
<b>Pucolanski materijali</b> (Pozzolanic materials)	Prirodne ili veštačke silikatne, siliko-aluminatne, siliko-karbonatne supstance ili kombinacije istih, koje fino samlevene u prisustvu vode reaguju sa rastvorenim kalcijum-hidroksidom stvarajući produkte koji imaju hidraulična svojstva.
<b>Hidraulično svojstvo</b> (Hydraulic property)	Svojstvo da materijal kada je pomešan sa vodom, stvara pastu koja vezuje i očvršćava reakcijom i procesom hidratacije i koji posle očvršćavanja zadržava svoju čvrstoću i stabilnost čak i pod vodom.
<b>Nusproizvod</b> (Nuz product)	Supstanca ili predmet koji direktno proizlaze iz proizvodnog procesa, iako to nije bila svrha, a neophodni je deo procesa proizvodnje. Nusprodukt se smatra da nije otpad ako se može osigurati prihvatljivo iskorištavanje za okolinu i ako se može koristiti direktno, bez dalje obrade ili prerade.
<b>Latentna hidrauličnost</b> (Latent hydraulics)	Hidrauličnost je zarobljena unutar staklaste strukture i potrebna je neka aktivacija da bi je oslobodila. To se najčešće dešava tako što sulfati i/ili alkalije hemijski reaguju sa zgurom i povećava se pH sistema. Kada dostigne kritičnu vrednost, staklasta struktura zgure postaje nestabilna, oslobađa se reaktivnost i zgura počinje da reaguje sa vodom stvarajući sopstveni cementni gel. Praktično, taj aktivator je portland cement jer on sadrži i alkalije i sulfate.
<b>"Unutrašnji produkti"</b> (Inner product)	Produkti koji se formiraju unutar periferije originalnog zrna cementa.

<b>"Spoljašnji produkti"</b> (Outer product)	Produkti koji se formiraju van originalnog zrna cementa.
<b>Izluživanje/ispiranje</b> (Leaching)	Izdvajanje nekoga sastojka iz smeše čvrstih supstanci njegovim selektivnim otapanjem u vodi.
<b>Dekalcifikacija</b> (Decalcification)	Proces pri kojem dolazi do smanjenja količine kalcijuma u sistemu. Obrnuti proces je kalcifikacija ili polimerizacija (u cementnom kamenu).
<b>Polimerizacija</b> (Polymerization)	Hemijska reakcija u kojoj se veliki broj monomera povezuje kovalentnim vezama u polimere. Kod cementa je to npr. slučaj povezivanja monomera koji sadrži silicijum.
<b>"Through-solution reaction"</b>	Formiranje jedinjenja kroz rastvor
<b>"Solid-state"</b>	Formiranje jedinjenja kroz čvrsto stanje

## HEMIJSKE OZNAKE

---

<b>Mg</b>		Magnezijum
<b>Al</b>		Aluminijum
<b>Fe</b>		Gvožđe
<b>K</b>		Kalijum
<b>N</b>		Azot
<b>Na</b>		Natrijum
<b>Ca</b>		Kalcijum
<b>Si</b>		Silicijum
<b>Na<sup>+</sup></b>		Katjon natrijuma
<b>K<sup>+</sup></b>		Katjon kalijuma
<b>OH<sup>-</sup></b>		Anjon hidroksida
<b>SO<sub>4</sub><sup>+</sup></b>		Katjon sulfata
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		Anjon sulfata
<b>Cl<sup>-</sup></b>		Anjon hlorida
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>		Anjon karbonata
<b>CaO</b>	<b>C</b>	Kalcijum-oksidi
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>S</b>	Silicijum-dioksidi
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>A</b>	Aluminijum-oksidi
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe</b>	Gvožđe-oksidi
<b>MgO</b>	<b>M</b>	Magnezijum-oksidi
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>S̄</b>	Sumpor-trioksidi
<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>H</b>	Voda
<b>CO<sub>2</sub></b>		Ugljenik-dioksidi
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	<b>CH</b>	Kalcijum-hidroksid (portlandit)
<b>Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub></b>	<b>M-S-H</b>	Magnezijum-silikat-hidrat

$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	Trikalcijum-silikat (alit)
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	Dikalcijum-silikat
$\beta 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\beta\text{C}_2\text{S}$	Beta dikalcijum-silikat (belit)
$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ (C-S-H)	Kalcijum-silikat-hidrat (Tobermoritov gel)
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	Trikalcijum-aluminat
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	Tetrakalcijum-aluminat-ferit
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 19\text{H}_2\text{O}$		Tetra-kalcijum-aluminat-hidrat
$\text{C}_3\text{AH}_6/ \text{C}_2\text{AH}_8/ \text{C}_4\text{AH}_{19}$		Hidrat aluminata
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaSO}_4\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{18}$	Monosulfat
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$	Etringit
$\text{CaSiO}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 15\text{H}_2\text{O}$		Taumasit
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$		Gips
$\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$		Silika gel
$\text{Mg}(\text{OH})_2$		Magnezijum hidroksid (brucit)
$\text{Al}(\text{OH})_3$		Aluminijum-hidroksid
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_4\text{AC}\bar{\text{C}}\text{H}_{11}$	Mono-karbo-aluminat
$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_{0,6}\text{O}_{2,4}(\text{OH})_{9,3}$		Hidrogarnet
$\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}4(\text{H}_2\text{O})$		Hidrotalcit
$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$		Epsomit
$\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$		Mirabilit
$\text{MgSO}_4$		Magnezujum sulfat
$\text{Na}_2\text{SO}_4$		Natrijum sulfat (thenardit)
$\text{K}_2\text{SO}_4$		Kalijum sulfat
$\text{NaCl}$		Natrijum hlorid
$\text{NaOH}$		Natrijum hidroksid
$\text{CaCO}_3$		Kalcijum karbonat
$\text{Al}(\text{OH})_3$		Gibsit
$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2\cdot 6(\text{OH})_2$		Singenit
$\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$		Fridelova so

## SKRAĆENICE

---

<b>BSE</b>	Elektronska mikroskopija u režimu povratno rasejanih elektrona ( <b>B</b> ack- <b>S</b> cattered <b>E</b> lectron)
<b>BSE-EDS</b>	Elektronska mikroskopija u režimu povratno rasejanih elektrona sa energetske disperznom spektroskopskom ( <b>B</b> ack- <b>S</b> cattered <b>E</b> lectron with <b>E</b> nergy <b>D</b> ispersive <b>X</b> -ray <b>S</b> pectrometry)
<b>EDS</b>	Energetske disperziona spektroskopija ( <b>E</b> nergy <b>D</b> ispersive <b>X</b> -ray <b>S</b> pectrometry)
<b>FTIR</b>	Infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom ( <b>F</b> ourier <b>T</b> ransform <b>I</b> nfra <b>R</b> ed <b>S</b> pectroscopy)
<b>MIP</b>	Živina porozimetrija ( <b>M</b> ercury <b>I</b> ntrusion <b>P</b> orosimetry)
<b>SE</b>	Sekundarni elektroni ( <b>S</b> canning <b>E</b> lectron)
<b>SEM</b>	Skenirajuća elektronska mikroskopija ( <b>S</b> canning <b>E</b> lectron <b>M</b> icroscope)
<b>SEM-EDS</b>	Skenirajuća elektronska mikroskopija sa energetske disperznom spektroskopskom ( <b>S</b> canning <b>E</b> lectron <b>M</b> icroscope with <b>E</b> nergy <b>D</b> ispersive <b>X</b> -ray <b>S</b> pectrometry)
<b>XRD</b>	Rendgenska difrakcija ( <b>X</b> - <b>R</b> ay <b>D</b> iffraction)
<b>AAR</b>	Alkalno-agregatna reakcija ( <b>A</b> lkali- <b>A</b> ggregate <b>R</b> eactions)
<b>ACI</b>	Američki institut za beton ( <b>A</b> merican <b>C</b> oncrete <b>I</b> nstitut)
<b>ASTM</b>	Američko društvo za ispitivanje materijala ( <b>A</b> merican <b>S</b> ociety for <b>T</b> esting <b>M</b> aterials)
<b>ACV</b>	Drobljivost agregata ( <b>A</b> ggregate <b>C</b> rushing <b>V</b> alue)
<b>AFm</b>	Grupa kalcijum-sulfoaluminat- hidrata sa jednim molekulom anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ); m-mono ( <b>A</b> lumino <b>F</b> errite <b>M</b> onosubstituted-monosulfoaluminate)
<b>AFt</b>	Grupa kalcijum-sulfoaluminat-hidrata sa tri molekula anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ); t-tree ( <b>A</b> lumino <b>F</b> errite <b>T</b> risubstituted-ettringite)
<b>DEF</b>	Odloženo formiranje etringita ( <b>D</b> elay <b>E</b> ttringite <b>F</b> ormation)
<b>EEF</b>	Formiranje etringita u ranoj fazi ( <b>E</b> arly <b>E</b> ttringite <b>F</b> ormation)
<b>EMV</b>	Ekvivalentna zapremina maltera ( <b>E</b> quivalent <b>M</b> ortar <b>V</b> olume)
<b>ESA</b>	Spoljašnje delovanje sulfata ( <b>E</b> xternal <b>S</b> ulfate <b>A</b> ttack)
<b>HRWRA</b>	Hemijski dodatak visokog stepena redukcije vode ( <b>H</b> igh <b>R</b> ange <b>W</b> ater <b>R</b> educing <b>A</b> dmixture)
<b>ISA</b>	Unutrašnje delovanje sulfata ( <b>I</b> nternal <b>S</b> ulfate <b>A</b> ttack)

<b>ITZ</b>	Tranzitna zona/Prelazna zona ( <b>I</b> nterfacial <b>T</b> ransition <b>Z</b> one)
<b>LA</b>	Koeficijent Los Anđeles ( <b>L</b> os <b>A</b> ngeles)
<b>NA</b>	Prirodni agregat ( <b>N</b> atural <b>A</b> ggregate)
<b>NAC</b>	Beton od prirodnog agregata ( <b>N</b> atural <b>A</b> ggregate <b>C</b> oncrete)
<b>RA</b>	Reciklirani agregat ( <b>R</b> ecycled <b>A</b> ggregate)
<b>RCA</b>	Agregat dobijen recikliranjem starog betona ( <b>R</b> ecycled <b>C</b> oncrete <b>A</b> ggregate)
<b>SI</b>	Oblik zrna ( <b>S</b> hape <b>I</b> ndex)
<b>SCM</b>	Mineralni dodaci cementu ( <b>S</b> upplementary <b>C</b> ementitious <b>M</b> aterials)
<b>T SMA</b>	Postupak mešanja iz dve faze ( <b>T</b> wo <b>S</b> tage <b>M</b> ixing <b>A</b> pproach)

## SIMBOLI

---

<b>A</b>	[m <sup>2</sup> ]	Površina
<b>a</b>	[mm]	Ivica kocke
<b>A<sub>i</sub></b>	[kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]	Koeficijent kapilarnog upijanja
<b>a<sub>i</sub></b>	[g]	Srednja vrednost delimičnog ostatka agregata
<b>a<sub>i/1</sub></b>	[g]	Delimični ostatak agregata na sitima za uzorak 1
<b>a<sub>i/2</sub></b>	[g]	Delimični ostatak agregata na sitima za uzorak 2
<b>b</b>	[mm]	Ivica kocke
<b>d</b>	[μm]	Prečnik pore
<b>D</b>	[mm]	Nominalno najkrupnije zrno agregata
<b>d</b>	[Å]	Prečnik pore
<b>d<sub>crit</sub></b>	[μm]	Kritični prečnik
<b>d<sub>i</sub></b>	[mm]	Otvor i-tog sita
<b>d<sub>max</sub></b>	[mm]	Maksimalna dubina prodora vode pod pritiskom
<b>d<sub>th</sub></b>	[μm]	"Threshold"
<b>f<sub>c</sub></b>	[MPa]	Čvrstoća betona pri pritisku
<b>f<sub>c,28</sub></b>	[MPa]	Čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 28 dana, izmerena na kocki ivice 150mm
<b>f<sub>c,3m</sub></b>	[MPa]	Čvrstoća betona pri pritisku nakon 3 meseca izlaganja delovanju sulfatnih rastvora, izmerena na cilindrima prečnika 100mm i visine 100mm

$f_{c,6m}$	[MPa]	Čvrstoća betona pri pritisku nakon 6 meseci izlaganja delovanju sulfatnih rastvora, izmerena na cilindrima prečnika 100mm i visine 100mm
$f_{c,sr,15}$	[MPa]	Srednja vrednost čvrstoće betona pri pritisku izmereno na kocki ivice 150mm
$f_{c,sr,20}$	[MPa]	Srednja vrednost čvrstoće betona pri pritisku svedeno na kocku ivice 200mm
$M$	-	Modul finoće agregata
$m_1$	[g]	Masa uzorka pre ispitivanja upijanja vode pod pritiskom
$m_2$	[g]	Masa uzorka nakon ispitivanja upijanja vode pod pritiskom
$m_a$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Količina agregata u 1m <sup>3</sup> betona
$m_{a,k}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Količina krupnog agregata u 1m <sup>3</sup> betona
$m_{a,s}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Količina sitnog agregata u 1m <sup>3</sup> betona
$m_{b,pv}$	[g]	Masa prirodno vlažnog uzorka
$m_{b,sv}$	[g]	Masa svežeg betona
$m_c$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Količina cementa u 1m <sup>3</sup> betona
$m_k$	[g]	Masa praznog kalupa za kocke ivice 150mm
$m_{k,pun}$	[g]	Masa punog kalupa za kocke ivice 150mm
$m_{spk}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Količina superplastifikatora u 1m <sup>3</sup> betona
$m_v$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Količina vode u 1m <sup>3</sup> betona
$m_{v,dod}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dodatna količina vode koju upije reciklirani agregat
$m_{v,k}$	[kg]	Masa kapilarno upijene vode
$m_v/m_c$	-	Vodocementni faktor
$O_i$	[g]	Kumulativni ostatak agregata na sitima
$p_m$	[MPa]	Pritisak žive
$P$	[kN]	Sila loma
$p$	-/[%]	Poroznost uzorka
$P_i$	[%]	Procentualni ostatak agregata na sitima
$t$	[h]	Vreme trajanja ispitivanja
$t^{1/2}$	[h <sup>1/2</sup> ]	Kvadratni koren iz vremena
$U_k$	[kg/m <sup>2</sup> ]	Kapilarno upijanje vode, po površini
$U_{k,25}$	[kg/m <sup>2</sup> ]	Kapilarno upijanje vode nakon t=25h od početka ispitivanja
$U_p$	[%]	Udeo pora određenog intervala u ukupnoj raspodeli pora
$u_{sr}$	[g]	Srednja vrednost upijanja vode pod pritiskom
$U_{sr}$	[g/cm <sup>2</sup> ]	Srednja vrednost upijanja vode pod pritiskom, po površini
$V_b$	[m <sup>3</sup> ]	Zapremina uzorka betona
$V_k$	[m <sup>3</sup> ]	Zapremina kalupa za kocke ivice 150mm
$V_{pora}$	[mm <sup>3</sup> ]	Zapremina pora u ispitivanom uzorku



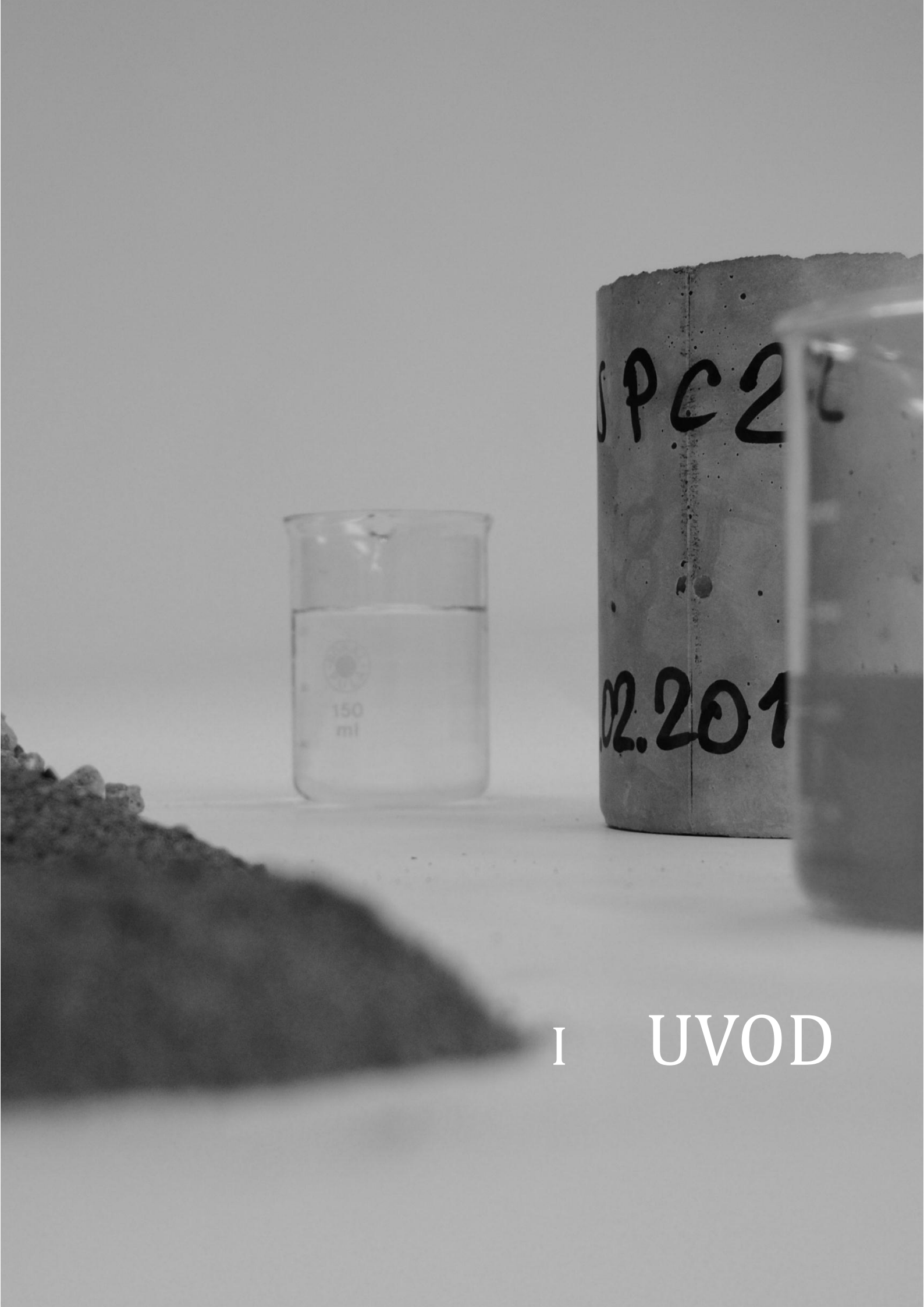
<b>V<sub>ukupno</sub></b>	[mm <sup>3</sup> ]	Ukupna zapremina ispitivanog uzorka
<b>w/c</b>	-	Vodocementni faktor
<b>w/c*</b>	-	Vodocementni faktor sa količinom vode iz superplastifikatora (>3l/m <sup>3</sup> )
<b>X</b>	-/[%]	Učešće frakcija agregata u mešavini
<b>Y<sub>i</sub></b>	[%]	Procentualni prolaz agregata na sitima
<b>Y<sub>M</sub></b>	[%]	Procentualni prolaz mešavine agregata na sitima
<b>γ</b>	[N/m]	Površinski napon žive
<b>γ<sub>b,pv</sub></b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Zapreminska masa betona u očvrslom, suvom stanju
<b>γ<sub>b,sv</sub></b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Zapreminska masa betona u svežem stanju
<b>Δh</b>	[mm]	Sleganje betona
<b>Δp</b>	[%]	Količina uvučenog vazduha
<b>θ</b>	[°]	Kontaktni ugao
<b>V̄<sub>cp</sub></b>	[m <sup>3</sup> ]	Apsolutna zapremina cementne paste

#### OSTALO

---

<b>Å</b>	Angstrom (jedinica za dužinu)
<b>A...</b>	Kategorije recikliranog agregata u odnosu na sadržaj materija rastvorljivih u vodi, koje utiču na vreme vezivanja, prema EN 12620
<b>C.../...</b>	Klase čvrstoće pri pritisku za betone normalne zapreminske mase i teške betone, prema serijama standarda EN 206
<b>CEM...</b>	Vrste cementa prema serijama standarda EN 197-1
<b>CEM I</b>	Portland cement, sastav prema EN 197-1
<b>CEM III</b>	Cement sa visokim sadržajem zguze, prema EN 197-1
<b>TYPE ...</b>	Klasifikacija cementa prema ASTM C150
<b>TYPE I</b>	Portland cement, prema ASTM C150
<b>TYPE II</b>	Umereno sulfatno otporan cement, prema ASTM C150
<b>TYPE V</b>	Visoko sulfatno otporni cement, prema ASTM C150
<b>CL...</b>	Klase sadržaja hlorida u betonu, prema EN 206
<b>XA...</b>	Klase izloženosti na hemijske uticaje, prema EN 206
<b>XC...</b>	Klase izloženosti sa rizikom korozije prouzrokovane karbonatizacijom, prema EN 206
<b>XD...</b>	Klase izloženosti sa rizikom korozije prouzrokovane delovanjem hlorida koji ne potiču iz morske vode, prema EN 206
<b>XF...</b>	Klase izloženosti na zamrzavanje/odmrzavanje, prema EN 206
<b>XS...</b>	Klase izloženosti sa rizikom korozije prouzrokovane delovanjem hlorida iz morske vode, prema EN 206
<b>XO</b>	Klasa izloženosti bez rizika korozije ili štetnih uticaja, prema EN 206





# I UVOD



## 1. UVOD

Većina građevinskih objekata je u toku svog životnog veka izložena agresivnom delovanju iz okruženja. Od svih agresivnih uticaja sulfati se izdvajaju kao specifična grupa, kako zbog mogućnosti delovanja iz vazduha, vode i tla, tako i zbog izazivanja različitih oblika korozije betona. Karakteristični oblici korozije betona, izazvani sulfatima su: fizički (ekspanzija sulfatnih soli u porama cementnog kamena i obrazovanje jedinjenja sa uvećanom zapreminom); hemijski (obrazovanje lakorastvorljivih jedinjenja pri hemijskoj reakciji sa produktima hidratacije cementa) i biološki (raspadanjem organskih materija nastaje gas  $H_2S$  koji se pod dejstvom određenih bakterija pretvara u sulfatnu kiselinu ili, kod nekih bakterija produkti metabolizma mogu sadržati sulfatnu kiselinu).

U građevinskim objektima najosetljiviji elementi konstrukcije na dejstvo sulfata jesu fundamenti, ukopani delovi objekata, kao i čitavi konstrukcijski sklopovi u industrijskim i infrastrukturnim objektima. Fundamenti i ukopani delovi objekata se često nalaze ispod nivoa podzemnih voda, koje u velikom broju slučajeva sadrže rastvorene različite vrste sulfata (magnezijum, natrijum, amonijum i u manjoj meri kalcijum). Kod mnogih industrijskih objekata mogu se kao posledica tehnoloških procesa javiti materije koje izazivaju sulfatnu koroziju. Kisele kiše u urbanim sredinama mogu biti jako agresivne na beton, dok objekti u blizini mora ili u moru takođe mogu biti izloženi delovanju sulfata ali rastvorenih u morskoj vodi. Biološka korozija je poseban oblik sulfatne korozije izazvane delovanjem produkata metabolizma bakterija.

Poslednjih godina, možda i decenija, u svetu se sve više istražuje mogućnost zamene prirodnog agregata i veziva u betonu. Razlozi upotrebe alternativnih materijala u betonu su višestruki. Pored očuvanja ograničenih prirodnih rezervi materijala, savremeno graditeljstvo na ovaj način pokušava da reši i problem otpadnih materijala i industrijskih nusprodukata. "Stari beton", koji se dobija nakon rušenja građevinskih objekata kao i nusprodukti iz industrije, predstavljaju sve veći ekološki problem zbog velikih količina i teškoća oko adekvatnog deponovanja. S druge strane, zamena dela cementa nekim nusproduktom iz industrije značajno se smanjuje emisija  $CO_2$  pri proizvodnji cementnog klinkera i smanjuje količina otpadnog materijala. Zato su ovi materijali postali predmet mnogih istraživanja. Nakon istraživanja osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika betona sa ovim materijalima i utvrđivanja mogućnosti njihove primene, savremena istraživanja se usmeravaju u pravcu definisanja njihove trajnosti, jer je to prema mnogim autorima ograničavajući faktor za njihovu širu primenu.

## 2. POTREBA ZA ISTRAŽIVANJEM

Sulfatna korozija običnih betona sa prirodnim rečnim i drobljenim agregatom je intenzivno istraživana od strane mnogih autora sa različitim načinom pristupa ovom problemu. U tim istraživanjima definisani su, kako uticajni parametri, tako i mehanizmi korozionih procesa, kao što su ekspanzija betona, razaranje produkata hidratacije i

kristalizacija soli. Međutim, u većini publikovanih istraživanja ističe se složenost ovog problema i potreba za daljim istraživanjem. Pregledom dostupne literature uočen je veliki broj radova o ispitivanju sulfatne otpornosti cementnih pasta i maltera ali ne i betona, naročito onih sa recikliranim agregatom. Zbog veće nehomogenosti betona, delovanje sulfata na njega je veći problem nego pri delovanju na paste i maltere, naročito od kada se koriste mineralni dodaci. Degradiranje obuhvata i fizičke i hemijske aspekte koji su najčešće nerazjašnjeni do kraja i često kontraverzni [1].

Kompleksnost istraživanja sulfatne otpornosti betona se ogleda i u činjenici da ne postoje standardizovani postupci za njeno određivanje. Upravo iz tog razloga, istraživači su u svojim eksperimentima koristili:

- uzorke od različitog materijala (cementna pasta, malter, beton)
- uzorke različitih oblika i dimenzija
- različite vrste i koncentracije sulfatnih rastvora, kao i režime delovanja i
- različite postupke (metode) i kriterijume za ocenu sulfatne otpornosti.

Na osnovu navedenih činjenica i evidentne potrebe za daljim istraživanjima u ovoj oblasti, sulfatna korozija betona sa recikliranim agregatom je odabrana za temu doktorske disertacije.

### **3. PREDMET, CILJ I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA**

Predmet ovog istraživanja je sulfatna otpornost betona sa recikliranim agregatom od betona (dalje u tekstu reciklirani agregat) i sulfatno-otpornim cementom sa visokim sadržajem granulirane zguze, oznake CEM III. U okviru ove grupe betonskih kompozita analizirani su uticajni parametri i mehanizmi degradacije betona usled delovanja sulfata.

Analizirani su sledeći uticajni parametri:

- hemijski i mineraloški sastav cementnog kamena,
- uticaj "starog" cementnog kamena vezanog za zrna agregata u recikliranom betonu,
- vrsta i dužina delovanja agresivnih supstanci.

U cilju utvrđivanja otpornosti betona na sulfatnu koroziju, obavljena su ista ispitivanja na betonima spravljenim sa prirodnim (rečnim) agregatom i na betonima spravljenim sa krupnim recikliranim agregatom od betona. U oba slučaja kao sitan agregat korišćen je prirodni (rečni). U okviru obe vrste betona varirane su dve vrste cementa:

- Portland cement CEM I 42.5R ("Lafarge", Beočinska fabrika cementa) i
- Metalurški sulfatno-otporni cement niske toplote hidratacije CEM III/B 32.5N LH/SR ("Lafarge", Beočinska fabrika cementa).

Osim vrste cementa, varirana su i dva vodocementna faktora:

- $(w/c)_1=0,55$  i
- $(w/c)_2=0,38$ .

Betoni spravljeni sa rečnim krupnim i sitnim agregatom i čistim portland cementom predstavljaju referentne betone u komparativnoj analizi.

Za sve vrste betona, koje su dobijene kombinacijom opisanih komponentnih materijala, određen je stepen i mehanizam njihove degradacije pri delovanju dva sulfatna rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  u koncentraciji od 5%. Odabrane sulfatne soli se najčešće javljaju u podzemnim vodama i tlu.

Za određivanje stepena oštećenja betona usled delovanja rastvora sulfatnih soli, ispitano je:

- promena čvrstoće pri pritisku,
- promena dužine uzoraka,
- promena kapilarnog upijanja vode,
- promena poroznosti i raspodela pora (pomoću MIP)
- mikroskopska analiza (pomoću SEM i BSE-EDS) i
- promena faznog sastava (pomoću XRD i FTIR).

Osnovni cilj ovog istraživanja je da se na osnovu ekperimentalnih rezultata i njihove analize zaključi da li betoni sa recikliranim agregatom imaju istu ili manju otpornost na sulfatnu koroziju, što bi omogućilo definisanje oblasti njihove primene sa aspekta trajnosti. Pored toga, istraživanje je koncipirano tako da omogući utvrđivanje sulfatne otpornosti betona sa recikliranim agregatom u zavisnosti od variranih komponentnih materijala i njihovih odnosa u sastavu betona.

Dobijeni rezultati i izvedeni zaključci biće podloga za definisanje preporuka za povećanje sulfatne otpornosti betona sa recikliranim agregatom. Takođe će omogućiti da se definišu mogućnosti ili ograničenja za primenu betona sa recikliranim agregatom kada su izloženi delovanju sulfata.

Na osnovu postavljenog cilja, kao osnova za definisanje plana i programa istraživanja, postavljene su polazne hipoteze:

*Hipoteza 1: Vrsta krupnog agregata (rečni ili reciklirani) ima uticaja na sulfatnu otpornost betona.*

*Hipoteza 2: Primenom sulfatno-otpornih cemenata može se poboljšati sulfatna otpornost betona sa recikliranim agregatom.*

*Hipoteza 3: Sulfatno-otporni betoni sa recikliranim agregatom mogu se dobiti i sa običnim Portland cementom uz smanjenje vodocementnog faktora.*

*Hipoteza 4: Postoji veza između sulfatne otpornosti betona, mikrostrukture i promena u mikrostrukturi cementnog kamena usled delovanja sulfatnih soli.*

Kako bi se proverile definisane hipoteze, sprovedene su sledeće aktivnosti:

- 1) Sistematizacija dostupnih podataka o metodama koje se koriste za ocenu sulfatne otpornosti očvrslih pasta/maltera/betona, vrsti primenjenih uzoraka (u smislu materijala, oblika, dimenzija), načinima nege pre početka ispitivanja, načinima i uslovima delovanja sulfatnih rastvora (u smislu vrste rastvora, koncentracije, temperature, dužine trajanja ispitivanja).
- 2) Eksperimentalno ispitivanje odabranih fizičko-mehaničkih svojstava betona, praćenje promene mikrostrukture i faznog sastava usled delovanja sulfatnih rastvora, u funkciji:
  - vrste primenjenog agregata,
  - vrste cementa
  - vrste vodocementnog faktora.
- 3) Donošenje opštih zaključaka o mogućnosti i načinu primene odabranih komponentnih materijala za dobijanje sulfatno-otpornih betona, kao i opravdanosti primene predloženih metoda za ocenu sulfatne otpornosti.

Imajući u vidu predmet i cilj istraživanja, kao i postavljene hipoteze doktorske disertacije, od izuzetnog je značaja pravilan izbor metoda naučno-istraživačkog rada. Sintezom i kritičkom analizom dostupnih rezultata istraživanja drugih autora vezanih za oblast teorije i tehnologije sulfatno-otpornih betona formirana je baza podataka kao osnova za sopstveno eksperimentalno istraživanje. U analizi rezultata korišćena je statistička metoda i metoda korelacija, a izvođenje zaključaka sopstvenog istraživanja bazirano je na primeni komparativne metode.

#### **4. PRIMENLJIVOST REZULTATA ISTRAŽIVANJA**

Sulfatna korozija betonskih kompozita je kompleksan fizičko-hemijski proces čija se aktuelnost ne smanjuje, bez obzira na veliki broj sprovedenih istraživanja u ovoj oblasti. Razlozi za ovako stanje su višestruki i uzrokovani su, između ostalog i upotrebom novih komponentnih materijala i nove opreme i metoda za karakterizaciju materijala i ocenu sulfatne otpornosti betona.

Rezultati predloženog eksperimentalnog istraživanja daju značajan doprinos u oceni sulfatne otpornosti betona spravljenih sa recikliranim agregatom, koji je dobijen usitnjavanjem starog betona. Osim navedenog doprinosa, rezultati izvedenog eksperimentalnog istraživanja definišu oblasti primene kako betona sa rečnim agregatom tako i betona sa recikliranim agregatom u zavisnosti od upotrebene vrste cementa, kvaliteta cementne matrice kroz smanjenje količine vode i vrste sulfatne agresije.



## 5. KRATAK PRIKAZ SADRŽAJA RADA

U prvom poglavlju definisan su predmet i ciljevi istraživanja, postavljene su osnovne hipoteze i opisana je metodologija istraživanja, kao i oprvdanost i primenljivost predmetnog istraživanja.

U drugom poglavlju istaknut je značaj trajnosti betona u betonskim konstrukcijama i sažeto su opisani faktori koji najviše utiču na trajnost betona. Posebno je analizirana poroznost cementnog kamena i njena povezanost sa propustljivošću gasova i tečnosti. Dat je pregled osnovnih vrsta pora kao i najčešće korišćenih tehnika za njihovo proučavanje.

U trećem poglavlju ukratko su date teorijske osnove veziva koja su odabrana za eksperimentalni deo disertacije. Dat je pregled osnovnih klinker minerala i ukratko je prikazan proces hidratacije i produkti hidratacije Portland cementa. Opisana je zgura kao dodatak cementu i date su osnovne karakteristike cemenata sa dodatkom zgure u visokom procentu. Na kraju poglavlja tabelarno je dat pregled sulfatno-otpornih vrsta cemenata prema EN 197-1.

U četvrtom poglavlju sažeto su prikazane teorijske osnove agregata od recikliranog betona, kao komponentnog materijala istraživanih vrsta betona. Opisani su postupci proizvodnje agregata, dat je pregled bitnih svojstava i osnovnih pojmova vezanih za agregat od recikliranog betona. Naglašena je uloga tranzitne zone, koja je posebno značajna u betonima spravljenim sa ovom vrstom agregata. Predstavljene su i metode koje se koriste za poboljšanje svojstava betona sa recikliranim agregatom, kao i postupci koji se mogu koristiti za određivanje količine "starog" cementnog kamena vezanog za zrno agregata, kao jedne od najbitnijih karakteristika ove vrste agregata.

U petom poglavlju prikazane su tehnike koje su odabrane za proučavanje promena u mikrostrukturi sa aspekta teksture, mineraloškog i hemijskog sastava u okviru eksperimentalnog istraživanja. Opisane su metode SEM (Skenirajuća elektronska mikroskopija), XRD (Rendgenska difrakcija) i FTIR (Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom) za kvalitativno i BSE-EDS (Povratno rasejani elektroni sa energetske disperznom spektroskopijom) za kvantitativno određivanje pomenutih svojstava cementnog kamena.

U šestom poglavlju pobrojani su elementi konstrukcija koji su podložni sulfatnoj koroziji, kao i sredine za koje je karakterističan ovaj oblik korozije betona. Objašnjeni su mehanizmi delovanja sulfata, hemijske promene koje se pri tome dešavaju u cementnom kamenu, produkti koji pri tome nastaju (etringit, gips, taumasit, brucit) i vidljive manifestacije na površini betona. Kroz analizu radova drugih istraživača naglašeni su problemi i konfuzije koji se javljaju prilikom ispitivanja sulfatne otpornosti očvrsljelih pasta, maltera i naročito betona zbog povećane nehomogenosti i upotrebe hemijskih i mineralnih dodataka. Prikazane su i preporuke za poboljšanje sulfatne otpornosti betona, kako od strane određenih autora tako i onih koji se nalaze u zvaničnim standardima pojedinih zemalja.

U sedmom poglavlju dat je pregled aktuelnih istraživanja iz oblasti delovanja različitih sulfatnih rastvora na paste, maltere i betone u kojima su analizirani uticaji: vrste cementa, mineralnih dodataka, vodocementnog faktora, načina nege uzoraka, vrste i koncentracije sulfatnih rastvora i režima delovanja sulfata. Analizirano je i nekoliko radova o sulfatnoj otpornosti betona sa recikliranim agregatom.

U osmom poglavlju prikazano je sopstveno eksperimentalno istraživanje sulfatne otpornosti betona u kojima su varirani dve vrste krupnog agregata, dve vrste cementa, dva vodocementna faktora i dve vrste sulfatnih rastvora. Dati su program istraživanja, podaci o komponentnim materijalima, postupak i projektovanje sastava betonskih mešavina, izrada betonskih mešavina i uzoraka za laboratorijska ispitivanja, oprema i postupci ispitivanja, kao i dobijeni rezultati ispitivanja odabranih svojstava svežeg i očvrslog betona. Na svežem betonu su mereni zapreminska masa i konzistencija, a na očvrsлом betonu kapilarno upijanje vode, upijanje vode pod pritiskom, promena dužine uzoraka i čvrstoća pri pritisku. Na posebno pripremljenim uzorcima urađene su mikrostrukturne analize: poroznost, SEM, BSE/EDS, XRD i FTIR. Sva navedena svojstva su merena pre početka izlaganja i nakon 3 i 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima.

U devetom poglavlju analizirani su rezultati sopstvenog eksperimentalnog istraživanja sulfatne otpornosti odabranih vrsta betona. Analiza sulfatne otpornosti je urađena najpre u okviru betona spravljenih sa istom vrstom krupnog agregata, a zatim je izvršena i komparativna analiza betona sa rečnim i recikliranim krupnim agregatom. Definisan je uticaj vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora na promenu svojstava odabranih za ocenu sulfatne otpornosti i ocenjena je sulfatna otpornost ispitivanih vrsta betona korišćenjem kriterijuma iz analizirane literature. Analizirane su i promena poroznosti i veličine pora, kao i promene u produktima hidratacije cementa i novonastala jedinjenja usled delovanja sulfatnih rastvora.

U desetom poglavlju prikazani su zaključci po odabranim metodama za proveru sulfatne otpornosti, po vrstama upotrebljenog agregata, a zatim je data komparativna analiza u okviru koje su upoređeni rezultati dobijeni primenom odabranih metoda za proveru sulfatne otpornosti, radi izbora najpogodnije metode. Posebno je urađena ocena sulfatne otpornosti betona sa recikliranim krupnim agregatom u zavisnosti od vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora i predloženi su pravci daljeg istraživanja. Na osnovu svih izvedenih zaključaka formiran je konačni zaključak o mogućnosti primene agregata od recikliranog betona za proizvodnju betona otpornih na sulfatnu koroziju.

U jedanaestom poglavlju, dat je širi spisak korišćene literature i referenci, kao i nazivi standarda koji su korišćeni u okviru eksperimentalnog dela disertacije.

U dvanaestom poglavlju, tabelarno ili u vidu dijagrama su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja - izmerene veličine i sračunate vrednosti svojstava odabranih za analizu.

A black and white photograph of a laboratory setting. In the foreground, two long, rectangular concrete or stone samples are laid out on a light-colored surface. The sample on the left is marked with handwritten text: 'C100 0015' and 'C100 0015-2'. The sample on the right is marked with 'C100 0015' and 'C100 0015-3'. Both samples show a rough, porous texture on their top surfaces and some cracking. In the background, there is a large, vertical rectangular block of material, a white plastic jug, a white bucket, and other laboratory equipment. The overall scene suggests a material science or engineering laboratory.

II TRAJNOST BETONA I  
POROZNOST CEMENTNOG  
KAMENA



## 1. UVOD

Beton je danas najviše korišćeni građevinski materijal. Jedna od ključnih karakteristika koja je odgovorna za to jeste njegova trajnost, odnosno sposobnost da se odupre različitim uticajima iz okruženja. Beton sa velikom trajnošću, zadržava ili zanemarljivo menja početnu formu, kvalitet i funkcionalna svojstva. Na trajnost betona može se uticati pravilnim projektovanjem i izvođenjem ali i održavanjem konstrukcije. To podrazumeva da se u fazi projektovanja objekta definiše optimalan oblik konstrukcije, u fazi projektovanja sastava betona napravi adekvatan izbor komponentnih materijala i definiše optimalni sastav, vodi računa o kontroli kvaliteta i nege i obućenost radne snage. Nije retko da se neki od ovih faktora zanemari što može prouzrokovati probleme sa trajnošću. Otuda su najčešće problemi vezani za trajnost povezani sa nekvalitetnom proizvodnjom i ugradnjom kao i neadekvatnim korišćenjem materijala a ne sa agresivnim delovanjem sredine.

Trajnost nije lako objasniti jer se najčešće definiše opisno, što ne možemo prihvatiti kao najidealnije. Ne može se reći da je karakteristika materijala ili samih konstrukcija, već više njihovo ponašanje u datim uslovima izloženosti sredini u kojoj se nalazi. Iz tog razloga možda je bolje reći vek trajanja nego trajnost.

Određeni uslovi u kojima se beton nalazi mogu biti veoma agresivni i izazvati njegovo oštećenje. Takvi uslovi deluju na promenu mikrostrukture, a promena mikrostrukture uslovljava promenu svojstava materijala. Mehanizmi koji dovode do toga mogu se, prema svojoj prirodi, podeliti na hemijske, fizičke i mehaničke, ali i na mehanizme koji nastaju kada agresivna čestica dolazi iz spoljašnje sredine, ili je unutar materijala. Najčešće su udruženi u delovanju i zavisno od vrste mogu biti koncentrisani u cementnoj pasti, agregatu, armaturi, kontaktnim površinama ili u više njih.

Metha zajedno sa Gerwick-om, fizičke uzroke oštećenja betona grupiše u dve kategorije: prvu, u koju ubraja površinsko habanje ili gubljenje mase usled abrazije, erozije i kavitacije, i drugu, koja obuhvata pucanje usled naglih promena temperature, vlažnosti, kristalizacije soli, statičkog i dinamičkog opterećenja i sl. Hemijske uzroke oštećenja dele u tri kategorije: hidroliza cementne paste pod dejstvom meke vode, katjonska reakcija između agresivnog fluida i cementne paste i reakcije koje uzrokuju stvaranje ekspanzivnih produkata [2].

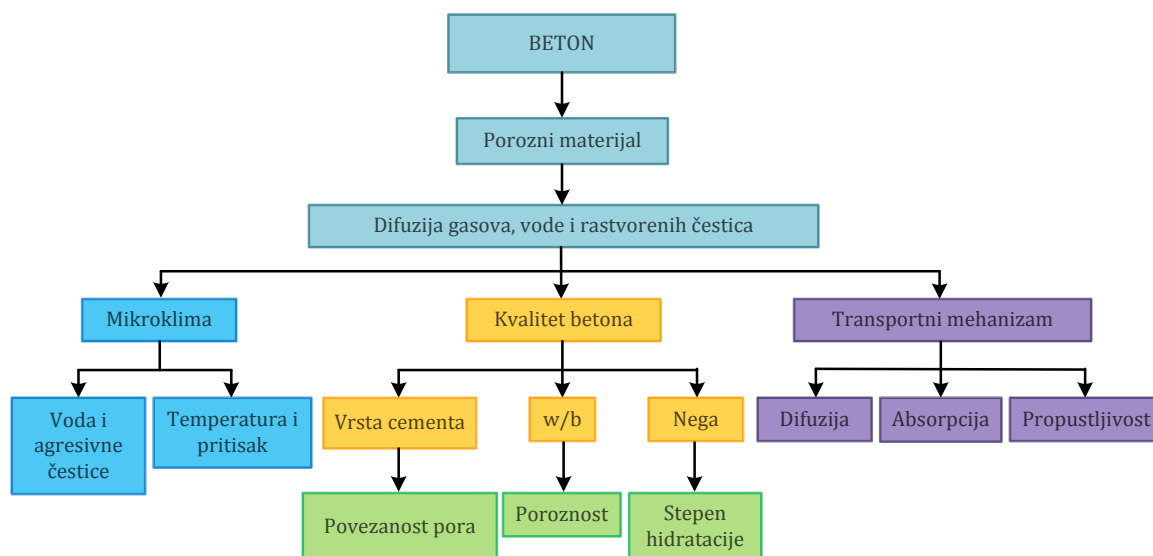
Za sve spoljašnje, hemijski agresivne supstance, bilo da su organskog ili neorganskog porekla, verovatnoća da će da oštete beton je minimalna, ukoliko beton ima nisku propustljivost i ukoliko je smešten u suvom okruženju pri konstantnoj temperaturi i vlažnosti. U većini slučajeva u realnoj konstrukciji takvi uslovi ne postoje. Kako bi predupredili degradaciju betona, izuzetno je važno znati tačne uslove u kojima će se nalaziti analizirana konstrukcija i o tome prikupiti što više informacija.

U zavisnosti od okruženja u kom se beton nalazi i vrste agresivnih uticaja se menjaju, te je veoma važno pri definisanju trajnosti betona obuhvatiti sve prisutne mehanizme

razaranje [3]. Smatra se da je materijal dostigao kraj životnog veka, kada su usled delovanja okoline, njegove karakteristike toliko promenjene, da je njegovo dalje korišćenje nesigurno ili neekonomično [4].

Kod jednog dela projekatana građevinskih konstrukcija postoji svest da je trajnost građevinskih materijala bitna koliko i mehaničke karakteristike i cena objekta. Međutim, još uvek je potrebno preduzimati mere da se svest kod prestalog dela projekatana razvije. U ukupnom budžetu koji se odvaja za neku konstrukciju, značajan deo zauzima njegova moguća sanacija ili potpuno uklanjanje. Osim toga, trajnost betona usko je povezana sa principima održanja i očuvanja životne sredine, kako sa stanovišta zaštite prirodnih resursa, tako i sa aspekta uticaja konstrukcije na okruženje. Kao još jedan u nizu problema može se istaći i potpuna ili delimična neusaglašenost postojećih pravilnika i uputstava za primenu novih tehnologija [5].

Trajnost betona je blisko povezana sa mogućnošću prodora agresivnih čestica u njegovu strukturu. Za adekvatno obuhvatanje pojma trajnosti, veoma je bitno razumeti fenomen transporta fluida koji je povezan i sa fizičkim i sa hemijskim uzrocima degradacije betona. Na narednom dijagramu (Slika II.1) prikazani su faktori koji utiču na pomenute procese [6]:



Slika II.1 - Prikaz faktora koji utiču na trajnost betona

Kada se posmatra mikroklima ispitivanog elementa, misli se na koncentraciju i vrstu hemijskih supstanci koje postoje u njegovom bliskom okruženju, njihovu rastvorljivost u vodi ili tlu, pritisak i temperaturu i njihove promene, cikluse vlaženja/sušenja, kao i na pokretljivost/stagnaciju vode koja je u kontaktu sa posmatranom konstrukcijom. Kod kvaliteta betona, kao najbitniji izdvajaju se vodocementni faktor, adekvatna nega i vrsta cementa. Uticaj transportnih mehanizama na trajnost betona će biti prikazani u narednom poglavlju.

U dobro hidratiranoj cementnoj pasti, sastavljenoj od relativno nerastvorljivih hidrata kalcijuma (C-S-H, CH, C-A-S-H), postoji ravnoteža sa tečnošću u porama visoke pH vrednosti. Zavisno od koncentracije  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  jona, pH vrednost varira od 12,5 do 13,5. Bilo koje okruženje sa vrednošću  $\text{pH} < 12,5$  može biti agresivno za beton i destabilizujuće za komponente hidratacije cementa. Međutim, kada je mala propustljivost cementnog kamena, brzina degradacije u betonu može biti veoma spora i u slučajevima kada je pH vrednost blizu 6 [4].

Od svih agresivnih uticaja, sulfati se izdvajaju kao specifična grupa, kako zbog mogućnosti agresivnog delovanja iz vazduha, vode i tla, tako i zbog izazivanja različitih oblika korozije betona (fizički, hemijski i biološki) [7]. Prema EN 206-1, ovaj oblik agresivnog delovanja na beton spada u hemijsku agresiju [8].

Za poboljšanje otpornosti betona na delovanje sulfata mogu se izdvojiti tri glavne strategije:

1. praviti visoko kvalitetan, nepropustiv beton;
2. koristiti sulfatno-otporna veziva i
3. osigurati da je beton propisno ugrađen i negovan.

Treba imati na umu da je potrebno primeniti sve preporuke zajedno kako bi se obezbedila visoka otpornost na dejstvo sulfata [6],[7].

Već je rečeno da se neadekvatna trajnost betona može povezati sa spoljašnjim i/ili unutrašnjim uzrocima, pri čemu su od unutrašnjih najvažniji poroznost, relativna veličina pora i stepen njihove povezanosti.

## 2. POROZNOST

Voda je najrasprostranjeniji fluid na planeti i uglavnom je povezana sa svim oblicima oštećenja betona. Osnovni je učesnik u stvaranju ali i razaranju materijala, a lakoća (ili teškoća) sa kojom prolazi kroz čvrsta tela određuje brzinu promene njihovih karakteristika. Prečnik molekula vode je relativno mali što joj dopušta kretanje kroz jako fine pore i mogućnost rastvaranja više supstanci nego bilo koji drugi fluid. Transportuje jone i gasove kroz sistem pora u čvrstom telu koji mogu biti uzročnici mnogih hemijskih procesa u materijalu.

Pri uobičajenim temperaturama voda je u tečnom stanju. Kretanjem kroz sistem pora tela u čvrstom agregatnom stanju, menjaju se karakteristike datog čvrstog tela. Zbog procesa hidratacije, skupljanja, širenja pora, kao i pojave mikroprslina usled fizičko-hemijskih interakcija između fluida i cementne paste, karakteristike betona vezane za transport fluida stalno se menjaju. Najčešći uzročnici smanjene trajnosti betona, osim vode, su i fluidi u gasovitom agregatnom stanju kao što su kiseonik i ugljen-diosid.

## 2.1. Propustljivost betona

Ulazak i kretanje fluida kroz beton zavise od strukture hidratirane cementne paste i odvijaju se na jedan od sledećih načina:

- difuzijom
- absorpcijom
- propustljivošću.

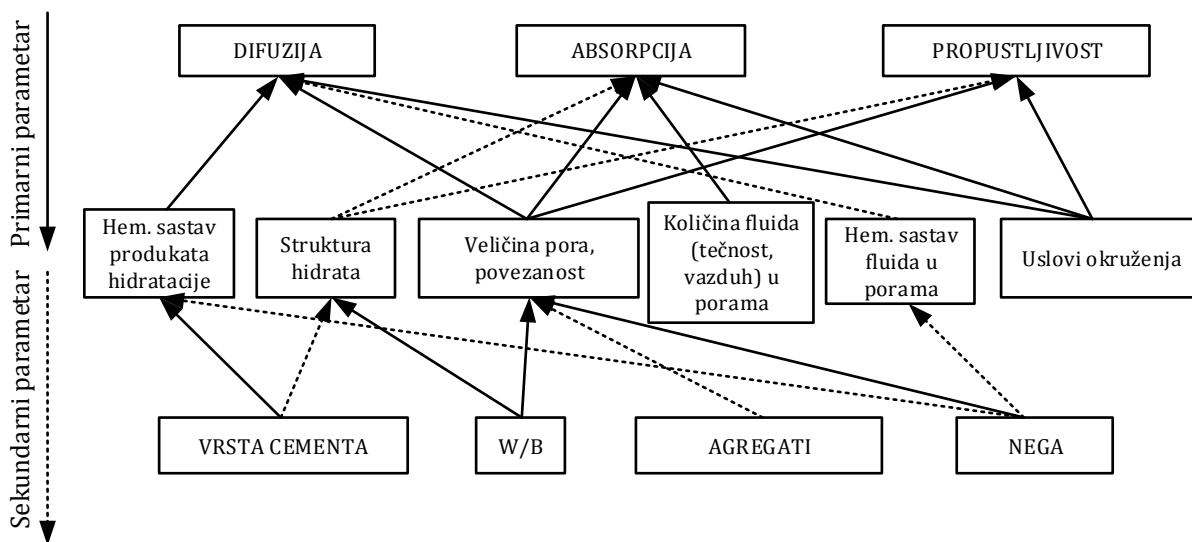
*Difuzija* je proces u kojem se fluid kreće usled razlike u koncentraciji.

*Absorpcija* je rezultat kretanja fluida u kapilarnim porama betona koje su otvorene ka okruženju i ne može da se javi u potpuno suvom ili zasićenom uzorku.

*Propustljivost* se odnosi na kretanje fluida usled razlike u pritiscima. Najčešće se svi ovi procesi stavljaju pod jedan naziv-propustljivost betona [9].

Difuzija čestica ili jona kroz vodu je oko četiri puta sporija nego kroz vazduh. Agresivni joni, kao što su sulfatni, kreću se putem difuzije (pre svega jonske) kroz pornu tečnost u betonu. Ova jonska difuzija je najefikasnija kada su u očvrslj cementnoj pasti pore zasićene, ali može da se javi i za koncentracije koje su nešto niže od koncentracije zasićenja. Difuzija je, kao i propustljivost, manja pri nižem vodocementnom faktoru.

Na narednom dijagramu (Slika II.2) se može videti koji su to primarni a koji sekundarni faktori koji utiču na kretanje gasova, tečnosti i jona kroz beton [6]:



Slika II.2 - Faktori koji utiču na kretanje gasova, tečnosti i jona kroz beton

Propustljivost betona je kontrolisana kapilarnom poroznošću. Propustljivost ne zavisi samo od količine pora, već i od vrste, veličine, rasporeda, oblika, zakrivljenosti površine i njihove povezanosti.



Voda dodata cementu indirektno je odgovorna za propustljivost hidratirane cementne paste. Naime, prostor koji ona zauzima u početku, delimično ili potpuno ostaje prazan nakon što je voda iskorišćena za hidrataciju cementa ili je isparila u okolnu sredinu. Tako vodu u cementnoj pasti možemo podeliti na hemijski vezanu vodu ili neisparljivu i slobodnu ili isparljivu vodu. U početku, propustljivost betona zavisi od veličine, oblika i koncentracije čestica cementa a kako hidratacija odmiče, kontrolisana je prostornim rasporedom kapilara. Sa procesom hidratacije smanjuje se kapilarna poroznost a samim tim i koeficijent propustljivosti. Između njih nema direktne proporcionalnosti, a malo smanjenje kapilarne poroznosti u početku povezano je sa značajnim smanjenjem velikih pora.

Kapilarna poroznost od približno 30% smatra se granicom kada se javlja diskontinuitet u kapilarnoj mreži a dalje smanjenje poroznosti neće uticati na koeficijent propustljivosti. Prema Neville-u [9], promena propustljivosti brža je pri nižem vodocementnom faktoru. U Tabela II.1 prikazano je vreme koje je potrebno da pore tokom hidratacije postanu diskontinualne u zavisnosti od vodocementnog faktora (prema Powers, 1959) [9].

*Tabela II.1- Vreme koje je potrebno da pore postanu diskontinualne, u zavisnosti od vodocementnog faktora (prema Powers, 1959) [9]*

<b>Vodocementni faktor</b>	<b>Vreme potrebno da se postigne diskontinualnost pora</b>
0,4	3 dana
0,45	7 dana
0,5	14 dana
0,6	6 meseci
0,7	1 godina
>0,7	Nemoguća diskontinualnost

Betoni sa istom ukupnom zapreminom pora mogu da pokažu različite unutrašnje karakteristike, zavisno od toga da li obuhvataju malu količinu velikih pora ili veliku količinu malih pora. Struktura pora betona veoma je složena i prostorno nehomogena. Cementna pasta blizu agregata, tj. u tranzitnoj zoni, ima drugačiju strukturu pora nego ostatak cementne paste. Sitan i krupan agregat u betonu mogu imati svoj sopstveni sistem pora koji može biti kompletno različit od sistema pora cementne paste i obično je diskontinualan [10].

Za propustljivost betona bitan je prečnik pora ali i njihova povezanost. Pore koje su diskontinualne, ispunjene vodom i sa malim ulaznim delom, ne učestvuju u protoku fluida, tj. nisu bitne za propustljivost. Za vodocementni faktor preko 0,38 kapilarne pore

će uvek postojati jer se ne može stvoriti toliko produkata hidratacije da mogu da ih zatvore.

Zbog postojanja različitih vrsta pora i mogućnosti da neke učestvuju u protoku fluida a neke ne, treba praviti razliku između poroznosti i propustljivosti, kao i ukupne i efektivne poroznosti [11]. Poroznost je mera koja pokazuje udeo praznog prostora u betonu i obično se izražava u procentima. Ako je poroznost velika i pore povezane onda je i propustljivost velika. Ako su pore diskontinualne ili iz drugih razloga neefikasne za protok fluida, propustljivost će biti mala i u slučaju velike poroznosti cementnog kamena.

Veliki broj faktora utiče na transportne procese u betonu: količina vode u betonu, količina cementa, veličina, vrsta i količina agregata, mineralni i hemijski dodaci, mešanje prilikom spravljanja, metode ugrađivanja, kompaktiranje, negovanje, tretmani zaštite, starost, poroznost, raspored pora po veličini, čvrstoća, vrste testova za ispitivanje propustljivosti i ambijentalni uslovi. Interakcija ovih parametara je složena i teško je izdvojiti neki kao nezavisan.

## 2.2. Vrste pora

Pore su prostori u čvrstom materijalu ispunjeni tečnošću ili vazduhom. Mogu da variraju po veličini, obliku i poreklu. Vrste pora koje su prisutne u hidratisanom cementnom materijalu [10]:

- pore u hidratisanom cementnoj pasti,
- pore u agregatu,
- pore u tranzitnoj zoni,
- prazne pore usled konstrukcijskih defekata i
- diskontinualnost u hidratisanom cementnoj pasti.

U očvrslom cementnom materijalu možemo ih posmatrati i kao [12]:

- otvorene pore (komuniciraju sa spoljašnjom sredinom),
- ink-bottle pore (ulaz pore je manji od njene stvarne veličine),
- zatvorene pore (nema komunikacije sa spoljašnjom sredinom) i
- pore sa otvorenim krajem (pore između čestica).

Osnovne vrste pora koje generalno postoje u hidratisanom cementnoj pasti jesu [10]:

- Gelske pore (prostori unutar C-S-H, mikropore, nanopore)
- Kapilarne pore (makropore, mezopore)
- Pore unutar hidratisanog dela zrna cementa (Hollow-shell)
- Vazdušne pore

### 2.2.1. Gelske pore

To su pore koje se uvek javljaju u toku hidratacije cementa i prisutne su u C-S-H gelu. U literaturi možemo pronaći različit opseg veličina za ove pore. Kao gornja granica uzima se od  $0,0005\mu\text{m}$  (Feldman i Sereda) do  $0,004\mu\text{m}$  (Powers), (0,5-4nm). Nemaju značajnu ulogu u kretanju vode kroz beton, ali doprinose skupljanju i tečenju (smatra se da pore prečnika manjeg od  $500\cdot 10^{-10}$  m (50nm) ne učestvuju u transportu vode). Obuhvataju 26-28% od ukupne poroznosti cementne paste [12].

### 2.2.2. Kapilarne pore

Predstavljaju prostor koji nije ispunjen čvrstim produktima hidratacije. Zapremina i veličina kapilarnih pora zavisi od stepena hidratacije i od rastojanja između nehidratiranih čestica cementa u svežoj mešavini cementne paste. Suprotno gelskim porama, za kapilarne pore se pretpostavlja da imaju glavni uticaj na transportne procese u betonu. U dobro hidratiranoj cementnoj pasti i sa malim vodocementnim faktorom, kapilarne pore mogu biti veličine od  $100\cdot 10^{-10}$  do  $500\cdot 10^{-10}$ m (10-50nm), dok u ranom stadijumu hidratacije i pri visokom vodocementnom faktoru kapilarne pore mogu biti veličine  $3000\cdot 10^{-10}$  do  $5000\cdot 10^{-10}$ m (300-500nm) [10]. Mreža kapilarnih pora predstavlja vezu sa okruženjem i služi za transportne procese između mikrostrukture cementa i spoljašnje sredine.

### 2.2.3. Pore unutar hidratisanog dela zrna cementa (Hollow shell pore)

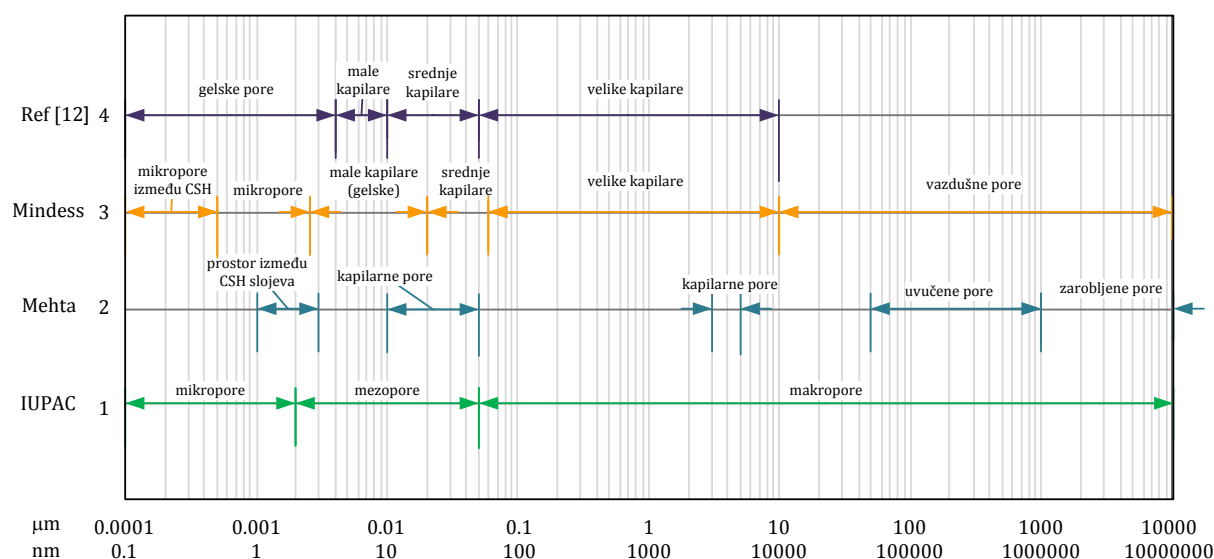
To su zatvorene, izdvojene pore koje su formirane unutar zrna cementa prilikom njegove hidratacije [10]. Granicu pore čini prvobitna granica zrna. Nakon što se na zrnu cementa formira ivica od produkata hidratacije, cementni gel uglavnom počinje da raste ka spolja, u kapilarne pore. Produkti koji se formiraju unutar periferije originalnog zrna cementa zovu se "inner" a oni van su "outer". Kako se nastavlja hidratacija, produkti mogu da se ne formiraju unutra zrna tako da se unutra formira prazan prostor i upravo ove pore su nazvane Hollow shell ili Hadley-jevo zrno. Veličina im je  $1-15\mu\text{m}$  [10]. Obično su povezane sa kapilarnim porama preko sitnijih gelskih. Zbog ink-bottle efekta koje imaju, često ih je teško registrovati pomoću nekih metoda kao npr. kod živine porozimetrije [11].

### 2.2.4. Vazdušne pore

Ove pore u betonu postoje jer su zarobljene tokom ugrađivanja i mešanja betona - "entrapped" ili kao uvučene usled korišćenja hemijskih dodataka - "entrained". Pore zarobljene tokom ugrađivanja i mešanja betona su veličine do nekoliko milimetara, obično su izolovane od ostalih pora, i zbog toga imaju mali uticaj na propustljivost betona. Male pore ove vrste su uglavnom sferičnog oblika dok su veće obično neregularnog oblika. Pore uvučene u beton usled korišćenja hemijskih dodataka su takođe diskretne i u vidu individualnih mehurića sfernog oblika. Uniformno su raspoređene kroz beton ali nisu međusobno povezane tako da ne utiču na propustljivost.

Vazdušne pore, pre svega pore uvučene usled korišćenja hemijskih dodataka, štite cementnu pastu od posledica smrzavanja. Mnogo su veće od kapilarnih pora i prema ASTM pore veličine preko 1mm se definišu kao zarobljene a one veličine 10 $\mu$ m do 1mm su uvučene [11].

Pogodno je da se pore klasifikuju u nekoliko opsega. Klasifikacija pora se može smatrati izazovom zbog složene prirode porne mreže u cementnoj pasti. Obuhvataju veliki opseg, od nm do cm. Standardna klasifikacija pora za materijale zasnovane na cementu još uvek ne postoji, i zato se javljaju razlike u nazivu i opsegu u kom se kreće veličina pora (Slika II.3) [12].



Slika II.3 – Opseg veličina pora i nazivi prema: 1) IUPAC, 2) Mehta, 3) Mindess i 4) ref [12]

Treba paziti da se izrazi mikro-, mezo- i makro-pore ponekad koriste različito. Mehanizam transportnih procesa je u različitim kategorijama veoma različit. Npr. u oblasti mezopora (2-50nm), prema IUPAC, javlja se elektrostatička interakcija između zida pora i tečnosti u njima, što može značajno da poveća transportne procese. Ovaj efekat se ne javlja kod makropora.

Tabela II.2- Klasifikacija pora prema IUPAC, Mehta, Mindess i byg R268

IUPAC		Mehta		Mindess et all.		Ref [12]	
Tip pore	Prečnik	Tip pore	Prečnik	Tip pore	Prečnik	Tip pore	Prečnik
		Uticaaj	Uticaaj	Uticaaj	Uticaaj	Uticaaj	Uticaaj
mikropore	≤2nm	Prostor između C-S-H	1 nm-3nm	mikropore (između slojeva)	≤0.5nm	gelske pore	≤0.004μm
		Kapilarne pore (nizak ω)	10nm-50nm		mikropore	0.5nm-2.5nm	gelske pore
mezopore	2nm-50nm	Kapilarne pore (visok ω)	3μm-5μm	male kapilare (gelske)	10nm-50nm	srednje kapilare	0.01μm-0.05μm
		Uvučene pore (tokom mešanja)	50μm-1mm	velike kapilare	10nm-50nm		
makropore	>50nm	Zarobljene pore (hemijski dodatak)	1mm-3mm	vazdušne pore	>10000nm	velike kapilare	0.05μm - 10μm

Na Slika II.3 i u Tabela II.2 se može videti da su granice između veličine pora različite među autorima. Takođe, kod Mehte se primećuje da u okviru podele nisu obuhvaćene pore veličine 3 do 10nm, između 50nm i 3 $\mu$ m i između 5 $\mu$ m i 50  $\mu$ m.

### 3. TEHNIKE ZA PROUČAVANJE STRUKTURE PORA

Postoji veliki broj metoda za karakterizaciju strukture pora u cementnom kamenu. Svaka od njih je pogodna za određeni opseg pora. Neke metode su moguće samo za otvorene pore dok druge mogu i za zatvorene. Tehnike koje se koriste za eksperimentalno merenje zapremine ili rasporeda pora mogu se podelite na direktne i indirektne. Direktne metode stvaraju sliku na osnovu koje se može odmah otkriti oblik i veličina pora. Kod indirektnih metoda, parametri strukture pora su određeni indirektno, što podrazumeva da su zasnovani na merenju specifičnih fizičkih veličina, i modelima koji pojednostavljaju složenu strukturu pora ali zato rezultati merenja često mogu varirati. Neke od najčešćih indirektnih tehnika za karakterizaciju pora u betonu su:

- živina porozimetrija (MIP),
- niskotemperaturna adsorpcija azota,
- optička mikroskopija,
- skening elektronska mikroskopija (SEM) i
- desorpcija vode.

Za grublju procenu poroznosti uzoraka može se odrediti i kapilarno upijanje vode kao i ispitivanje vodonepropusnosti betona. Prilikom korišćenja neke od tehnika za karakterizaciju pora treba paziti na koji opseg veličina pora je ta tehnika primenjiva i da li je namenjena za otvorene, zatvorene pore ili i jedne i druge.

Metode za karakterizaciju strukture pora obezbeđuju informacije kao što su:

- ukupna zapremina pora,
- površina pora,
- raspored pora po veličini, oblik pora i njihova povezanost.

#### 3.1. Živin porozimetar

Živin porozimetar (engl. Mercury Intrusion Porosimetry - MIP) se koristi za merenje količine i raspodele pora po veličini u cementnom materijalu. To je jednostavna i brza metoda koja omogućuje dobijanje informacija o strukturi pora na osnovu primenjenog pritiska za utiskivanje žive i zapremine žive koja je utisnuta u pore. Živnim porozimetrom može se meriti prečnik pora koji varira od 0,001 $\mu$ m do 1000 $\mu$ m (0,0035 $\mu$ m do 500  $\mu$ m-drugi izvor) ili prema Aligizaki [11] najmanji prečnik pora koji se može izmeriti ovom metodom je 0,002 $\mu$ m. Živa ima izuzetno visok površinski napon i tako ne kvasi zidove pora kod većine materijala u koje se utiskuje [11]. Izuzetno je važno koliki maksimalni pritisak može da postigne uređaj jer to određuje najmanju veličinu

pora koja se može izmeriti ovom metodom. Metoda je gotovo potpuno automatizovana i moguće je odrediti veliki broj parametara.

Ipak, opseg pora u cementnoj pasti je veći nego što je moguće izmeriti živinom porozimetrijom. Postoje pore u koje je nemoguće utisnuti živu i pri jako visokom pritisku [11]. To mogu biti jako fine pore ili zatvorene pore koje su izolovane od spoljašnje površine. Prilikom primene visokog pritiska može doći do deformacija pojedinih pora ili oštećenja zidova i ukрупnjavanja pora. Takođe, postoje pore čiji su ulazi jako mali u odnosu na stvarnu veličinu pore ("ink-bottle") i registrovani pritisak je, ustvari, onaj, koji je potreban da utisne živu kroz mali otvor, a ne stvarni pritisak, koji odgovara veličini pore. Faktori koji utiču na rezultate su: način pripreme uzorka za ispitivanje, veličina uzorka, brzina promene pritiska, kontaktni ugao, površinski napon žive i promena strukture pora usled delovanja visokog pritiska. Osim toga potrebno je obratiti pažnju da je uzorak potpuno suv pre ispitivanja, da je maksimalna veličina uzorka ograničena, da je moguć porast temperature u uzorku usled primene visokog pritiska (i do 15°C) kao i da je proračun zasnovan na velikom broju pretpostavki. Ovome se može dodati i da je potrebna posebna pažnja pri radu sa živom, kao izuzetno opasnoj supstanci.

Odnos između pritiska  $p_m$  (MPa) i prečnika pora  $d$  ( $\mu\text{m}$ ) opisan je Washburnovom jednačinom (Washburn 1921) koja se zasniva na modelu cilindričnih pora [13], jednačina (II.1):

$$p_m = \frac{4 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{d} \quad (II.1)$$

gde je  $\gamma$  površinski napon žive (0,480 N/m) i  $\theta$  (130-140°) kontaktni ugao između žive i površine pora u cementnom kamenu [11].

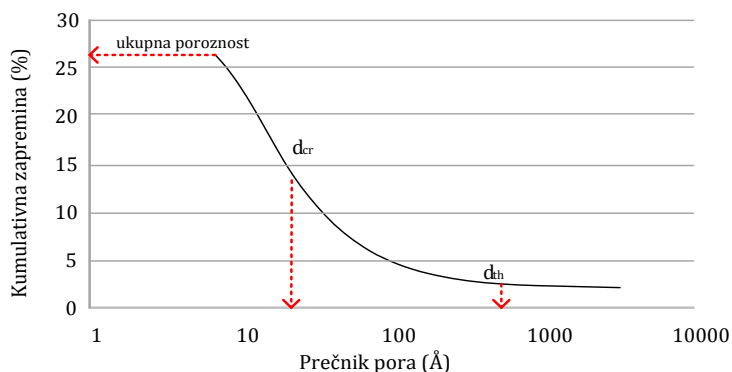
Ovom metodom moguće je dobiti podatke o rasporedu pora po veličini, ukupnoj poroznosti, vrednosti kritičnog prečnika pore i vrednosti "threshold"-a. Za to se najčešće koriste sledeći grafici:

- kumulativna zapreminska kriva u  $\text{cm}^3/\text{g}$  u funkciji od prečnika pora,
- kumulativna kriva u %, u funkciji od prečnika pora i
- diferencijalna raspodela pora u funkciji od prečnika pora.

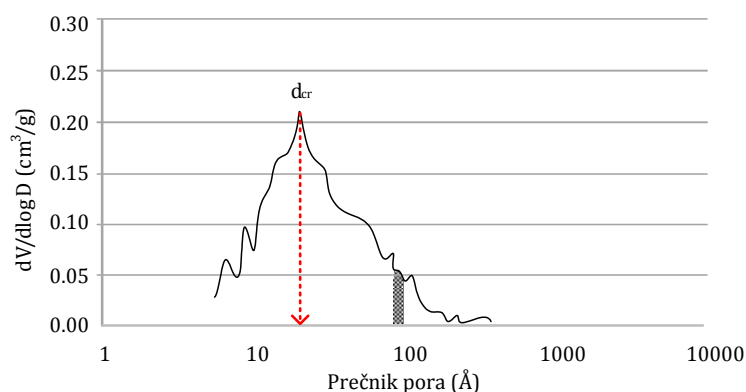
Iz prva dva grafika moguće je dobiti podatke o ukupnoj poroznosti, rasporedu pora po veličini, zapremini pora u određenom opsegu, kritičnom prečniku pora i "threshold"-u. Preciznija procena kritičnog prečnika pora se dobija preko trećeg grafika. Kod svih grafika se kao apcisa koristi veličina pora izražena u logaritamskoj razmeri kako bi se izbeglo opterećivanje ose na jednom kraju [11].

*Ukupna poroznost* dobijena iz kumulativne krive je tačka kojoj odgovara najveći pritisak i najmanja odgovarajuća pora. To je tačka maksimalno utisnute zapremine žive (Slika II.4).

*Kritičan prečnik pora (Critical pore size-eng),  $d_{cr}$* , odgovara najvećem nagibu kumulativne krive (Slika II.4). Obično se definiše kao maksimalni prečnik pora koji je kontinualan ili najčešće pojavljiv prečnik kod međusobno povezanih pora koji omogućava maksimalni protok. Lakše i preciznije se određuje preko diferencijalnog rasporeda pora (Slika II.5). Ova veličina kontroliše transport fluida kroz materijal [11].



Slika II.4- Kumulativna kriva utisnute žive prema veličini pora



Slika II.5 - Diferencijalni raspored pora prema veličini pora

*Threshold diameter (u daljem tekstu "threshold"),  $d_{th}$* , je prečnik pora iznad koje se utisne mala količina žive a odmah ispod znatna količina iste (Slika II.4). U kvalitativnom smislu predstavlja najveći prečnik pore pri kojem je utisnuta značajna količina žive. Može se reći i da odgovara najužem delu kod kontinualnih pora [11] ili prema Winslow i Diamond "threshold" predstavlja minimalni prečnik koji je kontinualan kroz cementnu pastu [14]. Najčešći način za njegovo geometrijsko određivanje jeste postavljanje tangente sa najvećim nagibom na kumulativnu krivu utisnute žive. Ova veličina je izuzetno važna, čak neki autori smatraju da je za propustljivost važniji "threshold" nego ukupna poroznost. U literaturi se može pronaći i da se izjednačavaju kritičan prečnik pora sa "threshold"-om [15].

Iz grafika koji prikazuje diferencijalni raspored pora moguće je proceniti zapreminu pora određenog opsega preko površine ispod krive (Slika II.5).



Kao i u mnogim drugim tehnikama i kod živine porozimetrije (MIP) postoje određeni nedostaci odnosno ograničenja, koji su navedeni ranije. Zato pri analizi treba na to obratiti pažnju i, ako je moguće, najbolje je kombinovati više metoda prilikom karakterizacije pora. I pored očiglednih ograničenja MIP je i dalje jedna od osnovnih metoda karakterizacije pora u cementnom kamenu [11].





III PORTLAND CEMENT  
I CEMENTI SA  
DODATKOM ZGURE



## 1. UVOD

Portland cement je hidraulično vezivo koje nastaje mlevenjem Portland cementnog klinkera uz dodatak sadre ili gipsa radi regulisanja vremena vezivanja (do 5%). Portland cementni klinker (zrna veličine 5-25mm) je veštački kameni materijal koji nastaje termičkom obradom osnovnih sirovinskih komponenti koje sadrže CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do temperature sinterovanja [4].

Sirovine za proizvodnju klinkera obavezno sadrže izvore Ca, Si, Al, Fe i alkalija (Na, K). Kalcijum (Ca) se nalazi u krečnjaku a ostale komponente u glini. Odnos krečnjaka i gline u sirovini za proizvodnju klinkera je 3:1 (po masama). Da bi se dobili željeni produkti u portland cementnom klinkeru, neophodno je dobro homogenizovati sirovu mešavinu pre izlaganja visokim temperaturama. Materijal se drobi, melje i meša u odgovarajućem odnosu, do veličine zrna od približno 75µm [4].

Prilikom termičke obrade sirovine, u različitim fazama odvijaju se različite hemijske reakcije prikazane u Tabela III.1.

*Tabela III.1– Hemijske reakcije prilikom termičke obrade sirovina kod proizvodnje cementa*

Faze	Proces	Temperatura
I faza	Sušenje smeše	100-150°C
II faza	Dehidracija gline	500-800°C
III faza	Glina →	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Krečnjak →	CaO+CO <sub>2</sub>
IV faza	Glina+krečnjak →	2CaO·SiO <sub>2</sub>
		3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
V faza	Glina+krečnjak → Sinterovanje svih klinker minerala	3CaO·SiO <sub>2</sub> 1350-1500°C

Zbog pojednostavljenja pisanja izraza za jedinjenja koja se javljaju pri proizvodnji i hidrataciji cementa uvedene su skraćenice u hemiji cementa. Osim lakšeg pisanja, njihovo korišćenje je opravdano jer i hemijski sastav pojedinih jedinjenja nije tačno poznat (npr. kalcijum-silikat-hidrat, C-S-H) što je još jedan razlog uvođenja ovakvog obeležavanja.

Skraćenice za osnovna jedinjenja koja se javljaju pri proizvodnji i hidrataciji portland cementa prikazane su u Tabela III.2.

Tabela III.2- Skraćenice za osnovna jedinjenja u hemiji cementa

Jedinjenje	Skraćenica	Jedinjenje	Skraćenica
CaO	C	Ca(OH) <sub>2</sub>	CH
SiO <sub>2</sub>	S	3CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	2CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
MgO	M	4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$	3CaO·2SiO <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ili C-S-H
H <sub>2</sub> O	H		

Reaktivnost jedinjenja portland cementa zavisi najviše od veličine čestica i od njihove kristalne strukture. Kristalne strukture koje se formiraju pri visokim temperaturama i neravnotežnim uslovima daleko su od idelanih, a defekti rešetke koji pri tome nastaju razlog su nestabilnosti jedinjenja portland cementa u prisustvu vode. Zato reaktivnost dva jedinjenja sličnog hemijskog sastava zavisi od uređenosti kristalne rešetke, tj. njene nestabilnosti. Portland cement najjednostavnije možemo opisati kao prah sastavljen od kalcijum-silikata (C<sub>2</sub>S i C<sub>3</sub>S), kalcijum-aluminata (C<sub>3</sub>A) i kalcijum-alumo-ferita (C<sub>4</sub>AF) koji je prisutan u manjoj količini.

*Kalcijum silikati (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S)* sadrže male količine Mg, Al, Fe, K, N i SO<sub>4</sub><sup>+</sup>. Nečiste forme ovih silikata C<sub>3</sub>S i β-C<sub>2</sub>S se nazivaju redom alit i belit. Struktura minerala C<sub>3</sub>S je izgrađena od SiO<sub>4</sub> tetraedara, jona kalcijuma i jona kiseonika. Raspored jona kiseonika oko kalcijuma je neregularan, tako da su joni kiseonika koncentrisani na jednoj strani svakog jona kalcijuma. Ovakav raspored stvara velike strukturne (intersticijalne) šupljine, što se smatra kao razlog za veliku reaktivnost ovog minerala. Mineral C<sub>2</sub>S se može javiti u 4 kristalne modifikacije. U cementnom klinkeru se naglim hlađenjem zadržava β-C<sub>2</sub>S modifikacija ovog minerala, koji, takođe, ima neregularni raspored jona kiseonika u strukturi, ali su veličine intersticijalnih defekata mnogo manje nego kod C<sub>3</sub>S, i zato je β-C<sub>2</sub>S daleko manje reaktivan.

*Kalcijum-aluminati i alumo-feriti (C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF)* imaju složene kristalne strukture ali i velike intersticijalne otvore što se smatra razlogom za veliku reaktivnost.

*Magnezijum i kalcijum-oksidi (MgO, CaO):* MgO nastaje pečenjem - dekarbonizacijom dolomita, koji je često prisutan kao nečistoća u krečnjaku. CaO je slobodni kalcijum-oxid koji je preostao nakon formiranja klinkernih minerala. Oba oksida hidratišu jako sporo. CaO je reaktivniji od MgO jer je kristal sa većom specifičnom površinom usled velikih jona kalcijuma.

*Alkalije (Na, K)* su uglavnom prisutne u glini. One pomažu formiranje kalcijum-silikata na znatno nižoj temperaturi nego što bi bio slučaj bez njih.

*Sulfati* utiču na ranu hidrataciju cementa, tako što je usporavaju. U klinkeru sulfati uglavnom potiču iz goriva, a u cementu iz gipsa.

Prosečan mineraloški sastav portland cementnog klinkera, dat je u Tabela III.3 [16].

Tabela III.3 – Prosečan mineraloški sastav cementnog klinkera [16]

Mineral	Formula	Oznaka	Učešće u %
Trikalcijum silikat (ALIT)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	45 - 65
Dikalcijum silikat (BELIT)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	10 - 30
Trikacijum aluminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	5 - 12
Tetrakalcijumalumo-ferit	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	6 - 12

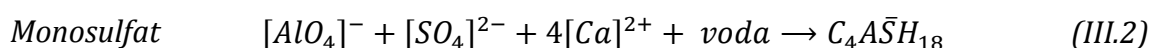
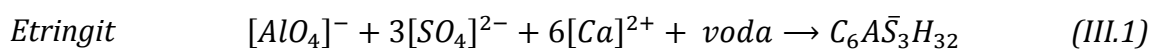
## 2. PROCES HIDRATACIJE PORTLAND CEMENTA

Kada se pomeša sa vodom, portland cement dobija adhezivne karakteristike i mogućnost da vezivanjem dobije strukturu i osobine kamena. Ta hemijska reakcija naziva se hidratacija. Ili možemo reći da je to proces prelaska iz visokog u nisko energetska stanje, pri čemu se oslobodi višak energije. Na osnovu toplote hidratacije može se odrediti koja faza hidratacije se odvija [17]. U početnoj fazi dolazi do oslobađanja jona, a kasnije kako se njihova difuzija smanjuje menja se princip hidratacije. Aluminati reaguju brzo, tako da je gubljenje konzistencije i vezivanje betona posledica hidratacije aluminata, dok u očvršćavanju betona dominantnu ulogu imaju silikati koji čine 75% sastava portland cementa.

### *Hidratacija aluminatne faze*

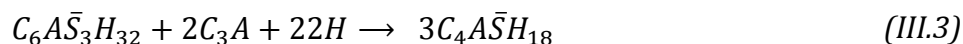
Nakon što se cement pomeša sa vodom,  $\text{C}_3\text{A}$  trenutno reaguje i brzo nastaju kristalni hidrati  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{19}$  i  $\text{C}_2\text{AH}_8$ , pri čemu se oslobađa velika količina toplote. Ovi kalcijum-hidro-aluminati su formirani u velikoj količini i sprečavaju brzo formiranje drugih bitnih hidrata kao što su CH ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -kalcijum-hidroksid) i C-S-H. Da bi portland cement bio koristan za konstrukcijsku primenu (da ga je moguće transportovati i ugraditi) dodat je gips da uspori reakciju  $\text{C}_3\text{A}$  [1]. Ovde se govori o  $\text{C}_3\text{A}$  ali i o  $\text{C}_4\text{AF}$ , jer su proizvodi hidratacije slični ali je  $\text{C}_3\text{A}$  reaktivniji.

Na samom početku hidratacije, u rastvoru postoji visoka koncentracija sulfata. Tada aluminati najčešće kristališu u *etringit* (visoko sulfatni oblik) koji ima formu iglica, ili u drugi proizvod *monosulfat* (nisko sulfatni oblik) koji kristališe u formi šestougaoih pločica. Koji od ova dva proizvoda hidratacije će se formirati, zavisi od koncentracije aluminijum i sulfatnih jona. Opisane hemijske reakcije imaju sledeći oblik [5], jednačine (III.1) i (III.2):



Monosulfati su grupa minerala nazvani AFm faza, jer sadrže jedan (mono-m) molekul anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). To se vidi kada se monosulfat napiše u obliku  $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaSO}_4\cdot 18\text{H}_2\text{O}$ . Etringiti pripadaju Aft fazi jer sadrže tri (three-t) molekula anhidrita ( $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).

Kada se tokom hidratacije i nastanka etringita smanji količina sulfata, etringit postaje nestabilan (pri pH manjem od 10,6, prema Mehti, ref u [18]) i prelazi u monosulfat:



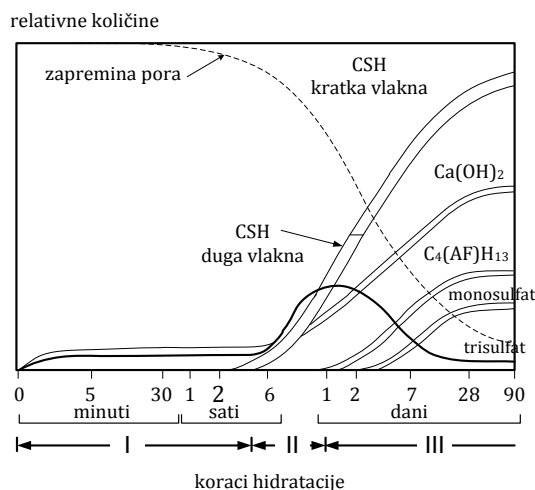
#### *Hidratacija silikatne faze*

Silikati su po strukturi slabo kristalni. Pri hidrataciji formiraju slojevit i poroznu strukturu koja pokazuje karakteristike čvrstog gela. Zbog velike sličnosti sa prirodnim mineralom tobermoritom ranije su u literaturi označavani kao tobermoritov gel [5]. Glavni proizvod hidratacije ovih silikata i nosilac čvrstoće u hidratisanom cementu jeste kalcijum-silikat-hidrat. Njegov sastav može da varira, što zavisi od više faktora, zato je uobičajeno da se obeležava skraćeno C-S-H. Struktura mu je u obliku mikrokristala čiji rast se odvija u različitim kristalografskim pravcima koji dovode do formiranja velike unutrašnje poroznosti [19]. Hidratacija silikata odvija se prema sledećim hemijskim jednačinama:



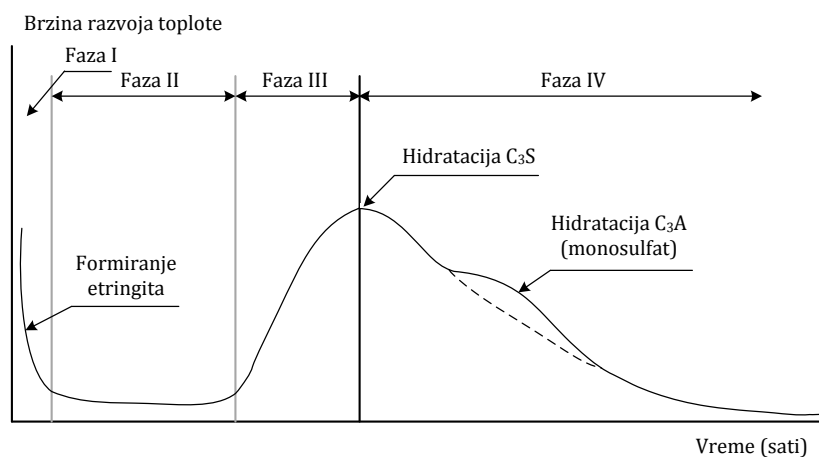
Na osnovu ovih jednačina može se zaključiti da pri hidrataciji  $\text{C}_3\text{S}$  nastaje 61%  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  (kalcijum-silikat-hidrat, skraćeno C-S-H) i 39% kalcijum-hidroksida (CH), a pri hidrataciji  $\text{C}_2\text{S}$ , 82%  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  (skraćeno C-S-H) i 18% kalcijum-hidroksida (CH). Zbog velike specifične površine, C-S-H jedinjenja su nosioci čvrstoće i adhezivnih karakteristika u cementnom kamenu. S druge strane, kalcijum-hidroksid (CH) se, zbog svog zanemarljivog doprinosa čvrstoći i velikoj verovatnoći učestvovanja u hemijskim reakcijama pri dejstvu agresivnih materija, označava kao negativni produkt hidratacije cementa. Zato se može reći da  $\text{C}_3\text{S}$  "daje" nižu čvrstoću i nižu otpornost na agresivne supstance u odnosu na  $\text{C}_2\text{S}$ .  $\text{C}_3\text{S}$  brže hidratiše i zahteva veću količinu vode za svoju hidrataciju. Ponekad se ograničava maksimalna količina  $\text{C}_3\text{S}$  ili se predlaže dodavanje pucolana kako bi se uklonio suvišni kalcijum-hidroksid iz hidratizane cementne paste. Na taj način poboljšava se i veza agregat-cementna pasta [20]. Ipak, CH je bitan za održavanje visoke pH vrednosti u pornoj tečnosti i stabilnosti produkata hidratacije. Formiranje produkata hidratacije kroz vreme prikazan je na Slika III.1.





Slika III.1– Formiranje produkata hidratacije kroz vreme prema [17]

Ili prikazano preko razvoja toplote hidratacije na Slika III.2 [17].



Slika III.2- Brzina razvoja toplote tokom hidratacije Portland cementa, prema [17]

Na ovoj slici je proces hidratacije prikazan kroz četiri faze:

- Faza I:* C<sub>3</sub>A veoma brzo reaguje sa vodom i joni Ca<sup>2+</sup>, OH<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup> i Na<sup>+</sup> ulaze u rastvor;
- Faza II:* obično traje do 5 sati, usporava se reaktivnost, cementna pasta je još uvek obradiva a kraj ove faze se smatra trenutkom početka vezivanja cementa;
- Faza III:* dolazi do ubrzanja reakcije C<sub>3</sub>S koja dostiže svoj maksimum pri kraju ove faze, kada se smatra da je i kraj vezivanja cementne paste;
- Faza IV:* dolazi do usporavanja reakcija.

Jedinjenja portland cementa su na visokom energetskom nivou, koja, da bi prešla u stabilno stanje, reaguju sa vodom. Tokom tog procesa oslobađa se energija u obliku toplote, a najviše tokom hidratacije aluminata [5]. S jedne strane ona može biti smetnja

(letnji period ili masivne betonske konstrukcije) a s druge pomoć (zimski period). Za uobičajene cemente, približno 50% potencijalne energije se oslobodi u prva 3 dana a 70% u prvih 7 dana hidratacije. Ako posmatramo vrstu cementa, najvišu toplotu hidratacije daje CEM I, malu CEM IV a umerenu CEM II.

Zrna koja su hidratizovala imaju tamnije jezgro i manji je odnos Ca/Si nego u slučaju ruba gde je boja svetlija i viši nivo Ca/Si, posmatrano elektronskim mikroskopom [21].

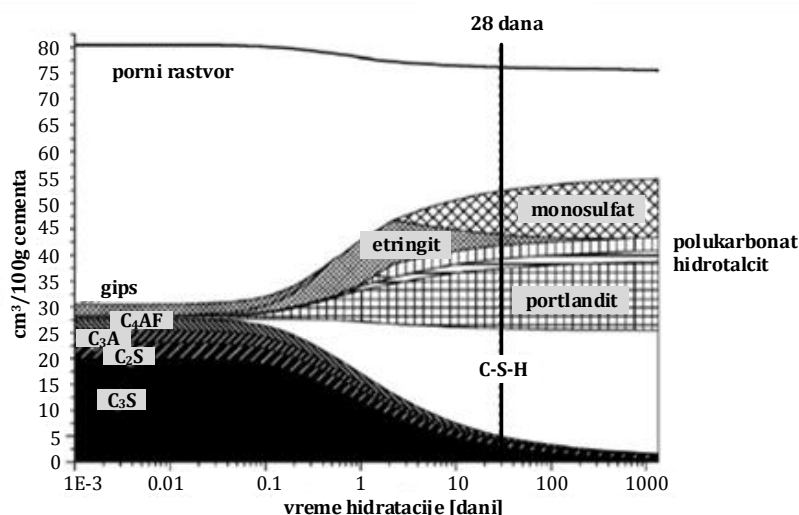
Pri hidrataciji i formiranju C-S-H, oslobađa se toplota i joni  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{OH}^-$ . PH vrednost brzo raste usled ovog otpuštanja  $\text{OH}^-$  jona i dostiže vrednost  $>12$ . Kristali C-S-H brzo rastu, postaju sve deblji i otežavaju molekulima vode da prodru do  $\text{C}_3\text{S}$  i da ih hidratišu, na taj način se usporava proces hidratacije. Kada se sistem zasiti počinje da kristališe CH. On je za razliku od C-S-H potpuno kristalni, ima tačan sastav i kristališe u vidu šestougao nih pločica [19].

Očvršli cementni kamen je prvenstveno sastavljen od produkata hidratacije  $\text{C}_3\text{S}$  i  $\text{C}_2\text{S}$ : 15% kristalnog CH i približno 50% amornog C-S-H (zapreminski). Kao intersticije u njima smešteni su produkti faza  $\text{C}_3\text{A}$  i  $\text{C}_4\text{AF}$  [1].

Prema [7] očvršli cementni kamen generalno čini:

- preostale nehidratizovane cementne komponente i gips;
- novoformirani produkti hidratacije;
- pore i
- porni rastvor.

Hidratacija cementa u funkciji vremena može se predstaviti i pomoću termodinamičkog modeliranja (Slika III.3) [22].



Slika III.3 – Hidratacija cementa u funkciji vremena prikazana pomoću termodinamičkog modeliranja [22]

Problem trajnosti betona naročito je porastao od kada su počeli da se koriste cementi sa mineralnim dodacima [23]. Dobijanje podataka o njihovom ponašanju u različitim

uslovima jeste dugotrajan proces. Dodaci direktno utiču na mikrostrukturu betona a time i na sve karakteristike betona, a među njima i trajnost.

Da bi se smanjila količina proizvedenog CO<sub>2</sub>, sačuvala energija i prirodni resursi materijala, koriste se dodaci (zamene) cementu. U tu svrhu primenjuju se prirodni materijali (prirodni pucolani, krečnjak, sagoreli škrljac) i nus proizvodi u industriji (leteći pepeo, silikatna prašina, granulirana zgura). Neki od njih imaju hidraulična svojstva (zgura, sagoreli škrljac i leteći pepeo sa visokim sadržajem krečnjaka), neki pucolanska (leteći pepeo koji je po prirodi silikatni, silikatna prašina i prirodni pucolani) dok se neki koriste kao punioci (krečnjak). Hidraulična svojstva se ogledaju u mogućnosti direktnog reagovanja sa vodom i formiranja materijala koji ima vezivna svojstva a pucolanska kroz reagovanje sa CH u prisustvu vode i formiranje jedinjenja koja poseduju hidraulične karakteristike.

Uticao dodataka na proces hidratacije zavisi od njihovog hemijskog sastava, reaktivnosti, raspodele čestica po veličini i obliku. Uključivanjem letećeg pepela i zgure u sastav betona poboljšava se obradivost. U početku su se ovi materijali koristili zbog njihovog uticaja na toplotu hidratacije i čvrstoću ali kasnije počinje primena i zbog povoljnog uticaja na trajnost betona [9]. Kako se navodi u [24] leteći pepeo i silikatna prašina smanjuju propustljivost betona u početnom periodu dok zgura taj efekat ispoljava kasnije.

U Tabeli III.4 prikazano je kakav uticaj na životnu sredinu ima zamena dela cementa zgurom ili letećim pepelom, prema "Slag Cement Association" (SCA). Podaci se odnose na slučajeve kada je cement zamenjen sa 35%, odnosno 50% zgure ili 20% letećeg pepela [12].

*Tabela III.4 - Uticaj na životnu sredinu pri zameni dela cementa zgurom ili letećim pepelom (Slag Cement Association)*

Uticaj na životno okruženje	Zgura (35%)	Zgura (50%)	Leteći pepeo (20%)
Ušteda u emisiji ugljen-dioksida	30%	43%	17%
Ušteda u energiji	21%	30%	14%
Smanjenje u korišćenju neobnovljivih izvora	5%	7%	3%

Hidraulički potencijal zgure otkriven je 1862. godine u Nemačkoj, a 1880. godine prvi put je korišćena u kombinaciji sa portland cementom. To je nemetalni proizvod koji se dobija kao nus-proizvod u visokim pećima prilikom proizvodnje čelika. Da bi se dobila zgura pogodna za korišćenje kao hidraulični materijal primenjuju se dva postupka obrade, granulacija ili peletizacija. Bitno je da zgura bude brzo hlađena kako bi se formirala staklasta struktura. U suprotnom zgura će formirati kristalnu, dobro uređenu strukturu koja je stabilna i nereaktivna. Njen hemijski sastav varira što zavisi od sirovog materijala i uslova u pećima gde se odvija proces dobijanja čelika. Sadrži iste glavne komponente kao i portland cement ali u drugačijem odnosu i ima veću finoću što

povećava njenu aktivnost. Glavni oksidi koji se formiraju tokom brzog hlađenja zgure i, pri tome, imaju staklastu strukturu jesu kalcijum-oksidi ( $\text{CaO}$ ), magnezijum-oksidi ( $\text{MgO}$ ) i silicijum-dioksidi ( $\text{SiO}_2$ ). Njihov zbirni sadržaj treba da iznosi najmanje 2/3 masenog udela u hemijskom sastavu zgure (prema EN 197-1). Pored ovog uslova, EN 197-1 zahteva i da je odnos  $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$  veći od 1. Osim ovih oksida bitan je i aluminijum-oksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [16]. Prema [25], čestice zgure su uglavnom sa veličinom 9,12-13,69 $\mu\text{m}$ , Slika III.4.



Slika III.4 - Zgura u različitim oblicima

Zgura pomešana sa vodom reaguje veoma sporo što je čini praktično beskorisnom. Njena hidrauličnost je zarobljena unutar staklaste strukture (poseduje latentnu hidrauličnost) i potrebna je neka aktivacija da bi je oslobodila. To se najčešće dešava tako što sulfati i/ili alkalije hemijski reaguju sa zgurom i povećava se pH sistema. Kada dostigne kritičnu vrednost, staklasta struktura zgure postaje nestabilna, oslobađa se reaktivnost i zgura počinje da reaguje sa vodom stvarajući sopstveni cementni gel. Praktično, taj aktivator je portland cement jer on sadrži i alkalije i sulfate. Smatra se da hidrauličnost zgure raste sa porastom oksida kalcijuma, magnezijuma i aluminijuma (do neke granice) a smanjenjem silicijum-dioksida [16].

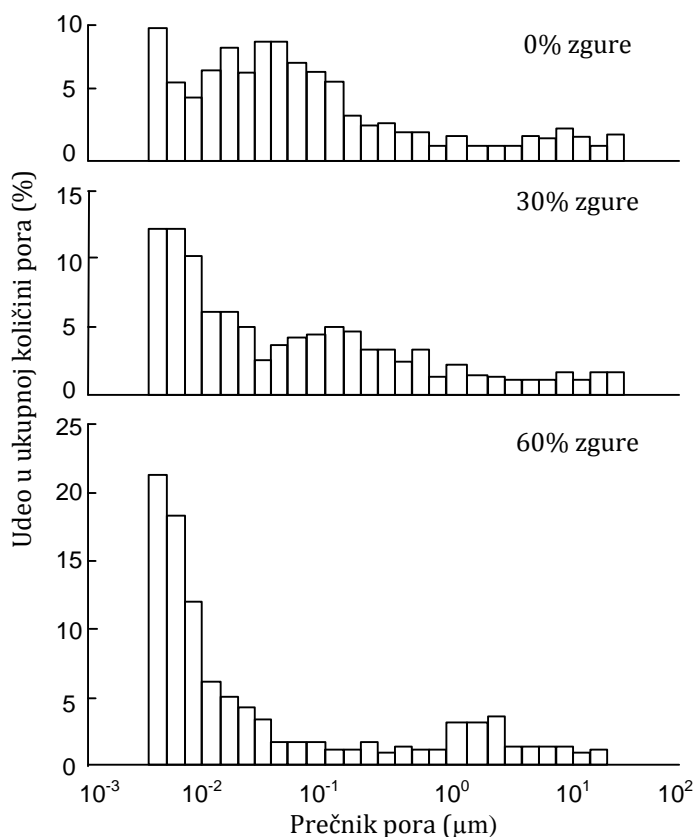
Zbog svoje latentne hidrauličnosti omogućava visok procenat zamene cementa (i do 70%).

Dodavanjem zgure cementu povećava se obradivost, usporava razvoj toplote hidratacije i povećava gustina očvrstlog proizvoda. Reakcija zgure sa vodom značajno se ubrzava pri višim temperaturama, a usporava pri niskim. Na niskim temperaturama brzina hemijske reakcije je veoma mala, skoro beznačajna [9]. Na razvoj čvrstoće u betonu utiče finoća zrna, hemijski sastav i struktura. Zgura ima staklastu strukturu ali prisustvo kristala u manjem procentu je pogodno, jer deluju kao povoljna mesta za proces hidratacije.

Produženo vreme negovanja kod mešavina koje sadrže zguru izuzetno je važno za proces hidratacije. Zbog spore hidratacije zture, početne čvrstoće su niže ali kasnije mogu biti i više u odnosu na čist portland cement.

Prema Newman-u [16], dodavanje zture povoljno deluje na smanjenje propustljivosti betona iz sledećih razloga:

1. Proces hidratacije se odvija i nakon 28 dana.
2. Sa povećanjem udela zture povećava se učešće finijih pora (Slika III.5).
3. Pri povećanju temperature, kod portland cementa se ukрупnjava struktura pora dok kod cementa sa zgurom gotovo da nema uticaja na formiranje porne mreže.



Slika III.5 – Raspored pora po veličini u zavisnosti od količine zture u cementu [16]

U pogledu sulfatne otpornosti, efekat zavisi od sastava zture (pre svega količine aluminata) i količine u kojoj se koristi kao zamena cementu.

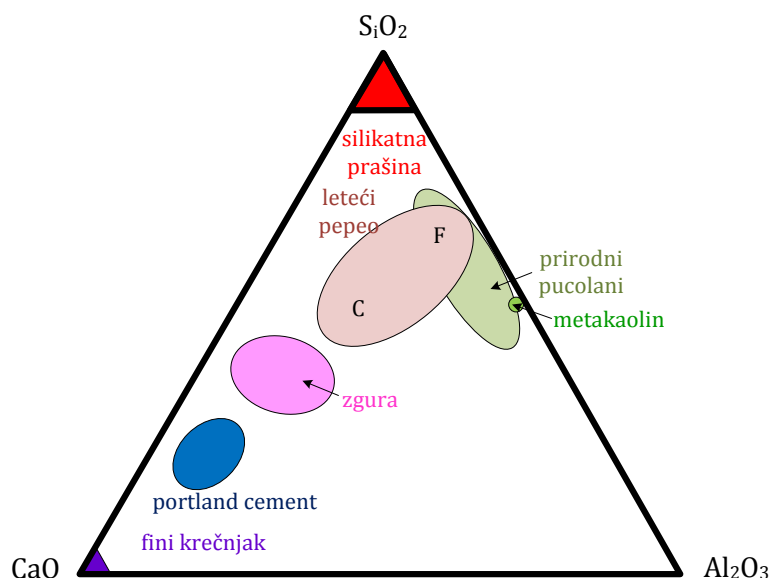
S. Ogawa et al. [26] zaključuju da ukoliko je količina aluminata u zguri visoka, tada dodatak krečnjaka i gipsa cementu, povećava njegovu sulfatnu otpornost. Usled dodatka krečnjaka formira se monokarboaluminat kao stabilna faza, što smanjuje mogućnost pretvaranja monosulfata u etringit. Gips produžava trajnost etringitu formiranom u početnoj fazi procesa hidratacije, i na taj način smanjuje verovatnoću da monosulfat kasnije pređe u etringit i izazove ekspanziju. Ipak, pokazalo se da je ztura osetljiva na

naizмениčno vlaženje/sušenje [27],[28],[29], tj. može se reći da je mala otpornost na fizički aspekt sulfatnog delovanja.

Gollop i Taylor [30] su u svojim istraživanjima koristili sulfatno otporni cement koji sadrži relativno malo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i gde je veći deo u feritu koji inače ima malu reaktivnost. Na osnovu dobijenih rezultata došli su do pretpostavki zašto se sulfatno otporni cement ponaša superiornije pri delovanju sulfata, u odnosu na običan portland cement. Odnos  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  je relativno visok i etringit, koji se formira u početku, je dosta postojan.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je zarobljen u etringitu, ne može da reaguje i stvori novi etringit u kasnijoj fazi kada je cement već značajno očvrstnuo. Uočeno je da monosulfat reaguje sa sulfatima i nastaje etringit ali je njegova količina veoma mala [30], na taj način ne može stvoriti oštećenja u cementnom kamenu.

Redovan produkt hidratacije cementa koji sadrži zguru je hidrogarnet ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_{0,6}\text{O}_{2,4}(\text{OH})_{9,3}$ ). Obuhvata malu količinu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ili  $\text{SiO}_2$  i pokazao se kao veoma otporan na dejstvo sulfata [30]. Zajedno sa hidrogarnetom javlja se i hidrotalcit ( $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}4(\text{H}_2\text{O})$ ) kao i C-A-S-H gel koji ima veliku površinu, povećanu poroznost i može da veže veliku količinu čestica [31]. Pretpostavlja se da se i hidrogarnet i hidrotalcit (odnos Mg/Al je 2,0-2,5) formiraju od feritne faze, sadrže značajnu količinu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i vezani su za C-S-H [30]. Ukoliko je u mešavini više MgO, tada nastaje i više hidrotalcita koji vezuje aluminijum (tako je manje dostupno za produkte kao što su monosulfat i etringit), smanjuje se poroznost a rastu čvrstoće [32].

Sastav portland cementa i dodataka preko ternarnog dijagrama prikazan je na Slika III.6.



Slika III.6– Ternarni dijagram za portland cement i dodatke [33]

Uobičajeni sastav cementnog klinkera i dodataka cementu dat je i u Tabela III.5.

Tabela III.5 - Uobičajen sastav cementnog klinkera i dodatka cementu [7]

Oksid	Skraćenica	Cementni klinker	Leteći pepeo	Zgura
CaO	C	64-65	1-20	30-50
SiO <sub>2</sub>	S	20-22	10-50	24-45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	4-7	10-30	5-13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	3-5	1-15	<1
MgO	M	1-4	1-4	1-20
SO <sub>3</sub>	S̄	0,3-1,5	0-5	<3
Na <sub>2</sub> O	N	0,1-1,5	0-4	<2
K <sub>2</sub> O	K	0,1-1,5	0-3	<2

### 3. SULFATNO OTPORNI CEMENTI PREMA EN 197-1

Prema standardu SRPS EN 197-1:2013 [34] i Pravilniku o kvalitetu cementa [35] postoji sedam proizvoda u familiji sulfatno otpornih običnih cemenata. Svrstani su u tri grupe:

- Sulfatno otporni portland cement:
  - CEM I-SR 0 - sulfatno otporni portland cement sa sadržajem C<sub>3</sub>A u klinkeru 0%
  - CEM I-SR 3 - sulfatno otporni portland cement sa sadržajem C<sub>3</sub>A u klinkeru ≤3%
  - CEM I-SR 5 - sulfatno otporni portland cement sa sadržajem C<sub>3</sub>A u klinkeru ≤5%
- Sulfatno otporni metalurški cement:
  - CEM III/B-SR sulfatno otporni metalurški cement (bez zahteva za sadržaj C<sub>3</sub>A u klinkeru)
  - CEM III/C-SR sulfatno otporni metalurški cement (bez zahteva za sadržaj C<sub>3</sub>A u klinkeru)
- Sulfatno otporni pucolanski cement:
  - CEM IV/A-SR sulfatno otporni pucolanski cement sa sadržajem C<sub>3</sub>A u klinkeru ≤9%
  - CEM IV/B-SR sulfatno otporni pucolanski cement sa sadržajem C<sub>3</sub>A u klinkeru ≤9%

Zahtevi u pogledu sastava svih sedam tipova sulfatno otpornih običnih cemenata dati su u Tabela III.6:

Tabela III.6 - Sedam tipova sulfatno otpornih cementa

Glavni tipovi	Tipovi cementa	Sastav (maseni procenat)				Sporedni dodatni sastojci	
		Klinker K	Glavni sastojci				
			Granulisana zgura S	Prirodni pucolani P	Silicijumski leteći pepeo V		
CEM I	Sulfatno otporni portland cement	CEM I-SR 0	95-100			0-5	
		CEM I-SR 3					
		CEM I-SR 5					
CEM III	Sulfatno otporni metalurški cement	CEM III/B-SR	20-34	66-80	-	-	0-5
		CEM III/C-SR	5-19	81-95	-	-	0-5
CEM IV	Sulfatno otporni pucolanski cement	CEM IV/A-SR	65-79			21-35	0-5
		CEM IV/B-SR	45-64			36-55	0-5

Sulfatno-otporni cementi, prema SRPS EN 197-1:2013 [34] i Pravilniku o kvalitetu cementa [35], moraju da ispune i dodatne zahteve koji su predstavljeni u Tabela III.7.

Tabela III.7- Dodatni zahtevi za sulfatno otporne cemente

Svojstvo	Tip cementa	Klasa čvrstoće	Zahtevi
Sadržaj sulfata (kao SO <sub>3</sub> )	CEM I-SR 0	32.5N	≤3.0%
		32.5R	
	CEM I-SR 3	42.5N	
	CEM I-SR 5	42.5R	
	CEM IV/A-SR	42.5N	≤3.5%
C <sub>3</sub> A u klinkeru	CEM IV/B-SR	52.5R	
	CEM I-SR 0		0%
	CEM I-SR 3		≤3.0%
	CEM I-SR 5	Sve klase	≤5.0%
	CEM IV/A-SR		≤9.0%
Pucolanska aktivnost	CEM IV/B-SR		
	CEM IV/A-SR	Sve klase	Zadovoljava ispitivanje nakon 8 dana



A black and white photograph showing a large pile of dark, angular concrete aggregate stones. The stones are of various sizes and shapes, some appearing as sharp, broken fragments. The pile is centered in the frame, with a soft, out-of-focus background. The lighting is even, highlighting the rough, porous texture of the concrete.

IV AGREGAT OD  
RECIKLIRANOG BETONA  
I TRANZITNA ZONA



## 1. RECIKLIRANI AGREGAT

Danas je sasvim normalna pojava zamena starih i oštećenih objekata novim. Razlozi za to mogu biti promena namene objekta, konstrukcijsko oštećenje, reorganizacija, povećanje saobraćajnog opterećenja, elementarne nepogode, ratovi i sl. Pri tome nastaju velike količine otpadnog materijala koji je potrebno negde smestiti, što predstavlja veliki problem za čovekovu životnu sredinu. S druge strane, nove konstrukcije zahtevaju proizvodnju velike količine betona, samim tim i upotrebu prirodnog agregata, kao njegove najzastupljenije komponente. Time se crpe neobnovljivi izvori. Zato su mnoge zemlje u Evropi uvele naplatu posebne takse za korišćenje prirodnog agregata. Moguće rešenje ovog problema jeste recikliranje otpadnog betona i stvaranje alternativnog agregata za nove konstrukcije, tzv. reciklirani agregat (RA) ili agregat dobijen recikliranjem starog betona (RCA). Postupak recikliranja obuhvata drobljenje otpadnog betona (Slika IV.1) i otklanjanje kontaminirajućih komponenti kao što su armatura, drvo, plastika i sl. [36].



*Slika IV.1 –Procesi usitnjavanja otpadnog materijala*

Iako se korišćenje recikliranog agregata u betonu poslednjih godina dosta istražuje i nivo recikliranja je prilično visok u pojedinim zemljama, njegova primena je još uvek nedovoljna. Za sada se najviše koristi u nekonstruktivnim elementima i to kao zamena za krupni agregat [37].

Početak korišćenja RA smatra se kraj Drugog svetskog rata, kada je uništen veliki broj objekata, puteva i bila je potrebna njihova obnova. Nakon početne upotrebe, sledi pauza u njegovom korišćenju sve do 70-ih godina prošlog veka kada SAD ponovo počinju da ga koriste za nekonstruktivne elemente. Koriste i druge zemlje koje imaju problem sa nalazištima kvalitetnog prirodnog agregata ili ozbiljnog manjka raspoloživog prostora za deponije. Tako se npr. u Japanu poslednjih nekoliko godina reciklira oko 95% otpadnog betona, a širom zemlje je formirano preko 1200 reciklažnih centara [38]. Takođe, visok procenat recikliranja je i u nekim visoko razvijenim evropskim zemljama, kao npr. u Danskoj oko 80-85%, Holandiji oko 75-85%, u Belgiji i Nemačkoj oko 75% [39],[40][41], u kojima je pomoću različitih mera državne politike društvo podstaknuto na recikliranje

i razvoj svesti o očuvanju prirodnih resursa na način da je recikliranje građevinskog otpada jeftinije od njegovog odlaganja na deponije – kroz povećanje cena deponovanja.

Glavni cilj jeste da se konstrukcija napravi više "zelena" i učini dobrobit očuvanju životne sredine [42].

Prilikom drobljenja otpadnog betona, za prirodni agregat ostaje vezana određena količina starog maltera (Slika IV.3). Smatra se da on najviše određuje karakteristike RCA i da je glavni razlog za niži kvalitet ovog agregata u odnosu na prirodni. Zapreminska masa u rastresitom stanju kod RCA je generalno niža nego kod prirodnog agregata, obično do 10% [43] ali i zapreminska masa u zasićenom, površinski suvom agregatu, usled vezanog maltera čija je gustina manja od gustine kamena za koji je vezan [44]. Poroznost (pre svega otvorena), a samim tim i upijanje vode su zavisni od količine i kvaliteta vezanog maltera. Prirodni agregat usled male poroznosti ima i malo upijanje vode (0,5-2,5%) ali malter vezan za njega, povećava ukupno upijanje vode i njeno zadržavanje u RCA (upijanje vode krupnog RA najčešće je u granicama 4-5,6% [[42],[45],[46], ponekada čak i do 9,2% [47]. Kvalitet RCA najčešće se određuje prema nivou apsorpcije vode. Taj podatak govori o količini vezanog maltera, uticaju na čvrstoću betona i trajnost.

Zbog svega navedenog, udeo krupnog RCA u betonima se ograničava dok je u slučaju sitnog RCA još neizvesnije u pogledu upijanja vode i nečistoća koje sa sobom nosi i njegovo učešće u betonu se ne dozvoljava. Pojedine zemlje daju preporuke za granične vrednosti upijanja vode RCA, njegov udeo u betonu i granulometrijski sastav. Najčešći problem slabog korišćenja RCA su velika raznolikost u kvalitetu, male čvrstoće, veliko skupljanje usled sušenja, tranzitna zona i nizak modul elastičnosti betona u kojem se ovaj agregat primenjuje. Najverovatniji razlozi za to su [48]:

- reciklirani beton je gotovo uvek kontaminiran nekim stranim materijalima, moguć je visok nivo sulfata, hlorida i sl. kao i
- malter koji je vezan uz agregat je mekan, porozan, sa dosta pukotina, manje otporan na mehaničke i hemijske uticaje i veoma raznolik u pogledu kvaliteta [19].

Izgled RCA nakon procesa drobljenja dat je na Slika IV.2.



Slika IV.2 –Izgled recikliranog agregata

Sastav cementa u RCA smatra se važnijim od njegovih fizičkih karakteristika [49]. S obzirom da agregat zauzima 60-70% ukupne zapremine betona, izbor, kvalitet i količina agregata veoma je bitna i treba na to obratiti pažnju [19].

Na makroskopskom nivou, beton je kompozitni materijal koji obuhvata diskretni agregat dispergovan u kontinualnoj cementnoj pasti. Kao i kod drugih kompozitnih materijala, i ovde veza ove dve najbrojnije komponente određuje mehaničke karakteristike betona. Struktura betona od RCA mnogo je složenija nego kod običnog betona (NAC). On ima dve tranzitne zone, jednu između zrna agregata i starog maltera (unutar RCA) i drugu između RCA i novog cementnog kamena [48], Slika IV.3.

Uticao RCA u betonu značajno varira od eksperimenta do eksperimenta, vrlo često su stavovi i zaključci o ulozi RCA potpuno suprotstavljani. Ipak, mogu se izneti neki generalni zaključci oko karakteristika betone sa RCA u odnosu na betona sa NAC [36]:

- povećano skupljanje (do 50%);
- povećano tečenje (do 50%);
- povećana apsorpcija vode (do 50%);
- smanjenje čvrstoće pri pritisku (do 25%);
- smanjenje čvrstoće na cepanje i čvrstoće na savijanje (do 10%);
- smanjenje modula elastičnosti (do 45%);
- ista ili smanjenja otpornost na mraz.

Na osnovu dostupne literature, izdvojena su najčešća ispitivanja koja su rađena na RCA pre primene u betonu:

- upijanje vode
- zapreminska i specifična masa
- količina vezanog maltera [46],[50]
- čvrstoća pri pritisku betona
- granulometrijski sastav
- oblik zrna (metodom pregleda) [42],[50]
- petrografska ispitivanja [51]
- poroznost
- površinska tekstura [50]
- otpornost prema abraziji [50]
- drobljivost.

Kao jedna od mera trajnosti RCA uzima se njegova drobljivost (preko ACV) i LA (Los Angeles) abrazivnost. Ove vrednosti su kod RCA obično manje nego kod prirodnog agregata što pokazuje slabost vezanog maltera i može predstavljati slabo mesto u betonu sa RCA. Većina autora smatra da zamena krupnog prirodnog agregata sa 25-30% RCA neće uticati značajno na čvrstoću betona. Neki istraživači pripisuju smanjenje čvrstoće betona povećanoj apsorpciji vode RCA, ali ujedno smatraju i da se čvrstoća može povećati starenjem jer ova voda iz maltera može biti otpuštena tokom vremena u novi malter i tako povećati stepen hidratacija a samim tim i čvrstoću betona [[42].

Opširan prikaz o uticaju RCA na neka svojstva betona (čvrstoću pri pritisku i savijanju i modul elastičnosti) dato je u radu Tam et al. [52]. Sumirani su rezultati istraživanja koja pokazuju kako RCA utiče na spomenuta svojstva betona u zavisnosti od procenta zamene prirodnog agregata recikliranim za period 1977-2003.

Kao jedna od najbitnijih karakteristika RCA je količina vezanog maltera. Utiče na osobine betona u kome se taj agregat koristi, kako u svežem (obradivost), tako i u očvrslom stanju (mehaničke karakteristike i trajnost). Problem predstavlja nepostojanje standardizovanog postupka za određivanje količine vezanog maltera u RCA i zato su pojedini istraživači razvili svoje metode:

- **Nagataki:** uzorci RCA potapani su u 10% rastvor hlorovodonične kiseline i na taj način je "otapan" malter koji je vezan za zrna agregata [45]. Nedostatak ovog postupka je što hlorovodonična kiselina deluje agresivno na agregat na bazi krečnjaka [53].
- **Sri Ravindrarajah i Tam:** pravljena je mešavina RCA i belog Portland cementa, potom su ti uzorci posmatrani pomoću digitalni planimetar [54].
- **Sanchez de Juan i Gutierrez:** uzorci RCA se suše, potom potapaju u vodu, ponovo suše i nakon toga se ručno uklanja vezani malter. Uzorci se izlažu velikim temperaturnim promenama od temperature hladne vode do 500°C. Ovaj postupak se pokazao kao jedan od najefikasnijih [50],[53].
- **Abbaz i al. :** uzeti su uzorci RCA, 24h su sušeni na temperaturi od 105°C, potom su bili potopljani 24h u 26% rastvor natrijum sulfata i nakon toga su (još uvek potopljani u rastvor) izlagani ciklusima (ukupno 5) zamrzavanja na -17°C u trajanju od 16h i odmrzavanja na 80°C u trajanju od 8h; nakon poslednjeg ciklusa rastvor je dreniran iz uzorka, uzorci isprani vodom iz česme i potom osušen na 105°C. Ipak, nakon ovog tretmana, deo maltera ostane vezan za agregat što smanjuje njegovu efikasnost [46].
- **Movassaghi:** uzorci RCA se potapaju u 20% azotnu kiselinu i zagrevaju sve dok vezani malter ne počne da se rastvara (oko 2 sata). Primenom opisane metode, na kraju isptivanja, deo maltera ostane vezan za agregat [50].

Prema rezultatima koje je su dobili Juan i Gutierrez [53], količina maltera vezana za RCA je 33-55% za frakciju 4/8mm i 23-44% za frakciju 8/16mm. Oni takođe navode da količina maltera u RCA ne bi trebala da je veća od 44%, da bi RCA mogao da se upotrebi za proizvodnju konstruktivnog betona. U radu [50] je predstavljeno da je količina vezanog maltera, nezavisno od frakcije, u rasponu 20-56% što zavisi od metode koja je primenjena za određivanje količine vezanog maltera. Slične rezultate objavili su i Abbas et al. [46] kod kojih je količina vezanog maltera 21-42%, primenjujući metodu koju su unapredili-smrzavanje/odmrzavanje.

Kao što je napomenuto, uz malter koji je u RCA često su vezani i neki drugi materijali (keramika, gips, asfalt, staklo), koji su, zbog njihovog negativnog dejstva na svojstva betona označeni, kao nečistoće [55]. Uticajem ovih nečistoća na svojstva RCA, kao što su upijanje vode, zapreminska masa zasićenog, površinski suvog uzorka, rastvorljivost

sulfata u kiselini i količina sumpora, bavili su se Agrela et al. [55]. Na kraju svojih istraživanja daju određene preporuke za korišćenje recikliranog agregata u konstruktivnim/nekonstruktivnim betonama, zavisno od dobijenih rezultata ispitivanog agregata.

U cilju poboljšanja svojstava RAC, istraživači su razvili nekoliko metoda koje su zasnovane na pravilima za projektovanje sastava betona ili za spravljanje betona. Fathifazl sa saradnicima [51] razvio je novu metodu primene RCA u betonu. Označena je kao Equivalent Mortar Volume (EMV). Prema njoj, betonska mešavina sa RCA i referentna betonska mešavina imaju jednake zapreminske udele malterske komponente i prirodnog agregata. Pri tome količinu malterske komponente u betonu sa RCA, treba umanjiti za količinu maltera koji je vezan u recikliranom agregatu. Na taj način u betonu sa prirodnim agregatom, celokupna količina malterske komponente je novi malter, dok u betonu sa RCA maltersku komponentu čini novi malter i onaj vezan za agregat. Autori ove metode iznose podatke da se primenom ove metode kod armiranobetonskih greda može dobiti beton koji ima iste ili čak više vrednosti čvrstoće pri pritisku, savijanju i smicanju.

Još jedan način da se poboljša kvalitet betona sa RA, jeste primena metode Two Stage Mixing Approach (TSMA). Ovu metodu preporučuje Tam sa saradnicima [48][19], a sastoji se u tome da se potrebna količina vode doda mešavini iz dva puta. Najpre se u mešalicu sipa agregat koji se meša 60s. Potom mu se doda približno jedna polovina zahtevane vode i ponovo sve promeša 60s. Nakon toga sipa se cement, promeša 30s, doda se ostatak vode i sve zajedno meša još 120s. Prva količina vode, koja je dodata, troši se na upijanje od strane RCA i ispunjavanja prslina i praznih prostora u staroj cementnoj pasti. Na ovaj način poboljšava se veza između RCA i nove cementne paste, jer taj prostor, poznat kao tranzitna zona, sada ima dovoljno vode za nesmetano obavljanje procesa hidratacije. Preostala voda omogućava da se odvijuje proces mešanja betona i učestvuje u procesu hidratacije preostale cementne paste.

Dostupnost radova koji se bave problemom trajnosti betona sa RCA je mala, naročito trajnost RCA na dejstvo sulfata.

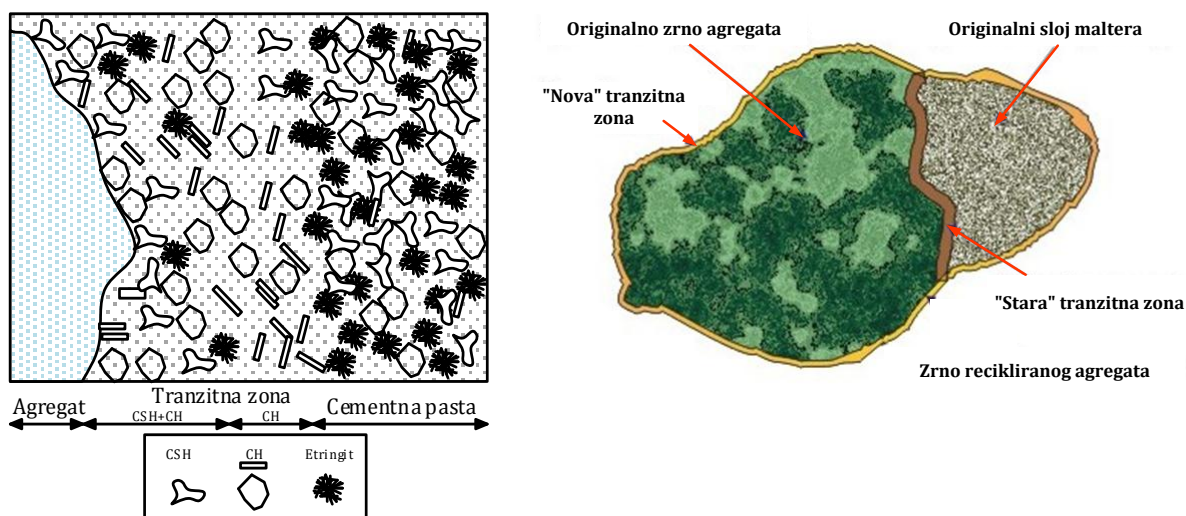
Corral-Higuera R. et al. [56] ispitivali su uticaj zamene 100% krupnog prirodnog agregata recikliranim, i delimične zamene cementa letećim pepelom (30%) i silikatnom prašinom (10%) na dejstvo 3,5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Zaključak je da pomenuti dodaci poboljšavaju otpornost betona na spoljašnje dejstvo natrijum sulfata u odnosu na betone sa RCA bez tih dodataka. Mereni su gubitak mase i otpornost armature na koroziju.

Seung-Tae Lee [57] koristio je RCA kao zamenu za sitan agregat u malteru. Nivo zamene bio je 0%, 25%, 50%, 75% i 100% i malteri su bili izloženi dejstvu  $\text{MgSO}_4$  koncentracije 4,24%. Nakon ispitivanja zaključeno je da zamena sitnog agregata u malteru do 50% nema negativan efekat na trajnost maltera. Praćena je promena čvrstoće pri pritisku, ekspanzija uzoraka i vršen je vizuelni pregled. U uzorcima sa preko 50% učešća RCA pronađena je prekomerna količina gipsa i taumasita. Pretpostavlja se da je do navedenih promena došlo usled velike količine maltera koji je dostupan rastvoru sulfata.

Preporuke za korišćenje recikliranog agregata nalaze se u EN 206-1 [58], pri čemu se svrstavanje u određene kategorije vrši prema EN 12620 [51]. Prikaz ovih preporuka, zajedno sa standardima prema kojim se vrši ispitivanje agregata i poglavljima sa kojim su povezani u EN 12620, nalazi se u Prilogu 2.

## 2. TRANZITNA ZONA

Za beton možemo reći da ima tri glavne komponente: agregat, cementnu pastu i zonu između njih. Ova treća komponenta, nazvana tranzitna zona (ITZ-Interfacial *Transition Zone*), određena je osobinama agregata, cementne paste i načina na koji oni međusobno reaguju u toku mešanja, ugrađivanja i negovanja betona. Ona unosi još jedan nivo heterogenosti kod betona, koji je i inače visok. U sastav tranzitne zone (ITZ) ulaze voda i finije čestice cementne paste. To je mesto gde dolazi do kristalizacije produkata hidratacije, izdvajanjem iz rastvora. Čine je, najpre, produkti hidratacije C-S-H i CH, koji se nalaze uz sama zrna agregata, potom sloj CH, pore i na kraju regularna cementna pasta (Slika IV.3). Za reciklirani agregat se može reći da ima dve tranzitne zone: stara tranzitna zona između zrna prirodnog agregata i starog cementnog kamena i nova, između recikliranog agregata i novog cementnog kamena (Slika IV.3). Ako je prosečno rastojanje između zrna agregata u betonu od 75 do 100 $\mu\text{m}$ , a širina tranzitne zone od 10 do 50 $\mu\text{m}$ , proizilazi da je zapremina tranzitne zone 20-40% zapremine cementnog kamena [59].



Slika IV.3 - Šematski prikaz tranzitne zone i zrna recikliranog agregata

Kao i kod drugih kompozitnih materijala, jačina veze između agregata i cementnog kamena određuje mehaničke karakteristike betona [60]. Ovu zonu karakteriše velika poroznost i uglavnom je to rezultat otežanog pakovanja čestica cementa uz površinu zrna agregata, tzv. "efekat zida". Zna se da pri pakovanju čestica u nekom sudu postoji oblast u blizini zida suda sa većom poroznošću od poroznosti u sredini suda, i širina ove oblasti odgovara približno prečniku najveće čestice. Eksperimentalno je izmerena širina tranzitne zone od 50 $\mu\text{m}$  i to odgovara aglomeratu čestica cementa (veličina čestica



cementa je 15-20 $\mu$ m). Za tranzitnu zonu je karakteristično da produkti hidratacije cementa rastu u pravcu od cementne paste ka zrnju agregata, dok je unutar cementne paste taj rast u svim pravcima. Zbog toga se prazan prostor ne popunjava efikasno i posledica je velika poroznost ove zone. Produkti hidratacije, koji se najčešće nalaze u tranzitnoj zoni, su kristali kalcijum hidroksida (CH). Ovo jedinjenje ulazi u sistem pora ITZ u obliku rastvora i kada rastvor postane zasićen dolazi do nukleacije i rasta kristala CH. Smatra se da prisustvo kristala CH u ITZ ne doprinosi značajno mehaničkim svojstvima betona [61].

Mehta zaključuje da povećanje poroznosti u malterima i betonima treba pripisati pojavi mikroprslina u tranzitnoj zoni [4]. Donekle se sa njim slaže i Neville, koji pri posmatranju propustljivosti očvrle cementne paste, obuhvata sistem pora koji se nalazi unutar same paste ali i u okviru tranzitne zone [62]. Tranzitna zona ima drugačiju mikrostrukturu od ostatka paste. Može se očekivati da će usled prisustva mikroprslina u ovoj zoni i veće poroznosti, ona značajno povećati propustljivost betona, ali i tu ima podeljenih mišljenja. Od toga da tranzitna zona značajno utiče na propustljivost betona, tako što je povećava, do mišljenja da je propustljivost kontrolisana sistemom pora koje se nalaze u samoj cementnoj pasti jer je to kontinualna faza, dok prisustvo agregata i ITZ produžava put fluidima.



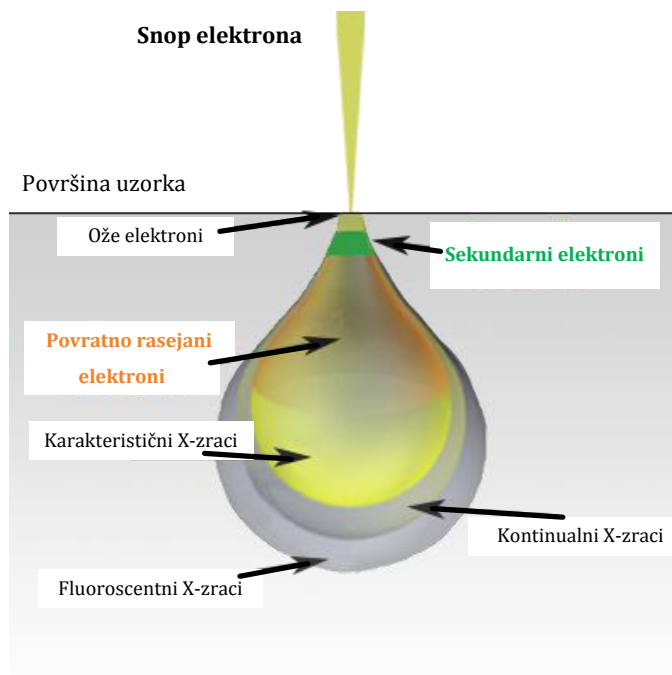


V MIKROSTRUKTURA I FAZNI  
SASTAV CEMENTNOG  
KAMENA



## 1. SKENING ELEKTRONSKA MIKROSKOPIJA

Prvi elektronski mikroskop se pojavio 1930. godine u Berlinu i nastao je iz potrebe da se poveća rezolucija. Svetlosni mikroskopi koji su se koristili, imali su rezoluciju oko  $0,3\mu\text{m}$ . Ona je određena talasnom dužinom svetlosti. Sa upotrebom snopa elektrona kojim se bombarduje površina uzorka kod elektronskog mikroskopa, postiže se rezolucija oko  $0,15\text{nm}$ . Iako je poslednjih nekoliko godina korišćenje elektronskog mikroskopa u izučavanju betona veoma popularno, ova tehnika je još uvek relativno nepoznata za većinu inženjera. SEM je elektronski instrument koji generiše i fokusira snop elektrona na površinu uzorka. Snop elektrona pada na površinu uzorka gde dolazi do niza elastičnih i neelastičnih interakcija elektrona iz upadnog snopa i uzorka. Elastični i neelastični sudari upadnog snopa dovode do formiranja signala na osnovu kog se formira slika. Signali koji se formiraju mogu biti prepoznati kao povratno rasejani elektroni (backscattered electrons - BE ili BSE), sekundarni elektroni (secondary electrons - SE) i X zraci, Slika V.1. U svim slučajevima slika se formira skupljanjem elektrona sa svake tačke površine. Energija elektrona iz upadnog (primarnog) elektronskog snopa se rasipa unutar uzorka gde se dešava interakcija sa elektronima atoma uzorka. U cementnoj pasti i betonu koji su uglavnom sastavljeni od lakih elemenata, zapremina dela uzorka u kojoj se dešava interakcija elektrona upadnog snopa i uzorka može imati dubinu i prečnik  $2\text{-}3\mu\text{m}$ .



Slika V.1 – Nastanak signala kod Skening elektronskog mikroskopa (SEM)

**Sekundarni elektroni (SE)** su elektroni niske energije koji dolaze iz slojeva koji su blizu površine uzorka. Nastaju u neelastičnom sudaru elektrona iz upadnog snopa sa elektronima atoma uzorka. Energija sekundarnih elektrona je veoma mala, svega nekoliko elektron volta. Stoga samo elektroni koji su blizu površine imaju dovoljnu energiju da napuste površinu uzorka a da ne budu ponovo absorbovani. Oni sadrže

mного informacija o površini uzorka i veličini čestica [63]. Koriste se za posmatranje slobodno prelomljene površine.

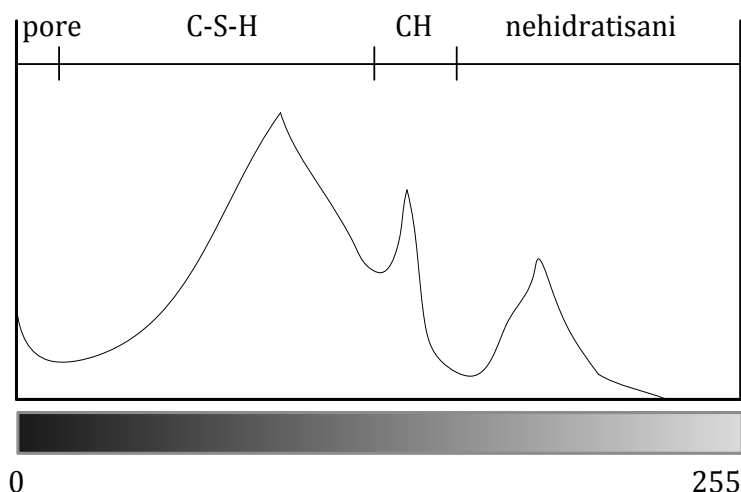
**Povratno rasejani elektroni (BSE)** su elektroni visoke energije koji se rasejavaju iz određene dubine u uzorku. To su upadni (primarni) elektroni koji se elastično odbijaju od elektrona atoma u uzorku. Njihova energija je mnogo veća od energije SE. Otuda oni mogu da "putuju" iz dubokih delova atoma. Za njih je karakteristično da će se veći broj elektrona iz primarnog snopa odbiti od elektrona atoma uzorka, ako je veći atomski broj atoma elementa u uzorku. Atom sa većim atomskim brojem ima veći broj elektrona pa je veća mogućnost da se sudare sa primarnim elektronima. Slika koja se pri tome dobija je svetlija. Otuda važi pravilo da je uzorak sa većim atomskim brojem svetliji. Na osnovu ove pojave se komponente u cementnoj pasti mogu indentifikovati jer imaju različite nijanse sive boje. U cilju dobijanja što boljeg kontrasta veoma je važno da se eliminišu drugi uticaji koji bi smanjili kontrast. U te uticaje spada topografija površine uzorka (rapavost) te se uzorci na kojim se radi BSE analiza najčešće poliraju. BSE režim je kvantitativna metoda koju često prati i kvalitativna analiza koja se zasniva na primeni X zraka (EDS). Na ovaj način se definiše raspodela elemenata na posmatranoj površini. Rad u ovom režimu ima smisla ako se kombinuju ove dve metode i ako se analizira veliki broj tačaka, zbog heterogenosti materijala. BSE je korisna tehnika u prikazivanju kontrasta elemenata na poliranim uzorcima i najčešće se koristi za praćenje formiranja različitih produkata hidratacije.

**Karakteristični X-zraci** nastaju kada elektron iz primarnog snopa izbaci elektron iz njegovog položaja u atomu. Na oslobođeno mesto dolazi elektron sa većom energije na položaj sa manjom i emituje X-zrake. Interakcija nastalih X-zraka sa uzorkom je daleko manja od interakcije elektrona. Ovi elektroni se mere elektronskim detektorom i prebacuju u slike pri čemu se dobijaju različite informacije [64].

Da li se neka faza cementnog kamena vidi kao svetlo ili tamno mesto zavisi od prosečnog atomskog broja te faze,  $Z$ . Svetlije boje znače viši atomski broj. Kod cementnog klinkera najsvetlija je feritna faza ( $C_4AF$ ), nakon nje sledi alit ( $C_3S$ ) i na kraju aluminat ( $C_3A$ ) i belit ( $C_2S$ ) koje imaju slične nijanse sive boje. Uvođenjem molekula vode u strukturu minerala cementnog klinkera, u procesu hidratacije, jako se smanjuje vrednost prosečnog atomskog broja i to mesto se prikazuje kao tamnije u odnosu na slučaj pre hidratacije. Kod produkata hidratacije najsvetliji je kalcijum hidroksid (CH), potom dolaze ostali produkti hidratacije koje nije moguće razlikovati prema boji (CSH, etringit, AFm..) [61].

C-S-H jedinjenja mogu dosta da variraju u nijansama sive boje kada se posmatraju pod mikroskopom. Njihov sastav je promenljiv, naročito u smislu odnosa kalcijum i silicijum oksida. Razlike mogu da se pojave i u stepenu mikroporoznosti. Oba ova faktora utiču na nivo sive boje kada se posmatraju u BSE režimu. C-S-H sa nižim Ca/Si odnosom je tamnije boje na BSE slikama nego C-S-H sa visokim Ca/Si odnosom. Razlike se pojavljuju usled različite aktivnosti Ca prilikom rastvaranja iz paste, pri pojavi karbonizacije i kada je prisutna velika količina pucolana. Razlike u mikroporoznosti mogu da se pojave kada se C-S-H formira na različitim temperaturama, više temperature vode stvaranju gušćeg

C-S-H sa manjom mikroporoznosti i svetlijom nijansom na BSE slikama. Nivo "sivoće" može da se predstavi preko histograma (Slika V.2). Skroz desno pik odgovara nehidratisanom materijalu, potom sledeći pik je CH i na kraju C-S-H. Da bi se dobili reprezentativni rezultati potrebno je uraditi dovoljno analiza zbog heterogenosti materijala. Postavlja se pitanje da li raditi analize sa malim ili velikim uvećanjem. Mouret je sa saradnicima primenio rigoroznu statističku analizu, gde je pokazao da je za dobre rezultate sasvim dovoljno uraditi oko 30 analiza sa uvećanjem od 200x [65].



Slika V.2 – Histogram, nijanse sive boje koje odgovaraju različitim produktima hidratacije

Produkti hidratacije cementa nisu složeni samo po sastavu nego i po strukturi. Oko 70% potpuno hidratirane paste čini C-S-H gel, 20% kalcijum hidroksid i ostatak su etringit, različiti hidrati, ostatak nehidratizovanog klinkera i drugi sastojci u malim količinama [66]. Po strukturi, pasta obuhvata kristalne, polu-amorfne i amorfne faze. Izučavanje hidratirane cementne paste pomoću SEM-a otkriva da postoje produkti hidratacije-C-S-H gel koji se formira u okviru zrna alita i belita od površine ka unutrašnjosti, zahvaljujući difuziji vode od površine ka centru zrna. Ovi produkti se zovu "unutrašnji produkti". Postoje i tzv "spoljašnji produkti" koji nastaju rastvaranjem kalcijum silikata u pornom rastvaru, potom taloženjem i kristalizacijom pornog rastvora kada se dostigne zasićenje. Ova tehnika je dosta pomogla u otkrivanju treće faze betona, poznate tranzitne zone i ujedno najslabije "faze" betona. Danas ima veliku primenu i u proučavanju trajnosti betona [64].

Priprema uzoraka za režim SE je relativno jednostavna što predstavlja jednu od njegovih najvećih prednosti. Posmatraju se sveže prelomljeni, nepolirani i vakuumirani uzorci. To omogućava identifikaciju kristala na prelomu, u porama ili na površini agregata. Od hrapavosti samog uzorka zavisi intenzitet energije elektrona, a njihovom detekcijom iz svih pravaca omogućava se 2D prikaz uzorka.

BSE na poliranim površinama ima ograničenja, naročito u neželjenim promenama koje se dešavaju na uzorku prilikom pripreme za ispitivanje. Ovo je donekle ublaženo novim tehnikama. Tehnike impregnacije zasnovane na vakuum sistemu koriste nisko viskozni

epoksid da bi se stabilizovala struktura uzorka. Priprema uzoraka uvodi pre svega sušenje, proces koji može promeniti mikrostrukturu paste i uvesti mikro pukotine. Kako bi se ovo izbeglo predloženo je da se voda iz pora postepeno zameni nekim rastvaračem (isopropanol, aceton, metanol...), a potom impregniraju epoksidom ili upijanje epoksida male gustine u strukturu pora [64].

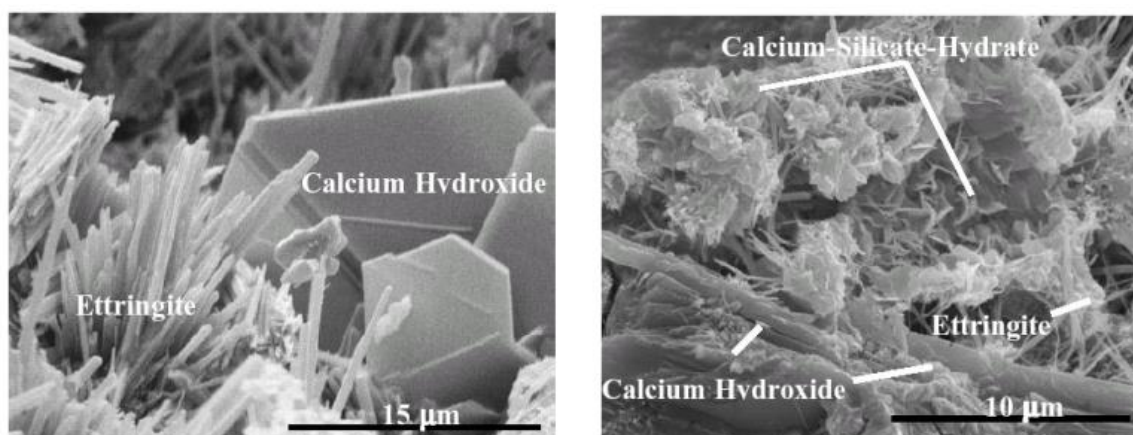
Prednosti BSE tehnike su sledeće [65]:

- Posmatranje ravnih poliranih površina koje mogu biti pripremljene tako da budu reprezentativne, za razliku od sveže prelomljenih uzoraka koji ipak otkrivaju "slab put".
- Širok spektar uvećanja od 20x do 10000x. Pri malom uvećanju može se proučavati prostorni raspored agregata, paste i bilo kakvog defekta u betonu, dok pri velikim uvećanjima moguće je izučavati morfologiju produkata hidratacije u pasti, kao i raspodela pora određene veličine.
- Mogućnost kombinovanja BSE slike sa informacijama o hemijskim analizama na mikro nivou.

Nedostaci su:

- Prostorna rezolucija je manja nego kod SE.
- Dvodimenzionalni prikaz trodimenzionalne strukture uzorka.
- Moguće manje promene na mikrostrukтури uzorka prilikom njegove pripreme.

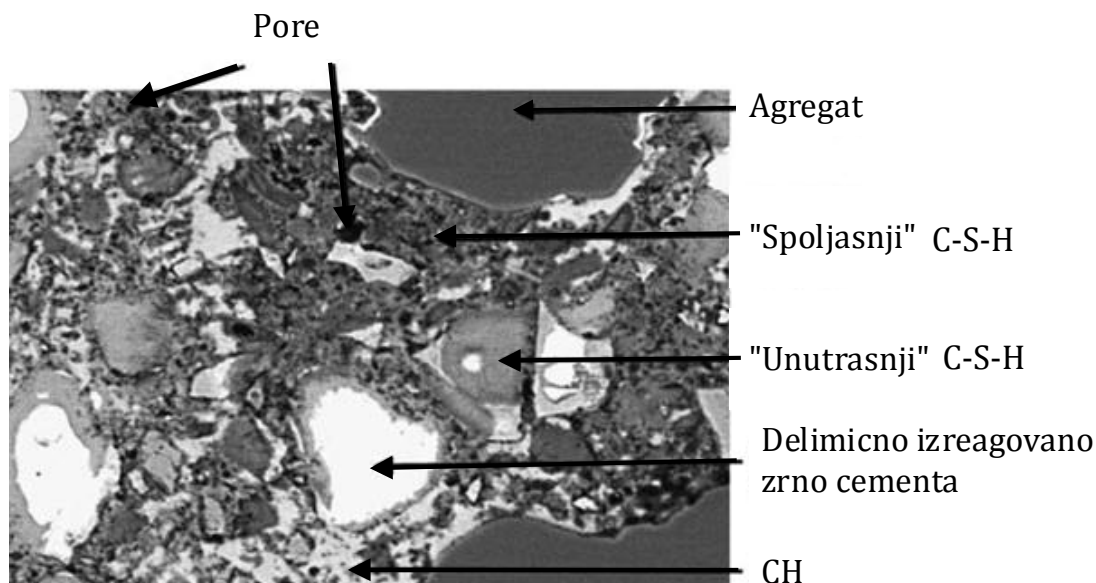
Mikrostruktura cementnih materijala koja se razvija u procesu hidratacije može da se veoma uspešno prati na SEM-u (svež prelom kada radi u režimu SE). Može se pratiti razvoj mikrostrukture u početku, kada se razvija procesom hidratacije, čime se povećava zapremina čvrste komponente u sistemu. U početku, kada se cementu doda voda, čestice su međusobno razdvojene vodom i nema povezanosti među njima. Procesom hidratacije, CH se izdvaja iz rastvora i taloži u porama a C-S-H na površini zrna cementa. Na taj način cementna zrna se povezuju C-S-H vlaknima i CH kristalima. Polako se formira sve više i više čvrste faze, Slika V.3 [17].



Slika V.3 – SEM snimak cementne paste sa CH, C-S-H i etringitom [17]



Karakteristična slika cementne paste u procesu hidratacije, snimljena u BSE režimu, data je na Slika V.4.



Slika V.4 – Karakteristična slika cementne paste u procesu hidratacije, BSE režim

Na osnovu SEM analiza rađenih u oba režima je, na primer, utvrđeno da Portland cementni klinker ne sadrži zrna samo  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  i  $C_4AF$  faza već se u okviru zrna nalaze mešavine različitih faza. Prilikom mlevenja, lom zrna se obično dešava kroz faze pre nego između njih tako da se kao rezultat dobijaju zrna koja gotovo uvek obuhvataju više od jedne faze. Te faze reaguju različitom brzinom i može se uočiti kod jednog istog zrna cementa deo koji je počeo da hidratiše (stvara C-S-H gel) i deo (neka druga faza) koji još čuva svoj prvobitni oblik, tj. nije počeo da hidratiše [65].

Takođe je na SEM-u utvrđeno da hidratacija  $C_3A$  vodi formiranju produkata hidratacije u čiji sastav ulazi aluminijum oksid. U ranom stadijumu, kada je velika količina sulfata dostupna, stvara se AFt faza ili etringit ( $C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$ ) koji ima morfologiju u obliku tankih iglica sa šestougaoim poprečnim presekom čija veličina zavisi od pH vrednosti rastvora u porama [67]. Kasnije, ukoliko je još  $C_3A$  dostupan, etringit može reagovati sa njim i nastaje monosulfat ( $C_3A \cdot CS \cdot H_{12}$ ). Monosulfat može postojati samostalno ali je mnogo češće prisutan zajedno sa C-S-H gelom kao i etringitom, i iz tog razloga teško ih je identifikovati.

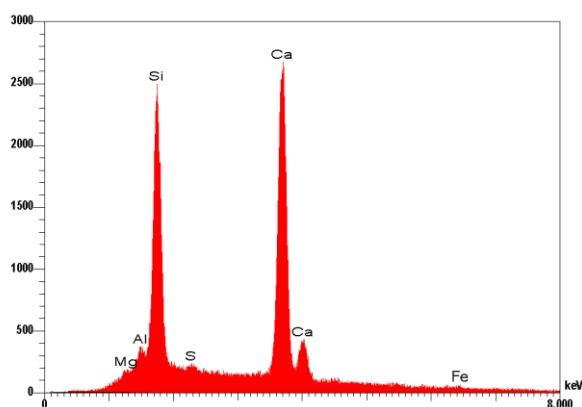
Pod određenim uslovima (npr. beton držan na povišenim temperaturama  $\approx 90^\circ\text{C}$ , a potom na ambijentalnoj temperaturi) etringit može rekristalizovati i u takvoj situaciji teško ga je razlikovati od monosulfata samo morfološki, nego je potrebno uraditi i mikroanalize [65]. U tom slučaju je potrebno uraditi EDS analizu na mapiranoj površini poliranog uzorka, a rezultate analizirati kroz crtanje posebnih dijagrama.

## 2. KARAKTERISTIČNI X-ZRACI I HEMIJSKA ANALIZA

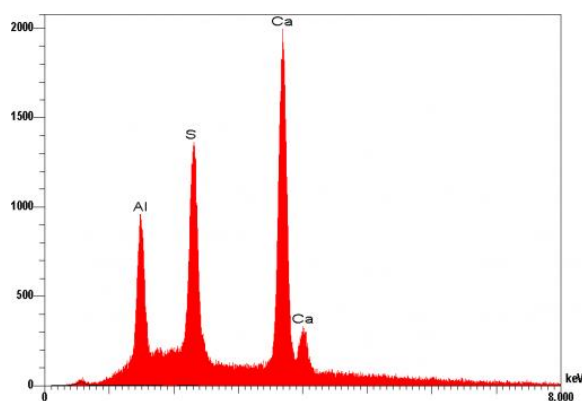
Na osnovu emisije karakterističnih X-zraka radi se hemijska analiza u pogledu sadržaja elemenata faza Portland cementnog klinkera i produkata hidratacije. Primena emitovanih X-zraka u hemijskoj analizi se zasniva na činjenici da većina elemenata ima karakteristično X-zračenje.

Broj elemenata koji se može detektovati zavisi od napona ubrzanja. Kod izučavanja hemijskog sastava maltera i betona na bazi cementa, pre svega je značajno utvrditi sadržaj sledećih elemenata: O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti i Fe. Vodonik nije moguće registrovati jer nema karakteristično zračenje.

Karakteristični X-zraci se identifikuju pomoću EDS analizatora (energy-dispersive spektrometar). Pomoću EDS analizatora je moguće kvantitativno i kvalitativno odrediti hemijski sastav. Dobra kvantitativna analiza zahteva da uzorak ima ravnu površinu. Stoga se uzorci za EDS analizu poliraju. Ukoliko se površina uzorka ne polira, put karakterističnih X-zraka kroz uzorak do detektora je različit što može dovesti do grešaka u proceni stepena absorpcije X-zraka. Drugim rečima, EDS analiza na uzorcima koji nisu polirani je nepouzdana. Na Slika V.5 i Slika V.6 su dati primeri EDS spektra.



*Slika V.5 – Spektar karakterističnih rendgenskih zraka za C-S-H gel sa veoma slabim pikovima koji se odnose na Mg, Al, S i Fe*

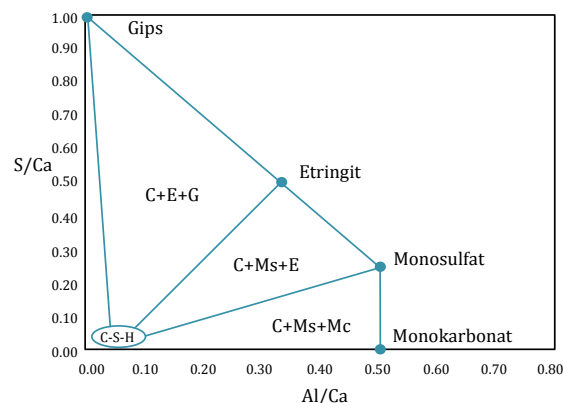
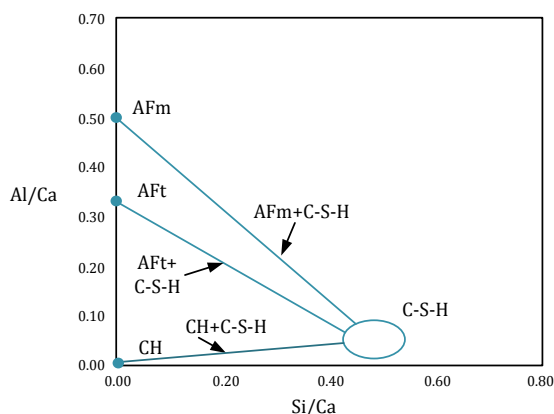


*Slika V.6 – Spektar karakterističnih rendgenskih zraka za etringit*

Pri analizi faza nastalih hidratacijom cementa dobijeni podaci se predstavljaju kroz sadržaj elemenata, a ne oksida, izražen u atomskim procentima, jer je u produktima hidratacije prisutna voda u značajnoj količini koja se ne može kvantifikovati. Iz ovih razloga se podaci za faze, nastale hidratacijom vrlo često prikazuju u grafičkom obliku gde su predstavljeni različiti atomski odnosi.

### 3. ANALIZA PRODUKATA HIDRATACIJE - UPOTREBA DIJAGRAMA SA PRIKAZOM RELATIVNIH ATOMSKIH ODNOSA

Kod analize podataka vezanih za EDS analizu, najveći problem predstavlja to što su produkti hidratacije izmešani u prostoru u kojoj se dešava interakcija primarnih elektrona iz upadnog snopa i uzorka. Stoga tačka, čiji sastav se analizira, na primer, ne predstavlja samo sastav C-S-H gela ili CH već njihove mešavine. Ovaj problem se pokušava izbeći tako što se istraživači fokusiraju samo na ispitivanje faza koje ih zanimaju. Vrlo često to nije moguće jer veličina produkata hidratacije zna da bude manja od prečnika primarnog snopa kao i zapremine u kojoj se dešava interakcija. S obzirom na značaj koji za ukupne osobine maltera i betona ima C-S-H gel, od velikog je značaja istražiti promene koje se dešavaju u sastavu C-S-H gela ili C-A-S-H gela. Najčešće se crtaju dijagrami prikazani na Slika V.7 i **Error! Reference source not found.** Na levom dijagramu (Slika V.7) čiste faze su C-S-H gel, AFt i AFm a na desnom (**Error! eference source not found.**) to su C-S-H gel, gips, etringit, monosulfat i monokarbonat (u koordinatnom početku se nalazi CH) [68].



Slika V.7 – Dijagram Al/Ca u funkciji od Si/Ca

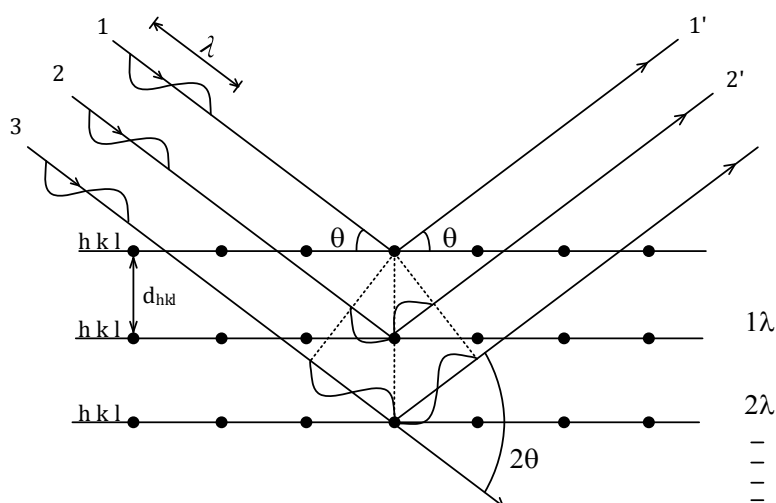
Slika V.8 – Dijagram S/Ca u funkciji od Al/Ca

Suština dijagrama prikazanih na slikama je da tačka koja leži na liniji koja povezuje sastav C-S-H faze i neke od gore navedenih faza predstavlja njihovu mešavinu. Druge tačke (u oblasti ograničenoj trouglovima) označavaju mešavine tri faze. Atomski odnos Ca/Si za C-S-H gel se kreće u granicama između 1,5 i 2,0 za portland cement i alit, dok se za cement sa dodacima kreće u rasponu Ca/Si=0,8-2,0. Položaj drugih faza u dijagramu prikazanom na levoj slici odražava stehiometrijske odnose u jedinjenjima CH, AFt – etringit, AFm- monosulfat i monokarbonat: CH (0;0), tj. u koordinatnom početku, etringit (0;0,33), AFm-monosulfat i monokarbonat (0;0,5). U dijagramu prikazanom desno, gips ima koordinate (0;1,0), etringit (0,33; 0,5), monosulfat (0,5;0,25), monokarbonat (0,5;0).

Ovakva vrsta analize omogućava da se dođe do sastava C-S-H gela. Naime, u C-S-H gelu, silicijum se može supstituisati sa aluminijumom pri čemu nastaje C-(A)-S-H gel. Takođe dolazi do vezivanja sulfata preko kalcijuma za C-S-H gel. Činjenica da se sulfati mogu vezati za C-S-H gel je korišćena u ovom radu za procenu stepena vezivanja etringita za C-S-H gel. Njegovo vezivanje za C-S-H gel dovodi do ekspanzije maltera/betona.

#### 4. RENDGENSKA DIFRAKCIJA (X-RAY DIFRACTION, XRD)

Rendgenska difrakcija zraka (XRD) je veoma koristan fizički fenomen koji se široko koristi za merenje kristalnosti i drugih parametara kristalne rešetke. Pored navedenog, veoma je korisna prilikom definisanja neophodnih strukturnih parametara kao što su kristalne ravni i Milerovi indeksi (recipročne vrednosti preseka koje određena kristalografska ravan zauzima u prostoru u odnosu na kristalografsku osu (h,k,l)). Osnovni princip XRD tehnike je razvijen izučavanjem optike. Elektromagnetno zračenje (uključujući X-zrake i vidljivu svetlost) se kreće u vidu talasa. Svaki tip elektromagnetnog talasa ima karakterističnu talasnu dužinu ( $\lambda$ ). Talasne dužine u opsegu X-zraka su približno iste veličine kao većina međuatomskih rastojanja. Kada talas dođe u kontakt sa čvrstim telom (u ovom slučaju nukleus atoma), odbija se od njega pod tačno određenim uglom refleksije koji je jednak upadnom uglu. Osnovni princip ove metoda prikazan je na Slika V.9 [69].

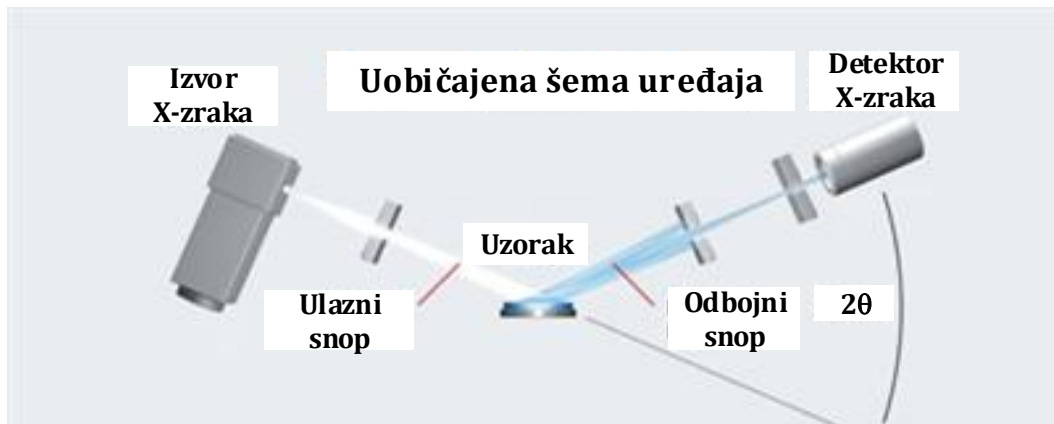


Slika V.9 - Prikaz difrakcije snopa rendgenskih zraka sa niza ekvidistantnih ravni kod kristala

Difrakcija se objašnjava interakcijom talasa sa materijalom. Postoji mogućnost da dođe do konstruktivne interferencije dva talasa (koja su u fazi) i tada dolazi do pojačanja intenziteta ili destruktivne interferencije dva talasa (koja nisu u fazi) kada dolazi do slabljenja intenziteta. S obzirom na činjenicu da svako kristalno jedinjenje se karakteriše jedinstvenom refleksijom X zraka od kristalnih ravni od kojih je sačinjeno, na osnovu položaja snimljenih difrakcionih maksimuma moguće je korišćenjem neke od raspoloživih baza podataka o strukturi kristalnih jedinjenja, izvršiti pouzdanu identifikaciju faza koje su prisutne u uzorku. Na osnovu intenziteta snimljenih

difrakcionih maksimuma (refleksija) moguće je izvršiti i kvantitativnu analizu uzorka tj. odrediti masene udele svake pojedinačne komponente u uzorku.

U XRD uređaju, postoji izvor X-zraka i detektor koji ih prikuplja, kao što je šematski prikazano na Slika V.10.



Slika V.10 – Šematski prikaz XRD uređaja

Izvor i detektor X zraka se pomeraju sinhronizovano pri različitim uglovima, uvek održavajući uslov da je upadni ugao jednak odbojnom uglu. Zbog prisustva mnogo različitih atoma u rešetki, većina talasa se neutrališe. Do konstruktivne interferencije dolazi kada je zadovoljena Bragova jednačina:

$$N \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad (V.1)$$

gde je:

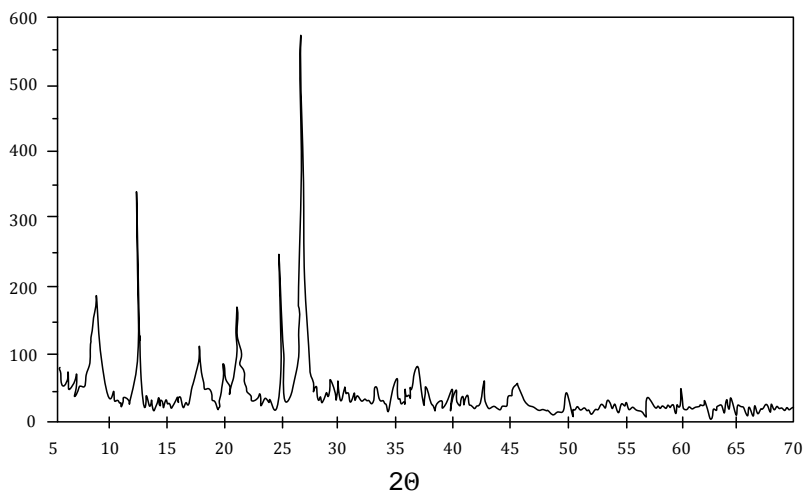
$N$  – red refleksije (uzeto da bude 1),

$\lambda$  - talasna dužina X-zraka,

$d$  – međuravansko rastojanje,

$\theta$  - upadni ugao.

Podaci koji se dobiju pomoću XRD analize obuhvataju intenzitet koji je izmeren u detektoru zraka kao funkcija upadnog ugla. Ugao se generalno prikazuje kao  $2\theta$ , jer su i izvor i detektor pod uglom  $\theta$ . Kada ne postoji konstruktivna interferencija, neće biti detektovanih difrakcionih pikova, odnosno maksimuma, jer nije zadovoljen uslov koji proizilazi iz Bragovog zakona. Pri vrednosti  $2\theta$ , kada dolazi do konstruktivne interferencije, pojačan nivo radijacije je zabeležen što se na difraktogramu manifestuje kao difrakcioni pik čiji je maksimum na tačno određenoj vrednosti  $2\theta$ . Uobičajeni XRD zapis (difraktogram) pokazan je na Slika V.11.



Slika V.11 – Primer rendgenskog difraktograma

Svaki pik u difraktogramu odgovara različitim ravnima u kristalnoj rešetki. Mnogi rezultati se mogu dobiti koristeći XRD i Bragovu jednačinu. Ako je poznata talasna dužina izvornog X-zraka, tada Bragova jednačina može biti reorganizovana za određivanje rastojanja između ravni kojima odgovara svaki pik:

$$d = \frac{n \cdot \lambda}{2 \cdot \sin\theta} \quad (V.2)$$

i na taj način se dobija informacija o vrsti kristalne strukture.

Pošto je u datom kristalu prisutno mnogo ravni, one su identifikovane preko odgovarajućih Milerovih indeksa (h k l). Tako se Bragova jednačina tačnije može napisati kao:

$$d_{hkl} = \frac{n \cdot \lambda}{2 \cdot \sin\theta} \quad (V.3)$$

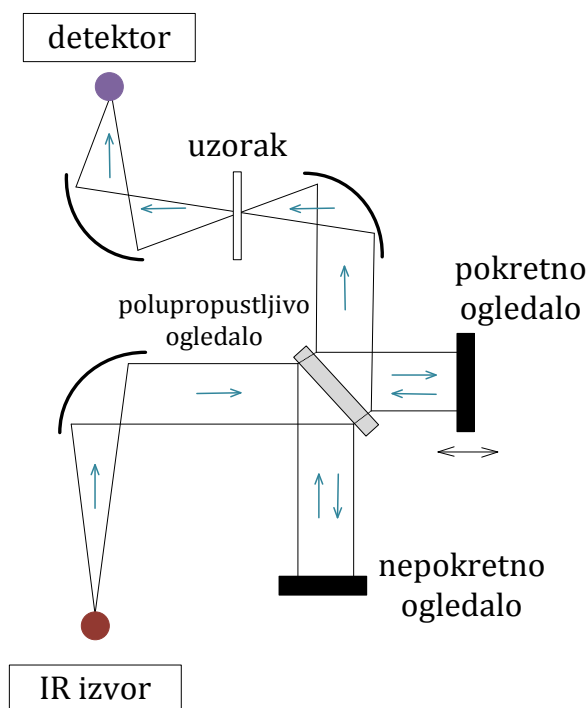
## 5. INFRACRVENA SPEKTROSKOPIJA SA FURIJEOVOM TRANSFORMACIJOM - FTIR

Infracrveno zračenje je po prirodi elektromagnetno zračenje, karakteristično po svojoj talasnoj dužini koja se nalazi u intervalu od 800 nm do 1 mm.

Princip na kojem se bazira infracrvena (IR) spektroskopija je merenje absorpcije odnosno transmisije infracrvenog zračenja kroz uzorak, na osnovu čega se posledično određuje struktura molekula tj. molekularni sastav posmatranog materijala. Absorbovanjem infracrvenog zračenja određenih talasnih dužina uslovljava pobuđivanje molekulskih vibracija koje osciluju sličnim frekvencijama kao što su frekvencije oscilovanja absorbovanih infracrvenih zraka, te molekuli počinju jače vibrirati i absorbovati deo zračenja. Zbog toga se infracrvena spektroskopija, zajedno s Ramanovom spektroskopijom zove vibracijska spektroskopija. Svaki molekul ima

karakteristične vibracije, koje zavise od: mase atoma, jačine veze i prostornog rasporeda (instrumentalna analiza-skripta). Vibracione absorpcione trake mnogih molekulskih funkcionalnih grupa pojavljuju se na karakterističnim vrednostima talasnih brojeva, a IR spektar kao celina je jedinstven "otisak prsta" molekula [70]. Ta činjenica daje infracrvenoj spektroskopiji velike analitičke mogućnosti jer je moguće odrediti prisustvo određenih molekulskih grupa, a samim tim i molekulski sastav ispitivanog materijala. Kako svaki molekuli ima različiti infracrveni spektar, infracrvena spektroskopija se koristi pri identifikaciji faza (instrumentalna analiza-skripta). Pored strukturne analize, IR spektrometrija se može primeniti i za kvantitativne svrhe. Određivanje koncentracije nekog jedinjenja pomoću ove metode zasniva se na Beer-Lamber-ovom zakonu, koja povezuje jačinu absorpcije sa koncentracijom i dužinom optičkog puta kroz uzorak. Sve kvantitativne analize se svode na merenje intenziteta odabranog apsorpcionog maksimuma jedinjenja koje se određuje. Najčešće se meri visina apsorpcione trake, mada tačnije rezultate daje merenje površine.

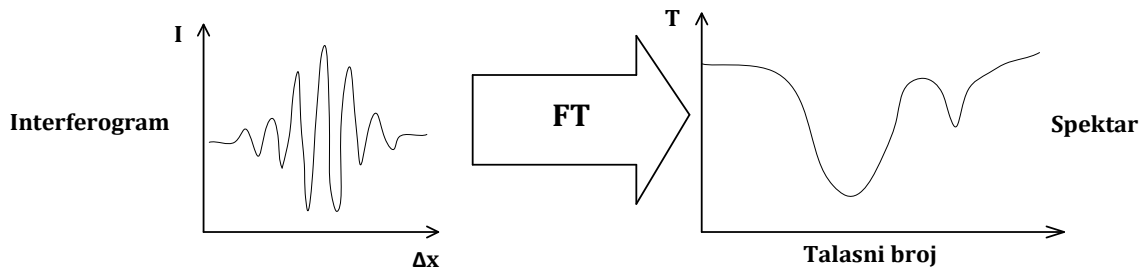
Osnovni deo Furijeovog infracrvenog spektrometra je Michelson-ov interferometar. Uzorak se izlaže polihromatskom zračenju. Zračenje koje emituje izvor dolazi do polupropustljivog ogledala koje polovinu zračenja propušta u pravcu nepokretnog ogledala, a drugu polovinu usmerava na pokretno ogledalo. Oba zraka se reflektuju od ogledala i vraćaju na polupropustljivo ogledalo gde dolazi do njihove interferencije. Interferisana svetlost prolazi kroz uzorak, a zatim stiže do detektora [70]. Šema infracrvenog spektrometra je prikazana na Slika V.12.



Slika V.12 - Šema FTIR spektrometra

Da bi se dobijeni interferogram preveo u spektar koristi se Furijeova transformacija, Slika V.13. Da bi se dobio spektar uobičajenog izgleda mora se izvršiti oduzimanje

spektra pozadine od ukupnog spektra pozadine i uzorka. Oduzimanje se vrši softverskim putem [70].



Slika V.13 - Šema prevođenja interferograma u spektar





# VI MEHANIZMI SULFATNE KOROZIJE BETONA



## 1. UVOD

Sulfatna korozija je veoma rasprostranjena jer se sulfati nalaze u zemljištu, u morskoj vodi, u vazduhu, gde dospevaju kao produkti sagorevanja goriva i kao otpadni materijal u pojedinim granama industrije. Elementi konstrukcije najosetljiviji na dejstvo sulfatne korozije, jesu temelji, ukopani delovi objekata, objekti u blizini mora, kao i čitavi konstrukcijski sklopovi u industrijskim i infrastrukturnim objektima. Temelji i ukopani delovi objekata veoma često se nalaze ispod nivoa podzemnih voda, koje u velikom broju slučajeva sadrže rastvorene različite vrste sulfata. U podzemnim vodama uglavnom su prisutni magnezijum, natrijum i kalijum sulfat. Amonijum-sulfat je uglavnom prisutan u poljoprivrednom zemljištu, a u manjoj količini kalcijum sulfat usled male rastvorljivosti [71].

U mnogim industrijskim objektima, kao posledica tehnoloških procesa, mogu se pojaviti materije koje izazivaju sulfatnu koroziju. Kisele kiše u urbanim sredinama mogu biti jako agresivne na beton, dok objekti u blizini mora ili u moru takođe su izloženi delovanju sulfata ali rastvorenih u morskoj vodi i u vidu aerosoli. Biološka korozija je poseban oblik sulfatne korozije izazvane produktima metabolizma bakterija. Treba naglasiti da soli u čvrstom stanju ne napadaju beton ali u rastvoru mogu reagovati sa hidratisanom cementnom pastom.

Koncentracija sulfata u podzemnim vodama, rekama i morskoj vodi obično iznosi 0,02-3,0g/l i ima vrednost pH 7-8. Sulfatno delovanje može da se definiše kao set mineroloških promena sa fizičkim efektima [1], ili, prema Skalny&Pierce, "sulfatni napad je kompleks fizičkih i hemijskih procesa koji rezultiraju u hemijskoj i fizičkoj modifikaciji cementne paste koje dovode do slabljenja mehaničkih i fizičkih karakteristika konstrukcije" [72].

Zavisno od kvaliteta betona i uslova sredine, složen mehanizam sulfatnog delovanja može da izazove različite hemijske i fizičke promene u betonu. Hemijske promene uključuju [7],[73]:

- uklanjanje  $\text{Ca}^{2+}$  iz pojedinih produkata hidratacije (dekompozicija CH i C-S-H)- ispiranje,
- promene u sastavu poreznog rastvora,
- formiranje hidratisanog silicijuma (silika gel),
- dekompozicija nehidratisanih klinker minerala,
- rastvaranje formiranih produkata hidratacije,
- formiranje etringita, gipsa i taumasita,
- formiranje jedinjenja magnezijuma, kao što su magnezijum-hidroksid (brucit) i magnezijum-siliko-hidrat,
- rekristalizacija nehidratisanog natrijum sulfata (thenardit) u/iz natrijum sulfat dekahidrata (mirabilit) i
- ulazak jona u beton i kasnije kristalizacija soli kao što su NaCl,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ , itd.

Uočene fizičke promene posledica su gore pomenutih hemijskih promena i one uključuju:

- kompletna promena strukture pora i mikrostrukture čvrste faze,
- povećanje poroznosti i propustljivosti,
- zapreminska ekspanzija i pojava mikropukotina,
- površinsko bubrenje, listanje, iscvetavanje,
- omekšavanje paste, smanjenje tvrdoće,
- stvaranje naslaga soli na površini i iscvetavanje u pukotinama,
- gubljenje čvrstoće,
- smanjenje modula elastičnosti.

Nijedna od ovih, gore pomenutih hemijskih i fizičkih promena ne podrazumeva dejstvo sulfata samo po sebi, ali njihove kombinacije mogu biti značajan dokaz da je došlo do sulfatne korozije. U početku, sulfatno delovanje može stvoriti neke suprotne efekte u odnosu na one koji su navedeni (smanjenje poroznosti ili povećanje čvrstoće usled ispunjavanja pora produktima dejstva sulfata), ali tokom nastavka procesa menja se efekat i postepeno gube zahtevane karakteristike.

Dejstvo sulfata na beton može da se manifestuje u tri različite forme: ekspanzijom i pojavom pukotina; raspadanjem produkata hidratacije i gubljenjem kohezije ili iscvetavanjem soli. Pri tome se povećava propustljivost betona i agresivna voda lakše prodire u unutrašnjost, ubrzavajući proces razaranja. Osnovni produkti koji pri tome nastaju jesu etringit, gips i taumasit. Koji će se oblik javiti zavisi od više faktora [5]:

- 1) Količine, koncentracije i prirode sulfata
- 2) Nivoa vode u tlu i njene varijacije
- 3) Toka podzemne vode, poroznosti tla i pritiska rastvora
- 4) Oblika konstrukcije
- 5) Kvaliteta betona
- 6) Temperature
- 7) Prisustva drugih jona.

Većinu ovih faktora teško je kontrolisati, ipak najlakše je uticati na faktor pod brojem 5, tj. kvalitet betona.

Uticao Cl<sup>-</sup> jona pri delovanju sulfatnog rastvora generalno se pokazao kao veoma dobar [71]. Hloridi pomažu u povećanju otpornosti usled bržeg kretanja kroz malter/beton u odnosu na sulfatne jone i tako pre reaguju sa komponentama i jonima u njima, stvarajući produkte koji nisu ekspanzivni, kao što je npr. Fridelova so. Osim toga, rastvorljivost etringita u rastvorima hlorida je 3 puta veća nego u vodi, a pretpostavlja se i taumasita zbog velike sličnosti ova dva minerala [74].

Faktori koji utiču na delovanje sulfata mogu se grupisati na sledeći način [75]:

**1-parametri vezani za karakteristike veziva** (tip i količina cementa, mineralni dodaci, vodocementni faktor, stepen hidratacije, uslovi negovanja);

**2-parametri vezani za hidrataciju cementa** (struktura pora, propustljivost, mehaničke karakteristike) i

**3-parametri vezani za uslove izloženosti** (koncentracija i vrsta sulfata, prisustvo drugih jona, vreme izloženosti, temperatura, variranje nivoa rastvora u odnosu na posmatrani materijal).

Sa delovanjem sulfata neizostavno je povezan i fenomen ispiranja koji se javlja kada je beton izložen delovanju vode [76] a povećava se u slabo mineralnoj ili kiseloj vodi [77],[78]. Pojam ispiranja jona iz strukture očvrslog betona se najčešće vezuje za rastvaranje kristalnog CH ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) iz strukture očvrslog maltera/betona i prelazak u spoljašnju sredinu. Kada se na ovaj način potroši sva količina CH dolazi do rastvaranja kalcijuma iz C-S-H [77]. Ovo objašnjenje ukazuje koliko je destruktivan proces sulfatne korozije jer se na taj način razara osnovna komponenta hidratisanog cementa koja je glavni nosilac čvrstoće.



Zbog ispiranja kalcijumovih i hidroksidnih jona iz strukture betona povećava se poroznost i transportne karakteristike površinskih delova betona. Na taj način olakšan je ulaz agresivnih jona u materijal i dolazi do destabilizacije jedinjenja koja sadrže pomenute jone [78]. U početku kod uzoraka dolazi do povećanja mase, verovatno usled nagomilavanja produkata nastalih delovanjem sulfatnih jona (npr. etringit, gips, monosulfat), i hidratacije a kasnije se masa smanjuje, najčešće usled otpadanja delova materijala ali i ispiranja koji se dešava na površini uzorka [79]. Pri višoj koncentraciji sulfata, veće je i ispiranje, a može doći i do rastvaranja gipsa. Ispiranje kalcijuma treba uzeti kao sastavni deo sulfatnog delovanja [80]. U toku ovog procesa kalcijum se prevodi u jonski oblik i na taj način lakše stupa u reakciju što doprinosi ubrzanju procesa nastanka jedinjenja kao što su etringit, gips i taumasit. Ako se napravi beton koji će imati manju ukupnu poroznost, što se može postići smanjenjem vodocementnog faktora (sa ili bez aditiva) ali i uvođenjem mineralnih dodataka, moglo bi se uticati na smanjenje ispiranja. Najčešće se ispiranje javlja u početku delovanja sulfata dok kasnije dolazi do stvaranja ekspanzivnih produkata [77]. Kako je navedeno u [22] mali uticaj na ovu pojavu ima koncentracija rastvora, dok veći ima količina vode koja je u kontaktu sa materijalom. Kako je navedeno u radu [81] odnos Ca/Si može biti dobar pokazatelj hemijskih promena koje se dešavaju u sistemu. Usled ispiranja Ca i smanjenja odnosa Ca/Si u C-S-H gelu, dolazi do smanjenja krutosti kod C-S-H. Takođe, ispiranje kalcijuma kod kalcijum-hidroksida vodi stvaranju homogenije strukture sa manje napona što dovodi do smanjenja krutosti unutar cementnog kamena [82].

Proces dekalifikacije je naglašeniji kada je materijal izložen delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$  nego u slučaju delovanja rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [83], jer se značajna količina  $\text{OH}^-$  jona troši na

stvaranje brucita i M-S-H gela što progresivnije snižava pH vrednost u pornom rastvoru. Procesom ispiranja nisu obuhvaćeni joni silicijuma, aluminijuma i gvožđa [82].

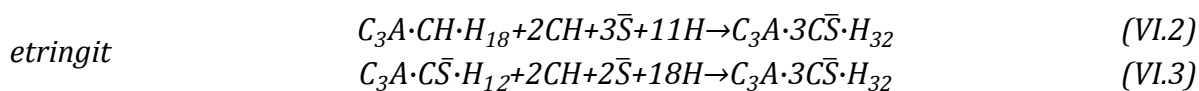
Glavni produkti reakcije sulfatnih jona sa produktima hidratacije cementa su etringit, gips i taumasit.

## 2. PRODUKTI DELOVANJA SULFATA

Bez obzira na poreklo sulfatnog jona, posledice reakcije ovih jona sa produktima hidratacije cementa su produkti: etringit, gips i taumasit. Osim ovih produkata kao posledica delovanja sulfatnog jona javlja se i dekalifikacija C-S-H gela (čime se smanjuju mehaničke karakteristike cementnog kamena), stvaranje brucita i M-S-H gela (zamena jona kalcijuma u C-S-H gelu sa jonom magnezijuma) koji ne doprinose povećanju čvrstoće a moguće i stvaranje silicijum oksida.

### 2.1. Etringit

Pri delovanju sulfata, najradije u hemijsku reakciju sa njima stupaju kalcijum-hidroksid (CH) i aluminatne faze (AFm, AFt). Pri hidrataciji, najveći deo C<sub>3</sub>A se nalazi u okviru monosulfata (C<sub>3</sub>A·C $\bar{S}$ ·H<sub>12</sub>), koji nastaje ukoliko je sadržaj C<sub>3</sub>A u cementu preko 5%, i kalcijum-alumo-hidrata (C<sub>3</sub>A·CH·H<sub>18</sub>), koji nastaje ukoliko je sadržaj C<sub>3</sub>A u cementu preko 8% [4]. Prilikom kontakta cementnog materijala sa sulfatnim jonima, oba ova hidrata se uz prisustvo CH pretvaraju u visoko-sulfatni oblik - etringit (C<sub>3</sub>A·3C $\bar{S}$ ·H<sub>32</sub>), što je prikazano hemijskim jednačinama (VI.2 i (VI.3 [5]:



Pri delovanju sulfata na C<sub>4</sub>AF nastaje isti produkt, ali je gotovo amorfan što se smatra manje ekspanzivnim i nije posebno razmatran [9]. Etringit može da se formira kako pri delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tako i rastvora MgSO<sub>4</sub> [33]/[84], može direktno iz jedinjenja (iz kalcijum-aluminata ili kalcijum-aluminat-hidrata) ili preko monosulfata, zavisno od izvora aluminijuma [85]. Izvori aluminijuma mogu biti različiti (C<sub>3</sub>AH, monosulfat ili cementni dodatak) pa je pisanje hemijske reakcije pre preporučljivo u jonskom obliku [86]. Prema [87] jedini i značajni direktni izvor aluminijuma može biti AFm faza.

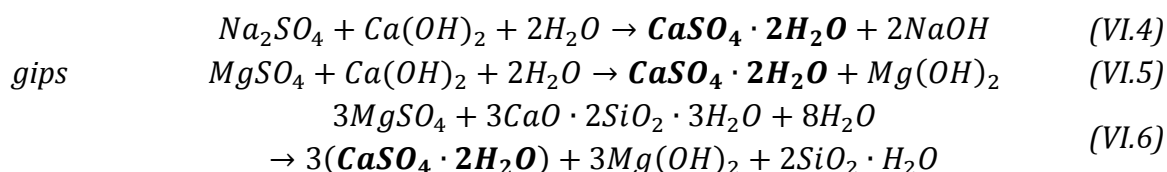
Etringit se formira u obliku tankih iglica ili dugih šipki [23], što zavisi od pH vrednosti u rastvoru [18]. Njegov rast nije brz jer proces zavisi od difuzionog procesa, koji je najčešće spor.

Postoje pretpostavke da je ekspanzija koja se javlja u betonu prilikom delovanja sulfata povezana sa nastankom etringita, ali ovaj mehanizam nije još potpuno razjašnjen. U doktorskoj disertaciji A. Chabrelie [23] navodi se da je molarna zapremina etringita dva puta veća od molarne zapremine monosulfata od kojeg nastaje (707cm<sup>3</sup>/mol naspram 309cm<sup>3</sup>/mol). Nešto slično je i kod R.D.Hooton, koji iznosi da se pri nastanku gipsa i etringita zapremina povećala 1,2-2,2 puta [88]. Ima autora koji smatraju da povećanje

zapremine može iznositi i do 7 puta [88]. Generalno je prihvaćeno da je ekspanzija koja je uzrokovana delovanjem sulfata rezultat naročito mehanizma koji je povezan sa formiranjem etringita ili drugih proizvoda kao što je gips.

## 2.2. Gips

Osim etringita, drugi proizvod koji je povezan sa delovanjem sulfata jeste gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Mehta pretpostavlja da zbog potrošnje Ca jona i stvaranja kalcijum sulfata tj. gipsa, koji je mnogo manje rastvorljiv u vodi, smanjuje se pH vrednost u sistemu što utiče na stabilnost produkata hidratacije. Pri vrednosti pH ispod 10 dolazi do značajne degradacije C-S-H gela, koji je glavni nosilac mehaničkih karakteristika u cementnom kamenu. Osim etringita, i gips se formira u uslovima visoke koncentracije sulfata, na primer za koncentraciju  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \geq 24 \text{ g SO}_4^{2-}/\text{l}$  [83],[87]. To vodi gubljenju čvrstoće i krutosti, koje je praćeno ekspanzijom i pucanjem, eventualno transformacijom betona u nevezivnu masu [5]. Gips koji se formira u reakciji sa sulfatnim jonima zove se sekundarni gips. I ovde postoji dilema da li novonastali gips izaziva oštećenje ili ne. Kalcijum-hidroksid zajedno sa alkalijama pomaže da se pH vrednost u sistemu pora održi u granicama 12-13. Pri njegovom trošenju u hemijskim reakcijama dolazi do smanjenja pH što pomaže razvoju korozije u betonu. Zavisno od tipa katjona koji je povezan sa sulfatnim rastvorom, i CH i C-S-H gel, prisutni u hidratiranoj cementnoj pasti, mogu da pređu u gips što je prikazano hemijskim jednačinama (VI.4)-(VI.6) [5]:



Gips koji nastaje u reakciji sulfatnih rastvora sa CH ili sa C-S-H, može dalje da reaguje sa monosulfatom ili C-A-H gelom i da pri tome nastane etringit [33],[89].

Stvaranje gipsa se odvija bliže površini uzorka zbog potrebe za većom količinom sumpora i u blizini rastvorenog Ca [80].

Pri delovanju  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  na CH (jednačina (VI.4) kao nus-proizvod nastaje natrijum-hidroksid (NaOH) koji čuva visoku alkalnost u sistemu što je veoma bitno za stabilnost produkata hidratacije cementa, pre svega C-S-H [5]. Gips je manje rastvorljiv od CH, gips će se taložiti, i reakcija će se nastaviti ako je NaOH uklonjeno, npr. tekućom vodom ili će akumulacija alkalija ( $\text{Na}^+$ ) u rastvoru da ograniči rastvorljivost CH [23]. Prema Lea-u (jednačina(VI.4), je manje verovatna da se desi između sulfata i C-S-H, jer je rastvorljivost C-S-H manja od rastvorljivosti CH [23].

U slučaju delovanja  $\text{MgSO}_4$  na CH (jednačina (VI.5), nastaje jedinjenje brucit  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  koji je nerastvorljiv i redukuje alkalnost sistema [5]. Tada se pH vrednost spušta na  $\sim 10,5$  kada etringit i C-S-H gel postaju nestabilni. U tom slučaju je C-S-H gel, kao glavni nosilac čvrstoće cementnog kamena, nestabilan i napadnut od strane sulfatnog rastvora.  $\text{MgSO}_4$  može da reaguje i sa C-S-H (jednačina (VI.6) pri čemu nastaje  $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (silika gel)

koji reaguje dalje sa  $Mg(OH)_2$  i nastaje jedinjenje M-S-H. To je materijal koji nema vezivni karakter i čvrstoću a pošto je slabo kristaličan, ne može se registrovati pomoću XRD-a [57]. Iz ovoga se može zaključiti da  $MgSO_4$  napada sve komponente u cementnom kamenu i da je agresivniji od delovanja  $Na_2SO_4$  [5],[28]. Zamena magnezijum sa kalcijum jonom i obrnuto je relativno lak proces jer imaju istu valentnost i prečnik, zato će magnezijum sulfat rado da reaguje sa C-S-H, stvarajući pri tome gips, brucit i silikatni gel [90]. Mg može da zameni Ca u C-S-H i do 6%. U slučaju da sav aluminijum izreaguje, nastaju gips i brucit [81].

Pri padu pH vrednosti u sistemu, C-S-H teži da otpusti kalcijum, pri tome se podiže pH i uspostavlja ravnoteža (proces je poznat kao dekalifikacija, o čemu je već bilo reči). Tako se smanjuje količina C-S-H, a povećava količina gipsa i brucita [90]. Brucit kao veoma teško rastvorljivo jedinjenje, taloži se na površini uzorka te može da štiti površinu uzoraka od prodora agresivnih jona ali neki smatraju i da taj efekat postoji samo u ranom stadijumu dejstva sulfata [91].

Natrijum sulfat ne stvara nerastvorljive produkte ali utiče na pH vrednost i lako reaguje sa  $CO_2$  ukoliko je prisutan, dok magnezijum sulfat stvara gotovo nerastvorljiv brucit kao i hidrotalcit [92]. Ova dva jedinjenja se često nalaze zajedno [30].

Pokazano je da monosulfat može da se pojavi i u slučaju kada je u portland cementu prisutna mala količina  $CO_2$ , koja potiče iz vazduha. U slučaju veće koncentracije  $CO_2$ , monosulfat ne prelazi u etringit, već u monokarbonat. U pomenutoj reakciji, grupa  $SO_4^{2-}$  koja se nalazi unutar kristalne strukture monosulfata se zamenjuje grupom  $CO_3^{2-}$  i na taj način se oslobađa sulfatni jon u rastvor, povećava se koncentracija sulfata i stvaraju uslovi za nastanak etringita. Nastanak etringita se smatra kao prvi stepen u procesu karbonizacije [93], jer u sledećem koraku,  $CO_3^{2-}$  reaguje sa  $Ca^{2+}$  i nastaje  $CaCO_3$  kao veoma stabilna faza. Pri tome su AFm faze, etringit i C-S-H dekalifikovani i pada vrednost pH ispod 8,5. Etringit i monokarbonat/polukarbonat mogu postojati zajedno ukoliko je prisutna dovoljna količina  $CO_2$ . U tom slučaju, monosulfat je nestabilan i prelazi u stabilniju fazu polukarbonat/monokarbonat [93].

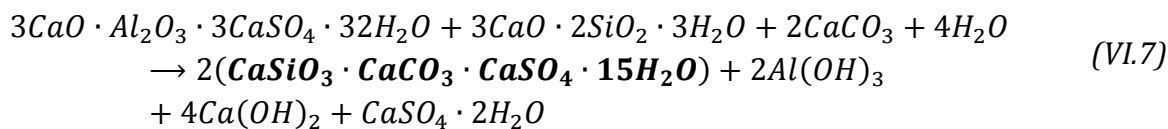
Pri dodatku pucolana, dolazi do reakcije sa CH, smanjuje se pH vrednost, jer je CH potrošen i u slučaju delovanja  $MgSO_4$  to uzrokuje napad na C-S-H i nastaje M-S-H [94]. Smanjenjem pH sa 13,5 na 10,5 omogućava se povećanje koncentracije magnezijuma u rastvoru i do 4 puta.

### 2.3. Taumasit

Karbonatni kiseli joni, koji postoje u betonu, mogu reagovati sa sulfatima, kalcijumom i silicijum-oksidadom i formirati taumasit ( $CaSiO_3 \cdot CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15H_2O$ ) [23]. On je netipičan mineral koji u strukturi ima tri različita anjona: karbonatni  $CO_3^{2-}$ , sulfatni  $SO_4^{2-}$  i silikatni u obliku  $Si(OH)_6$ , što upućuje na oktaedarsku koordinaciju silicijuma. Svi su povezani sa  $Ca^{2+}$  jonima. Silikatni jon potiče iz cementa (uglavnom C-S-H), sulfatni joni najčešće dolaze iz spoljašnje sredine ili iz etringita, a karbonatni jon može poticati iz karbonatnog agregata, krečnjaka koji se dodaje cementu ili spoljašnjeg izvora [95]. Strukturalno je

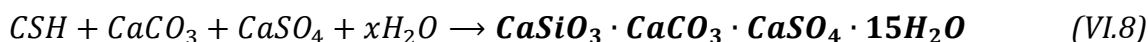


veoma sličan etringitu ali ne sadrži aluminijum, za razliku od etringita koji ne sadrži silicijum i imaju različitu simetriju [96]. Zbog velike sličnosti razlika se uočava primenom EDS-a (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) [97]. Nastanak taumasita iz etringita u prisustvu ugljen-dioksida, silicijum-dioksida i kalcijuma, prikazano je sledećom hemijskom jednačinom (jednačina (VI.7) [23] :

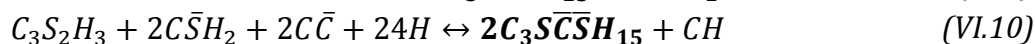
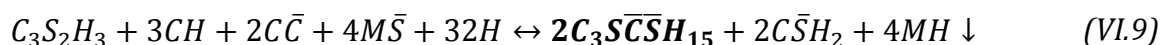


Osim što se formira iz etringita, taumasit može postojati i zajedno sa njim.

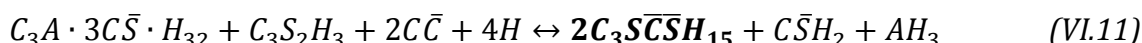
S. J. Barnett et al. [96] pomoću XRD-a potvrđuju nastanak taumasita iz etringita preko "solid solution". F. P. Glasser et al. [92] i G. Collet [95] smatraju da, osim na ovaj način-kroz rastvor, taumasit može nastati i direktno u interakciji C-S-H, sulfata i karbonata (jednačina (VI.8).



Kada se taumasit formira uz jone magnezijuma, uz njega nastaje gips i brucit uz trošenje CH (jednačina (VI.9), ali ukoliko nema jona magnezijuma, nastaje taumasit i CH (jednačina (VI.10).



Ukoliko se formira iz etringita onda, osim taumasita, nastaje i gips, aluminijum-hidrat i CH [95], (jednačina (VI.11).



Taumasit ( $CaSiO_3 \cdot CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15H_2O$ ) je stabilniji od etringita [23] i njegov nastanak se vezuje za temperature do 15°C [95], a favorizovano je na niskim temperaturama (0-5°C) i visokoj relativnoj vlažnosti (90%), jer silicijum ulazi u oktaedarsku koordinaciju na nižim temperaturama [23]. Neka malobrojna istraživanja pokazala su da taumasit može nastati i pri višim temperaturama [98]. Kada se jednom formira, taumasit ostaje stabilan i do temperature od 30°C. On nema vezivna svojstva, za njegov nastanak je neophodan izvor kalcijum silikata, što najčešće predstavlja C-S-H gel a predstavlja krajnju fazu prilikom delovanja sulfata na malter/beton [92],[99].

Formiranje taumasita odloženo je u slučaju primene betonskih mešavina sa dodacima kao što su metakaolin i zgura [92]. Ispitivanja su pokazala da C-S-H faza sa niskim Ca/Si odnosom ima veću otpornost na stvaranje taumasita od slučaja kada je odnos Ca/Si u C-S-H veći tj. približno 1,7 [100].

Minimalna koncentracija sulfatnih jona, koja je zahtevana za transformaciju C-S-H u taumasit, zavisi od sadržaja OH<sup>-</sup> jona. Što znači da za veće pH vrednosti, više Si će biti imuno na stvaranje taumasita. Pokazalo se da formiranje taumasita nije moguće ako se pH vrednost nalazi u granicama 13-14 [100]. Međutim, prema [101], taumasit se ne formira ako je pH < 10,5 ali kada se formira ostaje stabilan do pH 7.

Rastvorljivost CO<sub>2</sub> se povećava sa padom temperature od 25°C do 0°C dva puta. Ovo će omogućiti da CO<sub>2</sub> rastvori dva puta više Ca<sup>2+</sup> na nižim temperaturama i lakše formiranje taumasita [95]. CaCO<sub>3</sub> ima visoku rastvorljivost pri vrednostima pH 7-7,5, a kako pH raste, rastvorljivost se smanjuje.

R. G. Sibbick et al. [102] su utvrdili da postoje tri tipa taumasita:

TIP 1: kristalni, u obliku iglica, slučajno orjentisan, i sadrži veliku količinu praznog prostora;

TIP 2: kristalni, sličan tipu 1, ali sa manje praznog prostora, bolje orjentisani i pokazuje dosta masivniju strukturu, koja se uglavnom formira oko čestica agregata i ivica pukotina:

TIP 3: slični tipu 2 ali mnogo gušći. Blago obogaćen sa kalcijumom.

Dok su Irassat et al. [101] ustanovili da između etringita i taumasita postoje sledeće razlike:

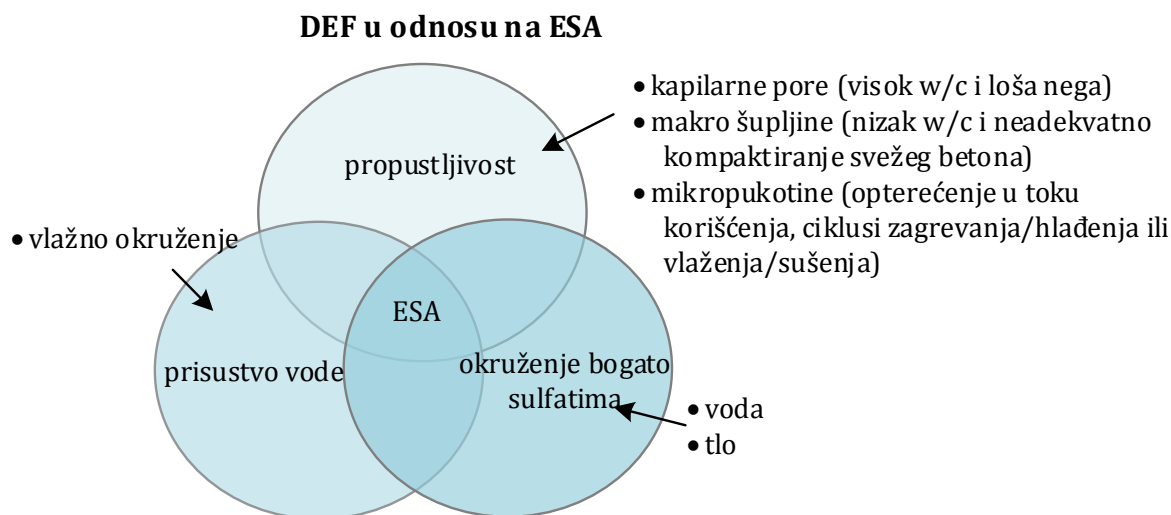
- 1) Etringit prouzrokuje ekspanziju ali i posle pucanja ostaje stabilan i kohezivan dok taumasit izaziva da malter postane nekoherentan i neotporan.
- 2) Taumasit se stvara na površini a etringit dublje.
- 3) Etringit prethodi stvaranju taumasita a to je obično kod cementa sa visokim sadržajem C<sub>3</sub>A.
- 4) Niska temperatura favorizuje formiranje taumasita, naročito oko 5°C, ali nastaje i pri višim temperaturama, npr. ambijentalnim.

### 3. MEHANIZMI SULFATNE KOROZIJE

Delovanje sulfata može se posmatrati kao spoljašnje i unutrašnje u zavisnosti od toga da li su u beton ušli iz spoljašnje sredine, tj. iz zemlje, otpadnih voda, vazduha, morske vode, ili su ušli kao komponenta cementa (npr. u okviru agregata).

#### 3.1. Mehanizam sulfatne koroziije u slučaju kada sulfatni joni dolaze iz spoljašnje sredine - spoljašnje dejstvo sulfata-ESA

Dejstvo sulfatnih jona koji potiču iz spoljašnje sredine povezano je sa interakcijom sulfata iz tla ili vode sa cementnom pastom. Prema Collepardi [103], uslovi neophodni za pojavu spoljašnjeg delovanja sulfata (ESA-External Sulphate Attack) prikazani su na Slika VI.1.



Slika VI.1– Uslovi potrebni za pojavu ESA, prema Collepardi [103]

Na slici se zapaža da na transport sulfatnih jona iz spoljašnje sredine veoma utiče propustljivost betona, potom koncentracija sulfata kao i prisustvo vode koja predstavlja medijum kroz koji se transportuju sulfatni joni.

Osnovni mehanizmi razaranja betona usled spoljašnjeg dejstva sulfata jesu [23]:

1. Zapreminske promene

Ekspanzija kao posledica stvaranja novih produkata pri dejstvu sulfata je moguća samo ako su sulfati u rastvorenom stanju. Ekspanzija ne mora da izazove razaranje ako beton ima kapaciteta da prati te promene. Takođe, ekspanzija zavisi i koliko molekula vode apsorbuju novi produkti.

2. Dekompozicija jedinjenja

Dejstvo sulfata može da uzrokuje da se usled smanjenja pH vrednosti produkti hidratacije razlažu jer postaju nestabilni.

3. Iscvetavanje soli

Naslage različitih soli mogu da se pojave ne samo na površini već i u unutrašnjosti betonskog elementa koji je izložen delovanju sulfata. Rastvorljivost soli, kao što su  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ , raste značajno sa povećanjem temperature. Pore u betonu mogu da se zasite rastvorom soli kada temperatura padne, npr. u toku noći, i kristali soli mogu brzo rasti i izazvati pritisak na unutrašnjost betona. Takođe, rastvor soli može iznenada da kristališe usled dejstva vibracija, npr. prolaskom saobraćaja.

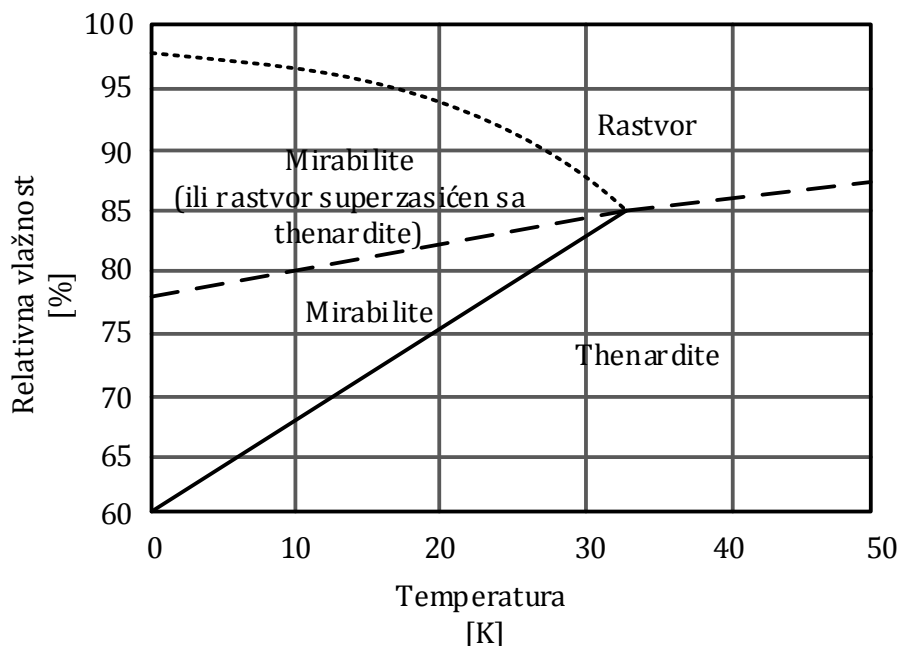
Proces kristalizacije soli kod rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  može da se prikaže sledećim hemijskim jednačinama (jednačine (VI.12)-(VI.17)) [86]:



Varijacije u temperaturi i relativnoj vlažnosti (RH) mogu da uzrokuju sledeću reakciju:

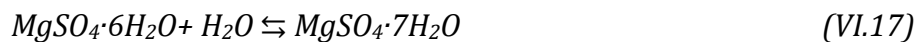
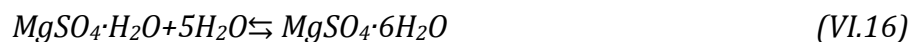


Sulfatna so  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  naziva se "thenardite" a  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  "mirabilite". Pritisak ovih soli u cementnom kamenu može biti veoma visok: thenardite može stvoriti pritisak reda veličine 27-34,5 bar, a mirabilite 69-83 bar [85]. Nastanak ove dve vrste soli u zavisnosti od temperature i RH prikazan je na Slika VI.2.



Slika VI.2 – Postojanost soli mirabilite i thenardite u zavisnosti od RH i temperature, [33]

Pri delovanju  $\text{MgSO}_4$  dolazi do sledećih hemijskih reakcija:



Kao što se vidi u prethodnim jednačinama, reakcije su povratne, što pojačava negativno dejstvo sulfatnih rastvora. Uočene su kod uzoraka, odnosno elemenata konstrukcije koji su delimično uronjeni u rastvor.

Collepari [103] je na sledeći način predstavio spoljašnje dejstvo sulfata (ESA):

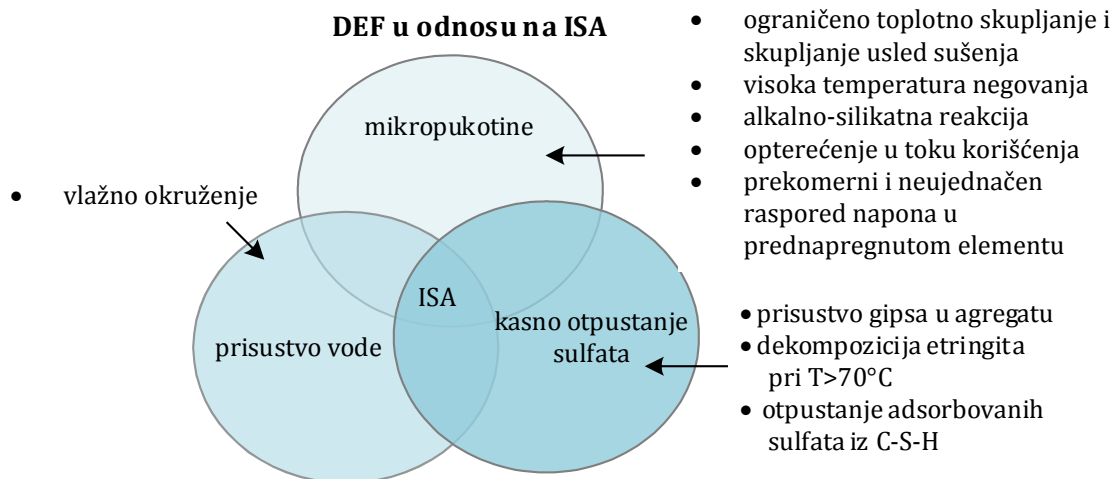
1. Sulfatno delovanje na kalcijum-hidroksid (CH) ili kalcijum-siliko-hidrat (C-S-H) pri čemu nastaje gips (CŠH). Kao manifestacija obično se javlja ekspanzija, ljuštenje, ali najvažnije je gubljenje čvrstoće usled dekalifikacije C-S-H.

2. Sulfatno delovanje na kalcijum-alumo-hidrat (C-A-H) ili monosulfat ( $C_3A \cdot C\bar{S} \cdot H_{12-18}$ ) pri čemu nastaje etringit ( $C_3A \cdot 3C\bar{S} \cdot H_{32}$ ). Manifestuje se kroz pojavu pukotina.
3. Sulfatno delovanje na C-S-H ili CH u prisustvu jona kalcijuma (Ca), pri čemu nastaje taumasit ( $CS \cdot C\bar{S} \cdot C\bar{C} \cdot H_{15}$ ). Njegov nastanak je povezan sa najsnažnijim gubljenjem čvrstoće i adhezije, može da nastane u reakciji sa bilo kojom sulfatnom soli i favorizovan je na nižim temperaturama.
4. Sulfatno delovanje  $MgSO_4$  na C-S-H pri čemu nastaju gips, brucit i silika gel. Nema etringita ali ima gubljenja čvrstoće i adhezije usled dekalifikacije C-S-H.

Kroz praksu se pokazalo da je betonski element manje oštećen ukoliko su sve njegove strane izložene dejstvu sulfata tj. kada je potpuno uronjen, nego slučaj kada voda može da isparava s jedne ili više strane ili je izložen delovanju ciklusa vlaženje/sušenje. U prvom slučaju dominantan je hemijski a u drugom fizički aspekt delovanja sulfata.

### 3.2. Mehanizam sulfatne korozije u slučaju kada su sulfatni joni uneseni sa komponentama betona - unutrašnje dejstvo sulfata-ISA

Za unutrašnje dejstvo sulfata (ISA-Internal Sulphate Attack) potrebno je da postoji izvor unutar samog maltera/betona. To se dešava kada su sulfati uneti sa agregatom, mineralnim dodacima ili cementom, ali izvor može biti i dodati gips. Slučaj da su uneti sa cementom danas je retkost jer se rade stroge kontrole pri njegovoj proizvodnji. Collepari je preko dijagrama na Slika VI.3 predstavio uslove koji su potrebni za pojavu ISA [103].



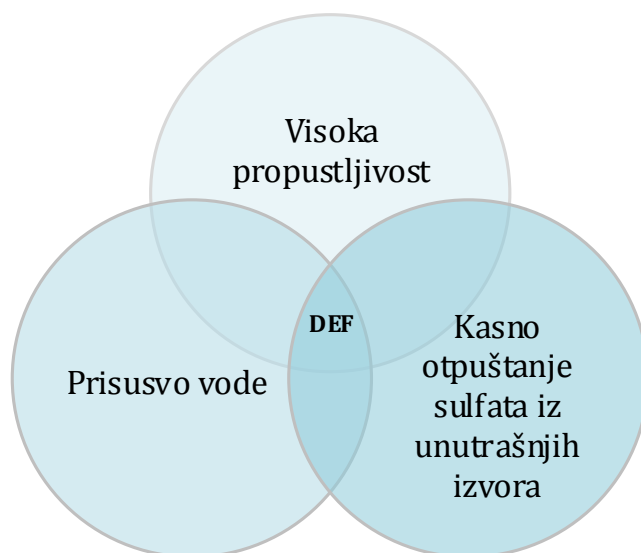
Slika VI.3 – Uslovi potrebni za pojavu ISA, prema Collepari [103]

"Sekundarni etringit" (ili odloženo formiranje etringita-DEF-Delayed Etringite Formation) se formira kada se primarni etringit koji se stvorio prilikom hidratacije, razloži i ponovo formira kada je beton očvrstnuo [4]. Na primer, beton koji je izložen delovanju vodene pare, može da otpusti sulfate iz etringita, koji je nestabilan preko  $65^\circ C$ .

Kasnije ti sulfati mogu da budu absorbovani prilikom formiranja novog etringita [4]. Često se za proveru odloženog formiranja etringita uzorci neguju na pari.

H. J. Kuzel [93] je ispitivao odloženo formiranje etringita i izneo podatak da, osim prisustva sulfata, može i prisustvo  $\text{CO}_2$  da izazove DEF. Naime, usled prisustva  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  iz monosulfata se zamenjuje sa  $\text{CO}_3^{2-}$ , raste količina slobodnog sulfata i od monosulfata nastaje etringit. Uz njega se najčešće formira polukarbonat ili, ukoliko ima više  $\text{CO}_2$ , monokarbonat.

Collepari [103] smatra da odloženo formiranje etringita nije ograničeno samo na betone izložene visokim temperaturama, već da su za to potrebni uslovi koji su prikazani preko dijagrama na Slika VI.4. Razaranje se dešava usled nejednake ekspanzije, koja je locirana samo na deo gde se stvara etringit. Zavisno od izvora sulfata, Collepari smatra da postoje dva tipa DEF-a: 1) ESA-kada je izvor sulfata u spoljašnjoj sredini i 2) ISA-kada je izvor sulfata u unutrašnjosti betona ili maltera.



*Slika VI.4 - Neophodni uslovi za pojavu DEF, prema Collepari [103]*

DEF se najčešće povezuje sa betonima visoke početne čvrstoće koji su negovani na višim temperaturama jer pri tome dolazi do otpuštanja sulfatnog jona koji kasnije može da reaguje i da nastane etringit u već očvrslom cementnom kamenu [85].

U mnogo slučajeva je formiranje etringita povezano sa alkalno-agregatnom reakcijom (AAR). Naime, AAR je brži proces nego DEF pri čemu se formiraju pukotine i omogućavaju brži prodor agresivnih jona kao i nesmetano kristalisanje sekundarnog etringita. Formiranje etringita je povezano sa otpuštanjem  $\text{OH}^-$  jona iz CH koji naglašavaju AAR [23].

#### 4. HIPOTEZE O DELOVANJU PRODUKATA REAKCIJE SULFATNIH JONA I PRODUKATA HIDRATACIJE CEMENTA BETONA NA BETON/MALTER I KONFUZIJA OKO ISTOG

Tokom poslednjih godina, značajan broj inženjera i istraživača na različite načine pristupa ispitivanju delovanja sulfata na maltere/betone kako bi se razumeli složeni mehanizmi degradacije. Veći problem predstavlja delovanje sulfata na beton nego na malter, zbog veće nehomogenosti betona koja je posebno izražena zbog sve intenzivnijeg korišćenje mineralnih dodataka koji tu nehomogenost još više naglašavaju. Degradiranje betona usled spoljašnjeg delovanja sulfata obuhvata i fizičke i hemijske aspekte koji su najčešće nerazjašnjeni do kraja i često kontraverzni [1].

Sigurno jedna od najvećih nedoumica vezanih za delovanje sulfata jeste koji efekat na cementni kamen, bilo u malteru ili betonu, imaju produkti koji pri tome nastaju, pre svega gips i etringit. Mišljenja su veoma podeljena. Deo naučnika smatra da ekspanziju izaziva etringit a kao posledica toga javljaju se prsline i dezintegracija uzoraka [71]. Drugi se tvrde da je to posledica nastanka gipsa [27],[72],[104],[105], dok ima i onih koji smatraju da oba produkta izazivaju ekspanziju ili nisu sigurni kome pripisati razaranje uzoraka [28]/[106]. Nielsen [83] zaključuje da su se pukotine u kojima postoji etringit formirale pre nastanka ovog jedinjenja i da nema direktne veze sa ekspanzijom. Takođe iznosi da gips, koji nastaje kao posledica sulfatne koroziije, ne može da stvori toliko jak pritisak da izazove ekspanziju, ali može da pogorša stanje. W. Müllauer et al. [107] pretpostavljaju da etringit nastaje u malim kapilarnim porama (10-50nm), stvara napon koji prelazi napon zatezanja u vezivu i tako izaziva stvaranje pukotina i ekspanziju. U tim pukotinama se formira i gips koji doprinosi nastavku ekspanzije i daljem razaranju uzoraka. Ovi produkti se javljaju i u većim porama ali ne izazivaju tako jake napone [107], dok je njihovo taloženje u gelskim porama onemogućeno površinskim naponom.

Hansen i Offutt [108] zaključuju da etringit nastao od reaktanata koji su posledica hidratacije cementa (kao što su gips i etringit) i koji se već nalaze u cementnoj pasti, ne izaziva ekspanziju jer dolazi do smanjenja u zapremini.

Skalny [7] međutim navodi da samo etringit, koji se nalazi vezan za C-S-H fazu, koji je inače na nivou nano čstica i ne može se registrovati uobičajenim metodama kao što je npr. XRD, može izazvati ekspanziju, a ne onaj formiran u porama i šupljinama koji ima dosta prostora za rast. Inače C-S-H može da veže veliki broj različitih jona. Tako se u literaturi navodi da se ekspanzija javlja kada je dostignut kritičan nivo  $\bar{S}/Si$  u C-S-H [28], ili da ekspanzija etringita zavisi od odnosa  $\bar{S}/Al$  [23]. Mikroskopske analize potvrđuju prisustvo jedinjenja sa visokim sadržajem  $Al_2O_3$  u C-S-H, veoma brzo nakon delovanja sulfatnog rastvora [30]. C-S-H i kada nije napadnut od strane sulfata može obuhvatiti mali deo  $\bar{S}$  i  $Al$  i to u okviru monosulfata koji je vezan za C-S-H [83].

Prema ACI 201.2R-08 "Guide to durable concrete", stvaranje etringita ( $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) pri delovanju sulfata uzrokuje ekspanziju i pucanje betona, dok formiranje gipsa ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) uzrokuje omekšavanje i gubitak čvrstoće betona. S

obzirom da je etringit prisutan u betonu i kao proizvod hidratacije, a gips je redovni sastojak cementa, ne mogu ovi proizvodi sami po sebi biti sigurni pokazatelji delovanja sulfata, već to treba potvrditi i preko petrografskih i hemijskih analiza.

Ono što se zna jeste da je etringit jedan od izvora čvrstoće u mnogim cementima (npr. kod cemenata sa visokom početnom čvrstoćom) i da pri tome ne izaziva formiranje pukotina. Mehta se pita da li to postoje dve vrste etringita [109]? U normalnim portland cementima, etringit se formira dva puta: jednom u toku rane hidratacije (u prvih 24h) a drugi put u toku izloženosti sulfatima. Nedostaje direktna veza između količine etringita koji je nastao i ekspanzije koja se javlja pri izloženosti uzoraka delovanju sulfata. Veruje se da se etringit formira iz tečne faze koja obuhvata jone kalcijuma, aluminijuma kao i sulfatne i hidroksidne jone. Sa stanovišta ekspanzivnog ponašanja, Mehta pretpostavlja da se kristali etringita mogu podeliti na dva tipa [109]:

*TIP 1:* Veliki kristali, dugački 10-100 $\mu$ m i debljine nekoliko mikrometara. Formiraju se pri niskoj koncentraciji OH<sup>-</sup> jona što je slučaj kod sulfatno-otpornih i brzo vezujućih cemenata. Hidratirani cement obuhvata veliku količinu etringita koji daje čvrstoću ali nema ekspanzije.

*TIP 2:* Mali kristali, dugački 1-2 $\mu$ m i debljine 0,1-0,2 $\mu$ m. Nastaju pri visokoj koncentraciji OH<sup>-</sup> jona, kao što je kod običnog portland cementa. Zavisno od uslova u kojima nastaju mogu biti ekspanzivni ili ne. Imaju veliku površinu i sposobni su da vežu veliku količinu vode.

Mehta [110] pretpostavlja dve hipoteze oko mehanizma ekspanzije koji je povezan sa formiranjem etringita:

- samo koloidni etringit je sposoban da razvije veliku ekspanziju, a on nastaje u prisustvu krečnjaka i
- da bi takav etringit izazavao veliku ekspanziju mora biti u kontaktu sa spoljašnjim izvorom vode.

Lafuma [110] pretpostavlja da pri "solid-state" konverziji Ca-aluminata u etringit dolazi do ekspanzije jer je aluminat teško rastvorljiv u prisustvu CH i da za to mu trba veliki napor.

Deo istraživača koji se bave ovim problemom veruje da se tokom rane hidratacije cementa etringit formira kroz rastvor (*through-solution reactions*). To objašnjavaju time što monosulfat i kalcijum-alumo-hidrat, koji sadrže najveći deo jona aluminijuma prisutnih u cementu, imaju strukturu koja se dosta razlikuje od etringita i pretpostavlja se da se on ne može formirati od njih kroz čvrsto stanje (*solid-state*). Transformacija monosulfata u etringit zahteva jone kalcijuma i sulfata iz rastvora. Kalcijum je obično obezbeđen razlaganjem CH pri čemu se povećava količina OH<sup>-</sup> i stvara uslov za nastanak etringita tipa 2 [110], koji u ovoj početnoj fazi ne izaziva ekspanziju. Međutim, kada se istroši aluminijum iz monosulfata ili tetrakalcijum-alumo-hidrata, nema više uslova za formiranje etringita, zaustavlja se kristalizacija etringita jer raste koncentracija kalcijumovih i sulfatnih jona i počinje stvaranje gipsa. U nekom trenutku usled rastvaranja CH, C-S-H i etringit se nalaze u uslovima smanjene količine OH<sup>-</sup> jona i



povećane količine sulfatnih jona, tada C-S-H gubi čvrstoću i krutost i nastaje etringit tipa 2 koji je sada negativan po okolinu [109]. Deo sulfatnih jona se veže za C-S-H i smanjuje adhezivne sposobnosti. U Tabela VI.1 su prikazane zapremine molekula nekoliko jedinjenja koji mogu postojati u betonu [23].

*Tabela VI.1- Zapremine molekula nekoliko jedinjenja koji mogu postojati u betonu [23]*

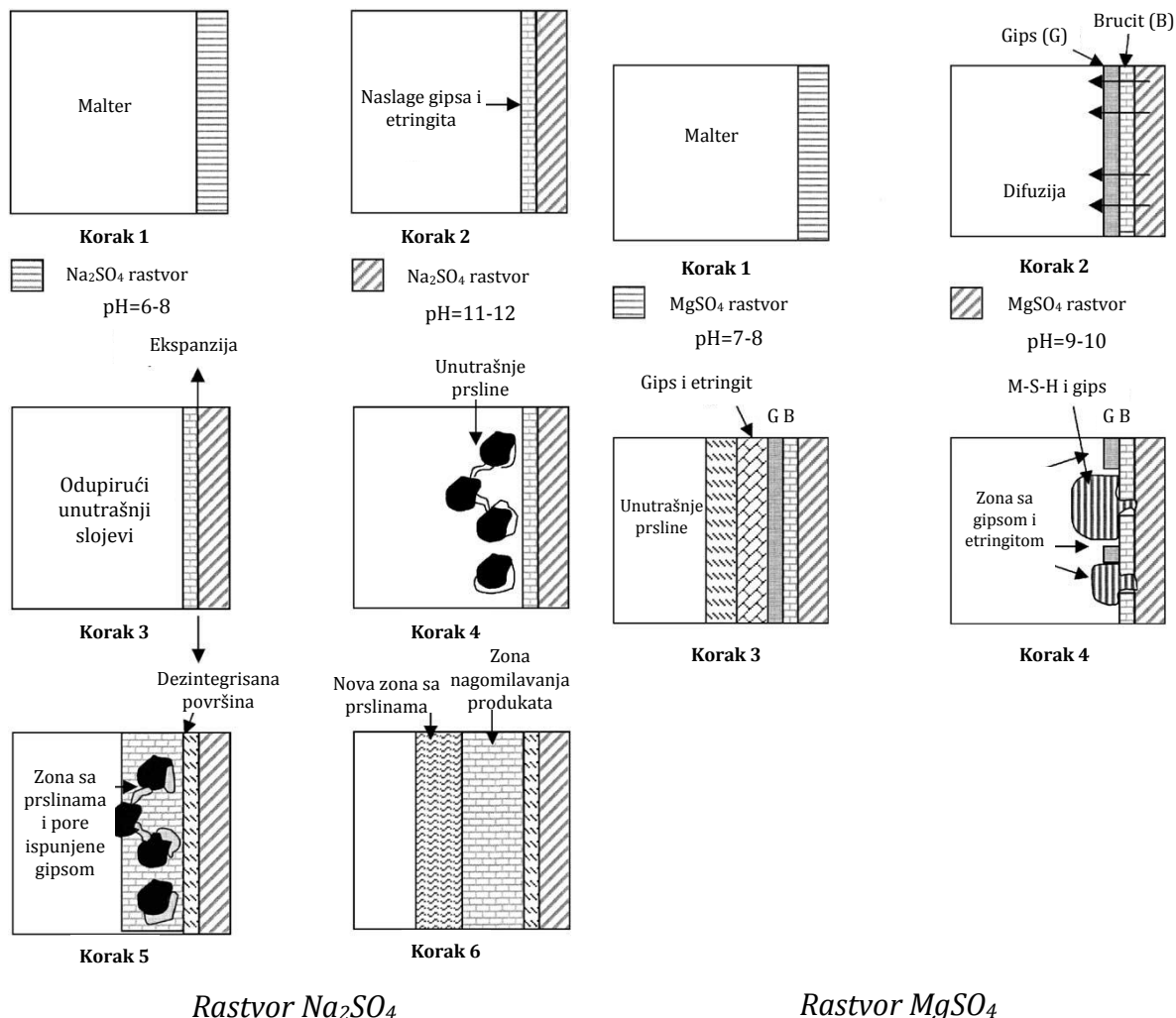
Jedinjenje	Zapremina (cm <sup>3</sup> /mol)	
Ca(OH) <sub>2</sub>	kalcijum-hidroksid	33,1
Mg(OH) <sub>2</sub>	brucit	24,6
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	gips	74,2
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	mirabilit	219,8
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	epsomit	146,8
4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·19H <sub>2</sub> O	tetra-kalcijum-aluminat-hidrat	369,2
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·CaSO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	monosulfat	312,7
3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3CaSO <sub>4</sub> ·32H <sub>2</sub> O	etringit	714,9
Al(OH) <sub>3</sub>	gibsit	32,0
K <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·6(OH) <sub>2</sub>	singenit	127,8

Jedan broj ispitivanja posvećen je i pokušaju razjašnjenja nedoumice da li delovanje sulfatnog rastvora izaziva razmekšavanje uzoraka. Tako se u pojedinim istraživanjima došlo do zaključka da delovanje Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (različitih koncentracija) na malterske uzorke izaziva omekšavanje produkata hidratacije usled stvaranja gipsa i pojavu prslina usled stvaranja etringita [111]. Mehta zaključuje da je gubljenje adhezije i čvrstoće cementnog kamena osnovna manifestacija delovanja sulfata a ne ekspanzija i pucanje uzoraka [89].

M. Santhaman et al. [112], pretpostavljaju mehanizme delovanja rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub> na posmatrane uzorke. Pri delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> mehanizam je sledeći (Slika VI.5a): kada se uzorak potopi u rastvor koji ima vrednost pH 6-8, pH rastvora se brzo menja do vrednosti pH 11-12, za samo nekoliko minuta nakon ubacivanja uzoraka, usled rastvaranja CH [101]. Sulfatni jon iz rastvora je zamenjen hidroksidnim jonom iz CH što povećava pH [105]. Ako voda miruje, kao što je slučaj u laboratorijskim uslovima, pH će ostati na vrednosti 11-12. Ali, ako se rastvor kreće, pH može da se zadrži na vrednosti 6-8. Ubrzo, blizu površine uzoraka počinje formiranje gipsa i etringita, dolazi do stvaranja napona zatezanja usled suprostavljanja dubljih, nepromenjenih slojeva i nastaju prsline. Rastvor dalje prodire kroz novonastale prsline i tu se, kao i u porama, stvaraju naslage produkata. Opet dolazi do stvaranja napona zatezanja i novih prslina unutar uzorka. Sada već jasno mogu da se uoče tri zone: zona dezintegracije, zona nagomilavanja produkata i unutrašnja zona koja je nepromenjena.

Kod delovanja MgSO<sub>4</sub> pretpostavlja se sledeće (Slika VI.5b): kada se uzorak potopi, rastvor ima vrednost pH 6-8, a za nekoliko minuta ona se penja na pH 9-10. Na površini uzorka formira se Mg(OH)<sub>2</sub> i često je povezan sa slojem gipsa koji se formira odmah

ispod njega. Nakon toga rastvor počinje polako da ulazi u uzorak ali sporije nego kod  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . U unutrašnjosti uzoraka formiraju se gips i etringit što dovodi do ekspanzije. Površinski sloj jeste neka vrsta zaštite za prodor rastvora ali i on može da ispuca i da rastvor neometano ulazi u uzorak, napada C-S-H i nastane M-S-H kao i sekundarni gips. Konačni lom se dešava usled gubljenja čvrstoće i dezintegracije.



Slika VI.5a i VI.5b – Pretpostavljeni mehanizmi pri delovanju  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  odnosno  $\text{MgSO}_4$  [112]

Pretpostavljeno je nekoliko teorija o uzrocima javljanja ekspanzije usled delovanja rastvora sulfata [107],[113]:

- Najjednostavnija hipoteza je da etringit zauzima više prostora nego AFm faza iz koje se formira (monosulfat).
- Pretpostavlja se da se etringit formira pomoću "solution state" umesto "through-solid reactions" mehanizma, jer je kristalna struktura etringita potpuno drugačija od one od koje nastaje. Ovo se naziva topohemijska reakcija.
- Mehta pretpostavlja da etringit ekspandira kada se formira u prisustvu krečnjaka kao kristal koloidnih dimenzija koji može da veže vodu. Ipak, u nekim sistemima nema slobodnog krečnjaka a ipak se javlja ekspanzija etringita.

- Najverovatnija teorija se bazira na ideji o pritisku koji se stvara prilikom kristalizacije. Prema Scherer-u, postoje dva uslova za to: kristal mora rasti iz zasićenog rastvora i kristal mora rasti u konačnom prostoru.

Slično je navedeno i u doktorskom radu Aude Chabrelie [1]. U njemu se usled uzajamnog delovanja sulfatnih jona i cementne paste, kao mogući oblici razaranja pominju ekspanzija, omekšavanje i dekohezija. U okviru ekspanzije razlikuju se četiri teorije koje su prikazane i u radu kod C. Yu et al. [113], a navedene su u prethodnom pasusu. Omekšavanje može da se desi i pri formiranju gipsa i etringita a pre svega kroz razlaganje C-S-H, dok je dekohezija uglavnom vezana za nastanak taumasita koji je krt i ne poseduje vezivne karakteristike.

Međutim, postoje navodi da etringit, nastao pri reakcijama (VI.2) i (VI.3), zauzima manju zapreminu nego što je zauzimaju reaktanti od kojih je nastao [86]. To na neki način podržavaju i Hansen i Offutt koji zaključuju da ako sva jedinjenja potiču iz sistema ne mora doći do ekspanzije već naprotiv, do kontrakcije [86].

Preporučuje se upotreba više kriterijuma za ocenu otpornosti betona ili maltera na dejstvo sulfata. Razlog je što rezultat razaranja može biti različit. Mogu se javiti prsline, omekšavanje ili dekohezija komponenti. To zavisi od velikog broja faktora. Tako, pri delovanju  $MgSO_4$  obično dolazi do dekohezije a ređe do pojave prslina i u tom slučaju merenje ekspanzije neće dati prave rezultate.

Ispitivanja "in field" su realna, ali veoma dugotrajna da bi se došlo do željenih rezultata. Osim toga, ispitivanja su teško ponovljiva, često deluje više faktora istovremeno, dolazi do složenih hemijskih i fizičkih procesa i na osnovu ovoga teško je doneti zaključke o mehanizmu razaranja.

S druge strane, kod laboratorijskih ispitivanja mogu da se kontrolišu uslovi u kojima se ispitivani elementi nalaze, traju kraće, jer mogu da se razviju ubrzane metode delovanja sulfata i ispitivanja su ponovljiva. Međutim, nisu u potpunosti realna, jer je teško simulirati sve faktore iz stvarnog okruženja. Na primer, Mehta i Brown [114] iznose činjenice da se prilikom laboratorijskih potapanja uzoraka u rastvor, njegova pH vrednost relativno brzo menja od  $\sim$  pH7 do pH12, što nije slučaj u realnim situacijama ("in field").

Korišćenje ubrzanih metoda nije tako retko, što podrazumeva povećanje koncentracije rastvora, povećanje temperature, održavanja konstantne pH vrednosti rastvora, delimično potapanje uzoraka u rastvor, izlaganje uzoraka naizmeničnim ciklusima vlaženja i sušenja ili smanjenje veličine uzoraka.

## 5. PREPORUKE ZA POBOLJŠANJE OTPORNOSTI NA DEJSTVO SULFATA

Jedna od mera da se poboljša kvalitet betona i na taj način odupre negativnom delovanju rastvora spolja jeste niska propustljivost [4]. Međutim, Freeman [115] iznosi da niska propustljivost izaziva površinsko oštećenje uzorka i treba je kombinovati sa drugim merama. Faktori koji obezbeđuju nisku propustljivost su adekvatna debljina betonskog

elementa, velika količina cementa (ali treba paziti jer se tako stvara veća količina CH i veće skupljanje), niski vodocementni odnos (obično je preporuka da se koriste veoma male vrednosti za takve uslove, 0,25-0,4), pravilno ugrađivanje i negovanje betona (duža nega i u uslovima povećane vlažnosti).

Što se tiče načina nege uzoraka, pojedini istraživači [116],[117] predlažu da se uzorci pre izlaganja delovanju rastvora kratkotrajno neguju na vazduhu. Kao dodatna sigurnost predlaže se primena sulfatno-otpornog ili mešanog cementa, koji će najverovatnije da odloži delovanje sulfata, što zavisi od agresivnosti sredine. U pogledu sastava, ovi cementi imaju ograničenu količinu  $C_3A$  (ili  $C_3A+C_4AF$ , prema ASTM) koji se smatra glavnim izvorom aluminijuma za stvaranje etringita.  $C_4AF$  je takođe izvor aluminijuma, ali je on manje reaktivan, pa se u većini preporuka njegova količina ne ograničava. Zbog relativno visokog odnosa  $SO_3/Al_2O_3$ , etringit koji je formiran u početku hidratacije dosta je postojan i aluminatna faza, sadržana u njemu, ne može ponovo da reaguje i stvori novi ekspanzivni etringit. U [118] se navodi da je za spoljašnje dejstvo sulfata bitna količina kristalnog  $C_3A$  dok je amorfni manje podložan delovanju sulfata.

Međutim, cementi sa niskim sadržajem aluminata teže da imaju veći odnos  $C_3S/C_2S$ , što vodi stvaranju veće količine CH koji za sobom povlači veću osetljivost na agresivne uticaje [27]. Irassar je utvrdio da malterski uzorci od cementa sa niskim sadržajem  $C_3A$  i  $C_3S$  pokazuju i do 10 puta manju ekspanziju nego oni sa niskim sadržajem  $C_3A$  i visokim  $C_3S$  [27]. S druge strane,  $C_3A$  pomaže u odloženom prodiranju hlorida i veoma je važan u zaštiti armature od korozije [23]. U [119] se navodi da je ograničenje u količini  $C_3A$  već pomalo zastareli pristup i nedovoljno odgovarajući: sulfatno-otporni cementi obezbeđuju manju zaštitu nego što se očekuje; takvi cementi su mnogo osetljiviji na koroziju armature, sporiji je prirast i manja čvrstoća na 28 dana.

Uticaj dodataka na cementnu pastu sastoji se u njihovom povoljnom dejstvu na povećanje gustine mikrostrukture i smanjenju količine  $C_3A$  u cementu. Ustvari, aluminijum prisutan u dodacima kao što je zgura, ulazi u sastav hidrotalcita i vezuje se za C-S-H, tako da ne može da učestvuje u stvaranju nepovoljnog etringita [120]. Takođe, smanjuje se količina CH koji je jako osetljiv na agresivne uticaje sredine ali se smanjuje i vrednost pH, pri kojem etringit postaje nestabilan. U prisustvu CH, količina aluminijuma u pornom rastvoru se smanjuje i usporava se njegovo kretanje, tako da je veća verovatnoća stvaranja etringita bliz izvora aluminijuma gde izaziva ekspanziju, dok bez prisustva CH, aluminijum može da se kreće i taloži etringit u porama gde ne izaziva ekspanziju [121].

Dodatak gipsa može da poveća otpornost prema delovanju sulfata jer u početku on može da veže značajnu količinu aluminijuma koja kasnije nije dostupna za stvaranje etringita [120].

Formiranjem sekundarnog C-S-H (preko pucolanske aktivnosti), stvara se film ili prekrivač oko aluminatnih faza što ograničava formiranje etringita. Treba ipak imati u vidu da nestajanje CH dovodi do toga da sulfatni joni reaguju sa C-S-H tako što zamenjuje kalcijum i pri tome može nastati M-S-H [23].

Količina aluminijuma i sulfata koja je vezana za C-S-H, raste sa povećanjem odnosa Si/Ca [122] kada lanac C-S-H postaje duži i ima mogućnost da veže veliki broj čestica. U ovom slučaju, koji se javlja pri velikom procentu zgre, nastaje C-S-H sa manje kalcijuma koji je otporniji na delovanje sulfata [123]. Smatra se da je jon aluminijuma vezan u C-S-H a da je sulfatni jon više adsorbovan i lakše se otpušta [124]. Ukoliko deluje rastvor  $MgSO_4$  na ovaj sistem, pre će se javiti M-S-H [119].

Kod taumasita, nema tako jednostavnog recepta kako korigovati sastav cementa i pri tome sprečiti ili odložiti njegovo stvaranje. Ono što je utvrđeno u doktorskoj tezi [124] jeste da smanjenjem krečnjaka u Portland cementu smanjuje potencijal za nastanak taumasita.

Neville [84] predlaže sledeće mere za poboljšanje sulfatne otpornosti: smanjenje količine  $C_3A$  u cementu, smanjenje CH korišćenjem dodataka i povećanje gustine betona.

Osim navedenog, veoma je važno posmatrati katjon koji je vezan za  $SO_4^{2-}$  jon jer može uticati na promenu mehanizma delovanja. To je bitno i kod izbora odgovarajućeg materijala jer npr. cementi sa niskim sadržajem  $C_3A$  su dobri u rastvoru  $Na_2SO_4$  ali kod  $MgSO_4$ , usled niskog pH, direktno je napadnut C-S-H što ne zavisi mnogo od količine  $C_3A$  [125]. Takođe je u [126] iznet stav da je fizička otpornost betona povezana sa njegovom propustljivošću a hemijska sa vrstom veziva.

## **6. PREPORUKE ZA POBOLJŠANJE OTPORNOSTI NA DEJSTVO SULFATA UVRŠTENE U PRAVILNIKE I STANDARDE**

Ograničenje količine  $C_3A$  za cemente koji se koriste u sredinama sa agresivnim sulfatnim delovanjem ili preporuke za vrstu i količinu dodataka, uvršteni su u zvanične standarde mnogih zemalja (EN, ASTM, DIN, SIST...).

### ***EN***

Prema EN 206-1 postoji šest klasa izloženosti betona na agresivno delovanje sredine u kojoj se nalazi (Prilog 15). Jedna od klasa jeste hemijska agresija (XA) kojoj pripada i agresivno delovanje sulfata. U okviru te klase nalazi se tri razreda izloženosti (XA1, XA2 ili XA3) i spram njih su date preporuke za sastav betona kako bi se on na najbolji način odupreo toj agresivnoj sredini.

Preporuke prilikom agresivnog delovanja sulfata, generalno uključuju vrednosti maksimalnog vodocementnog faktora, minimalne količine cementa, minimalnu čvrstoću betona i preporuke za vrstu cementa. Pojedine zemlje su uvele manje izmene ovih preporuka. Tako Nemački DIN (DIN 1045-2 i DIN EN 206-1), pored ovih, daje i preporuke za minimalnu količinu cementa CEM II, ukoliko se on koristi ili Slovenački SIST umesto minimalne čvrstoće pri pritisku zateva određenu vodonepropusnost (Prilog 15).

**ACI**

ACI 201.2R-08 "Guide to durable concrete" i ACI 318 prikazuju preporuke za povećanje otpornosti betona na dejstvo sulfata. One se, pre svega, odnose na mogućnost sprečavanja ulaska i kretanja vode kroz beton, kao i na odabir materijala s adekvatnim sastavom. Tu se misli na smanjenje vodocementnog odnosno vodovezivnog faktora, adekvatno ugrađivanje, nega betona i ograničenje količine  $C_3A$  prema sledećem:

- TYPE II (umereno sulfatno-otporni cement)-max 8%
- TYPE V (sulfatno-otporni cement)-max 5%

kao i količine  $C_4AF+2\cdot C_3A$ :

- TYPE V (sulfatno-otporni cement)-max 25%.

ACI 318 daje preporuke za beton koji će biti izložen agresivnoj sredini preko veličine vodocementnog faktora, minimalne čvrstoće betona i vrste cementa koje treba primeniti u zavisnosti od klase izloženosti (Prilog 15). Osim cementa koji su navedeni mogu se koristiti i drugi mešani cementi ali koji zadovoljavaju određene uslove u pogledu sastava, količine u betonu (prema ASTM) i izmerene ekspanzije (Prilog 15).

Kako bi se poboljšala sulfatna otpornost betona date su i preporuke za količine mineralnih dodataka: 25-35% za leteći pepeo i prirodne pucolane, 7-15% za silikatnu prašinu i 40-70% za zguru.



NNPČ

4

VII PRIKAZ I ANALIZA  
ISTRAŽIVANJA U OBLASTI DEJSTVA  
SULFATA NA PASTE, MALTERE I  
BETONE

02





## 1. FORMIRANJE PRODUKATA PRI DELOVANJU SULFATA

Iz opširnog pregleda dostupne literature može se zaključiti da produkti koji nastaju u cementnoj pasti pri delovanju sulfata zavise pre svega od vrste rastvora koji deluje. Sulfati koji su najčešće zastupljeni u podzemnim vodama, rekama i morima a samim tim i u laboratorijama gde se proučava njihovo dejstvo na malter/beton jesu natrijum sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) i magnezijum sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ).

Najčešće hemijske reakcije koje se dešavaju između sulfatnih jona vezanih za Na i Mg i produkata hidratacije cementa date su sledećim pregledom:

- Prema [33]:

$\text{Na}_2\text{SO}_4$	+	Kalcijum-hidroksid	(CH)	→ gips+NaOH
		Trikalcijum-alumo-hidrat	( $\text{C}_3\text{AH}_{12}$ )	→ etringit
Gips*	+	Monosulfat	( $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{C}\bar{\text{S}}\cdot\text{H}_{18}$ )	→ etringit

- Prema [23]:

$\text{Na}_2\text{SO}_4$	+	Monosulfat	( $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{C}\bar{\text{S}}\cdot\text{H}_{18}$ )	→ etringit
$\text{MgSO}_4$	+	Kalcijum-hidroksid	(CH)	→ gips+brucit $\text{Mg}(\text{OH})_2$
		Kalcijum-siliko-hidrat	(CSH)	→ gips+MSH

- Prema [89]:

Gips*	+	Tetrakalcijum-alumo-hidrat	( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ )	→ etringit
-------	---	----------------------------	--------------------------------	------------

- Prema [84]:

$\text{MgSO}_4$	+	Kalcijum-alumo-hidrat	(CAH)	→ etringit+brucit $\text{Mg}(\text{OH})_2$
-----------------	---	-----------------------	-------	--

gips\*-gips nastao pri delovanju sulfatnih rastvora ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili  $\text{MgSO}_4$ ) na produkte hidratacije

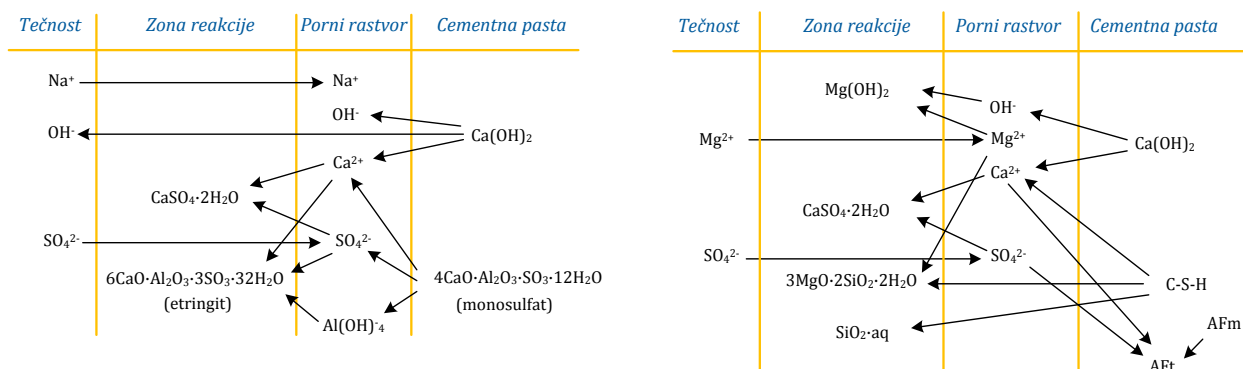
Kao što se iz ovog pregleda vidi, pri delovanju  $\text{MgSO}_4$  na produkte hidratacije cementa, osim gipsa i etringita nastaje i brucit  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ili magnezijum-siliko-hidrat (M-S-H). Reakcije između ovog rastvora i produkata hidratacije se mogu prikazati kroz dve difuzione šeme:  $\text{OH}^-$  joni difunduju iz paste ka spolja u rastvor, stvarajući brucit, a sulfatni joni iz rastvora difunduju ka unutra formirajući gips. Jaka dekalifikacija C-S-H je utvrđena na površini uzoraka što pomaže formiranju M-S-H [20]. Delovanju sulfata najbolje se odupire feritna faza [20], posebno u reakciji sa  $\text{MgSO}_4$  [81]. Generalno, reakcija  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  je uglavnom usmerena na reakciju sa CH i  $\text{C}_3\text{A}$ , mada je Taylor utvrdio da može da dođe i do reakcije sa C-S-H (koji se uglavnom pripisuje delovanju  $\text{MgSO}_4$ ) ali ako je snabdevanje  $\text{Ca}^{2+}$  jonima iz CH zaustavljeno.

Može se reći da se etringit formira delovanjem sulfatnog rastvora na izvore jona aluminijuma, koji je sadržan u  $C_3AH_{12}$  i u monosulfatu, dok se gips formira pri delovanju sulfatnog rastvora na CH ili C-S-H jedinjenja.

Delovanje sulfata pri kojem nastaju gips ili etringit često se naziva konvencionalno, a nastanak taumasita nekonvencionalno dejstvo. Za formiranje taumasita su potrebni posebni uslovi kao što je prisustvo ugljenika u obliku  $CO_2$  ili  $CO_3^{2-}$  jona, sulfata, silicijuma i karbonata u dugom vremenskom periodu, te on nije uvek prisutan kao proizvod reakcije sa sulfatima [89]. Taumasit može nastati pri delovanju bilo koje sulfatne soli i može reagovati i sa CH i sa C-S-H [103].

Pri delovanju  $Na_2SO_4$  sa CH, osim gipsa, nastaje i NaOH koji podiže vrednost pH rastvora do 13,5, što stabilizuje C-S-H i etringit [90]. Uz NaOH može nastati i  $Al(OH)_3$  [122].

Skalny [7] je reakcije koje se dešavaju pri delovanju natrijum ili magnezijum sulfata na komponente nastale pri hidrataciji cementa prikazao preko dve šeme, date na Slika VII.1.



Slika VII.1a i VII.1b– Reakcije koje se javljaju između komponenti hidratizane cementne paste i rastvora  $Na_2SO_4$  odnosno  $MgSO_4$  [7]

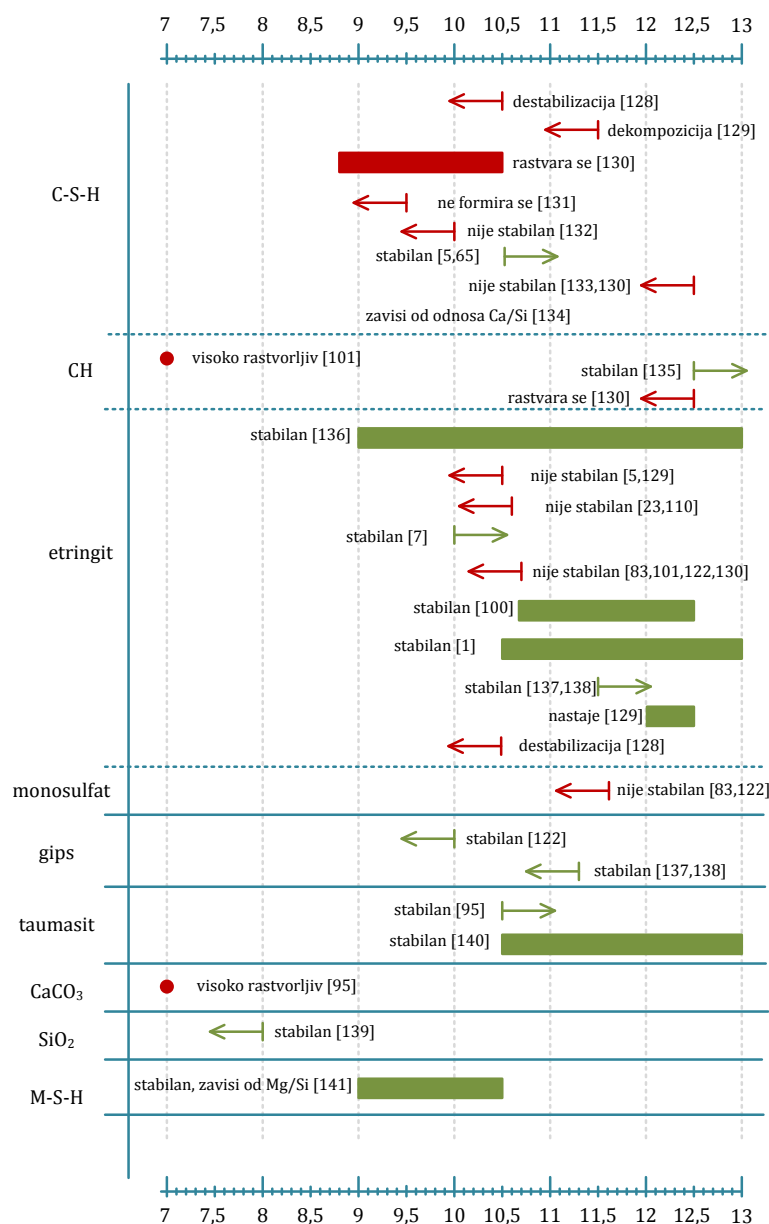
Prema Irassat et al. [101] sulfati deluju u 5 faza:

1. difuzija  $SO_4^{2-}$  jona i leaching CH
2. formiranje etringita na površini
3. formiranje gipsa i razlaganje CH
4. dekalifikacija C-S-H i eventualno
5. formiranje taumasita.  $OH^-$  i  $Ca^{2+}$  odlaze iz maltera u rastvor, a  $SO_4^{2-}$  iz rastvora ulazi u malter.

U početku delovanja sulfatnih rastvora može doći do povećanja čvrstoće uzoraka, najverovatnije usled taloženja produkata u porama cementnog kamena ili procesa hidratacije [27].

Na osnovu ispitivanja došlo se do podataka da je etringit postojan pri vrednostima  $pH > 10,7$ , monosulfat pri  $pH > 11,6$  [83], gips i aluminijum-sulfat pri  $pH < 10,0$  [127], a taumasit pri  $pH > 10,5$  [95]. Osim njih, C-S-H je stabilan na  $pH > 12,5$  a  $CaCO_3 > 7,0$ . Prisustvo  $Cl^-$  jona može da stabilizuje etringit i pri nižem pH (npr. 9,5), prema [23].

Pregledom dostupne literature uočeno je da se autori međusobno razlikuju po vrednostima pH na kojima su pojedina jedinjenja stabilna odnosno nestabilna i to je prikazano na Slika VII.2.



Slika VII.2 – Stabilnost odnosno nestabilnost jedinjenja zavisno od pH vrednosti

Prisustvo drugih jona uz sulfata može značajno da utiče na mehanizam reakcije, zato je veoma važno poznavati prirodu rastvora. Primer za to je prisustvo Cl<sup>-</sup> jona u morskoj vodi koji povoljno deluje na sulfatno dejstvo tako što ublažava posledice. Naime, on ima tendenciju da veže C<sub>3</sub>A iz cementne paste i stvori tzv. Fridelovu so koja nije ekspanzivna [71].

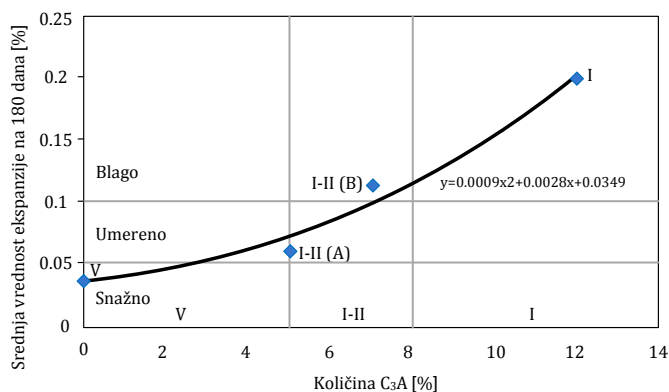
Cohen i Mather su utvrdili da usled prisustva agregata i tranzitne zone, nije moguće porediti na jednostavan način zaključke dobijene dejstvom sulfatnih jona na cementne paste sa rezultatima dobijenim na betonima [88].

## 2. MALTER/CEMENTNA PASTA

Najveći broj ispitivanja o delovanju sulfatnih rastvora na cementne materijale urađen je na uzorcima od cementne paste i maltera. Verovatni razlozi za to su mogućnost ispitivanja na manjim uzorcima, manji utrošak materijala, lakša manipulacija uzorcima, manje prostora za smeštanje, brži rezultati, lakše praćenje rezultata i lakša analiza mikrostrukture. Veća je ponovljivost ispitivanja u odnosu na betonske uzorke što je izuzetno bitno kod donošenja standarda i pravilnika. ASTM (Američko udruženje za ispitivanje i materijale) je objavilo standarde za ispitivanje potencijalne ekspanzije malterskih uzoraka izazvane delovanjem sulfata (ASTM C452-95 "Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate" i ASTM C1012-95 "Standard Test Method for Length Change of Hardened Concrete Exposed to Alkali Sulfates"). Standard ASTM C452-95 obuhvata kratko vreme ispitivanja i nije pogodan za mešane cemente ili cemente sa dodacima koji kasnije hidratišu pa se u takvim slučajevima predlaže primena standarda ASTM C1012-95.

### 2.1. Uticaj sastava cementa

Određivanje uticaja sulfata na betonske uzorke u okviru naučnog projekta [5], obuhvatila su i paralelno ispitivanje njegove malterske komponente. Ispitivanja su rađena prema američkim standardima i korišćene su različite vrste cementa (TYPE I, TYPE II i TYPE V) i mineralnih dodataka (leteći pepeo i zgura). Uzorci maltera su bile prizme 25mmx25mmx286mm, koje su držane potopljene šest meseci u 5% rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (prema ASTM C1012-95). Jasno se pokazalo da je otpornost cementnog maltera zavisna od sastava cementa tj. količine  $\text{C}_3\text{A}$  u njemu. Vrednost ekspanzije uzoraka u zavisnosti od ove komponente cementa prikazana je na Slika VII.3. Jasno se vidi da pri povećanju količine  $\text{C}_3\text{A}$ , raste i ekspanzija uzoraka.



Slika VII.3 – Srednja vrednost ekspanzije uzoraka maltera sačinjenih od običnog portland cement u zavisnosti od količine  $\text{C}_3\text{A}$  u njemu [5]

Slično ispitivanje radili su M. Sahmaran et al. [27] gde se pokazalo da sulfatno otporni cement sa niskim sadržajem  $\text{C}_3\text{A}$  (3,6%) ali visokim odnosom  $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$  (preko 18,3), ima veću ekspanziju i više produkata (gips i etringit) nastalih usled delovanja 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , nego mešani cementi (sa letećim pepelom i prirodnim pucolanima). U mešanim cementima uočeno je i manje produkata delovanja sulfata, kao što su gips i etringit, nego

u sulfatno-otpornom cementu. Ovde je tip cementa odredio ponašanje maltera i cementne paste. Pokazalo se da je merenje ekspanzije bila bolja mera otpornosti na delovanje sulfata nego merenje čvrstoće pri pritisku.

F. Bellmann & J. Stark [100] ispitivali su uticaj odnosa Ca/Si u C-S-H na formiranje taumasita u malterskim uzorcima pravljenim sa različitim tipovima cementa i sa dodacima (silikatna prašina, leteći pepeo,  $\text{CaCO}_3$ ). Pri tome je primenjen rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u koncentraciji od 1,5% i vodocementni faktor od 0,6. Minimalna koncentracija sulfatnih jona koja je potrebna za konverziju C-S-H u taumasit zavisi od koncentracije OH- jona. Viša koncentracija OH- jona daje veću pH vrednost, a u uslovima visokih pH vrednosti potrebna je visoka koncentracija sulfatnih jona da bi došlo do reakcije sa C-S-H i stvaranja taumasita. Zaključak ispitivanja bio je da niži odnos Ca/Si daje bolju otpornost C-S-H na delovanje sulfata. Obično je u cementima taj odnos 1,7. Za ove vrednosti Ca/Si relativno lako dolazi do reakcije sa C-S-H i pri delovanju niske koncentracije rastvora sulfata, ali ako se ta vrednost spusti do 1,1 (uz pomoć pucolana ili dodataka sa latentnom hidaruličnošću), C-S-H se ne transformiše u taumasit i pri znatno višoj koncentraciji rastvora sulfata.

N. Shanahan i A. Zayed [118] su utvrdili da je kod cemenata sa sličnom količinom  $\text{C}_3\text{A}$ , veoma važna količina  $\text{C}_3\text{S}$ . Tako su uzorci sa najviše  $\text{C}_3\text{S}$  imali najveću ekspanziju i najveću količinu gipsa i etringita.

## 2.2. Uticaj mineralnih dodataka

Zgura kao mineralni dodatak korišćena je u mnogobrojnim ispitivanjima otpornosti maltera i betona na dejstvo sulfata. Kao dodatak cementu, ima povoljan efekat na povećanje otpornosti maltera pri delovanju sulfatnih rastvora i to kada je visok nivo zamene (preko 50%) i kada su uzorci u potpunosti potopljeni u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [5].

Do sličnog zaključka došli su i A.E.Al-Salami & A.Salem [111], koji su koristili zguru u količini od 35%. Atahan je upotrebio zguru u količini od 40% i 60% za ispitivanje koje je trajalo 12 meseci i došao do sličnog zaključaka [142].

U radu Hekal et al. [89] uzorci cementne paste sa 40% zgure imali su bolju otpornost pri delovanju 10% rastvora  $\text{MgSO}_4$  nego uzorci od čistog portland cementa ili portland cementa sa dodatkom 10% i 15% silikatne prašine ili 5% i 10%  $\text{CaCO}_3$ .

P. Chindraprasirt et al. [143], ispitivali su uticaj finoće letećeg pepela na otpornost maltera pri dejstvu sulfata, kada se on doda cementu u količini od 40%. Veća finoća dodatka imala je više staklaste faze, zahtevala je manje vode a imala je veću reaktivnost. Sve ovo imalo je pozitivan uticaj na smanjenje ekspanzije uzoraka izazvane sulfatima.

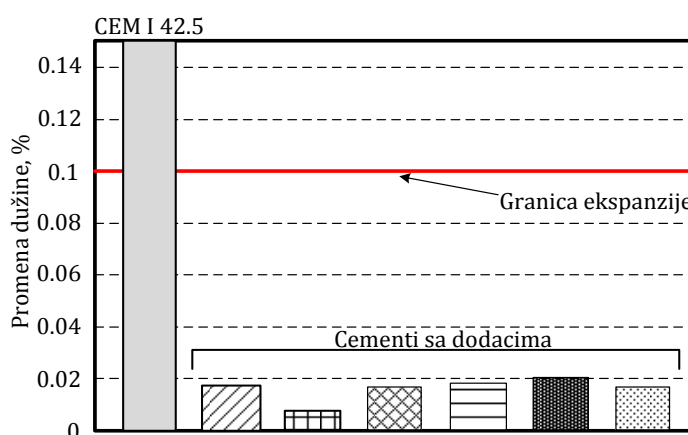
Kod primene letećeg pepela, veoma je bitan i njegov sastav u smislu količine silicijuma i kalcijuma. Leteći pepeo sa višom količinom kalcijuma – "visoko krečni" stvara svoj sopstveni C-S-H i manje troši postojeći CH u betonu (ima manje pucolanskih karakteristika a više hidrauličnih) dok je kod letećeg pepela sa višom količinom silicijuma - "nisko krečni" drugačiji i on koristi postojeći CH (ima izražene pucolanske

karakteristike). U literaturi se mogu pronaći i određene preporuke kako predvideti aktivnost letećeg pepela i njegovo učešće u otpornosti betona na delovanje sulfata, ali se nijedna nije pokazala kao apsolutno tačna [84].

U istraživanju K.K.Sideris et al. [144], cement je mešan sa više vrsta letećeg pepela koji imaju različito učešće elemenata kalcijuma i silicijuma. Malterski uzorci oblika kocke 5cmx5cmx5cm ili prizme 4cmx4cmx16cm, ispitivani su na čvrstoću pri pritisku i ekspanziju, redom. Krajnji rezultat je bio da su uzorci sa pepelom koji je imao više silicijuma imali manja oštećenja koja su se kasnije javila u odnosu na pepeo sa većim učešćem kalcijuma. Takođe, pozitivan efekat je imalo i povećanje učešća pepela u cementu, zamena od 30% je bila sa najlošijim ponašanjem dok je zamena od 60% pokazala najveću otpornost na delovanje sulfata. U ovom istraživanju veći uticaj na povećanje sulfatne otpornosti imala je redukcija veličine pora a ne ukupne poroznosti.

K. Yildirim and M. Sümer [24] su ispitivali uticaj dodatka letećeg pepela u cementu, u količinama od 20% i 50%. Rezultat ispitivanja malterskih prizmi držanih u rastvoru  $MgSO_4$ , na čvrstoću pri pritisku i savijanje, je bio da zamena cementa sa 20% pepela daje više vrednosti ovih čvrstoća u odnosu na 50% zamene. Kod upijanja vode ovaj efekat je bio suprotan, manja vrednost upijanja je bila kod 50% zamene cementa.

Upotreba različitih vrsta dodataka cementu, kao što su zeolit, leteći pepeo i zgura, u istraživanju Cenk Karakurt et al. [106], pokazalo se kao veoma povoljno pri delovanju 10% rastvora  $MgSO_4$  u trajanju od 6 meseci. Uzorci maltera su bili potpuno potopljeni u rastvor. Najbolji efekat je postignut pri zameni cementa od 30%, što je prema nekim drugim ispitivanjima [5] mala količina kada je u pitanju upotreba zgura za povećanje otpornosti maltera na agresivno delovanje sulfata. Kod svih uzoraka sa dodatkom, količina etringita je bila manja nego kod referentnog maltera spravljenog sa čistim portland cementom (otkriveno pomoću SEM), čvrstoća pri pritisku je bila viša a ekspanzija manja (Slika VII.4).



Slika VII.4 - Promena dužine (ekspanzija) malterskih prizmica u sulfatnom rastvoru 10%  $MgSO_4$  [106]

Kod ovog ispitivanja se pokazalo da su promena čvrstoće pri pritisku i ekspanzija u dobroj korelaciji i u proceni otpornosti na delovanje sulfata.

### 2.3. Uticaj vodocementnog/vodovezivnog faktora

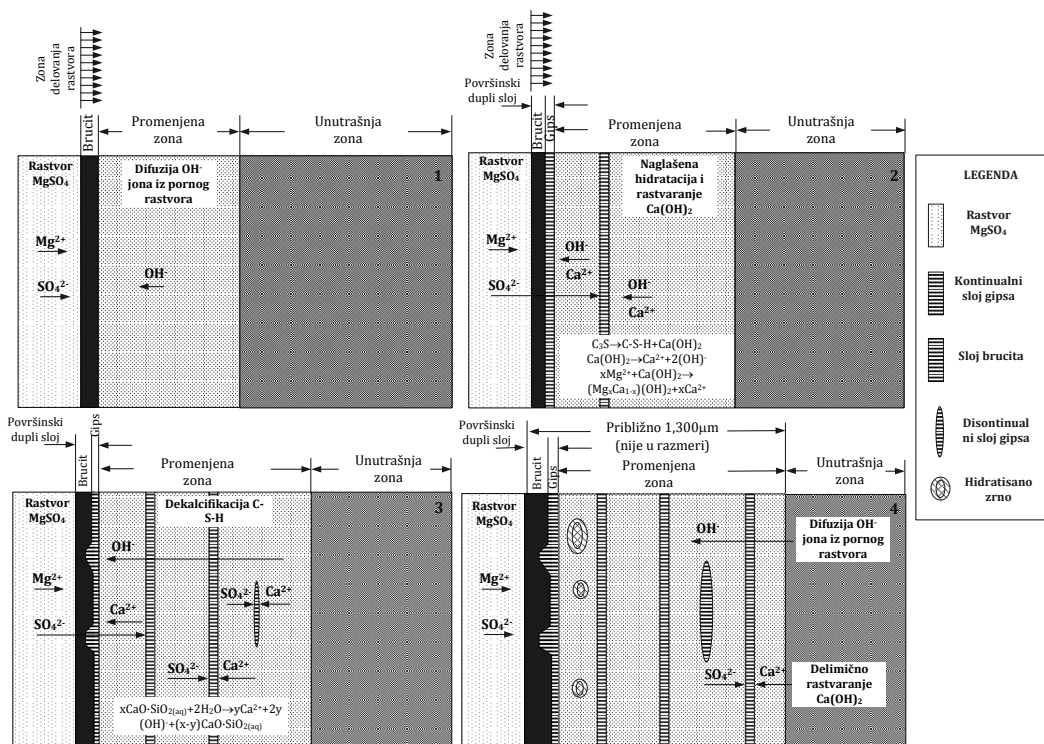
Kod ispitivanja M. Sahmaran et al. [27] vodocementni faktor se pokazao kao bitan kod običnog portland cementa, ali kod mešanih nema tako veliki značaj. Više je bio naglašen uticaj hemijskog sastava cementa.

R. El-Hachem [129] pokazuje da je kod uzoraka 2cmx2cmx16cm potopljenih u rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, koncentracije 3g/l, veća ekspanzija je bila kod uzoraka sa višim w/c faktorom (0,6), ali su uzorci sa nižim w/c (0,45) bili podložniji stvaranju pukotina i ranije su se javili znaci razaranja. Dubina ispiranja je bila veća kod uzoraka sa SRPC cementom ali je najmanje pukotina i ekspanzija bila upravo kod njih. Kod uzoraka sa PC uočen je gips u spoljašnjoj zoni a nešto dublje i etringit, dok kod SRPC glavni produkt je gips a nema etringita.

### 2.4. Uticaj vrste i koncentracije rastvora

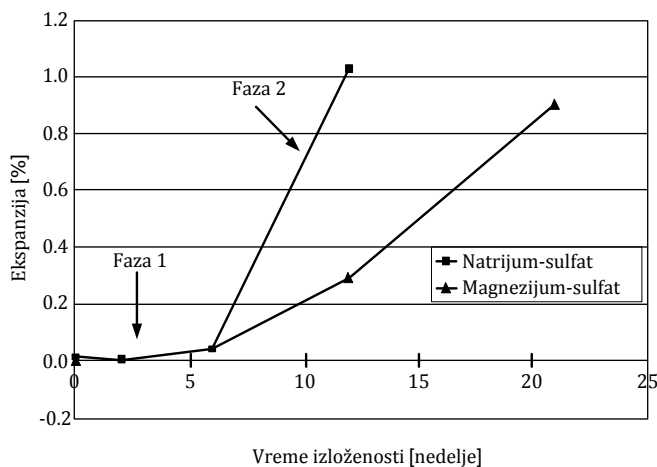
D. Bonen & D. Cohen [21] su ispitivali delovanje rastvora MgSO<sub>4</sub> na cementnu pastu, pri čemu su koristili dve koncentracije rastvora od 2,1% i 4,2%. Kao cement korišćen je TYPE I, ali sa količinom C<sub>3</sub>A slično kao kod TYPE V (sulfatno-otporni cement sa C<sub>3</sub>A do 5%). Korišćena je i silikatna prašina kao dodatak cementu u količini od 10% dok je vodocementni faktor bio 0,4. Tokom ispitivanja na površini uzoraka jasno su uočena dva sloja, spoljašnji brucit i unutrašnji gips. Brucit je gust, homogen i nema unutrašnju strukturu dok je gips kristalizovan i pokazuje nizak stepen orijentacije kristala. Gips je pronađen u unutrašnjosti uzoraka i to kao kontinualni sloj unutar čistog portland cementa ili u vidu dispergovanih kristala unutar cementa sa dodatkom silikatne prašine. Uz gips je sloj C-S-H koji je bogat magnezijumom. Pri povećanju koncentracije sa 2,1% na 4,2% nije se značajno promenio oblik destrukcije i mikrostruktura. Pojavio se M-S-H kod uzoraka od cementa sa dodatkom silikatne prašine i smanjena je dubina do koje se taloži gips kod uzoraka od čistog portland cementa. U ovom ispitivanju na površini uzoraka uočene su naslage gipsa i brucita, a etringit i monosulfat su pronađeni u tragovima. Ima ispitivanja koja su pokazala i da dupliranje jačine rastvora ne menja mikrostrukturu uzorka [20].

Isti autori su u drugom radu [81] prikazali nešto detaljnije formiranje mikrostrukture u cementnoj pastu izloženoj delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub>, Slika VII.5. Ispod površinskog duplog sloja sastavljenog od gipsa i brucita nalazi se tranzitna zona a potom nepromenjena unutrašnjost uzorka. U početku delovanja rastvora, Mg<sup>2+</sup> joni ne ulazi u cementnu pastu već se talože na površini uzorka u vidu brucita, dok SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> joni difunduju u pastu i formiraju u unutrašnjosti nekoliko paralelnih slojeva gipsa. Može se pretpostaviti da je pri višoj koncentraciji rastvora viša i brzina formiranja brucita što utiče na smanjenu i neujednačenu brzinu difuzije SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> jona a tako i na širinu tranzitne zone. Odnos Ca/Si je mera hemijskih promena u C-S-H gelu i pokazatelj hemijske agresije.



Slika VII.5 - Šematski prikaz delovanja rastvora  $MgSO_4$  i razvoj mikrostrukture u portland-cementnoj pasti [81]

U ispitivanju [145] sprovedenom na malterskim uzorcima izrađenim od čistog portland cementa i portland cementa sa dodatkom silikatne prašine i metakaolina, uzorci su bili izloženi delovanju rastvora različite koncentracije,  $Na_2SO_4$  (0,281-4,5%) i  $MgSO_4$  (0,237-3,8%), i pri različitim temperaturama. Merena je ekspanzija uzoraka a kao rezultat dobijeno je da pri delovanju  $Na_2SO_4$  mogu jasno da se izdvoje dve faze (2 perioda): 1. početna, pri kojoj je ekspanzija veoma mala (indukcioni period) i 2. nagla ekspanzija, verovatno usled nastanka gipsa i etringita. Pri delovanju  $MgSO_4$  uočen je kontinualni porast ekspanzije, verovatno usled nastanka sloja brucita ( $Mg(OH)_2$ ) na površini uzoraka koji je usporio ulazak sulfatnih jona, Slika VII.6.



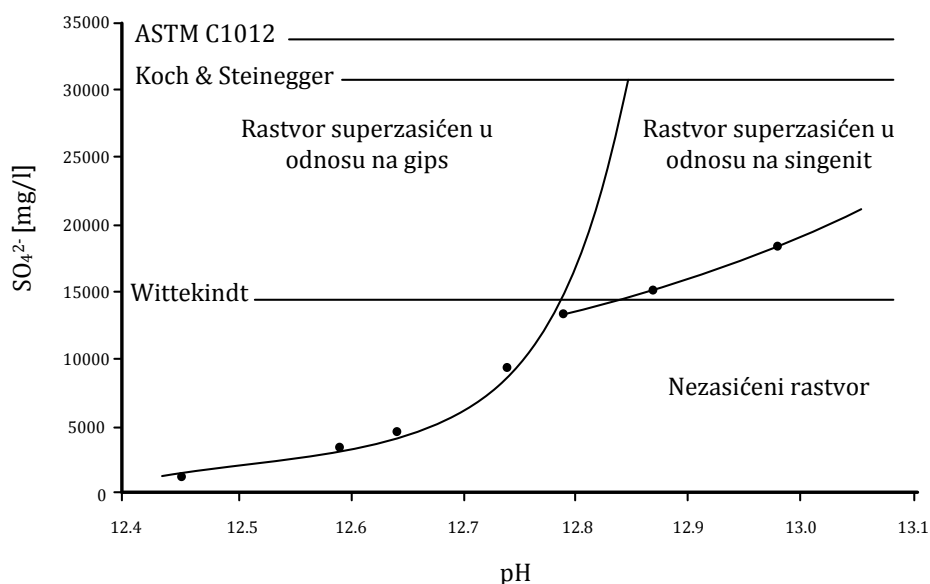
Slika VII.6 - Ekspanzije uzoraka izloženih  $Na_2SO_4$  i  $MgSO_4$ , i obeležene faze kod uzoraka u rastvoru  $Na_2SO_4$  [145]



Da bi se sa većom sigurnošću utvrdilo koji produkti su nastali usled delovanja ovih rastvora, uzorci su nakon 12 nedelja izloženosti sulfatnim rastvorima analizirani na SEM-u. Kod uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  primetna je dezintegracija površinske zone, ispod nje je sloj sastavljen od gipsa i etringita, a u unutrašnjosti mikroprslina. Kod delovanja rastvora  $\text{MgSO}_4$ , na površini je formiran dupli sloj sastavljen od brucita i gipsa, odmah ispod su naslage gipsa i etringita, a tamo gde je sloj brucita oštećen, može se odmah ispod primetiti transformacija C-S-H u M-S-H. Pri povećanju koncentracije rastvora i temperature izloženosti, brzina razaranja je bila veća.

U ispitivanju C. Ferraris et al. [72] na malterskim uzorcima izloženim 5% rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  uočene su 3 zone, posmatrajući od površine ka unutra: 1. spoljašnja, veoma porozna zona sa etringitom i C-S-H koji je zahvaćen procesom gubitka kalcijuma; 2. zona sa etringitom i gipsom koji zamenjuje CH; 3. zona sa monosulfatom ili kombinacijom monosulfat/etringit.

Na Slika VII.7 koju su dali F. Bellmann et al. [105], prikazan je uticaj pH vrednosti i koncentracije sulfatnog rastvora na pretvaranje CH u gips. Sa povećanjem pH vrednosti potrebna je veća koncentracija  $\text{SO}_4^{2-}$  da bi nastao gips. Ispitivanje je rađeno na malterskim uzorcima dimenzija  $1\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm}$ , pri različitim koncentracijama sulfatnog rastvora a nastanak produkata je praćen pomoću SEM-a. Iz dijagrama se vidi da je minimalna koncentracija rastvora za pojavu gipsa  $1400\text{mg/l}$  i pH vrednost od 12,45. Pomoću SEM-a je pokazano da pri koncentracijama  $1500\text{-}3000\text{mg/l}$  (koje su uobičajene u tlu) nema pojave gipsa već se formiraju etringit i eventualno taumasit. Gips je otkriven tek pri veoma visokim koncentracijama od  $30000\text{mg/l}$ , koje su nerealne za stvarne uslove.



Slika VII.7 – Koncentracija sulfata koja je potrebna za prelazak kalcijum-hidroksida u gips ili singenit [105]

Cohen i Mather upozoravaju na problem različitih koncentracija rastvora. Tako, na primer, pri delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  niske koncentracije ( $<1000\text{mg/l SO}_4^{2-}/\text{l}$ ) kao produkt nastaje etringit a pri višoj koncentraciji gips [88].

Cohen [88] navodi da rastvor  $\text{MgSO}_4$  negativno utiče na cement sa dodatkom silikatne prašine ali da je ova zamena povoljna u slučaju dejstva rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Produktima, koji nastaju pri delovanju pomenutih rastvora sulfata, bavili su se, između ostalih, Nielsen, Cohen, Bonen [83]. Nielsen je otkrio da se pri delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  na cementnu pastu formiraju tanki kanali ispunjeni gipsom, a da se pri delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$  na površini uzoraka formira kompozitni sloj sačinjen od brucita i gipsa. On, takođe, smatra da je etringit, koji je pronađen u pukotinama nakon potapanja u rastvor Na-sulfata, nastao usled hidratacije cementa a ne delovanja sulfatnog rastvora [83]. Ako se posmatra delovanje rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  na kocke ivice 25mm sačinjene od cementne paste (PC), pri vodocementnom faktoru od 0,3, Nielsen pomoću SEM-a otkriva sledeće produkte unutar nje:

- Sredina uzorka: C-S-H, monosulfat i CH
- 100-300 $\mu\text{m}$  od sredine uzorka ka površini: C-S-H, etringit i CH (još nema dekalifikacije)
- 25-100 $\mu\text{m}$  ispod površine-između tankih kanala sa gipsom: malo ili skoro da nema CH, mešavina etringita, gipsa i C-S-H (sa značajnom dekalifikacijom)
- Površina (do 25 $\mu\text{m}$  u unutrašnjost uzorka): C-S-H (dekalifikovan), etringit (sa malom količinom aluminijuma, što znači da je etringit prešao u neke druge faze).

Tokom ovog ispitivanja, ivice uzoraka su pretrpele najveća oštećenja dok je na površinama to bilo zanemarljivo. Kao što se vidi, C-S-H trpi značajnu dekalifikaciju. Pri delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$  na uzorke od iste cementne paste, uočena su veća oštećenja u odnosu na rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i to u vidu pucanja i ljuštenja. Raspored produkata je veoma sličan kao kod  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Pukotine se protežu do veće dubine, na površini je sloj brucita (debljine 40-50 $\mu\text{m}$ ) a zbog smanjenja pH vrednosti etringit postaje nestabilan [82]. Za formiranje brucita (kao i Mg-Si gela) potreban je  $\text{OH}^-$  iz površine uzorka, što smanjuje pH vrednost rastvora i deluje nestabilno na C-S-H i etringit koji pri tome prelazi u gips i aluminijum sulfat [129]. Etringit se ovde verovatno neće transformisati u monosulfat jer je on postojaniji pri nižem pH nego monosulfat [83].

## 2.5. Uticaj primenjenog agregata

Uticaj recikliranog betonskog agregata koji je kao sitna frakcija upotrebljen u malterskim uzorcima izloženim dejstvu 4,24% rastvora  $\text{MgSO}_4$ , ispitivao je Seung-Tae Lee [57]. Zamena rečnog sitnog agregata recikliranim iznosila je 0%, 25%, 50%, 75% i 100%, a kao mere otpornosti korišćene su pad čvrstoće pri pritisku i ekspanzija. Rezultati pokazuju da je optimalna zamena sitnog rečnog agregata recikliranim iznosila do 50%. To znači da je ponašanje malterskih uzoraka sa tom zamenom bilo bolje nego kod onih sa čistim rečnim agregatom izloženim dejstvu sulfata. Na osnovu mikroanalize pokazano je da je glavni uzrok razaranja uzoraka bilo stvaranje gipsa i taumasita ali ne i

etringita, iako su uzorci bili na temperaturi od  $20\pm 1^\circ\text{C}$ . Pretpostavka je da etringit nije stabilan u prisustvu  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  koji nastaje pri delovanju  $\text{MgSO}_4$  i koji smanjuje alkalnost a time i pH. Na vrednosti ekspanzije uticala je i poroznost recikliranog agregata, onaj sa većim upijanjem vode dao je i veću ekspanziju.

## 2.6. Uticaj drugih jona

U istraživanju [71],[107] pokazano je da je difuzija sulfatnih jona uz  $\text{Cl}^-$  jone sporija, da  $\text{Cl}^-$  joni reaguju sa  $\text{C}_2\text{A}$  i nastaje Fridelova so i da je rastvorljivost etringita 3 puta veća u prisustvu ovih jona nego bez njih. Takođe, ova so ima mogućnost vezivanja aluminata za sebe [71].

## 3. BETON

Ne postoje standardi za ispitivanje otpornosti betona na dejstvo sulfata, ali postoje neke preporuke. Tako USBR 4908 (United State Bureau of Reclamation) daje predlog za standardizovani test u kojem se ispituje ekspanzija očvrslog betona usled delovanja sulfata. Procedura je slična kao u standardu ASTM C1012-95, ali su uzorci betonski cilindri umesto malterskih prizmica. Može se primeniti na betone napravljene sa različitim vrstama cementa. Obuhvata tri metode izlaganja sulfatima: A-kontinualno potopljeni uzorci u 2,1% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; B-kontinualno potopljeni uzorci u 10% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; C-potapanje u 2,1% rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju od 16 časova a potom sušenje na  $54^\circ\text{C}$  u trajanju od 8 časova.

Bitno je napomenuti da pri ispitivanju delovanja sulfatnih rastvora na beton treba posmatrati više kriterijuma. Tako se, na primer, može pokazati da beton sa malom propustljivošću neće pokazati značajnu ekspanziju pri delovanju sulfata ali površinski može biti značajno razoren i preporuka je uzeti u obzir i gubitak mase uzoraka ili vizuelni pregled [5].

### 3.1. Uticaj sastava cementa

A. Chabrelie je u svojoj doktorskoj tezi [28] ispitivala betonske uzorke spravljene sa CEM I i CEM III (prema EN 197), izložene različitim režimima delovanja 3% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (ukupno 4) i različitim vodocementnim faktorima (0,55 i 0,38). Ispitivanje je trajalo godinu dana i za to vreme kod uzoraka spravljenih sa sulfatno-otpornim cementom (CEM III) nije pronađen gips (utvrđeno pomoću SEM i XRD), dok je količina i dubina nastanka etringita zavisila od vodocementnog faktora, ali je svakako bila manja nego kod portland cementa. Pokazalo se da je smanjenje vodocementnog faktora uz dodatak zgure u količini od 70-80% dobra mera za povećanje sulfatne otpornosti betona.

Opširno istraživanje koje je rađeno 80-ih godina prošlog veka u Americi [29] obuhvata pravljenje betonskih uzoraka od različitih vrsta i količine cementa ( $223\text{-}390\text{kg/m}^3$ ). Uzorci su bili polu-uronjeni u tlo gde je koncentracija  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  bila  $\sim 10\%$ . Nakon 5 godina izloženosti ovim uslovima, uzorci su pregledani i zaključeno je da sastav cementa, tačnije količina  $\text{C}_3\text{A}$ , ima mali uticaj u ovom slučaju i to pre svega za srednje vrednosti w/c.

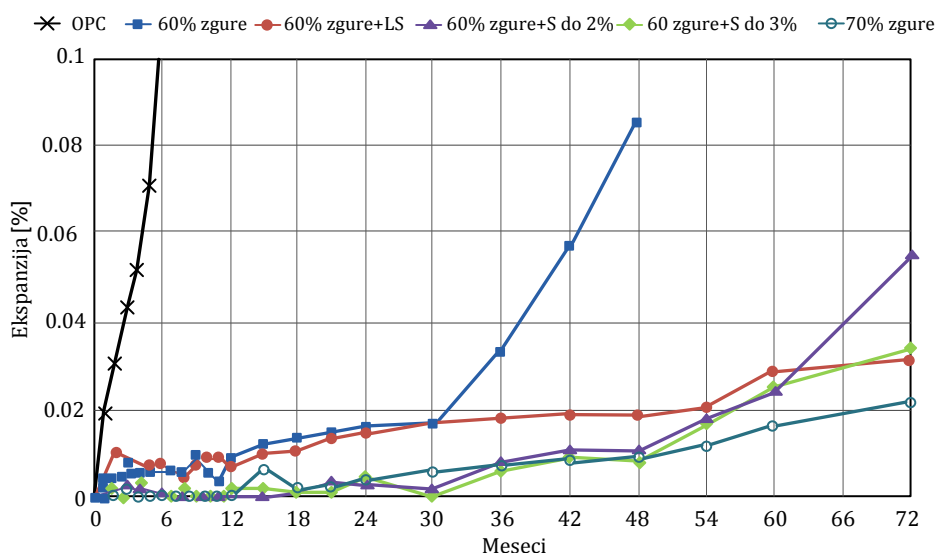
Povoljan efekat cementa CEM III na otpornost betona pri delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  pokazao se i u istraživanju O. Mielich and C.Ottl [146]. Efekat poboljšanja je bio još naglašeniji uz dodatak letećeg pepela. Tada je i nakon 540 dana izloženosti rastvoru, otpornost betona bila veoma visoka. Ekspanzija uzoraka potopljenih u 4,4% rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  na  $20^\circ\text{C}$  nakon 150 dana iznosi 0,04mm/m (0,04‰) za one sa PC i 0,06mm/m (0,06‰) sa CEM III ali nakon 540 dana merenja ekspanzija je bila 3,46mm/m (3,46‰) i 0,06mm/m (0,06‰), redom. Ovde je kao granica loma prema metodama Wittekindt bila 0,5mm/m (0,5‰).

U većini eksperimenata sulfatno otporni portland cement pokazuje bolje ponašanje od PC u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , ali Scherer i Fidjestöl pronalaze suprotno ponašanje, verovatno zbog visoke koncentracije rastvora pri čemu glavnu ulogu ima nastanak gipsa koji nema veze sa malom količinom  $\text{C}_3\text{A}$  [88].

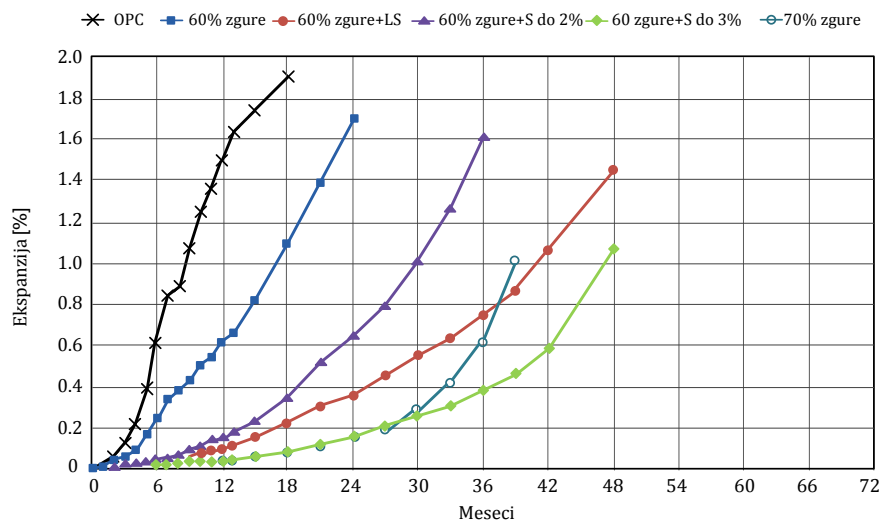
### 3.2. Uticaj mineralnih dodataka

Ponašanje cementa sa dodatkom zgure pri delovanju sulfatnog rastvora predmet je mnogih istraživanja. Zgura u velikom procentu zamene uglavnom je imala pozitivan efekat kod potopljenih uzoraka [77] ali se negativno odrazila kod uzoraka izloženih ciklusima vlaženja/sušenja [28],[135] ili delimično potopljenih [29],[135]. Brown et al. [135] potvrđuju efikasnost zgure i u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i u  $\text{MgSO}_4$ , dok Higgins [135] i Taylor govore o većoj efikasnosti zgure u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . U realnim konstrukcijama zgura je imala pozitivan efekat na delovanje sulfata iz tla [147]. D.D.Higgins [148] je ispitivao kako dodatak  $\text{CaCO}_3$  utiče na beton koji je spravljen sa cementom kom je dodata zgura u visokom procentu (60% i 70%) a izložen je delovanju rastvora sulfata. Ispitivanje je trajalo do 6 godina, pri tome su betonski uzorci držani u 1,5% rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili  $\text{MgSO}_4$ . Posmatrajući čvrstoću pri pritisku, nakon godinu dana nije bilo značajne razlike u odnosu na etalonske uzorke ali nakon 6 godina, merenja su pokazala da dodatak zgure od 70% više utiče na povećanje otpornosti betona nego dodatak od 60%. Dodatak  $\text{CaCO}_3$  u količini od 4% u odnosu na masu zgure, povećao je otpornost betona na delovanje sulfata. Doprinos  $\text{CaCO}_3$  se ocenjivao kroz promenu čvrstoće pri pritisku uzoraka izloženih delovanju  $\text{MgSO}_4$ , ali posmatrajući i ekspanziju uzoraka izloženih uticaju oba sulfatna rastvora, Slika VII.8 i Slika VII.9. Ekspanzija je dobijena kao razlika ekspanzija u sulfatnom rastvoru i onih u vodi. U rastvoru  $\text{MgSO}_4$  beton sa zgurum se ponašao lošije nego u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , dok je u betonu sa portland cementom obrnut slučaj. Interesantno je da krečnjak ( $\text{CaCO}_3$ ), uz zguru povećava otpornost na delovanje sulfata ali sam krečnjak ili ne utiče, ili je pogoršava, tako što pomaže formiranju taumasita. Objašnjenje za ovo su pokušali da daju Gollop i Taylor [120], tako što pretpostavljaju da izvor kalcijuma, koji je potreban za formiranje gipsa i etringita pri delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$ , više nije CH ili C-S-H već ubačeni  $\text{CaCO}_3$ , tako da C-S-H ostaje značajno sačuvan. Zbunjuće je bilo i da više aluminijuma koje je ubačeno preko zgure povećava otpornost, ali je to objašnjeno činjenicom je taj aluminijum rano iskorišćen, dok je beton još u svežem stanju. Gollop i Taylor to objašnjavaju činjenicom da se zbog višeg odnosa Si/Ca u cementu sa zgurum, više aluminijuma veže u C-S-H i nije dostupno za nastanak

etringita [120]. Higgins je slično dobio i kada je koristio rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u koncentraciji od 1,8% kao i pri rastvoru  $\text{MgSO}_4$  u koncentracijama 1,8%, 0,42% i 0,14% [149], pri čemu je rastvor menjan na 3 meseca kako bi se simulirala podzemna voda. Dezintegracija uzoraka je ovde više bila izražena na uglovima uzoraka i povezana sa bubrenjem nego sa omekšavanjem. Oštećenja na uglovima uzoraka su uglavnom povezana sa konvencionalnim sulfatnim delovanjem dok se oštećenje samih površina uzoraka povezuje sa stvaranjem taumasita.



Slika VII.8 - Ekspanzija prizmi u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (1,5%  $\text{SO}_3$ ) [148]



Slika VII.9 - Ekspanzija prizmi u rastvoru  $\text{MgSO}_4$  (1,5%  $\text{SO}_3$ ) [148]

Uticaj dodatka zgure u visokom procentu (50% i 70%) koja je izložena delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kao i u kombinaciji sa  $\text{NaCl}$ , ispitivao je M. Maes, 2014 [94]. Uzorci su bili cilindri  $\varnothing 100\text{mm} \times 150\text{mm}$  izvađeni iz kocki ivice 150mm. Dodatak zgure pokazao se kao veoma efikasan pri povećanju otpornosti na delovanje ovog sulfatnog rastvora. U toku 320 dana ispitivanja, nije uočeno značajno smanjenje mase ali nakon 616 dana smanjenje mase je bilo značajno kod običnog portland cementa – 26,5% dok kod

uzoraka sa dodatkom zgure smanjenje je bilo oko 2%. Slično je i kod merenja promene dužine, ali su se razlike javile dosta kasno, nakon 140 dana izloženosti delovanju sulfata. Posle 497 dana ispitivanja u rastvoru, portland cement je imao povećanje dužine od 0,59% a kod dodatka zgure ta promena je iznosila 0,04% i 0,02% (za 50% i 70% zamene). Na osnovu mikroskopskih analiza pokazalo se da oštećenja u betonskim uzorcima sa PC nisu uzrokovana samo pojavom etringita nego je bilo neophodno da postoji i gips zajedno sa njim. U uzorcima sa 50% zamene ima etringita ali ne i gipsa dok kod 70% zamene zgure gotovo da nema ni etringita ni gipsa.

Bendt [150] je pokazao da dodatak zgure od 50% običnom portland cementu poboljšava otpornost betonskih uzoraka potopljenih u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  koncentracije 50g/l nakon 84 dana ispitivanja. To je bio slučaj i kada je kao agregat korišćen prirodni agregat i reciklirani beton. Proveravani su čvrstoća pri pritisku i zatezanju, modul elastičnosti i koeficijent propustljivosti.

U radu Roziere et al. [77] betonski uzorci koji su bili izloženi delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , koncentracije 3g/l i 30g/l a sadržali su zguru u procentu od 62%, pokazali su manju ekspanziju čak i sa visokim w/c odnosom. U ovom slučaju se pokazalo da je praćenje ispiranja kod uzoraka dobro za procenu delovanja sulfata.

U cementima sa 69% zgure pre će da dođe do dezintegracije i omekšavanja nego do ekspanzije. Manja količina gipsa je bila usled manje količine CH i niže vrednosti odnosa Ca/Si u C-S-H [87].

Rezultati ispitivanja dugog 23 godine o uticaju rastvora  $\text{MgSO}_4$  na betonske uzorke držane u laboratorijskim uslovima, pri čemu je koncentracija rastvora menjana od 0,3% do 5%, prikazani su od strane P. W. Brown et al., 2003, [98]. Korišćeni su cementi TYPE I sa dodatkom zgure u količini od 45 i 72%, TYPE II i TYPE V. Zgura se i u ovim uslovima pokazala kao dodatak koji poboljšava ponašanje betona na delovanje sulfata. Dubina nastanka produkata, usled delovanja sulfatnog rastvora, bila je slična kod cementa sa dodatkom zgure i cementa TYPE V, koji se označava kao sulfatno-otporni prema ASTM.

Ispitivanje sulfatno-otpornog cementa CEM III (dodatak zgure u količini od 62%) na delovanje rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , koncentracije 3g/l i 30g/l i pri kontrolisanoj pH vrednosti, sprovedli su E. Roziere et al., 2009 [77]. Ispitali su promenu mase, dinamički modul elastičnosti i ekspanziju na uzorcima dimenzija 7cmx7cmx28cm. Nisu objavljeni krajnji rezultati ispitivanja ali u periodu koji je obuhvaćen, dodatak zgure je imao efekat poboljšanja otpornosti betonskih uzoraka na delovanje rastvora pomenutih koncentracija.

Dodatak metakaolina cementu koji je izložen delovanju rastvora sulfata, malo je izučavan od strane istraživača i inženjera. Istraživanje Nabil M. Al-Akhras [151], gde je ovaj dodatak zamenio količinu cementa u iznosu od 5%, 10% i 15%, pokazalo se kao efikasno u povećanju otpornosti betona na delovanje 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Viša zamena cementa dala je kao rezultat i višu otpornost betonskih uzoraka na delovanje ovog rastvora. Između ostalih karakteristika, određivanu su i ekspanzija i promena čvrstoće pri pritisku. Rezultati promene čvrstoće pri pritisku dati su samo nakon 18 meseci, dok

je kod ekspanzije rezultat nakon 6 meseci izlaganja 5% rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sledeći: za  $w/c=0,5$  uzorci sa čistim portland-cementom (bez metakaolina) imali su ekspanziju od približno 0,15%, dok sa 5%, 10% i 15% metakaolina ta ekspanzija je bila redom približno 0,08%, 0,05% i 0,03%. Za  $w/c=0,6$  ekspanzija je približno 0,17%, 0,12%, 0,05% i 0,03%, redom. Osim za ovaj period postoje podaci za merenja do 18 meseci.

Leteći pepeo, prema mnogobrojnim istraživanjima pokazuje dosta povoljan uticaj na otpornost pri delovanju sulfata. Tako je i u istraživanju L. Guangcheng et al. [13], gde su betonski uzorci izloženi delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i gde je dodatak letećeg pepela u količini 15%, 25% i 35% smanjio rastojanje od površine uzorka gde se stvaraju kristali. Najbolje su se pokazali uzorci koji su zajedno sadržali pepeo i silikatnu prašinu.

Pozitivan uticaj letećeg pepela na otpornost betona izloženog delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  pokazan je kod O. Mielich and C.Ottl [146].

Međutim, da bi se mogao utvrditi uticaj letećeg pepela na sulfatnu otpornost betona, treba ispitivanjem obuhvatiti uticaj njegovog hemijskog sastava, reaktivne kristalne faze i amorfni sastav. Tako je potvrđeno da leteći pepeo sa više kalcijuma u svom sastavu (klase C, ACI) ima manju sulfatnu otpornost u odnosu na onaj sa više silicijuma (klasa F, ACI) u sastavu [33]. Preporuka ACI je da se leteći pepeo klase C koristi kao zamena cementu u količini od 25-35%, a pepeo klase F u količini 15-25%.

U radu autora Ahmed M Diab [153] se navodi da korišćenje silikatne prašine ima povoljan efekat prilikom delovanja rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dok u slučaju rastvora  $\text{MgSO}_4$  taj efekat je suprotan, što je potvrđeno preko gubitka čvrstoće i ekspanzije uzoraka. Veće razaranje cementa sa silikatnom prašinom se pripisuje reakciji  $\text{Mg}^{2+}$  jona sa C-S-H i njegovoj konverziji u nevezivni M-S-H jer je u ovom slučaju količina CH značajno smanjena.

K. Sotiriadis et al. [154] posmatrali su uticaj različitih mineralnih dodataka na stvaranje taumasita u betonu. Njihova primena se pokazala kao veoma korisna jer je stvoreno manje primarnog C-S-H i CH (usled manje količine  $\text{C}_3\text{S}$  i  $\text{C}_2\text{S}$ ) ali više sekundarnog C-S-H koji je bogatiji u Si i tako otporniji na delovanje sulfata. Takođe, mineralni dodaci imaju viši nivo aluminijuma što vodi ka stvaranju niza aluminatnih jedinjenja otpornih na stvaranje taumasita. Posmatrajući prirodne pucolane došli su do zaključka da imaju nešto slabiji efekat nego leteći pepeo i zgura, verovatno zbog niske temperature ( $5^\circ\text{C}$ ) na kojima su uzorci čuvani koja usporava pucolansku aktivnost. Magnezijum sulfat je bio razorniji za uzorke sa mineralnim dodacima.

U radu [128] kod uzoraka od cementa sa silikatnom prašinom i granulisanom zgurom nema brucita i nestaju monosulfat i etringit a sulfati lakše prodiru u unutrašnjost. Nakon duže izloženosti delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$ , monosulfat i etringit postaju nestabilni i prelaze u gips i još neki produkt. Ovde su se mešani cementi superiornije ponašali u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i to se pripisuje sledećem: manje CH i manje gipsa; smanjena koncentracija  $\text{C}_3\text{A}$  i manje etringita; pucolanska aktivnost stvara C-S-H, stvara se gips oko aluminatnih faza i ometa stvaranje etringita; C-S-H ispunjava pore i smanjuje propustljivost a usled manjeg pH etringit nije ekspanzivan. Uzorci betona napravljeni od

mešanog cementa, izloženi delovanju rastvora  $MgSO_4$  lošije su se pokazali od uzoraka napravljenih od običnog portland cementa, dok je u rastvoru  $Na_2SO_4$  obrnuto. Na osnovu istraživanja zaključeno je da malterske kocke ivice 25mm mogu da se koriste da predvide ponašanje betona od mešanog cementa ali ne i od portland cementa.

### 3.3. Uticaj veličine uzoraka

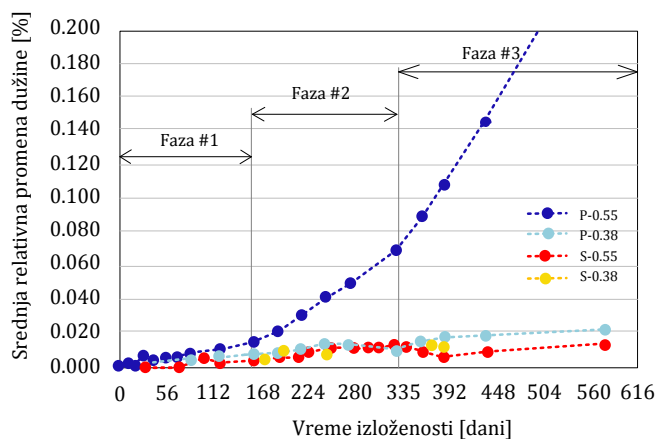
Xavier et al. [99] su izučavali kako izbor veličine betonskih uzoraka utiče na brzinu razaranja pri agresivnom delovanju sulfatnog rastvora. Uzorci veličine  $\varnothing 11\text{cm} \times 22\text{cm}$  i  $\varnothing 4\text{cm} \times 8\text{cm}$  su bili konstantno potopljani u 5% rastvor  $Na_2SO_4$ . Ispitivanje je pokazalo da su manji uzorci ( $\varnothing 4\text{cm} \times 8\text{cm}$ ) bili osetljiviji na delovanje rastvora što se manifestovalo preko vidljivih pukotina, otpadanja materijala i veće ekspanzije. Kao mogući razlog za to navodi se veći odnos površine i zapremine kod manjih uzoraka kao i odnos maksimalnog zrna agregata prema minimalnoj dimenziji uzorka. Objašnjenje za ovo drugo može biti da pukotine prvo nastaju na spoju agregat/cementni kamen i da se manji uzorci teže odupiru njihovom širenju.

### 3.4. Uticaj vodocementnog/vodovezivnog faktora

Ispitivanje gde su korišćena tri tipa cementa, TYPE I, TYPE II i TYPE V (prema ASTM C150), pokazalo je da povećanje vodocementnog faktora sa 0,35, preko 0,45 do 0,55 povećava i propustljivost betona i to za sva tri tipa cementa. Korišćena je metoda prodora hlorida u uzorak [5].

Ranije pomenuta doktorska teza [1], pokazala je i da su betonski uzorci sa  $D_{\text{max}}=8\text{mm}$  koji su bili potopljani u rastvor  $Na_2SO_4$  osetljiviji na delovanje sulfata pri vodocementnom faktoru 0,55 nego pri 0,38. Merena je ekspanzija uzoraka i rezultati su prikazani na Slika VII.10. Pri tome je najlošije rezultate imao beton sa portland cementom i vodocementnim faktorom 0,55.

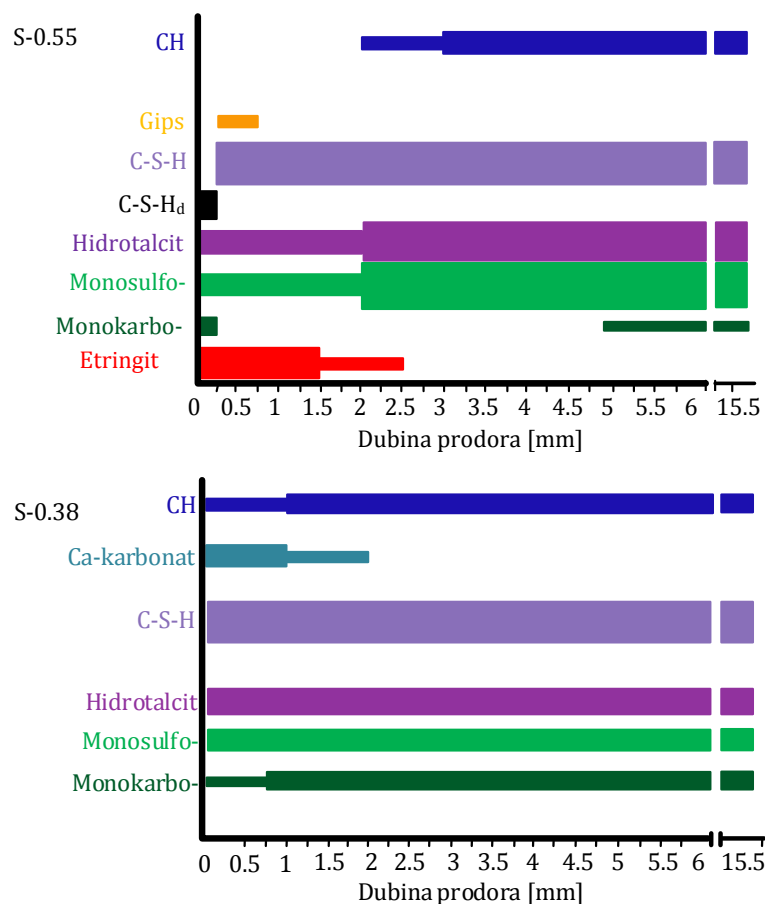
Kod istih uzoraka mereno je i rastojanje od površine uzorka, na kom nastaju različiti produkti usled delovanja natrijum sulfata. Rezultati dobijeni za slučaj kada je korišćen CEM III a zavisno od vodocementnog faktora prikazani su na Slika VII.11.



Slika VII.10- Promena dužine uzoraka od mikro-betona nakon potapanja u rastvor  $Na_2SO_4$  [1]



Dubina stvaranja kristala (gledano od površine uzorka), pri delovanju sulfata na betonske uzorke, a pri variranju vodocementnog faktora (0,35, 0,45 i 0,55), posmatrana je i u istraživanju L. Guamgcheng et al. [152]. Dobijeni rezultati slični su kao kod A. Chabrelie [1], kod nižeg w/c faktora uočena je plića zona stvaranja kristala.



Slika VII.11 – Procena nastanka različitih faza u uzorcima sa CEM III i dva vodocementna faktora, nakon što su betonski uzorci bili potopljeni u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju od 357 dana [1]

Generalno posmatrano, smanjenje vodocementnog faktora uticalo je na povećanje otpornosti betona pri delovanju sulfata. Tako je bilo i u pomenutom istraživanju [29], gde je variran vodocementni faktor od 0,39 do 0,71, ili u istraživanju Nabil M. Al-Akhras [151] sa vodocementnim faktorom 0,5 i 0,6.

Još jedno ispitivanje je urađeno od strane Changwen Miao et al. [155], gde su betonski uzorci sa različitim vodocementnim faktorom (0,26/0,323/0,44) istovremeno izloženi delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i ciklusima zamrzavanja/odmrzavanja. Najveća oštećenja su bila kod uzoraka sa najnižim vodocementnim faktorom, dok su uzorci sa w/c=0,323 i 0,4 imali mala oštećenja. Oštećenja su se manifestovala u vidu gubitka mase i smanjenja modula elastičnosti. Ispostavilo se da su se oštećenja uvećala istovremenim dejstvom sulfata i uslova koji važe pri ispitivanju otpornosti na mraz. Usled naizmeničnog smrzavanja/odmrzavanja javljaju se mikropukotine koje ubrzavaju prodor sulfata u

unutrašnjost uzoraka, ali s druge strane, delovanje sulfata snižava temperaturu pri kojem dolazi do mržnjenja vode.

P. Monteiro i K. Kurtis [156] su posmatrali ponašanje betonskih uzoraka izvađenih iz realnih konstrukcija i delimično potopljenih u 2,1%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  na period od 40 godina. Na osnovu analize zaključili su da je "sigurna zona" pri delovanju ovog rastvora za w/c manje od 0,45 i da pri tim vrednostima količina  $\text{C}_3\text{A}$  u cementu nema veliki uticaj (u ovom ispitivanju vrednost je bila 4-8%). Količina ovog minerala u cementu postaje značajna kada vrednost vodocementnog faktora poraste za 10%. Tako pri količini  $\text{C}_3\text{A}$  u cementu od 10% i pri w/c=0,45-0,51, lom uzoraka se dešava unutar 5 godina izloženosti rastvoru. Cor et al. su zaključili da kod cemenata sa niskim sadržajem  $\text{C}_3\text{A}$  veći efekat ima w/c nego količina  $\text{C}_3\text{A}$ .

Smanjenje w/c faktora je takođe pozitivno uticalo na sulfatnu otpornost betonskih uzoraka od portland cementa koji su bili izloženi, osim različitim koncentracijama  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0%, 3% i 5%) i delovanju  $\text{Cl}^-$  jona. Pretpostavka je da se  $\text{Cl}^-$  joni brže kreću kroz beton, pre reaguju sa produktima hidratacije i onemogućavaju reakcije sa sulfatnim jonima [157].

Uticaj smanjenja vodocementnog faktora na sulfatnu koroziju se u većini studija pokazao pozitivnim, ali u nekim istraživanjima pokazalo se i kao negativno (Al-Amoudi et al., 1995 [75]). Objašnjenje za to je, da se produkti nastali usled delovanja sulfata formiraju u manjem prostoru gde nema dovoljno prostora za njihov rast. Tako je i u istraživanju [90], koji smatra da rastvor  $\text{MgSO}_4$  mnogo razornije deluje na maltere i betone sa niskim vodocementnim faktorom, verovatno usled suviše finih pora koje se pri tome formiraju.

### 3.5. Uticaj nege uzoraka

Postoji mnogo načina negovanja uzoraka pre nego što se izlože delovanju sulfatnih rastvora. Moguće je povremeno menjati fluid u kojem se čuvaju uzorci, menjati temperaturu ili trajanje nege. Povećanje temperature pri kojoj se neguju uzorci važi za metodu kojom se ubrzava proces očvršćavanja te se postižu ranije zahtevane čvrstoće, propustljivosti ili neke druge karakteristike.

U slučaju korišćenja mineralnih dodataka, produženo vreme nege pokazalo se kao veoma korisno za razvoj strukture cementnog kamena, a time i smanjenje propustljivosti.

Betonski uzorci koji su početno negovani u standardnim uslovima (voda sobne temperature ili zasićena krečna voda), a potom na povišenoj temperaturi od  $38\pm 2^\circ\text{C}$  (21 dan) pokazuju smanjenje propustljivosti u odnosu na uzorke negovane samo u vodi sobne temperature [5].

U ispitivanju Nabil M. Al-Akhras [151], gde je cement delimično zamenjen metakaolinom i betonski uzorci izloženi delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , promena trajanja početne nege

uzoraka od 3, 7 i 28 dana u krečnoj vodi pokazala se kao beznačajna kod uzoraka sa metakaolinom ali je produžetak nege povoljno delovao na uzorke sa portland cementom.

P.S.Mangat i J.M.El-Khatib [116] su betonske uzorke (prizme dimenzije 10cmx10cmx25cm) pre potapanja u rastvor 7% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+3%MgSO<sub>4</sub>, negovali na tri različita načina: 1. uzorci su bili držani pokriveni 13 dana na temperaturi od 45°C i relativnoj vlažnosti 25% a potom 14 dana otkriveni na 45°C i 25% RH; 2. uzorci držani 28 dana na vazduhu, bez potririvanja, pri 45°C i 25% RH i 3.uzorci negovani 28 dana na 20°C i 55% RH. Korišćen je portland cement i cement sa dodacima letećeg pepela, silikatne prašine ili zgure. Sulfatna otpornost je posmatrana preko spolja vidljivih oštećenja i preko merenja ekspanzije (kao mera loma uzeta je vrednost ekspanzije od 0,5%). Kod portland cementa i cementa sa dodatkom zgure od 40%, najmanja sulfatna otpornost je bila u slučaju 1 a najbolja za slučaj 3, dok je pri dodatku zgure od 80%, otpornost betona povećana za slučajeve 1 i 2 ali se pogoršala za slučaj nege pod 3. Objašnjenje za lošiju otpornost u slučaju nege 1 možda bi moglo da se pripíše višem stepenu hidratacije i time višoj količini CH koji je bitan za stvaranje ekspanzivnih produkata pri delovanju rastvora sulfata. Dodaci smanjuju negativan uticaj nege uzoraka pri višim temperaturama. Takođe, ovo istraživanje pokazalo je da zapremina pora i njihova struktura nemaju direktne veze sa sulfatnom otpornošću i da se povećanje sulfatne otpornosti može dobiti zamenom cementa sa 22% letećeg pepela, 9% silikatne prašine i 80% zgure.

Ispitivanje A. Chabrelie i K.Scrivener [28] pokazuje da je karbonizacija uzoraka, delimično potopljenih u sulfatni rastvor imala povoljan efekat kod delovanje sulfata.

Mangat, Khatib [75] kao i Osborne [75] ističu važnost kratkotrajne nege uzoraka na vazduhu pre potapanja u sulfatni rastvor.

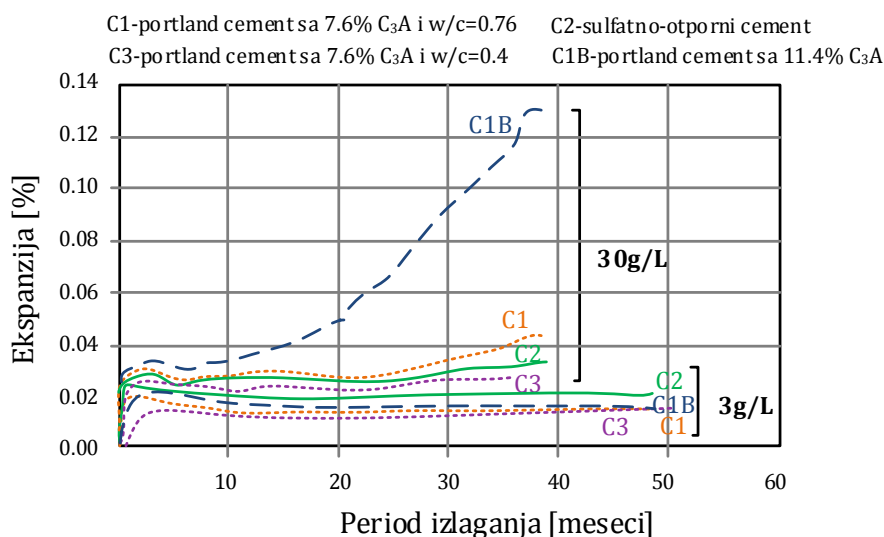
### 3.6. Uticaj vrste i koncentracije rastvora

U radu pomenutog D.D.Higgins-a [148], osim uticaja dodataka na otpornost betona sa dodatkom zgure, ispitivan je i uticaj vrste sulfatnog rastvora. Posmatrajući čvrstoću pri pritisku, veći pad je bio kod uzoraka držanih u rastvoru MgSO<sub>4</sub> nego u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, upoređujući ih sa uzorcima držanim u vodi (etalonski uzorci). Merenja su bila nakon 1, 2 i 6 godina, Slika VII.8 i Slika VII.9.

Što se tiče vrste rastvora, slični rezultati dobijeni su i kod H. A. F. Delwah [158], koji pokazuju veću agresivnost rastvora MgSO<sub>4</sub> nego rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> iste koncentracije. Pomoću SEM-a otkrivena je heterogena struktura C-S-H u rastvoru sa magnezijum jonima dok je u rastvoru sa natrijum jonima ona bila homogena. Kao zaključak, između ostalog, izneto je da je betonskim elementima napravljenim od cementa sa dodatkom silikatne prašine ili zgure, neophodna neka vrsta zaštite kada su izloženi delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub>, pri koncentraciji SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> jona od preko 1%.

Uticaj koncentracije rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na betonske uzorke 7cmx7cmx28cm ispitivan je od strane R.El-Hachem et al. [79], pri čemu su jačine rastvora bile 3g/l i 30g/l a pH vrednost

rastvora održavana je na 7,5. Korišćeni su cementi sa različitim procentom  $C_3A$  u sebi (2%, 7,6% i 11%) i jasno je pokazano da povećanje koncentracije rastvora ubrzava razaranje uzoraka. Ekspanzije uzoraka u zavisnosti od vrste cementa i koncentracije rastvora, prikazane su na Slika VII.12. U ovom slučaju, preporučeno je da se osim ekspanzije, kao mera razaranja betona pri delovanju sulfata, posmatra i gubitak mase uzoraka. Kao glavni okidač dejstva sulfata smatra se pojava ispiranja.



Slika VII.12 – Ekspanzija betonskih uzoraka [79]

Ispitivanje površinske tvrdoće betonskih uzoraka oblika kocke ivice 15cm, u zavisnosti od vodocementnog faktora (0,4/0,6/0,7/0,8) i koncentracije rastvora  $Na_2SO_4$  (3%/8%) urađeno je od strane W. Ouyang et al. [159]. Ispitivanje je trajalo godinu dana i rezultat koji je dobijen pokazuje da su na promenu koncentracije rastvora osetljiviji uzorci sa vodocementnim faktorom 0,4, 0,7 i 0,8 nego 0,6. Imali su značajno veće površinske tvrdoće nakon izlaganja 3% nego pri 8% rastvoru, dok je faktor 0,6 malo osetljiv na tu promenu i imao je konstantne vrednosti u periodu 28 do 120 dana. Tok razvoja posmatrane karakteristike tekao je u dve faze. U prvoj je usled ispunjavanja pora etringitom i gipsom došlo do povećanja tvrdoće a potom kada više nije bilo mesta za razvoj kristala i kada su naponi usled njihovog rasta bili viši od onih koje beton može da podnese dolazi do pojave prslina i pada površinske tvrdoće.

Prema Biczok-u, 1967, pri delovanju rastvora  $Na_2SO_4$  niske koncentracije sulfatnih jona ( $<0,1\% SO_4^{2-}$ ) kao osnovni produkt delovanja sulfata javlja se etringit, pri visokoj koncentraciji ( $>0,8\% SO_4^{2-}$ ) nastaje gips a između ove dve vrednosti prisutna su oba proizvoda. Kod delovanja rastvora  $MgSO_4$ , za koncentracije  $<0,4\% SO_4^{2-}$  jona nastaje etringit, za raspon 0,4-0,75%  $SO_4^{2-}$  nastaju oba proizvoda a za  $>0,75\% SO_4^{2-}$  se definiše kao magnezitna korozija [125].

Omar S. Baghabra Al-Amoudi [90] iznosi zaključak da su mešani cementi visoko otporni u natrijum sulfatu ali ne i u magnezijum sulfatu. To je podržano i u radu [92].

### 3.7. Uticaj režima delovanja sulfata

Već pomenuti rad [28] i doktorska teza A. Chabrelie [1] osim vodocementnog faktora obuhvatila je i uticaj režima delovanja rastvora sulfata na beton spravljenim sa portland (CEM I) i sulfatno-otpornim (CEM III) cementom. Kod uzoraka konstantno potopljenih u rastvor, uočena su 3 stadijuma delovanja sulfata: ulazak rastvora, površinsko oštećenje i oštećenje u unutrašnjosti uzoraka Slika VII.10. Pri režimu održavanja pH vrednosti na  $7,5 \pm 0,5$ , redukovano je bubrenje i ekspanzija uzoraka. U slučaju vlaženja/sušenja uzoraka javila se velika ekspanzija kod sulfatno-otpornog cementa, čime je pokazana njegova velika osetljivost na ove vrste promena uslova sredine. Režim delimično potopljenih uzoraka u sulfatni rastvor imao je sličan efekat kao kod potpuno potopljenih, ali sa odloženom pojavom oštećenja usled karbonizacije koja se javila na delu uzorka izloženog vazduhu.

### 3.8. pH vrednost

U blizini CH ili nehidratisanog zrna cementa vrednost pH je visoka. Čestice  $MgSO_4$  i  $Na_2SO_4$  se transportuju do tog mesta putem vode i dolazi do reakcija [160]. U laboratorijskim uslovima, pad pH može da bude ili usled kontrolisanog režima pH ili usled karbonatizacije [101].

Održavanje pH vrednosti sulfatnog rastvora, kojem su izloženi uzorci u toku ispitivanja, smatra se kao simuliranje uslova sredine u kojoj se inače nalaze betonski elementi. Pri konstantnoj vrednosti pH može da se prati difuzija u uzorcima, koja je bitna pri delovanju sulfata [79].

Hampson et al. su izučavali uticaj pH vrednosti na mikrostrukturu i stabilnost etringita i utvrdili da je pri višem pH (oko 12,5) kristalna struktura etringita dezorganizovana i dužina vlakana skraćena u poređenju sa etringitom formiranim na  $pH=11,5$  [127].

U radu R. P. Khatri et al., 1997, [126] iznose da pri delovanju rastvora sulfata na uzorke, pri pH 12-12,5 nastaje etringit, pri pH 8-11,5 nastaje gips i dolazi do dekompozicije C-S-H, dok pri  $pH < 8$  dolazi do ispiranja kalcijuma iz uzoraka i dekalifikacije C-S-H, uz napomenu da se različito ponašaju malteri i betoni.

Mehta zaključuje da je konstantno niska pH vrednost rastvora, vodeći mehanizam za stvaranje gipsa u uzorku. Ali ima autora koji ovaj slučaj pripisuje pre delovanju kiseline nego delovanju sulfata [125].

Brown je u svom eksperimentu, čiji su rezultati objavljeni 1981. godine, kontrolisao pH vrednost rastvora ( $pH=6,0$ ; 10,0 i 11,5) i zaključio da se smanjenjem pH vrednosti smanjuje i otpornost uzoraka na delovanje sulfata.

H. T. Cao et al. [161], posmatraju uticaj različitog pH (12,0/7,0/3,0) na beton sastavljen od cementa kome je dodata zgura u različitim procentima od 40%, 60% i 80%, pri delovanju rastvora sulfata. Dodatak zgure od 80% uticao je da beton ima zanemarljivu

ekspanziju pri svim vrednostima pH korišćenim u ispitivanju. Međutim, dodatak zgure od 40 i 60%, pri pH=3,0 i pH=7,0, nije pokazao značajno poboljšanje u odnosu na cement bez dodatka, već se javila značajna ekspanzija nakon 30, odnosno 40 nedelja izloženosti betona. Ipak, ovo smanjenje pH vrednosti nije tako značajno uticalo na uzorke koji su sadržali cement sa dodatkom letećeg pepela ili silikatne prašine u količini od 20% i 40%. Pri svim vrednostima pH postoji ekspanzija i pad čvrstoće, ali su izraženiji kako se smanjuje pH vrednost rastvora. Etringit je pronađen i pri pH=3,0, što znači da je unutar uzoraka očuvana visoka pH vrednost. Pokazalo se da zamena cementa sa 40% FA, 5% SF i 80% GBF daje dobre rezultate preko širokog raspona pH vrednosti i da pri padu pH dominantni postaju ispiranje kalcijuma i dekalifikacija C-S-H.

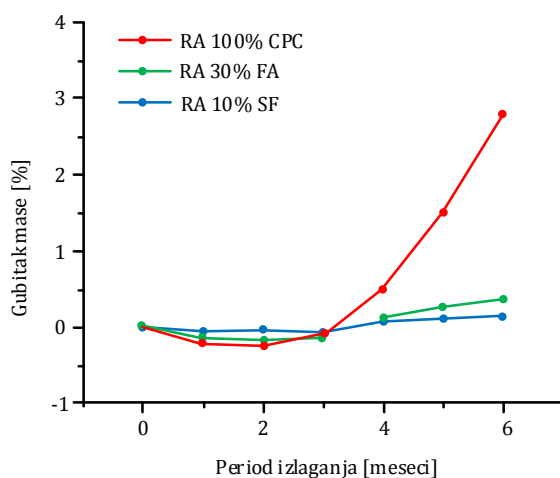
Smanjenje koncentracije jona kalcijuma u tečnoj fazi ukazuje na formiranje stabilnije faze u sistemu [127].

Damidot i Glasser (1997) iznose činjenicu da prisustvo  $\text{Cl}^-$  u visokoj koncentraciji u rastvoru (morska voda) stabilizuje etringit i on je tada postojan i pri pH=9,5.

### 3.9. Uticaj primenjenog agregata

Pronađen je veoma mali broj istraživanja u kojima je kao agregat korišćen reciklirani beton, bilo kao delimična ili potpuna zamena za prirodni agregat.

Corral-Higuera R. Et al. [56] ispitivali su uticaj delovanja sulfata na betonske uzorke dimenzija  $\text{Ø}15\text{cm} \times 30\text{cm}$ , gde je kao krupan agregat korišćen reciklirani beton a kao sitan je zadržan rečni. Osim čistog portland cementa, korišćeni su i dodaci, leteći pepeo u količini od 30% ili silikatna prašina u količini od 10%. Rastvor je bio 3,5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Merena je promena mase i korozija ugrađene armature. Gubljenje mase je počelo da se uočava nakon 4 meseca i to kod uzoraka sa čistim portland cementom, dok je kod uzoraka sa dodacima gubitak bio veoma mali. Nakon 6 meseci ispitivanja procentualni gubitak mase kod uzoraka sa portland cementom je bio 2,8%, kod uzoraka sa letećim pepelom 0,37% a najmanji kod upotrebe silikatne prašine, Slika VII.13.



Slika VII.13 –Gubitak mase betonskih uzoraka u sulfatnom okruženju [56]

M.L.Berndt [150] je u svom istraživanju o uticaju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  na beton koji je izložen ciklusima vlaženja i sušenja, koristio kao krupan agregat reciklirani beton i zguru kao zamenu za cement u količinama od 50% i 70%. Ispitivanje je trajalo 12 meseci i praćena je promena modula elastičnosti, iako pojedini istraživači smatraju da on nije dobar pokazatelj dejstva sulfata na beton jer su promene površinke prirode. Ipak, rezultat je bio poboljšanje u ponašanju betona sa recikliranim krupnim agregatom kada mu je dodata zgura.

Sličan rezultat dobila je u svom istraživanju grupa autora iz Koreje [162]. Koristili su, takođe, reciklirani beton kao krupan agregat, ali pored 60% zgure dodavali su i 30% letećeg pepela i izlagali 10% rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Merena je promena mase i čvrstoća pri pritisku a dodavanje zgure i letećeg pepela značajno je poboljšalo otpornost betonskih uzoraka. Slični zaključci su izvedeni u radu [163] gde je sulfatni rastvor bio  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u koncentraciji od 5% a dodatak letećeg pepela je znatno poboljšao otpornost (zamena letećeg pepela je bila 20%, 35% i 50%).







VIII EKSPERIMENTALNO  
ISTRAŽIVANJE



## 1. UVOD

Analizom dostupne literature iz oblasti delovanja sulfata na paste, maltere i betone, uočeno je da postoji veoma malo rezultata istraživanja koja su sprovedena na betonima, naročito ukoliko je deo prirodnog agregata zamenjen recikliranim betonom.

U trenutku sastavljanja programa ispitivanja otpornosti betonskih mešavina na delovanje sulfata, nisu pronađene standardne metode za ovo ispitivanje. Iz tog razloga analizirani su podaci, postupci i preporuke iz stručne literature, na osnovu kojih je sastavljen program ispitivanja. Cilj istraživanja je da se na osnovu eksperimentalnih rezultata i njihove analize zaključi da li betoni, u kojima je krupan prirodni agregat zamenjen agregatom od "starog" betona (u nastavku betoni sa recikliranim agregatom), imaju istu ili manju otpornost u sulfatno agresivnoj sredini, što bi omogućilo definisanje njihove primene sa aspekta trajnosti. Osim toga, istraživanje je koncipirano tako da omogući utvrđivanje sulfatne otpornosti betona sa recikliranim agregatom u zavisnosti od variranih komponentnih materijala i kvaliteta cementnog kamena preko smanjenja vodocementnog faktora.

Rezultati istraživanja i izvedeni zaključci biće podloga za definisanje preporuka za povećanje sulfatne otpornosti betona sa recikliranim agregatom. Takođe, rezultati istraživanja će omogućiti da se definišu mogućnosti ili ograničenja za primenu ovih vrsta betona kada su izloženi sulfatnoj agresiji.

Veći deo ispitivanja su obavljena u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju, Fakulteta tehničkih nauka. Za potrebe karakterizacije poroznosti cementnog kamena i produkata sulfatne korozije, deo ispitivanja je urađen u Univerzitetskom centru za elektronsku mikroskopiju-Novu Sad, Prirodno-matematičkom fakultetu i na Tehnološkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu.

Ispitivanja su obavljena u periodu: mart 2015 - septembar 2016. godine.

## 2. PROGRAM EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

U cilju blagovremenog planiranja svih aktivnosti predviđenih planom istraživanja i kontrole njegove realizacije, sastavljen je detaljan program ispitivanja. Ovaj program je obuhvatio:

- izbor komponentnih materijala,
- priprema i nabavka komponentnih materijala,
- ispitivanje kvaliteta komponentnih materijala,
- izbor vrsta betona za ispitivanje sulfatne otpornosti,
- određivanje sastava betonskih mešavina,
- izbor svojstava betona pomoću kojih će se ocenjivati sulfatna otpornost,
- definisanje oblika, dimenzija i broja uzoraka za ispitivanje i ocenu sulfatne otpornosti betona,

- definisanje načina negovanja uzoraka do početka izlaganja sulfatnim rastvorima i definisanje uslova izlaganja uzoraka sulfatnim rastvorima,
- izradu dinamičkog plana ispitivanja odabranih svojstava betona radi ocene sulfatne otpornosti.

Za izradu betonskih mešavina odabrani su sledeći komponentni materijali:

- Portland cement CEM I 42.5R ("Lafarge", Beočinska fabrika cementa).
- Metalurški sulfatno-otporni cement niske toplote hidratacije CEM III/32.5N LH/SR ("Lafarge", Beočinska fabrika cementa).
- Sitan agregat (rečni agregat, reka Drina, 0/4mm).
- Krupan agregat (rečni agregat, reka Drina i reciklirani beton, 4/8 i 8/16mm).
- Superplastifikatori (tip HRWRA, "Sika ViscoCrete 3070" i "Sika ViscoCrete 5500HP", proizvođač "Sika" Švajcarska).
- Voda iz gradskog vodovoda.

Odabrane su dve različite vrste cementa sa aspekta mineraloškog sastava, CEM I i CEM III, za koje je poznato da imaju različitu otpornost prema sulfatnoj koroziji, sa ciljem da se proverí njihov uticaj u slučaju određivanja sulfatne otpornosti betona sa recikliranim agregatom. Zgura (koja ulazi u sastav CEM III) je otpadni materijal koji nastaje u procesu proizvodnje sirovog gvožđa i predstavlja veliki ekološki problem zbog potrebe za njegovim deponovanjem. S druge strane, zgura predstavlja odličnu zamenu za deo cementnog klinkera, pa se, njenom primenom u cementima postižu višestuki pozitivni efekti: smanjenje zagađenja životne sredine, očuvanje prirodnih resursa, smanjenje emisije CO<sub>2</sub>.

Za sve mešavine odabran je prirodni - rečni agregat kao sitan, a kao krupan, prirodni - rečni i reciklirani agregat. Reciklirani krupan agregat je dobijen drobljenjem betona nepoznatog sastava i porekla. Ovakvim izborom krupnog agregata utvrdio bi se uticaj starog cementnog kamena na fizičko-mehanička svojstva betona i njegovu trajnost.

U cilju obezbeđenja iste ugradljivosti betonskih mešavina, predviđena je upotreba hemijskog dodatka iz ranga komercijalnih superplastifikatora.

U skladu sa planom istraživanja, analizirana su svojstva sledećih grupa betonskih mešavina:

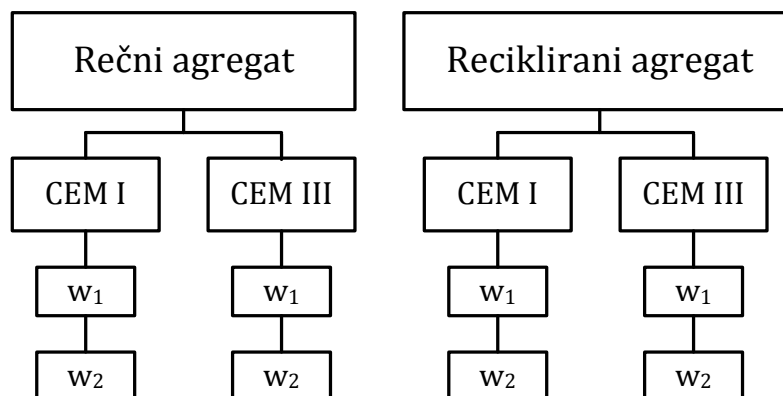
- N - betonske mešavine spravljene sa rečnim agregatom;
- R - betonske mešavine spravljene sa krupnim recikliranim agregatom.

Pored različitih vrsta agregata, upotrebljene su i pomenute vrste cementa, čime se u okviru svake od prethodno navedenih grupa betonskih mešavina, formiraju po dve podgrupe:

- PC - betoni spravljani sa cementom CEM I (portland cement);
- MC - betoni spravljani sa CEM III (metalurški cement).

U okviru svake podgrupe (PC i MC) variraju se po dva vodocementna faktora:  $\omega_1$  i  $\omega_2$ .

Na ovaj način, variranjem dve vrste krupnog agregata, dve vrste cementa i dva vodocementna faktora, dobijeno je osam različitih betonskih mešavina na kojima će se proveravati sulfatna otpornost. Način formiranja opisanih betonskih mešavina šematski je predstavljen na Slika VIII.1.



Slika VIII.1– Način formiranja betonskih mešavina

Sastav betonskih mešavina projektovan je na osnovu sledećih polaznih uslova:

- apsolutna zapremina cementa i vode je oko  $0,3\text{m}^3$ ;
- maksimalna veličina zrna  $D_{\text{max}}=16\text{mm}$ ;
- dva vodocementna faktora: 0,38 i 0,55;
- granulometrijski sastav mešavine agregata je u obliku Fuler-ove krive;
- količina superplastifikatora je zasnovana na potrebi da se postigne zahtevana konzistencija (0,2-1,4% mase cementa);
- dodatna količina vode je određena na osnovu upijanja vode recikliranog agregata nakon 30 minuta (II frakcija 3,0%, III frakcija 2,2%);
- količina uvučenog vazduha je približno 2%.

Na svim vrstama betona, koje su dobijene kombinacijom navedenih komponentnih materijala uz poštovanje uslova za projektovanje sastava, planirano je praćenje i analiza stepena i mehanizama njihove degradacije pri delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  u koncentraciji od 5%.

Uzorci će se prvih 28 dana negovati na dva načina:

1. u zasićenoj krečnoj vodi (uzorci za ispitivanje čvrstoće pri pritisku pre izlaganja delovanju sulfatnih rastvora, uzorci za merenje ekspanzije i uzorci za merenje promene kapilarnog upijanja);
2. u vazdušnoj sredini koja je zasićena vodenom parom do starosti od 7 dana a nakon toga u zasićenoj krečnoj vodi (uzorci za ispitivanje čvrstoće pri pritisku nakon 3 i 6 meseci delovanja sulfatnih rastvora i uzorci za određivanje promene poroznosti cementnog kamena pomoću živine porozimetrije/promene u mikrostrukтури (SEM, BSE-EDS)/promene u faznom sastavu (XRD, FTIR).

U cilju očuvanja pH vrednosti rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ , planirano je da se rastvori zamene na svaka tri meseca. Etalonski uzorci će se čuvati u zasićenoj krečnoj vodi.

Stepen oštećenja betona usled delovanja sulfatnih soli pratiće se preko:

- promena čvrstoće pri pritisku,
- promena dimenzije uzoraka (ekspanzija),
- promena kapilarnog upijanja,
- promene poroznosti cementnog kamena (MIP- Mercury Intrusion Porosimetry),
- promene u mikrostrukturi sa aspekta teksture, mineraloškog i hemijskog sastava:
  - kvalitativno: mineraloški sastav slobodnog preloma uzoraka (SEM-Scanning Electron Microscope), promene u faznom sastavu (XRD- X-Ray Diffraction; FTIR- Fourier Transform Infrared Spectroscopy).
  - kvantitativno u pogledu atomskog hemijskog sastava: BSE-EDS (Back-Scattered Electron Imaging-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).

Osim navedenog, na uzorcima od svake betonske mešavine, pre početka potapanja u sulfatne rastvore, odrediće se prodor vode pod pritiskom (vodonepropusnost).

Na osnovu odabranih svojstava za praćenje i ocenu sulfatne otpornosti, definisani su oblik, veličina i broj potrebnih uzoraka. Oni su za jednu vrstu betona prikazana u Tabela VIII.1.

*Tabela VIII.1- Pregled oblika, veličine i potrebnog broja uzoraka za jednu vrstu betona*

Ispitivano svojstvo	Etaloni	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{MgSO}_4$
Čvrstoća pri pritisku na 28 dana	3 kocke 150mmx150mmx150mm	-	-
MIP, SEM, EDS			
Vodonepropusnost	3 kocke 150mmx150mmx150mm	-	-
Čvrstoća pri pritisku kod starosti*:			
3 meseca	3x3 cilindra Ø100mmx100mm	3x3 cilindra Ø100mmx100mm	3x3 cilindra Ø100mmx100mm
6 meseci			
MIP, SEM, EDS			
Promena dimenzija uzoraka	3 prizme 100mmx100mmx500mm	3 prizme 100mmx100mmx500mm	3 prizme 100mmx100mmx500mm
Kapilarno upijanje	3 ploče 150mmx150mmx75mm	3 ploče 150mmx150mmx75mm	3 ploče 150mmx150mmx75mm

\* - starost uzoraka se računa od dana početka izlaganja dejstvu sulfata

### 3. PODACI O KOMPONENTNIM MATERIJALIMA

#### 3.1. Cement

Za eksperimentalno istraživanje odabrani su portland cement oznake PC 42,5R (CEM I 42,5R) i metalurški sulfatno otporni cement oznake M20K 32,5N LH/SR (CEM III/B 32,5N LH/SR) koji su proizvedeni u fabrici cementa "Lafarge" Beočinska fabrika cementa. Oba cementa ispunjavaju uslove kvaliteta prema Pravilniku o kvalitetu cementa. U Laboratoriji za Ispitivanje građevinskih materijala proverena su osnovna fizička i mehanička svojstva ovih cemenata prema standardima SRPS EN 196-1 [164], SRPS EN 196-3 [165] i SRPS EN 196-6 [166]. Rezultati ispitivanja dati su u Prilogu 1. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da obe vrste cementa (CEM I 42,5R i CEM III 32,5N LH/SR) zadovoljavaju propisana fizičko-hemijska i mehanička svojstva definisana u Pravilniku o kvalitetu cementa i SRPS EN 197-1 [168].

Osim standardnih ispitivanja koja su navedena, za obe vrste cementa određen je i hemijsko-minerološki sastav od strane proizvođača, a rezultati su dati u Prilogu 1.

#### 3.2. Agregat

Za realizaciju eksperimentalnog istraživanja odabrani su prirodni separisani agregat rečnog porekla, frakcije 0/4mm, 4/8mm i 8/16mm i agregat koji je dobijen drobljenjem "starog" betona nepoznatog porekla, frakcije 4/8mm i 8/16mm.

##### 3.2.1. Rečni agregat

Rečni agregat upotrebljen u ovom istraživanju poreklom je iz reke Drine. Pran je i separisan u tri frakcije 0/4mm, 4/8mm i 8/16mm (Slika VIII.2). Separacija sa koje je agregat preuzet je "Best izgradnja" Novi Sad.



Frakcija 0/4

Frakcija 4/8

Frakcija 8/16

*Slika VIII.2– Izgled frakcija rečnog agregata*

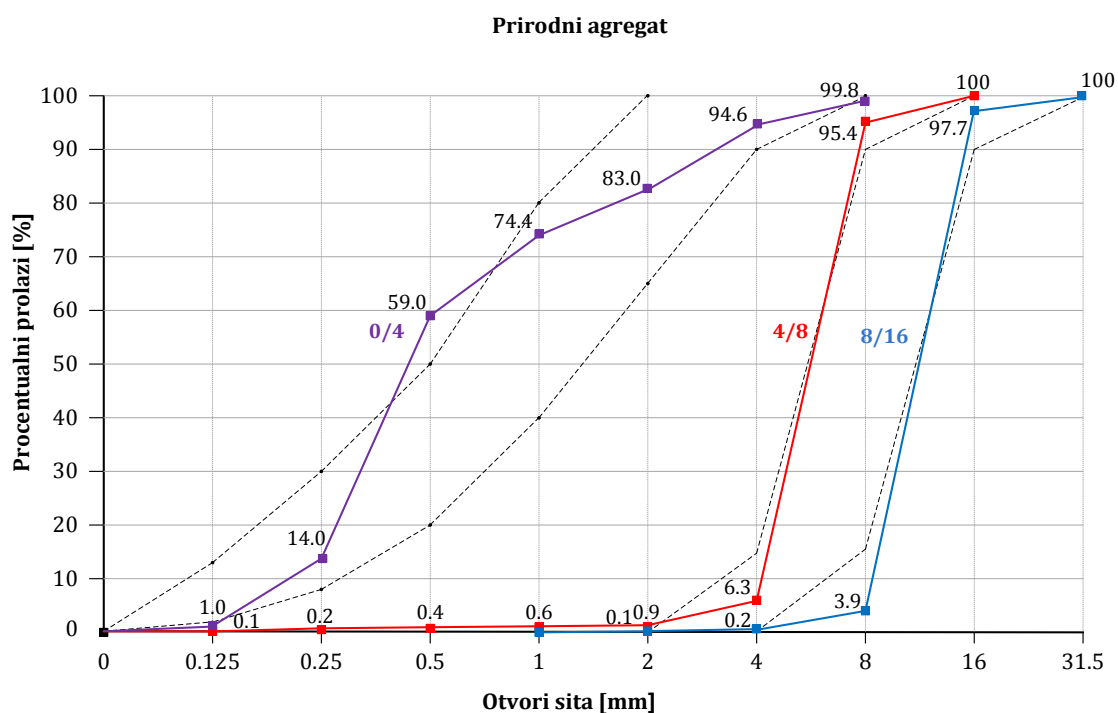
Upotrebljeni rečni agregat je ispitan u skladu sa Naredbom o obaveznom atestiranju agregata, prema standardima SRPS B.B2.010 i SRPS B.B3.100 u instituciji za ocenu usaglašenosti (IMS Beograd). Izveštaj o ispitivanju odabranih fizičkih, mehaničkih,

hemijskih i geometrijskih svojstava prirodnog agregata, kao i sastojaka koji mogu biti štetni po njihova svojstva, dati su u Prilogu 17.

Dodatno su u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala proverena sledeća svojstva rečnog gregata:

- Granulometrijski sastav frakcija agregata (SRPS EN 933-1) [168] i
- Oblik zrna-Indeks oblika (SRPS EN 933-4) [169].

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava dati su Prilogu 2 a granulometrijske krive su prikazane na Slika VIII.3.



*Slika VIII.3 – Granulometrijske krive frakcija rečnog agregata*

Agregat je pogodan za spravljanje betona ako je njegova granulometrijska kriva unutar referentnog područja (obeleženo crtkastim linijama).

**Sitan agregat:** Sa Slika VIII.3 se vidi da frakcija 0/4 ima nešto manji sadržaj zrna sitnijih od 0,125mm i nešto veći sadržaj zrna krupnoće do 0,5mm. Takođe se uočava da je razlika u prolazima između dva susedna sita na granici dozvoljene vrednosti ( $\leq 45\%$ ). Modul finoće sitnog agregata iznosi 2,74 i nalazi se u dozvoljenim granicama (2,3-3,6).

**Krupan agregat:** Frakcije 4/8 i 8/16 zadovoljavaju uslove kvaliteta u pogledu podmerenih i nadmerenih zrna.

Deo rezultata ispitivanja dat je u Tabela VIII.2, radi lakšeg projektovanja sastava betona i analize rezultata eksperimentalnog dela. U tabeli su, osim rezultata ispitivanja dati i



standardi prema kojima je ispitivanje urađeno kao i preporuke za granične vrednosti prema EN 206.

*Tabela VIII.2- Deo rezultati ispitivanja rečnog agregata*

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat		
			0/4mm	4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1	-	0,78	0	0
Oblik zrna	EN 933-4	$\leq SI_{55}$	-	8,5 (SI <sub>15</sub> )	16,0 (SI <sub>20</sub> )
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097-2	$\leq LA_{50}$	23,8 (LA <sub>25</sub> )	23,8 (LA <sub>25</sub> )	25,3 (LA <sub>30</sub> )
Zapreminska masa vodom zasićenog, površinski suvog uzorka [kg/m <sup>3</sup> ]	EN 1097-6	-	2650	2650	2650
Upijanje vode [%]	EN 1097-6	-	1,0	0,6	0,6

Na osnovu analize dobijenih rezultata, može se zaključiti da prirodni frakcionisani agregat zadovoljava zahtevane kriterijume za ispitivana svojstva.

### 3.2.2. Reciklirani agregat

Krupniji komadi "starog" betona, koji je korišćen za dobijanje recikliranog agregata, uzeti su sa stovarišta otpadnog materijala u Novom Sadu.

Nakon toga sledilo je dodatno usitnjavanje, koje je urađeno na postrojenju za drobljenje kamena u Fabrici betona "Karin komerc" u Veterniku (Slika VIII.4).



*Slika VIII.4- Postrojenje za drobljenje kamena u Fabrici betona*

Izgled "starog" betona pre i nakon usitnjavanja na pomenutom postrojenju prikazano je na Slika VIII.5.



*Slika VIII.5- Izgled "starog" betona pre i nakon usitnjavanja*

Separacija ovako dobijenog agregata urađena je u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Za spravljanje betonskih mešavina izabrane su frakcije 4/8mm i 8/16mm (Slika VIII.6).



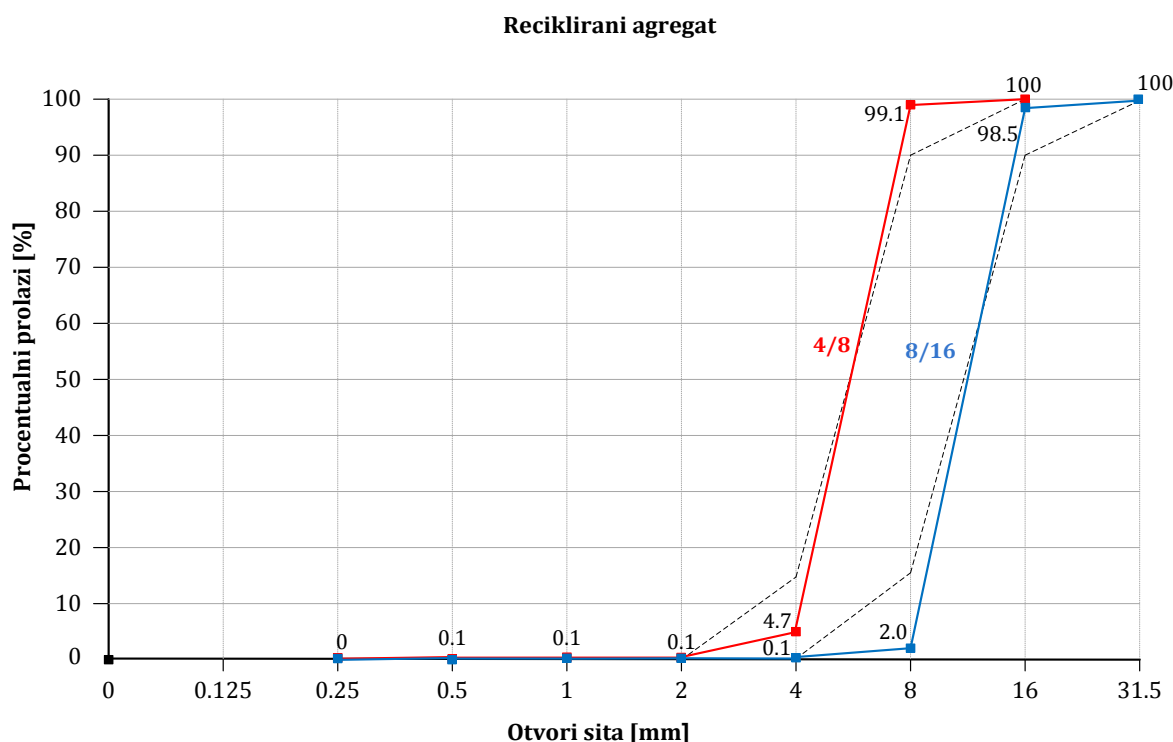
*Slika VIII.6- Frakcije recikliranog agregata (4/8mm i 8/16mm)*

Na separisanom recikliranom agregatu ispitana su sledeća svojstva:

- Granulometrijski sastav frakcija agregata (SRPS EN 933-1) [168];
- Finoća mliva (SRPS EN 933-1) [168];
- Oblik zrna-Indeks oblika (SRPS EN 933-4) [169];
- Otpornost na drobljenje-metoda Los Andeles (SRPS EN 1097-2) [170];
- Zapreminska masa i upijanje vode (SRPS EN 1097-6) [171];
- Uticaj recikliranog agregata na početno vreme vezivanja cementa (SRPS EN 1744-6) [172];
- Klasifikacija sastojaka krupnog recikliranog agregata (SRPS EN 933-11) [173] i
- Količina vezanog maltera (-).

Sva navedena ispitivanja urađena su u u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu osim ispitivanja otpornosti agregata na drobljenje-metoda Los Anđeles koja je urađena na Građevinskom fakultetu u Beogradu u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije. Izveštaj o ovom ispitivanju se nalazi u Prilogu 18.

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava frakcija recikliranog agregata dati su u Prilogu 2 a granulometrijske krive su prikazane na Slika VIII.7.



Slika VIII.7 – Granulometrijske krive frakcija recikliranog agregata

**Krupan agregat:** Frakcije 4/8 i 8/16 zadovoljavaju uslove kvaliteta u pogledu podmerenih i nadmerenih zrna.

Rezultati ispitivanja odabranih fizičkih, mehaničkih i geometrijskih svojstava recikliranog agregata, dati su u Tabela VIII.3, radi lakšeg projektovanja sastava betona i analize rezultata eksperimentalnog dela. U tabeli su, osim rezultata ispitivanja dati i standardi prema kojima je ispitivanje urađeno kao i preporuke za granične vrednosti prema EN 206.

Osim ispitivanja koja su prikazana u Tabela VIII.3, na recikliranom agregatu utvrđena je i klasifikacija sastojaka prema SRPS EN 933-11 [173] na osnovu kojeg je ispitivani agregat svrstan u Tip A (prema SRPS EN 12620-Tabela 22 [174] i SRPS EN 206-Tabela E.2 [175]).

Tabela VIII.3- Rezultati ispitivanja recikliranog agregata

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat	
			4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1	-	0,03	0,04
Oblik zrna	EN 933-4	≤SI <sub>55</sub>	7,2 (SI <sub>15</sub> )	4,1 (SI <sub>15</sub> )
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097-2	≤LA <sub>50</sub>	27,8 (LA <sub>30</sub> )	27,8 (LA <sub>30</sub> )
Zapreminska masa u suvom stanju [kg/m <sup>3</sup> ]	EN 1097-6	≥2100kg/m <sup>3</sup>	2340	2340
Upijanje vode [%]	EN 1097-6	-	3,0*	2,2*
Utjecaj na vreme početka vezivanja	EN 1744-6	≤A <sub>40</sub>	25min (A <sub>40</sub> )	25min (A <sub>40</sub> )

\* nakon 30 minuta

Takođe je određena i količina maltera vezana za prirodni agregat. Odabrana je metoda ratvaranja vezanog maltera pomoću 16% hlorovodonične kiseline [45]. Ispitivanjem je dobijeno da količina vezanog maltera iznosi 40%.

Na osnovu analize dobijenih rezultata može se zaključiti da reciklirani agregat zadovoljava zahtevane uslove kvaliteta za ispitivana svojstva.

Prilikom određivanja sastava betonskih mešavina vodilo se računa o upijanju vode recikliranog agregata. Za određivanje ove količine vode (dodatna voda) korišćeni su rezultati upijanja vode recikliranog agregata nakon 30 minuta koji su dati u Prilogu 2.

### 3.3. Hemijski dodaci

Za poboljšanje ugradljivosti betona predviđena je upotreba superplastifikatora tipa HRWRA+SRA proizvođača "Sika" – Švajcarska. U zavisnosti od potrebne redukcije vode za postizanje odgovarajuće konzistencije upotrebljeni su "Sika ViscoCrete 3070" ili "Sika ViscoCrete 5500" (modifikovani polikarboksilati). Osnovni podaci o primenjenim superplastifikatorima prikazani su u Tabela VIII.4.

Tabela VIII.4.- Osnovni podaci o primenjenim superplastifikatorima

Vrsta superplastifikatora	Zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Sadržaj suve materije [%]	Uobičajeno doziranje
Sika ViscoCrete 3070	1090	30	0,5-1,2
Sika ViscoCrete 5500HP	1080	40	0,2-1,2

### 3.4. Voda

Za spravljanje betona korišćena je voda iz gradskog vodovoda, koja se može upotrebiti bez prethodnih ispitivanja.

## 4. SASTAV BETONSKIH MEŠAVINA

Na osnovu polaznih uslova datih u poglavlju "Program eksperimentalnog istraživanja" definisan je sastav osam betonskih mešavina. Oznake i sastav mešavina dati su u Tabela VIII.5.

*Tabela VIII.5– Oznake betonskih mešavina*

Oznaka betona	Vrsta cementa	Vrsta agregata	Vodocementni faktor
NPC1	CEM I 42.5	Rečni agregat 0/4;4/8;8/16	0,55
NPC2	CEM I 42.5	Rečni agregat 0/4;4/8;8/16	0,38
NMC1	CEM III 32.5N LH/SR	Rečni agregat 0/4;4/8;8/16	0,55
NMC2	CEM III 32.5N LH/SR	Rečni agregat 0/4;4/8;8/16	0,38
RPC1	CEM I 42.5	Rečni agregat 0/4 Reciklirani agregat 4/8;8/16	0,55
RPC2	CEM I 42.5	Rečni agregat 0/4 Reciklirani agregat 4/8;8/16	0,38
RMC1	CEM III 32.5N LH/SR	Rečni agregat 0/4 Reciklirani agregat 4/8;8/16	0,55
RMC2	CEM III 32.5N LH/SR	Rečni agregat 0/4 Reciklirani agregat 4/8;8/16	0,38

Objašnjenje oznaka:

- N, R – označavaju vrstu krupnog agregata koji je upotrebljen, normalni (rečni) ili reciklirani beton, redom,
- PC, MC – označavaju vrstu cementa koji je upotrebljen, portland cement (CEM I) ili metalurški (CEM III), redom,
- 1,2 – označavaju vodocementni faktor koji je usvojen, 0,55 ili 0,38, redom.

Ispred svih ovih oznaka, za svaku betonsku mešavinu, stavljeno je još po jedno slovo u zavisnosti od rastvora u kome su držani uzorci:

- E – za uzorke držane u zasićenoj krečnoj vodi (etaloni),
- N – za uzorke držane u rastvoru 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,
- M – za uzorke držane u rastvoru 5% MgSO<sub>4</sub>.

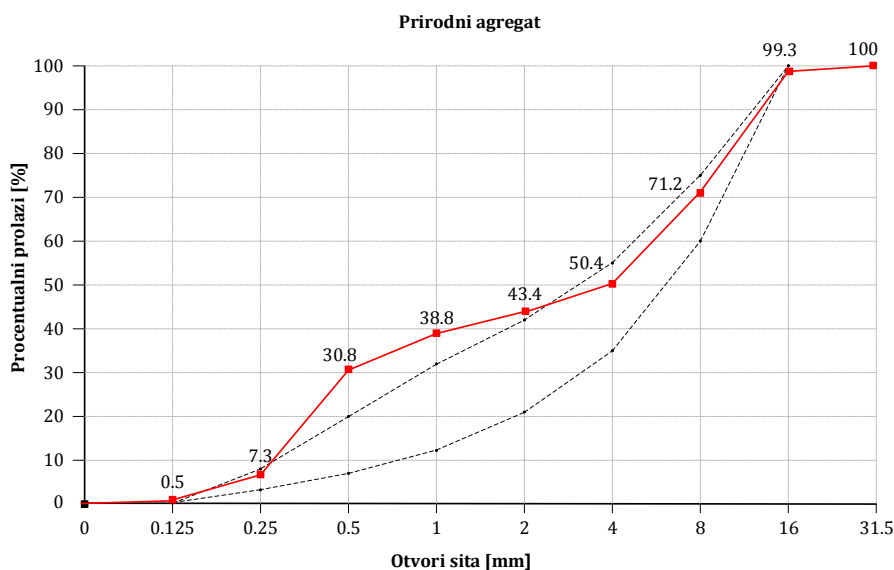
## 4.1. Primeri određivanja sastava betonskih mešavina

### 4.1.1. Određivanje sastava betona NPC1

Sastav betonske mešavine NPC1 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, rečnim, sitnim i krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,55) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa  $m_c=350\text{kg/m}^3$ ;
- količina vode određena na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $m_v/m_c=0,55$  iznosi  $m_v=192,5\text{kg/m}^3$ , tako da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$ ;
- učešća pojedinih frakcija agregata usvojena su tako da granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata odgovara Fuller-ovoj krivi (Prilog 3). Učešća frakcija iznose:
  - frakcija 0/4 –  $X_{0/4}=52\%$ ;
  - frakcija 4/8 –  $X_{4/8}=19\%$ ;
  - frakcija 8/16 –  $X_{8/16}=29\%$ .

Na Slika VIII.8 su prikazane vrednosti ordinata dobijene granulometrijske krive kao i referentne krive za povoljan granulometrijski sastav ( $A_{16}$  i  $B_{16}$ ).



Slika VIII.8 - Granulometrijska kriva mešavine sitnog i krupnog rečnog agregata i referentne krive

Količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ .

$$\frac{350}{3100} + \frac{192,5}{1000} + \frac{m_a}{2660} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1788 \text{ kg/m}^3$$

Količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- frakcija 0/4 –  $m_{0/4}=930\text{kg}$ ;
- frakcija 4/8 –  $m_{4/8}=340\text{kg}$ ;
- frakcija 8/16 –  $m_{8/16}=518\text{kg}$

$$\gamma_{b,sv} = 350 + 192,5 + 1788 = 2330\text{kg/m}^3$$

#### 4.1.2. Određivanje sastava betona NPC2

Sastav betonske mešavine NPC2 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, rečnim, sitnim i krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,38) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina vode i cementa određena je na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $m_v/m_c=0,38$ , usvojene količine superplastifikatora (Sika ViscoCrete 3070) od 0,8% u odnosu na masu cementa i uslova da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3m^3$ :

$$\frac{m_c}{3100} + \frac{0,38 \cdot m_c}{1000} + \frac{0,008 \cdot m_c}{1090} = 0,3 \rightarrow m_c = 423 \text{ kg/m}^3$$

$$m_v = 160,7 \approx 161 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{spk}} = 3,4 \text{ kg/m}^3$$

- učešća frakcija agregata su ista kao kod betonske mešavine NPC1 i iznose:
  - frakcija 0/4 –  $X_{0/4}=52\%$ ;
  - frakcija 4/8 –  $X_{4/8}=19\%$ ;
  - frakcija 8/16 –  $X_{8/16}=29\%$ ;
- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1m^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :

$$\frac{423}{3100} + \frac{161}{1000} + \frac{3,4}{1090} + \frac{m_a}{2650} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1800 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima (kao kod mešavine NPC1) iznose:
  - frakcija 0/4 –  $m_{0/4}=936\text{kg}$ ;
  - frakcija 4/8 –  $m_{4/8}=342\text{kg}$ ;
  - frakcija 8/16 –  $m_{8/16}=522\text{kg}$

$$\gamma_{b,sv} = 423 + 161 + 3,4 + 1800 = 2387 \text{ kg/m}^3$$

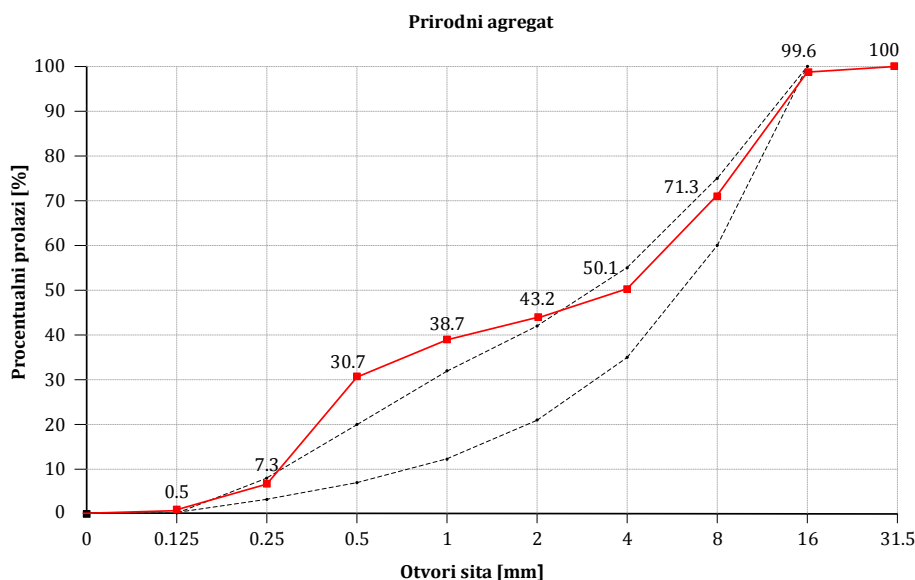
#### 4.1.3. Određivanje sastava betona RPC1

Sastav betonske mešavine RPC1 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, rečnim sitnim i recikliranim krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,55) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa  $m_c=350\text{kg/m}^3$ ;
- količina vode određena na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $m_v/m_c=0,55$  iznosi  $m_v=192,5\text{kg/m}^3$ , tako da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3m^3$ ;
- učešća pojedinih frakcija agregata usvojena su tako da granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata odgovara Fuller-ovoj krivi (Prilog 3). Učešća frakcija iznose:
  - frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $X_{0/4}=52\%$ ;

- frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $X_{4/8}=19\%$ ;
- frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $X_{8/16}=29\%$ .

Na Slika VIII.9 su prikazane vrednosti ordinata dobijene granulometrijske krive kao i referentne krive za povoljan granulometrijski sastav ( $A_{16}$  i  $B_{16}$ ).



*Slika VIII.9 - Granulometrijska kriva mešavine sitnog rečnog i krupnog recikliranog agregata i referentne krive*

Količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :

$$\frac{350}{3100} + \frac{192,5}{1000} + \frac{0,52 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,48 \cdot m_a}{2340} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1681 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:
  - frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $m_{0/4}=874\text{kg}$ ;
  - frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $m_{4/8}=319\text{kg}$ ;
  - frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $m_{8/16}=487\text{kg}$
- količina vode koju upija reciklirani agregat:  $m_v = 20,2 \text{ kg/m}^3$   
 $\gamma_{b,sv} = 350 + 192,5 + 1681 + 20,2 = 2243,7\text{kg/m}^3$

## 4.2. Sastav betonskih mešavina

Na osnovu prethodno prikazanih postupaka proračuna, određeni su sastavi svih betonskih mešavina (ukupno osam), čiji su postupci projektovanja prikazani u Prilogu 4. Sastavi predmetnih betonskih mešavina dati su Tabela VIII.6. Računske vrednosti zapreminskih masa betona u svežem stanju date su u Prilogu 6.



Tabela VIII.6-Količine komponentnih materijala u 1m<sup>3</sup> betona

Oznaka	Cement		Voda		Agregat		Hemijski dodatak		Vodozem entni faktor	
	CEM I	CEM III	m <sub>v</sub>	m <sub>v,dod</sub>	m <sub>a,s</sub>	m <sub>a,k</sub>	m <sub>a,k</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]		ω
					Rečni	Reciklirani				
			[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]						
NPC1	350	-	192,5	-	930	858	-	-	-	0,55
NPC2	423	-	161,0	-	936	864	-	5,9 (0,8%+0,6%)	-	0,38
NMC1	-	338	186,0	-	936	864	-	0,7 (0+0,2%)	-	0,55
NMC2	-	416	158,0	-	937	865	-	-	2,5 (0,4%+0,2%)	0,38 0,39
RPC1	350	-	192,5	20,2	874	-	803	-	-	0,55
RPC2	425	-	162,0	20,5	880	-	813	3,4 (0,4%+0,4%)	-	0,38
RMC1	-	338	186,0	20,5	881	-	813	-	-	0,55
RMC2	-	414	157,0	20,5	881	-	814	3,3 (0,8%)	-	0,38

## 5. IZRADA BETONSKIH MEŠAVINA I UZORAKA

Sve betonske mešavine su spravljene u protivstrujnoj laboratorijskoj mešalici za beton sa vertikalnom osovinom i zapremine 50 litara, proizvođača ZRMK Ljubljana. Vreme mešanja komponenti betona iznosilo je 3 minuta. Kod receptura sa recikliranim agregatom, agregat je prethodno kvašen količinom vode koju upije za 30 minuta ( $m_v$ -dodatna voda). Nakon 5 minuta, dodati su ostatak agregata i vezivo koji su mešani "u suvo" (Slika VIII.10), potom je dodata voda i hemijski dodatak po potrebi, uz konstantno mešanje. Krajnji izgled betonske mešavine dat je na Slika VIII.11.



*Slika VIII.10– Sipanje suvih komponenti u mešalicu*



*Slika VIII.11– Spravljena betonska mešavina*

Prosečna temperatura prostorije u toku spravljanja betonskih mešavina iznosila je 22°C a relativna vlažnost  $\varphi \approx 55\%$ .

Nakon završenog mešanja, izmerena je temperatura svežeg betona, koja je iznosila 19,5-22,2°C i određena je konzistencija metodom sleganja u periodu od 5-10min (Slika VIII.12). Rezultati su dati u Prilogu 5.



*Slika VIII.12– Merenje sleganja betona*

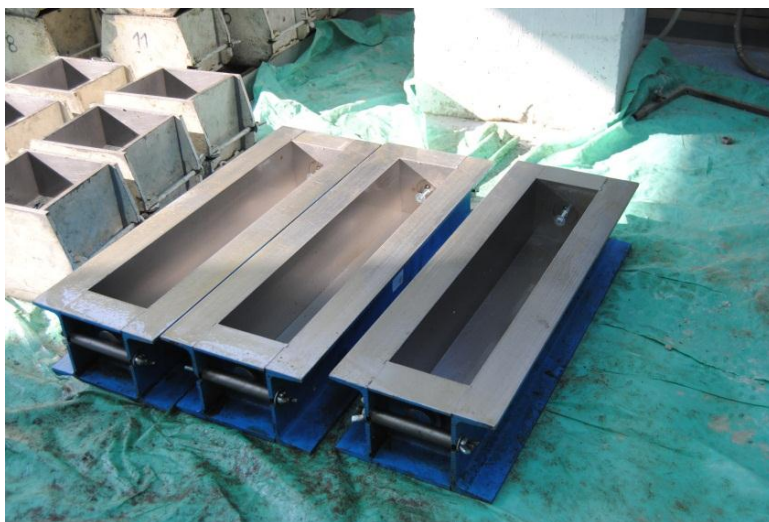
Potom je beton ugrađivan u kalupe (Slika VIII.13-Slika VIII.16).



*Slika VIII.13 – Pripremljeni kalupi za izradu betonskih kocki, ploča i prizmi*



*Slika VIII.14 – Pripremljeni kalupi za izradu betonskih cilindara*



*Slika VIII.15 – Pripremljeni kalupi sa reperima za izradu betonskih prizmi*



*Slika VIII.16– Ugrađivanje betona u kalupe*

Kompaktiranje betona je izvršeno vibriranjem na vibro-stolu u trajanju od 30 sekundi, za sve vrste upotrebljenih kalupa, Slika VIII.17 .



*Slika VIII.17– Kompaktiranje betona*

Nakon kompaktiranja svi uzorci betona su prvih 24 časa negovani u kalupima, prekriveni pvc folijom.

Ukupan broj spravljenih uzoraka po vrsti betona iznosi 69. Za njihovu izradu utrošeno je približno 0,124m<sup>3</sup> betona. Izgled uzoraka nakon ugrađivanja u kalupe prikazano je na Slika VIII.18.



*Slika VIII.18 – Beton ugrađen u kalupe*

Ukupan broj spravljenih uzoraka u okviru eksperimentalnog istraživanja iznosi 552. Za njihovu izradu utrošeno je približno 0,993m<sup>3</sup> betona.

Po vađenju iz kalupa svi uzorci su adekvatno obeleženi. Oznaka obuhvata vrstu rastvora u koji će uzorci biti potopljeni, vrstu betona, redni broj uzorka i datum spravljanja recepture (Slika VIII.19).



Slika VIII.19 – Uzorci nakon vađenja iz kalupa i obeležavanja

Pregled dimenzija, oblika i potrebnog broja uzoraka za određena ispitivanja dato je u poglavlju "Program eksperimentalnog istraživanja" , Tabela VIII.1.

Uzorci oblika cilindra koji su izlagani delovanju sulfatnih rastvora (za ispitivanje promene čvrstoće pri pritisku nakon 3 i 6 meseci delovanja ovih rastvora) su na planpararelnim stranama premazani epoksidnim lepkom. Ovo je urađeno da bi se te površine zaštitile od razaranja usled delovanja sulfata i tako omogućilo lakše ispitivanje uzoraka na čvrstoću pri pritisku. Takođe, ovim epoksidnim lepkom zaštićena su i mesta ulaska repera u uzorak za merenje promene dužine kao i pripadajuće strane kod prizmi (Slika VIII.20).



Slika VIII.20–Izgled uzoraka nakon zaštite epoksidnim premazom

## 6. REŽIMI NEGE I IZLAGANJA UZORAKA AGRESIVNIM RASTVORIMA

U zavisnosti od vrste ispitivanja kojim je praćena sulfatna otpornost odabranih vrsta betona, odabran je režim kondicioniranja uzoraka koji je prikazan u Tabela VIII.7

Tabela VIII.7- Opis režima kondicioniranja uzoraka

Etaloni						
Čvrstoća pri pritisku/MIP/SEM/EDS/	Kocke 150mmx150mm	1 dan kalup	→	27 dana krečna voda	→	ispitivanje na 28 dana
	Cilindri Ø100mmx100mm	7 dana kalup	→	krečna voda	→	ispitivanje nakon 3 i 6 meseci držanja u rastvoru
Promena dimenzija	Prizme 100mmx100mmx500mm	1 dan kalup	→	krečna voda	→	periodično ipitivanje i vraćanje u krečnu vodu
Kapilarno upijanje*	Ploče 150mmx150mmx75mm	1 dan kalup	→	krečna voda	→	Ispitivanje na početku potapanja uzoraka u rastvore, i nakon 3 i 6 meseci držanja u njima, vraćanje uzoraka nakon merenja
VDP*	Kocke 150mmx150mm	1 dan kalup	→	krečna voda	→	Ispitivanje na 35 dana starosti
Uzorcima u rastvorima						
Čvrstoća pri pritisku/MIP/SEM/EDS/promena mase	7 dana kalup	→	14 dana krečna voda	→	3 dana na vazduhu	→ 4 dana u sušnici na 50°C
	→	premazivanje uzoraka epoksidom			→	7 dana na vazduhu
Cilindri Ø100mmx100mm	→	sulfatni rastvor do dana ispitivanja		→	ispitivanje nakon 3 i 6 meseci držanja u rastvoru	
Promena dimenzija	1 dan kalup	→	20 dana krečna voda	→	3 dana na vazduhu	→ 4 dana u sušnici
	Prizme 100mmx100mmx 500mm	→	premazivanje uzoraka epoksidom	→	7 dana na vazduhu	→ sulfatni rastvor
	→	periodično ipitivanje i vraćanje u sulfatni rastvor				
Kapilarno upijanje* Ploče 150mmx150mmx 75mm	1 dan kalup	→	sulfatni rastvor		→	Ispitivanje nakon 3 i 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima, vraćanje uzoraka u rastvor nakon merenja

\* uzorcima su pre ispitivanja 14 dana sušeni na vazduhu

Etalonski (referentni) uzorcima su tokom trajanja eksperimenta držani u zasićenoj krečnoj vodi što je podrazumevalo rastvaranje približno 1,8g kalcijum-hidroksida u 1 litar vode. Ovaj način čuvanja etalonskih uzoraka je izabran kako bi se izbeglo ispiranje kalcijum hidroksida iz samih uzoraka usled dugotrajnog čuvanja u vodi. Ostatak uzoraka je

kondicioniran u dva rastvora:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  koncentracije 5%, koji je napravljen rastvaranjem 5kg pomenutih soli u 100l čiste vode (Slika VIII.21).



*Slika VIII.21–Sulfatne soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$*

Rastvaranje kalcijum-hidroksida i sulfatnih soli je urađeno u toploj vodi temperature od približno  $30^\circ\text{C}$ . Nakon spuštanja temperature na približno  $21\pm 2^\circ\text{C}$ , rastvori su sipani u odgovarajuće bazene gde su uzorci čuvani tokom trajanja eksperimenta (Slika VIII.22).



*Slika VIII.22–Kondicioniranje uzoraka tokom trajanja eksperimenta*

Svi rastvori (zasićena krečna voda, rastvori  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ ) su menjani na 3 meseca kako bi se održala pH vrednost. Odmah nakon spravljanja rastvora vrednosti pH su bile sledeće:

- zasićena krečna voda:  $\sim 12,5$
- rastvor 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ :  $\sim 7,5$
- rastvor 5%  $\text{MgSO}_4$ : 8-8,5.



Vrednosti pH rastvora su proveravane u početku svakodnevno a kasnije jednom nedeljno. Uređaj sa kojim su merene ove vrednosti je multiparametarski instrument proizvođača Hanna, tip HI2040, sa opsegom merenja pH od -2 do +16, rezolucijom 0,01, kalibracijom u dve tačke i tačnošću do 1,5% (Slika VIII.23).



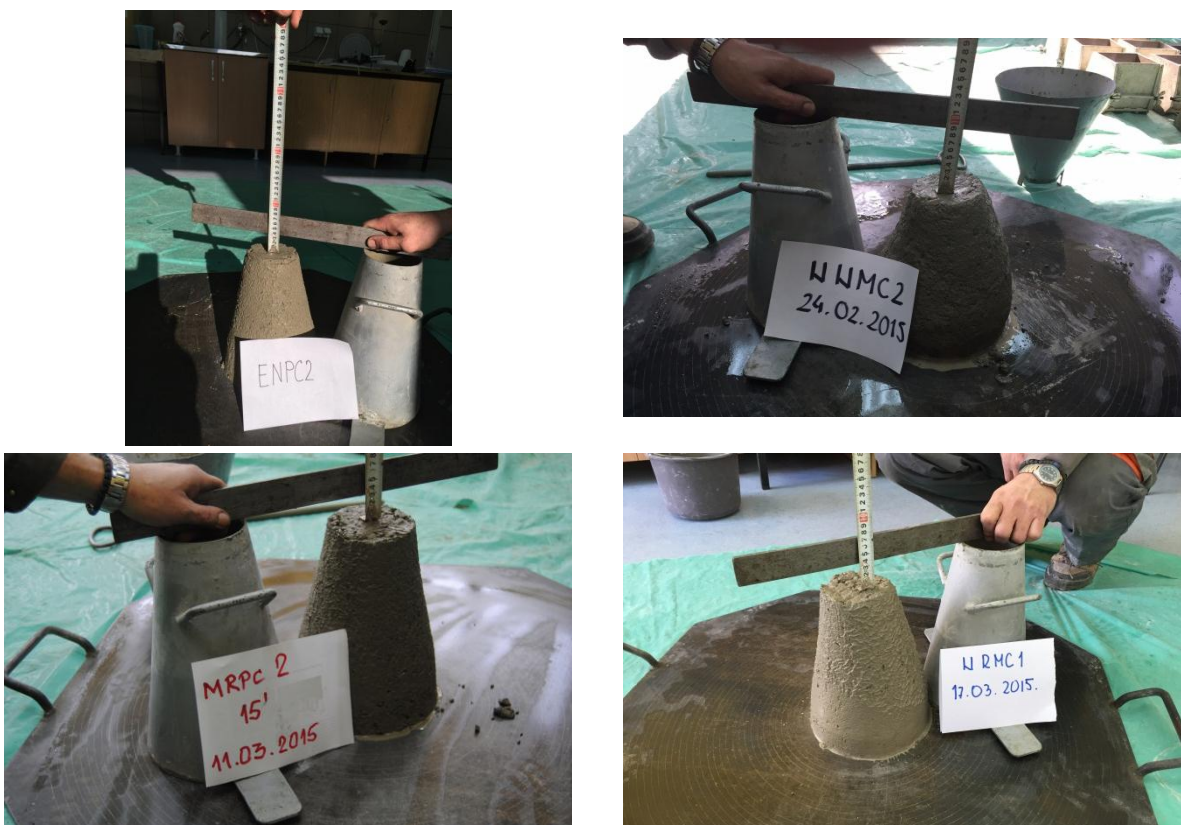
*Slika VIII.23–Uređaj za merenje pH vrednosti*

## 7. ISPITIVANA SVOJTVA

### 7.1. Svojstva svežeg betona

#### 7.1.1. Konzistencija

Konzistencija svežeg betona određena je metodom sleganja u skladu sa standardom SRPS EN 12350-2 [176]. Sleganje je mereno nakon 5 ili 10 minuta. Na Slika VIII.24 je prikazan postupak određivanja sleganja betona, a rezultati merenja dati su u Prilogu 5.



Slika VIII.24- Merenje konzistencije metodom sleganja

#### 7.1.2. Zapreminska masa

Zapreminska masa svežeg betona određena je prema standardu SRPS ISO 6276 [177] za svaku vrstu betona na uzorcima oblika kocke, ivice 150mm. Srednje vrednosti zapreminske mase u svežem stanju za svaku vrstu betona date su u Prilogu 6.

## 7.2. Svojstva očvrslog betona

#### 7.2.1. Čvrstoća betona pri pritisku

Čvrstoća betona pri pritisku određena je prema standardu SRPS EN 12390-3 [178] na uzorcima oblika kocke sa ivicom 150mm i pri starosti od 28 dana. Za merodavnu vrednost je usvojena aritmetička sredina od tri uzorka. Ispitivanje je obavljeno za svaku vrstu betona.

Za određivanje promene čvrstoće betona pri pritisku nakon 3 i 6 meseci izlaganja delovanju sulfatnim rastvorima, korišćeni su uzorci oblika cilindra  $\varnothing 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ . Razlog promene oblika i dimenzija uzoraka jeste brže delovanje sulfata na uzorcima oblika cilindra. Sila loma je određena pomoću hidraulične prese kapaciteta 3000kN, a brzina nanošenja opterećenja iznosila je  $0,6 \pm 0,2\text{MPa/s}$ .

Pre ispitivanja sile loma, izmerene su dimenzije i masa uzoraka. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku je prikazano na Slika VIII.25, a rezultati merenja, sila loma i izračunate čvrstoće pri pritisku za svaki uzorak dati su u Prilogu 8.



*Slika VIII.25- Određivanje čvrstoće pri pritisku*

### **7.2.2. Promena dužine uzoraka**

Promena dužine betonskih uzoraka određena je u skladu sa UNI 11307 [179] na prizmama dimenzija  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$  (Slika VIII.26). Za registrovanje deformacija upotrebljen je deformetar proizvođača Insize (Kina). Tačnost uređaja iznosi  $0,001\text{mm}$ . Promena dužine je merena u osi uzorka, ne mernoj bazi dužine  $500\text{mm}$ , (Slika VIII.26). Merodavna vrednost promene dužine određena je kao aritmetička sredina rezultata dobijenih na tri prizme. Ispitivanje je sprovedeno na osam vrsta betona, za tri režima negovanja uzoraka (krečna voda, natrijum sulfat i magnezijum sulfat). Promena dužine je merena na svakih sedam dana u toku 6 meseci izlaganja rastvorima sulfata. U Prilogu 9 dati su rezultati merenja.



Slika VIII.26- Merenje promene dužine uzorka prema UNI 11307

### 7.2.3. Upijanje vode pod pritiskom (ispitivanje vodonepropustljivosti)

Upijanje vode pod pritiskom (ispitivanje vodonepropustljivosti betona) određeno je prema EN 12390-8 [180], Slika VIII.27. Uzorci za ispitivanje su oblika kocke ivice 150mm. Kao merodavan rezultat uzeta je srednja vrednost upijanja određena na tri uzorka, za svaku vrstu betona. Merenje je izvršeno na uzorcima starim 35 dana, koji nisu potapani u sulfatne rastvore. Rezultati merenja upijanja vode pod pritiskom dati su u Prilogu 10.



Slika VIII.27- Određivanje upijanje vode pod pritiskom

#### 7.2.4. Kapilarno upijanje vode

Kapilarno upijanje vode određeno je prema SRPS U.M8.300 [181], Slika VIII.28. Uzorci za ispitivanje su oblika kvadra osnove 150mmx150mm i visine ~75mm. Kao merodavan rezultat uzeta je srednja vrednost upijanja, određena na tri uzorka za svaku vrstu betona. Kapilarno upijanje vode određeno je na uzorcima pre potapanja u sulfatne rastvore i nakon 3 i 6 meseci držanja u njima. Rezultati merenja kapilarnog upijanja vode dati su u Prilogu 11.



Slika VIII.28- Ispitivanje kapilarnog upijanja vode

#### 7.2.5. Poroznost (Živina porozimetrija)

Raspodela pora po veličini, ukupna zapremina pora (poroznost), vrednosti "threshold"-a i kritičnog prečnika određeni su pomoću živine porozimetrije-MIP (Mercury Intrusion Porosimetry). Ispitivanje je urađeno na porozimetru Carlo Erba 2000 WS, Italija, sa radnim pritiskom 0,05-200MPa za određivanje prečnika pora u intervalu 0,002-200 $\mu$ m.

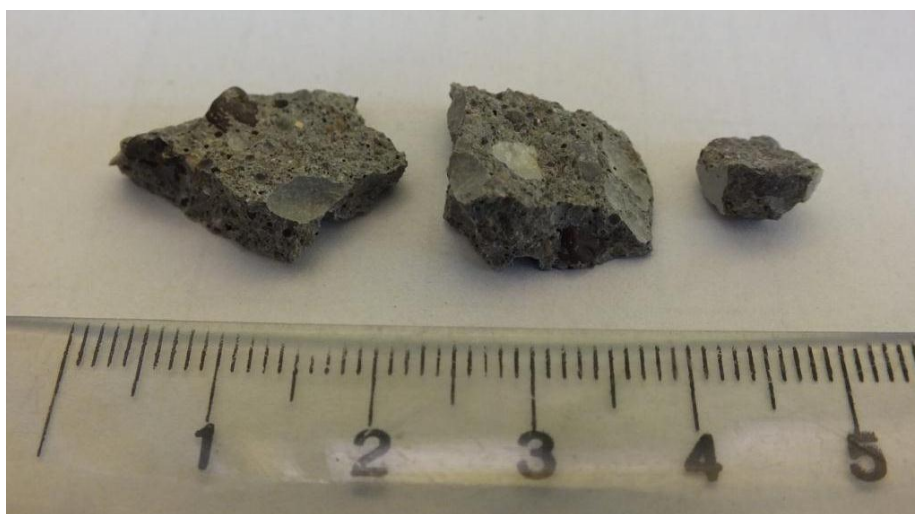
Priprema uzoraka se sastojala od lomljenja uzoraka veličine 1-3 grama (Slika VIII.30) ručno, sa površine uzoraka koji su bili izloženi delovanju rastvora (sulfatni ili krečni). Nakon toga, uzorci su potopljeni u izopropanol 7 dana a potom izloženi delovanju vakuuma u trajanju od osam sati (Slika VIII.29). U prvih 5 sati potapanja, izopropanol je menjan na jedan sat.

Ispitivanje je urađeno na etalonskim uzorcima i uzorcima izloženim delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 3 i 6 meseci.

Rezultata ispitivanja dati su u Prilogu 12 i Prilogu 13.



Slika VIII.29- Priprema uzoraka za merenje poroznosti pomoću živine porozimetrije



Slika VIII.30- Uzorci za živinu porozimetriju

#### 7.2.6. Mikroskopska analiza (SEM, BSE-EDS)

Mikroskopska analiza obavljena je na Skening elektronskom mikroskopu marke JEOL, Tokijo, Slika VIII.32.

Priprema uzoraka je bila ista kao i za živinu porozimetriju uz malu dopunu. Za SEM analizu slobodni prelom uzorka je bio prevučen tankim slojem zlata i analiziran u uređaju pri ubrzanju elektrona od 20kV. Za BSE-EDS analizu uzorak je nakon vakuumiranja zaliven dvokomponentnim nisko viskoznim epoksidnim lepkom, poliran i prevučen tankim slojem zlata (Slika VIII.31) a potom izložen ubrzanju elektrona od 10kV. EDS analiza je urađena na uzorcima pri uvećanju od 1500x i na dubinama: do 0,5mm na svakih 65 $\mu$ m, potom na 1, 2 i 3mm od površine uzorka. Najmanje 30 tačaka je izmereno u regionu do 0,5mm. Vreme prikupljanja informacija za svaki spektar iznosilo je 60 sekundi.

Ispitivanje je urađeno na etalonskim uzorcima i onim koji su bili izloženi delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 3 i 6 meseci.

Deo dobijenih rezultata dat je u Prilogu 14.



Slika VIII.31- Dvokomponentni niskoviskozni epoksid za zalivanje uzoraka za BSE-EDS



Slika VIII.32 – Skenirajući elektronski mikroskop

### 7.2.7. Analiza faznog sastava u cementnom kamenu (XRD, FTIR)

Rendgensko-strukturna analiza (XRD) je urađena na instrumentu Philips PW-1710 pod sledećim eksperimentalnim uslovima: monohromatska  $\text{CuK}\alpha$  radijacija sa talasnom dužinom od  $1,5418\text{\AA}$ , opseg snimanja je između  $2\theta$  od  $10-65^\circ$ , sa brzinom skeniranja od  $0,02^\circ$  i  $0,5\text{s}$  po koraku, pri naponu od  $40\text{kV}$  i struji  $30\text{mA}$ .

Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR), Thermo-Nicolet Nexus 670, je izvedena pod sledećim eksperimentalnim uslovima: uzorci su pripremljeni tako što je ispitivana supstanca izmešana sa fino sprasanim i osušenim KBr, u odgovarajućem kalupu u vakuumu, pri spektralnoj rezoluciji od  $4\text{cm}^{-1}$ , opsega  $4000-400\text{cm}^{-1}$  i 32 skeniranja po jednom merenju. Rađena je dekonvolucija apsorpcionih traka u opsegu  $1200-850\text{cm}^{-1}$  pomoću Gausove funkcije. Dekonvolucija i fitovanje omogućavaju ispitivanje različitih individualnih veza u slučaju njihovog preklapanja u FTIR spektru.

Priprema uzoraka je obuhvatila drobljenje uzorka u laboratorijskom avanu, i prosejavanje kroz sito  $0,09/0,1\text{mm}$  radi dobijanja praha sa veličinom čestica manje od  $0,09\text{mm}$ , Slika VIII.33.



Slika VIII.33 - Avan sa tučkom i sito koji su korišćeni za pripremu uzoraka kod XRD i FTIR

## 8. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Na osnovu rezultata merenja datih u priložima, izračunate su vrednosti fizičko-mehaničkih svojstava betona planiranih programom ispitivanja. Karakteristične vrednosti svojstava prikazane su tabelarno u cilju što lakše analize i izvođenja zaključaka.

### 8.1. Svojstva svežeg betona

Na osnovu rezultata merenja datih u Priložima 5 i 6, u Tabela VIII.8 prikazane su vrednosti zapreminske mase svežeg betona i konzistencije .

Tabela VIII.8- Svojstva svežeg betona

Vrsta betona	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Sleganje [mm]
		$\Delta h$
NPC1	2314	5,5
NPC2	2350	4,0
NMC1	2307	5,0
NMC2	2342	12,0
RPC1	2248	15,0
RPC2	2310	5,0
RMC1	2251	4,0
RMC2	2292	10,0

Oznake u tabeli imaju sledeća značenja:

- $\gamma_{b,sv}$  – zapreminska masa svežeg betona
- $\Delta h_{min}$  – sleganje izmereno 5 minuta od početka spravljanja betona



## 8.2. Svojstva očvrstlog betona

### 8.2.1. Čvrstoća pri pritisku

U poglavlju 7.2.1 prikazan je postupak određivanja čvrstoće pri pritisku, a rezultati pojedinačnih ispitivanja dati su u Prilogu 8 (Određivanje čvrstoće pri pritisku). Izračunate srednje vrednosti zapreminske mase očvrstlog betona i čvrstoće pri pritisku, za svaku vrstu betona, za starost od 28 dana prikazane su u Tabela VIII.9. Prikazane vrednosti su preračunate na čvrstoću kocke ivice 20cm.

Oznake u tabelama imaju sledeća značanja:

- $\gamma_{b,pv}$  – zapreminska masa suvog betona
- $f_{c,28}$  – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 28 dana

*Tabela VIII.9- Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona pri starosti od 28 dana (pre potapanja u sulfatne rastvore)*

	Vrsta betona							
	NPC1	NPC2	NMC1	NMC2	RPC1	RPC2	RMC1	RMC2
$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2285	2352	2284	2341	2212	2294	2223	2275
Čvrstoća pri pritisku, $f_c$ [MPa]	46,3	72,5	31,8	52,8	43,1	61,8	31,3	54,1

Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku etalonskih uzoraka i uzoraka koji su bili potopljani 3 i 6 meseci u rastvore natrijum sulfata i magnezijum sulfata prikazani su u Tabela VIII.10 i Tabela VIII.11.

*Tabela VIII.10 - Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku nakon 3 meseca držanja u sulfatnom rastvoru*

Oznaka	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku, $f_{c,3m}$ [MPa]	Oznaka	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku, $f_{c,3m}$ [MPa]
ENPC1	2311	54,4	ERPC1	2252	53,5
NNPC1	2299	55,8	NRPC1	2255	49,1
MNPC1	2310	56,3	MRPC1	2258	54,8
ENPC2	2343	79,3	ERPC2	2289	78,0
NNPC2	2354	80,7	NRPC2	2280	79,3
MNPC2	2370	81,1	MRPC2	2291	77,1
ENMC1	2318	45,3	ERMC1	2222	39,7
NNMC1	2292	43,4	NRMC1	2238	43,2
MNMC1	2301	43,3	MRMC1	2228	41,6
ENMC2	2349	70,0	ERMC2	2281	71,2
NNMC2	2341	62,6	NRMC2	2263	65,7
MNMC2	2344	76,0	MRMC2	2258	67,8

Tabela VIII.11 - Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku nakon 6 meseci držanja u sulfatnom rastvoru

Oznaka	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku, $f_{c,6m}$ [MPa]	Oznaka	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku, $f_{c,6m}$ [MPa]
ENPC1	2248	55,1	ERPC1	2256	54,5
NNPC1	2238	42,9	NRPC1	2253	35,9
MNPC1	2243	52,3	MRPC1	2248	49,3
ENPC2	2360	87,9	ERPC2	2302	79,6
NNPC2	2362	79,7	NRPC2	2302	74,8
MNPC2	2365	71,5	MRPC2	2287	73,4
ENMC1	2313	46,4	ERMC1	2264	45,9
NNMC1	2280	46,1	NRMC1	2245	46,7
MNMC1	2300	42,5	MRMC1	2226	42,5
ENMC2	2338	71,4	ERMC2	2282	74,4
NNMC2	2325	64,7	NRMC2	2271	67,7
MNMC2	2354	74,7	MRMC2	2273	67,5

### 8.2.2. Promena dužine betonskih uzoraka

Na osnovu rezultata pojedinačnih merenja promene dužine betonskih uzoraka iz Priloga 9, u Tabela VIII.12 - Tabela VIII.15 su prikazane izračunate srednje vrednosti promene dužine za svaku vrstu betona u mm/m (‰), za mernu bazu od 500mm. Prikazane vrednosti se odnose na etalonske uzorke kao i na uzorke izložene delovanju sulfatnih rastvora.

Tabela VIII.12- Promena dužine betonskih uzoraka sa rečnim agregatom [mm/m]

Vreme držanja u sulfatnom rastvoru [dani]	Vrsta betona											
	ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,016	0,069	0,041	0,016	0,041	0,045	0,015	0,014	0,053	0,008	0,008	0,045
14	0,026	0,087	0,057	0,021	0,051	0,053	0,019	0,026	0,058	0,013	0,011	0,050
21	0,033	0,089	0,07	0,023	0,060	0,059	0,023	0,030	0,063	0,019	0,015	0,052
28	0,031	0,09	0,086	0,025	0,073	0,067	0,026	0,031	0,070	0,022	0,020	0,052
35	0,031	0,099	0,103	0,032	0,087	0,070	0,029	0,031	0,072	0,027	0,023	0,055
42	0,030	0,103	0,105	0,036	0,102	0,077	0,026	0,033	0,074	0,028	0,024	0,056
49	0,031	0,122	0,117	0,037	0,116	0,084	0,027	0,033	0,074	0,029	0,025	0,059
56	0,031	0,149	0,129	0,039	0,119	0,090	0,028	0,032	0,076	0,033	0,025	0,058
63	0,031	0,152	0,146	0,040	0,123	0,093	0,027	0,033	0,077	0,037	0,027	0,059
70	0,033	0,161	0,160	0,045	0,125	0,103	0,023	0,036	0,078	0,039	0,027	0,058

Tabela VIII.13- Promena dužine betonskih uzoraka sa rečnim agregatom [mm/m]-nastavak

Vreme držanja u sulfatnom rastvoru [dani]	Vrsta betona											
	ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
77	0,031	0,161	0,162	0,05	0,122	0,103	0,026	0,037	0,076	0,039	0,027	0,058
84	0,034	0,160	0,160	0,053	0,122	0,102	0,023	0,035	0,078	0,039	0,026	0,056
91	0,031	0,168	0,161	0,051	0,120	0,106	0,024	0,037	0,079	0,040	0,027	0,057
98	0,031	0,169	0,163	0,05	0,120	0,107	0,026	0,038	0,080	0,040	0,026	0,059
105	0,032	0,176	0,160	0,051	0,125	0,107	0,026	0,036	0,081	0,040	0,026	0,059
112	0,033	0,179	0,161	0,051	0,126	0,108	0,024	0,039	0,083	0,041	0,027	0,060
119	0,034	0,177	0,162	0,052	0,129	0,110	0,027	0,040	0,085	0,042	0,027	0,062
126	0,037	0,178	0,158	0,053	0,130	0,113	0,029	0,042	0,086	0,043	0,026	0,066
133	0,038	0,180	0,155	0,055	0,128	0,116	0,027	0,049	0,089	0,043	0,027	0,069
140	0,039	0,187	0,159	0,056	0,131	0,123	0,029	0,052	0,092	0,043	0,028	0,072
147	0,038	0,198	0,166	0,058	0,133	0,126	0,028	0,057	0,095	0,044	0,024	0,075
154	0,040	0,207	0,165	0,060	0,131	0,127	0,029	0,061	0,098	0,046	0,025	0,077
161	0,042	0,206	0,169	0,063	0,130	0,126	0,029	0,066	0,102	0,047	0,025	0,083
168	0,042	0,211	0,174	0,064	0,132	0,126	0,028	0,064	0,103	0,047	0,025	0,087
175	0,044	0,219	0,172	0,066	0,125	0,128	0,030	0,067	0,109	0,047	0,025	0,089
182	0,044	0,225	0,183	0,074	0,129	0,129	0,031	0,067	0,117	0,046	0,025	0,091

Tabela VIII.14 - Promena dužine betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom [mm/m]

Vreme držanja u sulfatnom rastvoru [dani]	Vrsta betona											
	ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,011	0,051	0,038	0,008	0,010	0,018	0,011	0,009	0,013	0,016	0,018	0,033
14	0,013	0,056	0,032	0,030	0,009	0,028	0,022	0,018	0,021	0,024	0,037	0,039
21	0,018	0,066	0,035	0,032	0,010	0,028	0,028	0,017	0,029	0,033	0,047	0,042
28	0,019	0,077	0,049	0,040	0,012	0,037	0,030	0,019	0,029	0,034	0,047	0,045
35	0,023	0,083	0,055	0,047	0,019	0,042	0,035	0,019	0,030	0,040	0,047	0,047
42	0,020	0,080	0,058	0,050	0,021	0,046	0,035	0,020	0,031	0,049	0,048	0,049
49	0,014	0,077	0,061	0,060	0,031	0,049	0,035	0,020	0,033	0,059	0,050	0,050
56	0,009	0,081	0,075	0,073	0,037	0,059	0,035	0,019	0,031	0,063	0,055	0,052
63	0,010	0,087	0,077	0,084	0,047	0,065	0,037	0,020	0,031	0,064	0,060	0,058
70	0,010	0,095	0,079	0,089	0,051	0,078	0,038	0,022	0,035	0,070	0,061	0,062
77	0,007	0,105	0,085	0,090	0,062	0,089	0,037	0,022	0,046	0,078	0,063	0,068
84	0,008	0,117	0,095	0,091	0,070	0,099	0,039	0,023	0,050	0,087	0,068	0,072
91	0,011	0,119	0,105	0,090	0,072	0,101	0,042	0,024	0,058	0,089	0,071	0,078
98	0,012	0,128	0,109	0,090	0,078	0,105	0,046	0,029	0,062	0,094	0,071	0,080

Tabela VIII.15 – Promena dužine betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom [mm/m]-nastavak

Vreme držanja u sulfatnom rastvoru [dani]	Vrsta betona											
	ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
105	0,011	0,136	0,110	0,090	0,086	0,106	0,045	0,035	0,063	0,095	0,076	0,086
112	0,009	0,155	0,118	0,091	0,091	0,107	0,045	0,047	0,065	0,095	0,077	0,089
119	0,009	0,162	0,125	0,092	0,106	0,107	0,045	0,051	0,065	0,097	0,080	0,089
126	0,008	0,169	0,133	0,092	0,095	0,106	0,050	0,050	0,065	0,099	0,086	0,091
133	0,015	0,174	0,140	0,093	0,095	0,113	0,052	0,050	0,065	0,095	0,087	0,094
140	0,020	0,180	0,151	0,094	0,095	0,116	0,038	0,051	0,065	0,095	0,091	0,095
147	0,020	0,198	0,162	0,095	0,096	0,116	0,054	0,053	0,067	0,094	0,091	0,081
154	0,021	0,210	0,165	0,095	0,097	0,115	0,057	0,053	0,070	0,093	0,095	0,091
161	0,021	0,227	0,164	0,094	0,098	0,124	0,060	0,053	0,071	0,090	0,091	0,090
168	0,022	0,247	0,164	0,095	0,106	0,125	0,060	0,053	0,075	0,090	0,092	0,087
175	0,023	0,259	0,172	0,096	0,109	0,131	0,060	0,053	0,075	0,091	0,093	0,088
182	0,023	0,267	0,179	0,097	0,116	0,134	0,060	0,053	0,077	0,091	0,093	0,086

### 8.2.3. Upijanje vode pod pritiskom

Rezultati merenja dubine prodora i količine upijene vode dati su Prilogu 10. U toku eksperimenta merena je masa uzoraka pre i nakon izlaganja dejstvu vode pod pritiskom, radi određivanja upijanja vode. Dobijena vrednost je izražena u g i kg/m<sup>2</sup>. U Tabela VIII.16 su date srednje vrednosti upijanja vode pod pritiskom i dubine prodora za svaku vrstu betona.

Upijanje vode je izračunato prema izrazima:

$$u_{sr} = m_2 - m_1 \text{ [g]} \quad (VIII.1)$$

$$U_{sr} = \frac{u_{sr}}{A} \text{ [g/cm}^2\text{]} \quad (VIII.2)$$

Oznake u datim izrazima imaju sledeća značenja:

- $u_{sr}$  – srednja vrednost upijanja u g
- $U_{sr}$  – srednja vrednost upijanja u g/cm<sup>2</sup>
- $m_1$  – masa uzorka pre ispitivanja
- $m_2$  – masa uzorka nakon delovanja vode pod pritiskom
- $A$  – kontaktna površina (~ krug prečnika 7,5cm).

Tabela VIII.16 – Upijanje vode i dubina prodora vode pod pritiskom

Vrsta betona	Upijanje vode		Dubina prodora
	$u_{sr}$ [g]	$U_{sr}$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$d_{max,sr}$ [mm]
NPC1	11,0	0,249	15,0
NPC2	3,0	0,068	10,0
NMC1	3,3	0,075	16,7
NMC2	5,0	0,113	14,0
RPC1	7,3	0,165	12,0
RPC2	6,3	0,143	10,7
RMC1	7,0	0,159	16,0
RMC2	6,0	0,136	13,3

#### 8.2.4. Kapilarno upijanje vode

Merenje kapilarnog upijanja vode ispitivanih vrsta betona određeno je prema odredbama standarda SRPS U.M8.300 [181]. Rezultati pojedinačnih merenja kapilarnog upijanja vode na tri uzorka za svaku vrstu betona dati su u Prilogu 11, a u Tabela VIII.17- Tabela VIII.21 date su srednje vrednosti izražene u kg/m<sup>2</sup> (površina preko koje je omogućeno upijanje vode je ~ 150mmx150mm). U istoj tabeli su prikazane i izračunate vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode  $A_i$ . Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode određeni su prema izrazima (VIII.3) i (VIII.4). Koeficijent kapilarnog upijanja vode je određen za  $t=25h$ , prema preporuci iz standarda za slučaj kada se ne može uspostaviti linearna zavisnost između kapilarnog upijanja,  $m_{v,k}$  i kvadratnog korena vremena,  $\sqrt{t}$ .

$$U_k = \frac{m_{v,k}}{A} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (\text{VIII.3})$$

$$A_i = \frac{U_{k,25}}{4,9} \text{ [kg/m}^2\text{h}^{1/2}\text{]} \quad (\text{VIII.4})$$

U prethodnim izrazima, oznake imaju sledeća značenja:

- $U_k$  – kapilarno upijanje
- $m_{v,k}$  – masa kapilarno upijene vode (g)
- $A_i$  – koeficijent kapilarnog upijanja
- $U_{k,25}$  – kapilarno upijanje vode nakon  $t=25h$  od početka ispitivanja.

Tabela VIII.17- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode uzoraka pre potapanja u sulfatne rastvore

Vreme t [h]	$t^{1/2}$ [h <sup>1/2</sup> ]	Vrsta betona							
		NPC1	NPC2	NMC1	NMC2	RPC1	RPC2	RMC1	RMC2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,017	0,13	0,056	0,027	0,101	0,061	0,087	0,065	0,168	0,074
0,083	0,29	0,102	0,048	0,188	0,093	0,145	0,107	0,286	0,129
0,25	0,5	0,154	0,062	0,270	0,136	0,194	0,141	0,400	0,179
0,5	0,71	0,200	0,072	0,320	0,160	0,239	0,175	0,482	0,223
1	1	0,255	0,097	0,373	0,192	0,285	0,206	0,576	0,252
4	2	0,356	0,129	0,507	0,249	0,410	0,277	0,780	0,333
9	3	0,434	0,153	0,559	0,293	0,489	0,317	0,875	0,383
25	5	0,547	0,181	0,636	0,334	0,597	0,378	1,000	0,435
49	7	0,622	0,189	0,667	0,361	0,652	0,397	1,037	0,468
73	8,54	0,644	0,192	0,751	0,367	0,667	0,407	1,037	0,468
97	9,85	0,653	0,193	0,760	0,367	0,668	0,415	1,037	0,468
<b>A<sub>i</sub></b> [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]		<b>0,112</b>	<b>0,037</b>	<b>0,130</b>	<b>0,068</b>	<b>0,122</b>	<b>0,077</b>	<b>0,204</b>	<b>0,089</b>

Tabela VIII.18- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom nakon 3 meseca držanja u sulfatnom rastvoru

Vreme t [h]	$t^{1/2}$ [h <sup>1/2</sup> ]	Vrsta betona											
		ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,017	0,13	0,030	0,025	0,030	0,025	0,015	0,039	0,040	0,052	0,030	0,041	0,022	0,049
0,083	0,29	0,030	0,030	0,033	0,027	0,022	0,033	0,046	0,059	0,036	0,034	0,030	0,050
0,25	0,5	0,037	0,036	0,033	0,030	0,022	0,046	0,056	0,071	0,054	0,033	0,036	0,050
0,5	0,71	0,041	0,040	0,041	0,034	0,021	0,042	0,079	0,098	0,058	0,041	0,045	0,064
1	1	0,058	0,046	0,046	0,040	0,022	0,051	0,092	0,113	0,059	0,052	0,057	0,059
4	2	0,113	0,055	0,043	0,043	0,028	0,051	0,124	0,146	0,089	0,049	0,064	0,071
9	3	0,114	0,093	0,078	0,045	0,039	0,059	0,147	0,172	0,112	0,061	0,080	0,083
25	5	0,135	0,105	0,090	0,052	0,049	0,065	0,172	0,208	0,149	0,065	0,097	0,088
49	7	0,141	0,128	0,106	0,068	0,055	0,082	0,188	0,229	0,165	0,064	0,115	0,101
73	8,54	0,141	0,129	0,106	0,076	0,067	0,088	0,187	0,230	0,170	0,064	0,118	0,102
97	9,85	0,141	0,129	0,106	0,076	0,067	0,088	0,187	0,230	0,170	0,064	0,118	0,102
<b>A<sub>i</sub></b> [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]		<b>0,028</b>	<b>0,021</b>	<b>0,018</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>	<b>0,013</b>	<b>0,035</b>	<b>0,042</b>	<b>0,030</b>	<b>0,013</b>	<b>0,020</b>	<b>0,018</b>

Tabela VIII.19- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom nakon 6 meseci držanja u sulfatnom rastvoru

Vremet $t^{1/2}$ [h] [h <sup>1/2</sup> ]		Vrsta betona											
		ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,017	0,13	0,022	0,026	0,045	0,016	0,030	0,058	0,036	0,034	0,040	0,033	0,028	0,068
0,083	0,29	0,028	0,035	0,036	0,030	0,036	0,062	0,049	0,046	0,040	0,036	0,039	0,073
0,25	0,5	0,037	0,035	0,038	0,031	0,039	0,064	0,058	0,052	0,049	0,037	0,043	0,074
0,5	0,71	0,041	0,043	0,036	0,028	0,039	0,061	0,068	0,056	0,049	0,043	0,046	0,071
1	1	0,038	0,038	0,032	0,031	0,037	0,067	0,079	0,067	0,051	0,044	0,052	0,073
4	2	0,040	0,055	0,043	0,031	0,045	0,077	0,113	0,095	0,052	0,058	0,067	0,083
9	3	0,033	0,058	0,044	0,039	0,042	0,073	0,124	0,110	0,054	0,078	0,088	0,094
25	5	0,041	0,101	0,058	0,031	0,040	0,070	0,147	0,134	0,058	0,078	0,092	0,098
49	7	0,043	0,130	0,072	0,030	0,037	0,070	0,147	0,135	0,065	0,086	0,104	0,104
73	8,54	0,043	0,130	0,072	0,027	0,036	0,068	0,147	0,135	0,065	0,087	0,104	0,104
97	9,85	0,043	0,130	0,072	0,027	0,036	0,068	0,147	0,135	0,065	0,087	0,104	0,104
<b>A<sub>i</sub></b> <b>[kg/m<sup>2</sup> h<sup>1/2</sup>]</b>		<b>0,008</b>	<b>0,021</b>	<b>0,012</b>	<b>0,006</b>	<b>0,008</b>	<b>0,014</b>	<b>0,030</b>	<b>0,027</b>	<b>0,012</b>	<b>0,016</b>	<b>0,019</b>	<b>0,020</b>

Tabela VIII.20- Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom nakon 3 meseca držanja u sulfatnom rastvoru

Vremet $t^{1/2}$ [h] [h <sup>1/2</sup> ]		Vrsta betona											
		ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,017	0,13	0,024	0,052	0,028	0,022	0,030	0,018	0,045	0,074	0,049	0,022	0,022	0,019
0,083	0,29	0,025	0,058	0,034	0,028	0,030	0,022	0,065	0,101	0,070	0,025	0,022	0,018
0,25	0,5	0,022	0,067	0,043	0,033	0,031	0,031	0,085	0,120	0,082	0,033	0,030	0,022
0,5	0,71	0,041	0,083	0,043	0,049	0,041	0,033	0,100	0,142	0,091	0,040	0,031	0,024
1	1	0,041	0,085	0,045	0,056	0,055	0,049	0,124	0,160	0,108	0,058	0,044	0,034
4	2	0,052	0,122	0,053	0,062	0,056	0,050	0,182	0,217	0,153	0,084	0,071	0,053
9	3	0,061	0,126	0,065	0,080	0,070	0,052	0,231	0,281	0,202	0,102	0,089	0,061
25	5	0,082	0,168	0,094	0,079	0,068	0,053	0,290	0,357	0,247	0,123	0,108	0,073
49	7	0,087	0,175	0,098	0,065	0,062	0,040	0,329	0,383	0,266	0,135	0,136	0,093
73	8,54	0,087	0,188	0,114	0,084	0,074	0,041	0,336	0,394	0,275	0,139	0,142	0,095
97	9,85	0,087	0,188	0,114	0,084	0,074	0,041	0,336	0,394	0,275	0,139	0,142	0,095
<b>A<sub>i</sub></b> <b>[kg/m<sup>2</sup> h<sup>1/2</sup>]</b>		<b>0,017</b>	<b>0,034</b>	<b>0,019</b>	<b>0,016</b>	<b>0,014</b>	<b>0,011</b>	<b>0,059</b>	<b>0,073</b>	<b>0,050</b>	<b>0,025</b>	<b>0,022</b>	<b>0,015</b>

Tabela VIII.21-Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom nakon 6 meseci držanja u sulfatnom rastvoru

Vreme t [h]	t <sup>1/2</sup> [h <sup>1/2</sup> ]	Vrsta betona											
		ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,017	0,13	0,019	0,095	0,046	0,030	0,052	0,043	0,057	0,058	0,070	0,025	0,032	0,053
0,083	0,29	0,022	0,120	0,052	0,028	0,061	0,047	0,079	0,076	0,085	0,030	0,040	0,065
0,25	0,5	0,025	0,151	0,059	0,028	0,071	0,052	0,103	0,098	0,097	0,039	0,049	0,071
0,5	0,71	0,037	0,166	0,062	0,034	0,090	0,061	0,124	0,113	0,104	0,044	0,051	0,073
1	1	0,040	0,194	0,077	0,041	0,108	0,068	0,153	0,132	0,117	0,049	0,065	0,077
4	2	0,053	0,267	0,102	0,058	0,157	0,089	0,244	0,186	0,189	0,065	0,090	0,098
9	3	0,062	0,328	0,162	0,064	0,184	0,107	0,302	0,236	0,202	0,076	0,104	0,113
25	5	0,071	0,368	0,215	0,073	0,193	0,114	0,382	0,272	0,248	0,102	0,128	0,124
49	7	0,077	0,398	0,261	0,073	0,203	0,114	0,408	0,290	0,273	0,120	0,151	0,142
73	8,54	0,081	0,424	0,301	0,076	0,212	0,120	0,421	0,296	0,284	0,127	0,161	0,151
97	9,85	0,081	0,424	0,301	0,076	0,212	0,120	0,421	0,296	0,284	0,127	0,161	0,151
A <sub>i</sub> [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]		0,014	0,075	0,044	0,015	0,039	0,023	0,078	0,056	0,051	0,021	0,026	0,025

### 8.2.5. Poroznost (živina porozimetrija)

Karakteristike porne strukture uzoraka svih posmatranih vrsta betona određene su kroz ukupnu poroznost, raspored pora po veličini, određivanje kritičnog prečnika pora i vrednosti "threshold"-a.

Vrednosti ukupne poroznosti date su u Tabela VIII.22, za uzorke sa rečnim agregatom i Tabela VIII.23, za uzorke sa recikliranim agregatom.

Tabela VIII.22- Vrednosti ukupne poroznosti određene preko živine porozimetrije kod uzoraka sa rečnim agregatom

	ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
0	15,33	15,33	15,33	7,51	7,51	7,51	17,74	17,74	17,74	11,19	11,19	11,19
3m	13,07	3,44	8,27	6,35	5,68	5,95	15,59	11,24	6,94	5,73	1,95	3,36
6m	21,10	11,80	9,91	9,74	4,30	5,48	22,25	9,02	5,82	8,01	7,45	8,07

Tabela VIII.23- Vrednosti ukupne poroznosti određene preko živine porozimetrije kod uzoraka sa recikliranim agregatom

	ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
0	13,35	13,35	13,35	8,59	8,59	8,59	16,48	16,48	16,48	11,14	11,14	11,14
3m	9,98	7,45	7,58	5,61	2,44	2,83	10,41	11,16	9,21	6,44	5,62	4,27
6m	13,13	9,32	8,78	15,18	12,87	9,71	12,69	10,11	15,07	11,43	11,84	1,86

Rezultati dobijeni pomoću živine porozimetrije obuvataju primenjeni pritisak na uzorak, količinu utisnute žive, prečnik i zapreminu pora. Na osnovu ovih rezultata napravljeni su



dijagrami sa kumulativnom krivom utiskivanja koja daje kumulativni raspored pora i dijagrami sa diferencijalnim rasporedom pora po veličini (Prilog 12).

"Threshold" i kritični prečnik pora su važni za procenu transportnih karakteristika u uzorku a njihove vrednosti očitane sa dijagrama sa diferencijalnim rasporedom pora po veličini date su u Tabela VIII.24 za uzorke sa rečnim agregatom i Tabela VIII.25 za uzorke sa recikliranim agregatom.

Tabela VIII.24- Vrednosti "threshold" i kritičnog prečnika kod uzoraka sa rečnim agregatom

	ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	
0	d <sub>crit</sub>	0,04/2,5	0,04/2,5	0,04/2,5	0,027	0,027	0,027
	d <sub>th</sub>	2,88	2,88	2,88	0,03	0,03	0,03
3m	d <sub>crit</sub>	0,01/2,4	0,009/2,4	0,01/2,8	0,02/3,7	2,47	0,009/2,3
	d <sub>th</sub>	2,92	2,72	4,96	5,58	2,53	2,4
6m	d <sub>crit</sub>	0,02	0,009/2,5/4,3	0,006	0,01/2,5/3,9	2,23	2,49/5,0
	d <sub>th</sub>	0,04	6,3	0,01	5,5	2,36	8,9
	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2	
0	d <sub>crit</sub>	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
	d <sub>th</sub>	0,04	0,04	0,04	0,035	0,035	0,035
3m	d <sub>crit</sub>	0,01/2,5	0,008/2,5	0,008/2,7	0,01/2,4	2,4	2,65
	d <sub>th</sub>	3,18	2,78	3,36	3,13	3,0	2,99
6m	d <sub>crit</sub>	0,09/2,4	0,005/2,3	0,0072	0,007/2,3/3,2	0,007/0,06	0,008/2,3
	d <sub>th</sub>	2,53	2,39	0,0075	4,2	0,062	4,4

d<sub>crit</sub> – kritični prečnik pore  
d<sub>th</sub> – "threshold"

Tabela VIII.25- Vrednosti "threshold" i kritičnog prečnika kod uzoraka sa recikliranim agregatom

	ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	
0	d <sub>crit</sub>	0,009/0,03	0,009/0,03	0,009/0,03	0,009/0,03	0,009/0,03	
	d <sub>th</sub>	0,065	0,065	0,065	0,04	0,04	0,04
3m	d <sub>crit</sub>	0,01/2,7	0,009/2,4	0,008/2,4	0,02/2,5	0,007/2,4	2,5
	d <sub>th</sub>	4,11	3,1	2,6	2,76	2,64	2,73
6m	d <sub>crit</sub>	0,01/2,7	2,39	2,72	0,02/3,4/12	2,45/4,2	0,006/0,4/2,9
	d <sub>th</sub>	2,82	3,32	2,8	12,0	6,6	3,84
	ERMPC1	NRMC1	MRMC1	ERMPC2	NRMC2	MRMC2	
0	d <sub>crit</sub>	0,031	0,031	0,031	0,022	0,022	0,022
	d <sub>th</sub>	0,04	0,04	0,04	0,026	0,026	0,026
3m	d <sub>crit</sub>	0,02/2,3	0,011/2,6	0,007/2,3	0,01/2,4	0,007/2,3	0,005/2,4
	d <sub>th</sub>	2,56	3,0	2,9	2,5	2,3	2,43
6m	d <sub>crit</sub>	0,009/2,9	0,005/3,6	0,008/2,5	0,009/2,6	3,88	2,97
	d <sub>th</sub>	4,2	4,55	4,26	4,48	4,78	4,88

d<sub>crit</sub> – kritični prečnik pore  
d<sub>th</sub> – "threshold"





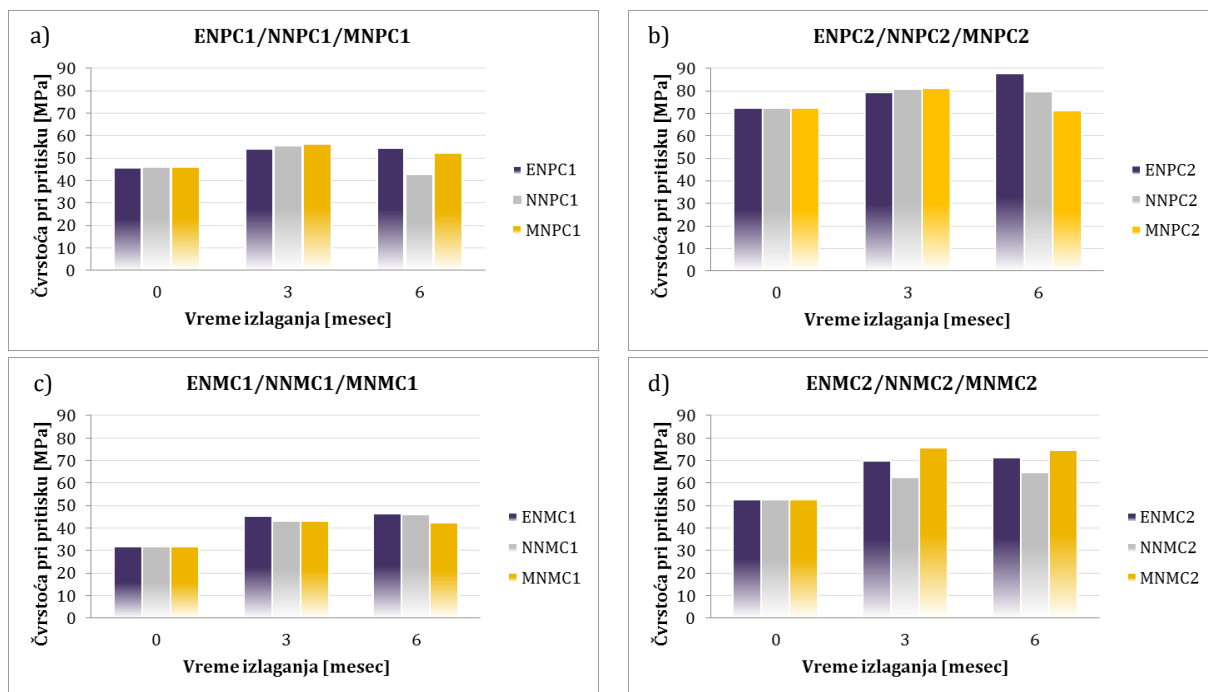
IX ANALIZA I DISKUSIJA  
REZULTATA



## 1. BETON SA REČNIM AGREGATOM

### 1.1. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati čvrstoće pri pritisku ispitivanih vrsta betona, nakon 3 i 6 meseci izlaganja uzoraka delovanju sulfatnih rastvora (5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i 5%  $\text{MgSO}_4$ ) i boravka u zasićenoj krečnoj vodi (etalonski uzorci), kao i njihove čvrstoće pri starosti od 28 dana, pre potapanja u sulfatne rastvore, dati su u Tabela VIII.10 i Tabela VIII.11, a grafički su prikazani na Slika IX.1.

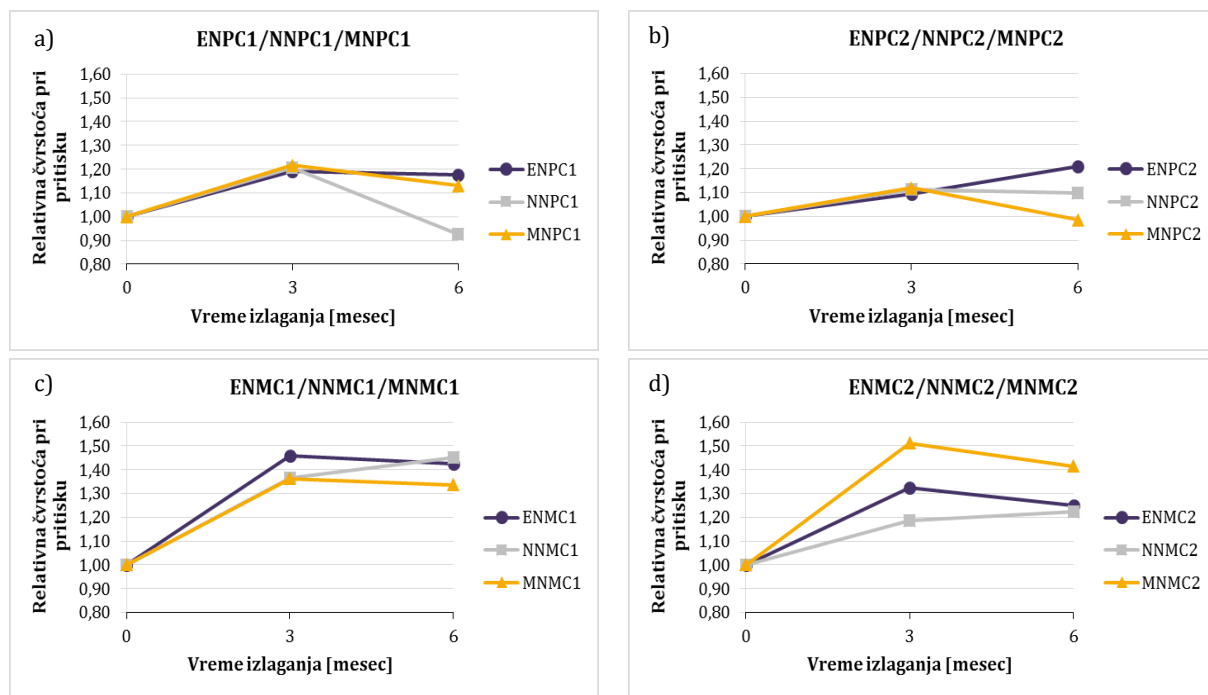


Slika IX.1 - Čvrstoća pri pritisku betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za sve mešavine sa rečnim agregatom;

a) CEM I, NA,  $w/c=0,55$ , b) CEM I, NA,  $w/c=0,38$ , c) CEM III, NA,  $w/c=0,55$ , d) CEM III, NA,  $w/c=0,38$

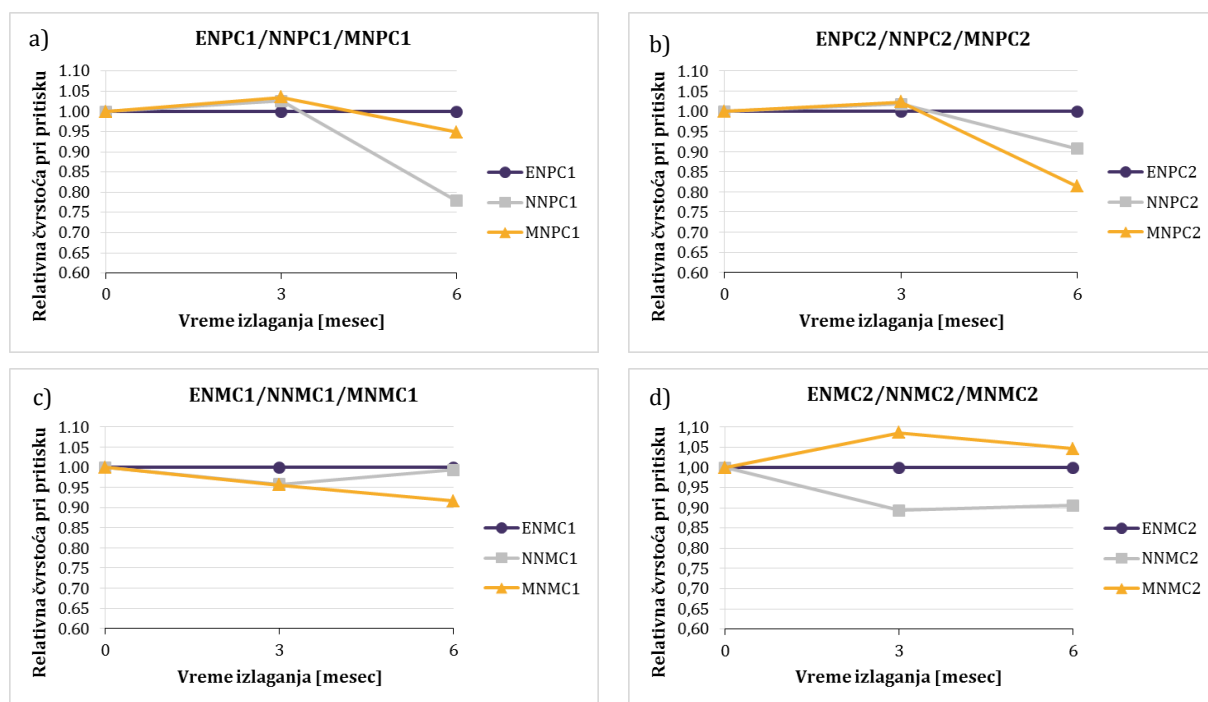
Radi preciznijeg sagledavanja prirasta čvrstoće betona kroz vreme, uzimajući u obzir vrstu rastvora kome su uzorci bili izloženi, formirani su odgovarajući dijagrami koji pokazuju promenu čvrstoće pri pritisku uzoraka koji su bili izloženi delovanju rastvora magnezijum ili natrijum sulfata u trajanju od 3 i 6 meseci, u odnosu na čvrstoću uzoraka pre izlaganja delovanju sulfatnih rastvora i prikazani su na Slika IX.2. Poredeći prikazane rezultate, može se zaključiti da:

- Svi uzorci pokazuju povećanje čvrstoće pri pritisku nakon 3 meseca izloženosti sulfatnim rastvorima u odnosu na početnu vrednost. Povećanje čvrstoće se kreće od 10% do 50%.
- Nakon 6 meseci izloženosti sulfatnim rastvorima većina uzoraka takođe pokazuje povećanje čvrstoće u odnosu na početnu vrednost. Povećanje čvrstoće ide i do 45%. Izuzetak je samo beton sa CEM I i  $w/c=0,55$  koji je bio izložen delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (NNPC1). Kod ovih uzoraka registrovan je pad čvrstoće od 7% (Slika IX.2a)



Slika IX.2 - Promena čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka sa rečnim agregatom u odnosu na etalonske uzorke pre potapanja u sulfatne rastvore; a) CEM I, NA, w/c=0,55, b) CEM I, NA, w/c=0,38, c) CEM III, NA, w/c=0,55, d) CEM III, NA, w/c=0,38

Promena čvrstoće pri pritisku uzoraka potopljenih u sulfatne rastvore u odnosu na čvrstoću pri pritisku odgovarajućih referentnih (etalonskih) uzoraka iste starosti prikazana je na Slika IX.3.



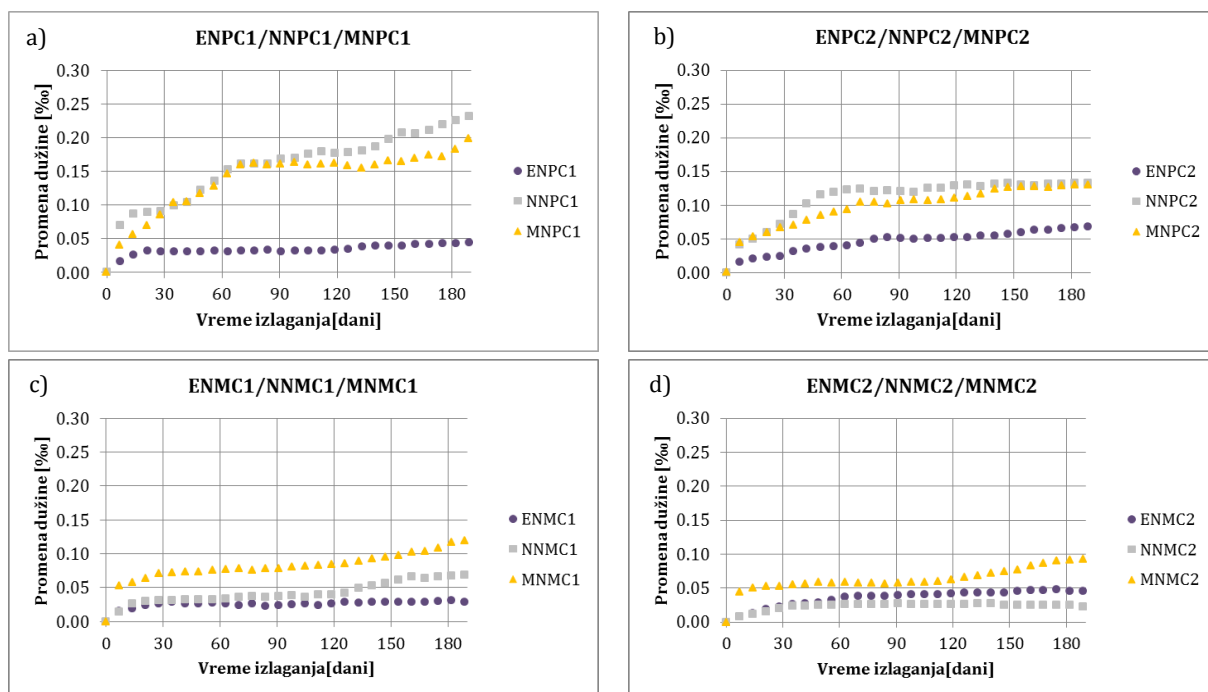
Slika IX.3 - Promene čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka sa rečnim agregatom izloženih delovanju rastvora sulfata u odnosu na etalonske uzorke iste starosti; a) CEM I, NA, w/c=0,55, b) CEM I, NA, w/c=0,38, c) CEM III, NA, w/c=0,55, d) CEM III, NA, w/c=0,38

Analizom dijagrama prikazanih na Slika IX.3, uočeno je:

- Betoni sa cementom CEM I, ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) nakon 3 meseca boravka u natrijum ili magnezijum sulfatu ne pokazuju značajne razlike u čvrstoći pri pritisku u odnosu na uzorke iz zasićene krečne vode (Slika IX.3a). S druge strane, nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima, svi uzorci pokazuju pad u čvrstoći u poređenju sa etalonskim uzorcima (Slika IX.3a, 3b). Najveće smanjenje, koje iznosi 22%, ima beton sa  $w/c=0,55$ , potopljen 6 meseci u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (NNPC1), Slika IX.3a.
- U slučaju betonskih uzoraka sa cementom CEM III i  $w/c=0,55$  (Slika IX.3c), potopljenih 3 meseca u oba sulfatna rastvora (NNMC1 i MNMC1), uočena su neznatna smanjenja u čvrstoći pri pritisku (do 5%), dok je za izloženost rastvoru magnezijum sulfata od 6 meseci smanjenje čvrstoće do 10%.
- Uzorci sa cementom CEM III i  $w/c=0,38$  (Slika IX.3d), potopljeni 3 i 6 meseci u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (NNMC2), imaju smanjenje čvrstoće pri pritisku do 10%, dok uzorci iste betonske mešavine potopljeni u rastvor  $\text{MgSO}_4$  (MNMC2) pokazuju izvesno povećanje čvrstoće za isti period.

## 1.2. Promena dužine

Rezultati praćenja promene dužine uzoraka koji su 6 meseci bili potopljeni u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili 5%  $\text{MgSO}_4$  kao i etalonskih uzoraka koji su bili potopljeni u zasićenu krečnu vodu (Prilog 9), grafički su predstavljeni na Slika IX.4.



Slika IX.4 - Promena dužine betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa rečnim agregatom;

a) CEM I, NA,  $w/c=0,55$ , b) CEM I, NA,  $w/c=0,38$ , c) CEM III, NA,  $w/c=0,55$ , d) CEM III, NA,  $w/c=0,38$

U Tabela IX.1 prikazane su stvarne vrednosti ekspanzije uzoraka nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorim. Za izračunavanje stvarnih vrednosti ekspanzije korišćen je izraz (IX.1):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{M(N),t} - \varepsilon_{E,t} \quad (IX.1)$$

Gde je:

- t - Posmatrani period u mesecima (3 ili 6)
- $\varepsilon_t$  - Stvarna ekspanzija betonskih uzoraka
- $\varepsilon_{M(N),t}$  - Izmerena ekspanzija betonskih uzoraka, potopljenih u rastvor natrijum sulfata ili magnezijum sulfata u periodu od 3 ili 6 meseci
- $\varepsilon_{E,t}$  - Izmerena ekspanzija etalonskih betonskih uzoraka, odgovarajuće strosti.

Dobijeni rezultati dati su u Tabela IX.1

Tabela IX.1 - Stvarne vrednosti ekspanzije za uzorke sa rečnim agregatom

Vreme držanja u sulfatnom rastvoru [meseci]	Vrsta betona							
	NNPC1	MNPC1	NNPC2	MNPC2	NNMC1	MNMC1	NNMC2	MNMC2
3	0,137	0,130	0,069	0,055	0,013	0,055	-0,013	0,017
6	0,181	0,139	0,055	0,055	0,036	0,086	-0,021	0,045

Analizom pojedinačnih dijagrama sa Slika IX.4 može se uočiti:

- Dijagram na Slika IX.4a: Uzorci sa CEM I i  $w/c=0,55$ , potopljeni u sulfatne rastvove, imaju veću ekspanziju od etalonskih i ta razlika se vremenom povećava. Ekspanzije uzoraka do 3 meseca izlaganja delovanju sulfatnih rastvora su međusobno iste. Povećanje dužine za taj period, u odnosu na etalonski uzorak, iznosi 0,137‰ odnosno 0,130‰. U periodu od 3-6 meseci uzorci potopljeni u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ispoljavaju veću ekspanziju, koja za period od 6 meseci iznosi 0,181‰.
- Dijagram na Slika IX.4b: Upoređenjem linearnih ekspanzija uzoraka sa CEM I i  $w/c=0,38$ , može se zaključiti da uzorci potopljeni u sulfatne rastvove imaju veću ekspanziju od etalonskih, ali da vrsta sulfatnog rastvora nema značajnog uticaja na vrednost izmerene ekspanzije. Takođe se uočava da se u periodu od 3-6 meseci stvarna ekspanzija nije povećala i ona na 6 meseci iznosi 0,055‰.
- Dijagram na Slika IX.4c: Upoređenjem linearnih ekspanzija uzoraka sa CEM III i  $w/c=0,55$ , uočava se da uzorci potopljeni u rastvor magnezijum sulfata imaju veće vrednosti ekspanzije u odnosu na uzorke potopljene u rastvor natrijum sulfata i u odnosu na etalonske uzorke u toku celog posmatranog perioda, dok uzorci potopljeni u rastvor natrijum sulfata, pokazuju povećanje dužine tek nakon 120 dana boravka u predmetnom rastvoru. Stvarne vrednosti ekspanzije su male i iznose 0,036‰ odnosno 0,086‰, nakon 6 meseci boravka u odgovarajućim rastvorima.
- Dijagram na Slika IX.4d: Upoređenjem linearnih ekspanzija uzoraka sa CEM III i  $w/c=0,38$ , uočava se da uzorci potopljeni u rastvor magnezijum sulfata imaju veće vrednosti ekspanzije u odnosu na uzorke potopljene u rastvor natrijum



sulfata i u odnosu na etalonske uzorke u toku celog posmatranog perioda, dok uzorci potopljeni u rastvor natrijum sulfata, ne pokazuju povećanje dužine u odnosu na etalonske uzorke. Stvarna vrednosti ekspanzije uzoraka u rastvoru magnezijum sulfata, nakon 6 meseci je mala i iznosi 0,045‰.

Na bazi prethodno napisanih zaključaka, može se izvući hipoteza da je razlika u ekspanziji između etalonskih uzoraka i uzoraka potopljenih u oba sulfatna rastvora, koji su spravljani sa CEM I i nižim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,38$ ), kao i uzoraka sa CEM III, za oba vodocementna faktora ( $w/c=0,38$  i  $w/c=0,55$ ) minorna. To su betonske mešavine NPC2, NMC1 i NMC2. Da bi se proverila ova hipoteza, primenjeni su statistički testovi koji porede varijanse dva uzorka ( $S^2$ ) i njihove aritmetičke sredine ( $\bar{x}$ ). Tetiranje je obavljeno međusobnim upoređenjem vrednosti promena dužine uzoraka od iste betonske mešavine, koji su držani u različitim sulfatnim rastvorima, sa promenom dužine odgovarajućih etalonskih uzoraka. Parametri za oba statistička testa prikazani su u Tabela IX.2 a rezultati testiranja u Tabela IX.3.

Broj izmerenih vrednosti za svaki set je 27.

Za procenu postavljenih hipoteza korišćene su testne karakteristike  $F_0$  za poređenje varijansi i  $t_0$  za poređenje aritmetičkih sredina. Iz tabele [182] je na osnovu izabranog stepena značajnosti ( $\alpha=0,05$ ) i stepeni slobode ( $v=n-1=26$ ) očitana vrednost testne statistike  $F_\alpha$  (kvantil Snedekove F raspodele) koja je potrebna kod poređenja varijansi i u ovom slučaju iznosi 1,93.

Za testiranje aritmetičkih sredina, testna statistika  $t_\alpha$  (kvantil Studentove raspodele) je različita i zavisi od izračunate vrednosti  $v$  a njene vrednosti su date u Tabela IX.3.

*Tabela IX.2 - Parametri za testiranje uzoračke varijanse i aritmetičke sredine*

Par.	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
$\bar{x}$	0,04528	0,10858	0,09615	0,02503	0,04023	0,07955	0,03478	0,02300	0,06162
$S^2$	0,00029	0,00116	0,00097	0,00004	0,00026	0,00047	0,00016	0,00004	0,00030

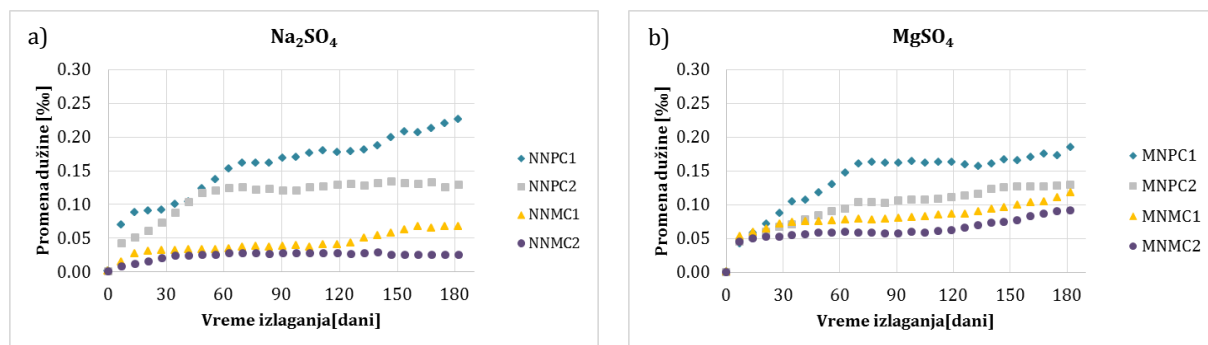
*Tabela IX.3 - Parametri za testiranje uzoračke varijanse i aritmetičke sredine*

Par.	ENPC2 NNPC2	ENPC2 MNPC2	ENMC1 NNMC1	ENMC1 MNMC1	ENMC2 NNMC2	ENMC2 MNMC2
$F_0$	3,978	3,306	7,052	11,825	3,531	1,924
$F_0 > F_\alpha$	da	da	da	da	da	ne
$t_0$	8,8026	7,5890	4,6713	12,7460	4,4110	6,626
$v$	38,25	40,40	33,90	30,37	38,20	52,00
$t_\alpha$	2,0264	2,0211	2,0317	2,0423	2,0264	2,01
$t_0 > t_\alpha$	da	da	da	da	da	da

Na osnovu rezultata testa može se zaključiti da postavljena hipoteza nije potvrđena i da se ne može prihvatiti, jer posmatrani setovi (parovi) nemaju iste varijanse i aritmetičke sredine pri stepenu značajnosti od 0,05. To znači da posmatrane betonske mešavine

(NPC2, NMC1 i NMC2) potopljene 6 meseci u rastvore 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili 5%  $\text{MgSO}_4$  imaju različitu ekspanziju u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke i da sulfatni rastvori imaju uticaja na ekspanziju posmatranih uzoraka.

Rezultati linearne ekspanzije mogu se prikazati i u zavisnosti od vrste rastvora, Slika IX.5.



Slika IX.5 - Promena dužine betonskih uzoraka sa rečnim agregatom;  
a) u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) u rastvoru  $\text{MgSO}_4$

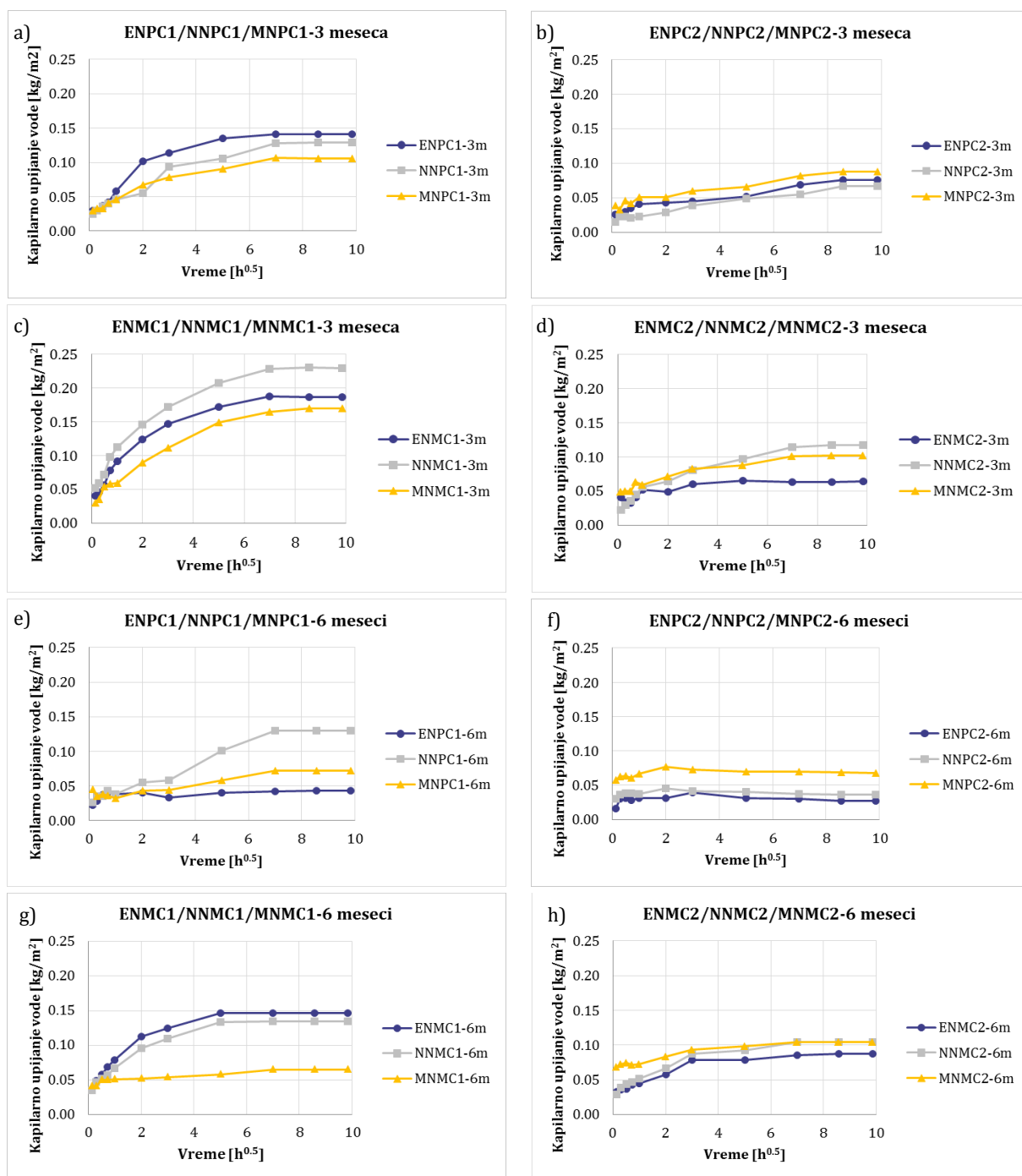
Sa dijagrama na Slika IX.5a, na kome su prikazane promene dužine betonskih uzoraka potopljenih u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , jasno se uočava da vrsta cementa (mineraloški sastav) ima uticaja na veličinu ekspanzije. Naime, betoni spravljeni sa cementom CEM I, bez obzira na vrednost w/c imaju veću ekspanziju u odnosu na betone spravljene sa CEM III. Ako se posebno upoređuju vrednosti ekspanzija betona spravljenih sa CEM I, uočiće se da vodocementni faktor ima uticaja na rezultat, tj. da se značajno veće vrednosti ekspanzije dobijaju kod betona sa w/c=0,55. U slučaju betona spravljenih sa CEM III uticaj vodocementnog faktora je minoran.

Analizom dijagrama na Slika IX.5b, na kome su prikazane promene dužine betonskih uzoraka potopljenih u rastvor  $\text{MgSO}_4$ , vidi se uticaj vrste cementa na veličinu ekspanzije, odnosno, da betoni spravljeni sa CEM I imaju veće vrednosti ekspanzija od betona sa cementom CEM III, ali i da vodocementni odnos, takođe ima uticaj na vrednost ekspanzije kod betona spravljenih sa CEM I, tako da su razlike u ekspanziji betona sa CEM I i w/c=0,38 i betona sa CEM III (sa oba w/c) male.

Na osnovu svih prikazanih rezultata, uočava se da beton sa CEM I i w/c=0,55 ima najveće vrednosti ekspanzije u oba sulfatna rastvora i da betoni sa manjim vodocementnim faktorom imaju manju ekspanziju u poređenju sa betonima koji imaju viši vodocementni faktor.

### 1.3. Kapilarno upijanje vode

Rezultati kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka dati su u Prilogu 11. Na osnovu njih, na Slika IX.6 prikazana je kinetika kapilarnog upijanja uzoraka sa prirodnim agregatom, nakon što su 3 i 6 meseci bili izloženi delovanju sulfatnih rastvora.



Slika IX.6 - Kapilarno upijanje vode uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa rečnim agregatom;

a) CEM I, NA,  $w/c=0,55$ , 3 meseca, b) CEM I, NA,  $w/c=0,38$ , 3 meseca, c) CEM III, NA,  $w/c=0,55$ , 3 meseca, d) CEM III, NA,  $w/c=0,38$ , 3 meseca, e) CEM I, NA,  $w/c=0,55$ , 6 meseci, f) CEM I, NA,  $w/c=0,38$ , 6 meseci, g) CEM III, NA,  $w/c=0,55$ , 6 meseci, h) CEM III, NA,  $w/c=0,38$ , 6 meseci

Usled različitih fizičkih procesa, hemijskih reakcija i produkata koji se javljaju tokom potapanja uzoraka u rastvor natrijum i magnezijum sulfatu, nije jednostavno analizirati dobijene rezultate od kapilarnog upijanja vode. Na osnovu prikazanih dijagrama za upijanje vode nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima, Slika IX.6 (dijagrami a, b, c i d) i analize mogućnosti uspostavljanja zajedničke korelacije između kapilarnog

upijanja i vremena upijanja vode, po vrstama betona uočeno je da vrsta sulfatnog rastvora nema uticaja na način - kinetiku upijanja vode, već da kinetika upijanja vode zavisi od vrste betona (od vrste cementa i vodocementnog faktora). Izvedeni zaključak se ne može primeniti na rezultate kapilarnog upijanja vode nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, jer je na osnovu dijagrama, Slika IX.6 (dijagrami e, f, g i h) i analize mogućnosti uspostavljanja zajedničke korelacije između kapilarnog upijanja i vremena upijanja vode, po vrstama betona zaključeno da, pored vrste betona, na kinetiku kapilarnog upijanja vode utiče i vrsta rastvora.

Sa predmetnih dijagrama (Slika IX.6), takođe se može uočiti, da betoni sa nižim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,38$ ) imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja vode, bez obzira na vrstu rastvora ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  i zasićena krečna voda).

Analizom koeficijenata kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka i uzoraka nakon 3 i 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima (Tabela IX.4), uočeno je:

- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka svih ispitivanih vrsta betona smanjuju se sa povećanjem starosti.
- Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka zavise od vrste cementa i vodocementnog faktora i veće su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I, kao i kod betona sa  $w/c=0,55$  u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$ , bez obzira na starost uzoraka.
- Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su 3 ili 6 meseci boravili u sulfatnim rastvorima, zavise od vrste cementa i vodocementnog faktora i veće su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I, kao i kod betona sa  $w/c=0,55$  u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$ , u okviru istog sulfatnog rastvora.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci) su veći od odgovarajućih vrednosti nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima.
- Razlika između vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su bili potopljeni 3 meseca u sulfatne rastvore i etalonskih uzoraka je takva, da se ne može jasno uočiti uticaj analiziranih parametara na promenu vrednosti ovog koeficijenta. Dobijene vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode su i veće i manje i jednake sa vrednostima odgovarajućih etalonskih uzoraka i ne može se uočiti zakonitost njegove promene.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka nakon 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore su manji od odgovarajućih koeficijenata uzoraka betona koji su bili potopljeni u sulfatne rastvore, osim kod betona sa CEM III i  $w/c=0,55$ .
- Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 3 meseca potapanja u sulfatne rastvore su uglavnom veće (kod 6 od 8 analiziranih kombinacija) od odgovarajućih koeficijenata uzoraka betona nakon 6 meseci boravka u istim rastvorima. Ova dva "odstupanja" od opšteg trenda su mala po apsolutnim vrednostima, tako da se može zaključiti da se koeficijenti kapilarnog upijanja vode smanjuju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rastvorima.

Tabela IX.4 - Koeficijenti kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom, etaloni i nakon 3 i 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

A <sub>i</sub> [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]	Uzorci											
	ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
0 meseci	0,109			0,036			0,127			0,067		
3 meseci	0,027	0,021	0,018	0,010	0,010	0,013	0,034	0,042	0,030	0,013	0,019	0,018
6 meseci	0,008	0,020	0,012	0,006	0,008	0,014	0,029	0,027	0,012	0,016	0,018	0,020

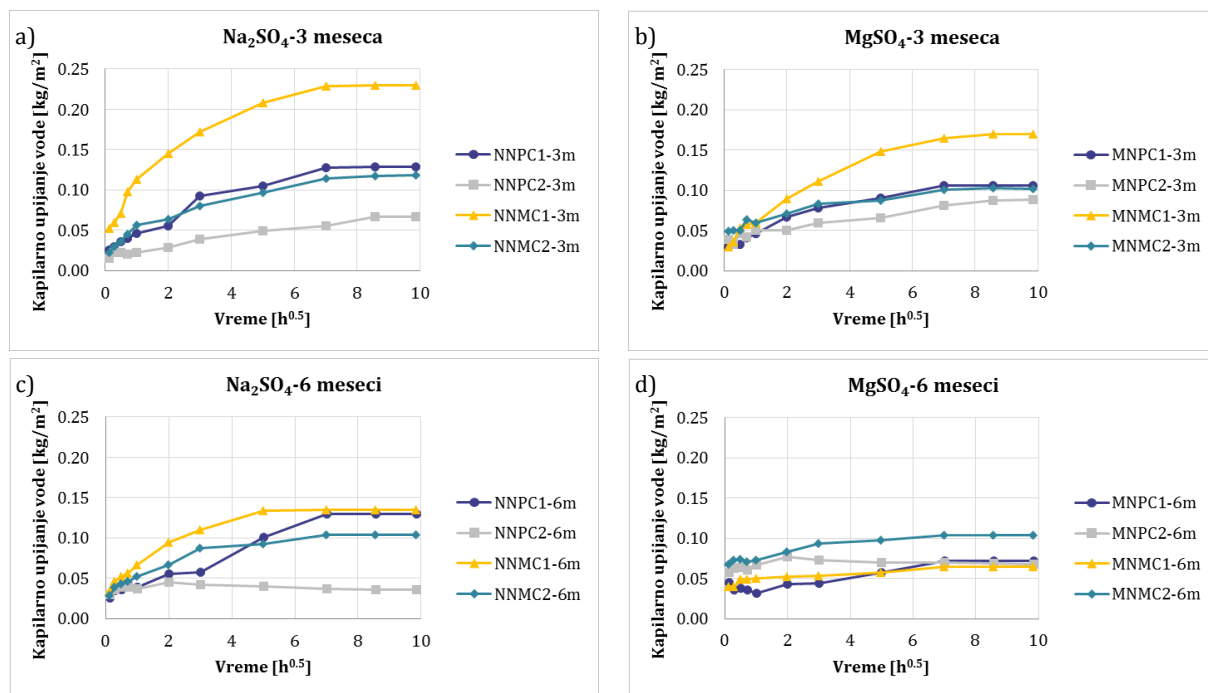
Konačne vrednosti upijanja vode posmatranih betonskih uzoraka pre potapanja u sulfatne rastvore i nakon 3 i 6 meseci boravka u njima date su u Tabela IX.5.

Tabela IX.5 - Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka sa rečnim agregatom [kg/m<sup>2</sup>]

Vreme [mesec]	Uzorci											
	ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
0	0,653			0,193			0,760			0,367		
3	0,141	0,129	0,106	0,076	0,067	0,088	0,187	0,230	0,170	0,064	0,118	0,102
6	0,043	0,130	0,072	0,027	0,036	0,068	0,147	0,135	0,065	0,087	0,104	0,104

Na osnovu vrednosti datih u prethodnoj tabeli, uočava se da najmanje kapilarno upijanje vode ima beton sa CEM I i w/c=0,38 (ENPC2/NNPC2/MNPC2) za sva tri posmatrana perioda, bez obzira na vrstu rastvora. Najveće vrednosti kapilarnog upijanja vode ima beton sa CEM III i w/c=0,55 (ENMC1/NNMC1/MNMC1), za sva tri posmatrana perioda i sve rastvore, osim u slučaju uzoraka MNMC1 nakon 6 meseci boravka u MgSO<sub>4</sub>. Upoređenjem vrednosti kapilarnog upijanja vode pre potapanja u sulfatne rastvore sa vrednostima nakon 3 i 6 meseci nastavka nege u krečnoj vodi ili boravka u sulfatnim rastvorima, uočava se da su se vrednosti upijanja vode značajno smanjile. Razlozi smanjenja upijanja vode su najverovatnije hidratacija cementa, a u nekim slučajevima i popunjavanje pora produktima sulfatne korozije. Uticaj vrste cementa na veličinu kapilarnog upijanja vode se najbolje vidi na etalonskim uzorcima, a tumači se pomoću stepena hidratacije cementa. Naime, cement CEM I ima bržu hidrataciju od CEM III, pa su vrednosti kapilarnog upijanja vode manje. Betoni spravljeni sa CEM I, generalno imaju manje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon boravka 3 i 6 meseci u sulfatnim rastvorima u odnosu na betone za čije spravljanje je korišćen CEM III. Takođe se vidi da manji vodocementni faktor doprinosi smanjenju kapilarnog upijanja vode, bez obzira na dužinu boravka u rastvoru i bez obzira na vrstu rastvora.

Rezultati kapilarnog upijanja vode razdvojeni po rastvorima Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub> dati su na Slika IX.7.



Slika IX.7 - Kapilarno upijanje vode betonskih uzoraka sa rečnim agregatom; a) u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nakon 3 meseca, b) u MgSO<sub>4</sub> nakon 3 meseca c) u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nakon 6 meseci, d) u MgSO<sub>4</sub> nakon 6 meseci

Analizom prikazanih dijagrama može se primetiti da betonski uzorci sa sulfatno-otpornim cementom, CEM III i w/c=0,55, imaju najveće vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 i 6 meseci boravka u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i nakon 3 meseca boravka u rastvoru MgSO<sub>4</sub>. Takođe se može uočiti da su vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka sa sulfatno-otpornim cementom, CEM III i w/c=0,55 nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, značajno manje u odnosu na rezultate dobijene nakon 3 meseca. Smanjenje upijanja vode je registrovano i na ostalim betonskim mešavinama, ali je razlika između upijanja vode na 3 i 6 meseci zanemarljiva.

Ako se međusobno uporede odgovarajuće vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima uočiće se da betoni sa w/c=0,55 imaju veće upijanje vode nakon boravka u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u odnosu na upijanje vode nakon boravka u rastvoru MgSO<sub>4</sub>, što se ne može potvrditi kod betona sa w/c=0,38.

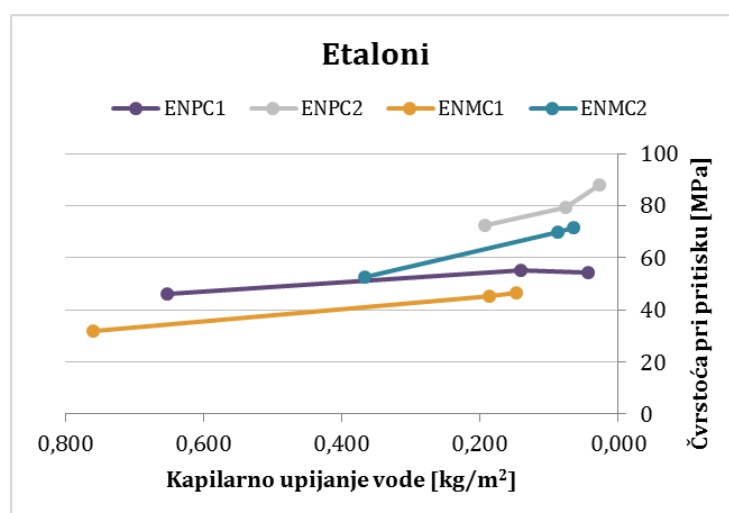
Na osnovu prikazanih analiza može se zaključiti da vrsta cementa ima dominantan uticaj na vrednost kapilarnog upijanja vode i kod uzoraka koji su negovani u krečnoj vodi i kod uzoraka koji su 3 ili 6 meseci bili izloženi delovanju sulfatnim rastvorima. Betoni spravljeni sa CEM I imaju manje kapilarno upijanje vode u odnosu na betone spravljene sa CEM III. Uticaj ima i vodocementni faktor jer smanjenjem vodocementnog faktora sa vrednosti 0,55 na 0,38, uzrokuje redukciju vrednosti kapilarnog upijanja, osim kod uzoraka MNMC1/MNMC2 potopljenih 6 meseci u MgSO<sub>4</sub>, Slika IX.7.

Radi uspostavljanja veze između konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode i čvrstoće betona pri pritisku, formirana je Tabela IX.6.

Tabela IX.6 - Vrednosti kapilarnog upijanja vode  $U_v$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] i odgovarajućih čvrstoća pri pritisku  $f_p$  [MPa], betonski uzorci sa rečnim agregatom

Vreme [mesec]	Parametar	Uzorci											
		ENPC1	NNPC1	MNPC1	ENPC2	NNPC2	MNPC2	ENMC1	NNMC1	MNMC1	ENMC2	NNMC2	MNMC2
0	$U_v$	0,653			0,193			0,760			0,367		
	$f_p$	46,3			72,5			31,8			52,8		
3	$U_v$	0,141	0,129	0,106	0,076	0,067	0,088	0,187	0,230	0,170	0,064	0,118	0,102
	$f_p$	54,4	55,8	56,3	79,3	80,7	81,1	45,3	43,4	43,3	70,0	62,6	76,0
6	$U_v$	0,043	0,130	0,072	0,027	0,036	0,068	0,147	0,135	0,065	0,087	0,104	0,104
	$f_p$	55,1	42,9	52,3	87,9	79,7	71,5	46,4	46,1	42,5	71,4	64,7	74,7

Na osnovu prikazanih rezultata uspostavljene su zavisnosti između vrednosti čvrstoće pri pritisku i konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka po vrstama betona i prikazane na Slika IX.8.



Slika IX.8 - Promena čvrstoće pri pritisku i konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka kroz posmatrane periode (početni, 3 i 6 meseci)

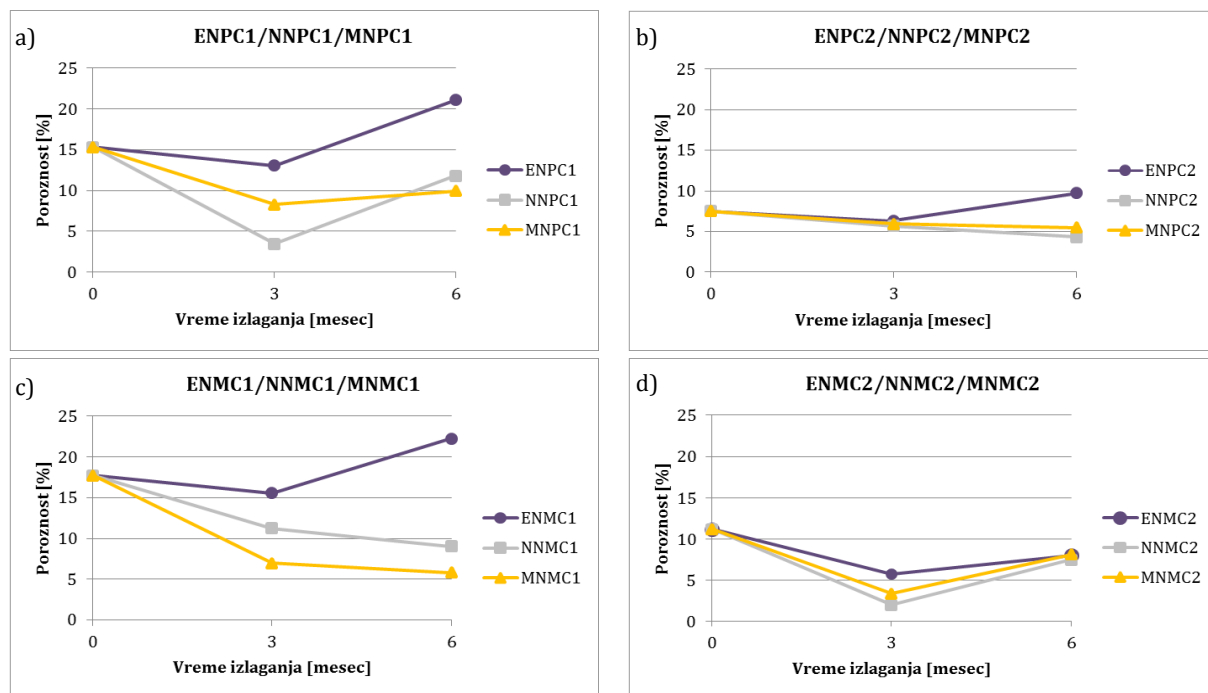
Prva vrednost na dijagramu (gledano s leva na desno) za svaku seriju, predstavlja početnu čvrstoću pri pritisku/kapilarno upijanje, sledeća tačka su vrednosti nakon 3 meseca izlaganja delovanju sulfatnih rastvora i poslednja nakon 6 meseci. Prikazani dijagrami potvrđuju opšte poznat stav da se sa smanjenjem vrednosti kapilarnog upijanja vode povećavaju čvrstoće pri pritisku, kroz vreme, ali i da vrsta betona, odnosno vrsta cementa i vodocementni faktor, imaju značajan uticaj na oba parametra, tako da se ne može uspostaviti jedinstvena korelaciona veza između čvrstoće pri pritisku i kapilarnog upijanja vode.

Analizom rezultata kapilarnog upijanja vode i čvrstoće pri pritisku uzoraka potopljenih u sulfatne rastvore, zaključeno je da se ne mogu uspostaviti korelacione veze između ovih parametara, u funkciji perioda izloženosti, ni po betonskim mešavinama. Razlog za

ovakav zaključak je što na vrednosti oba parametra različito utiču fizički i hemijski procesi koji se dešavaju tokom izloženosti betonskih uzoraka sulfatnim rastvorima.

#### 1.4. Živina porozimetrija-ukupna poroznost, kritični prečnik i threshold

Promene vrednosti ukupne poroznosti etalonskih uzoraka kao i onih izloženih delovanju sulfata za period pre potapanja u sulfatne rastvore kao i nakon 3 i 6 meseci držanja u njima prikazane su na Slika IX.9 raspoređene prema vrsti betona.



Slika IX.9 - Promena ukupne poroznosti uzoraka betonskih mešavina od rečnog agregata po mešavinama

Na osnovu Slika IX.9 se vidi da nakon 3 meseca držanja uzoraka u rastvoru dolazi do smanjenja ukupne poroznosti u odnosu na početno stanje, bez obzira u koji su rastvor potopljeni (krečna voda,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili  $\text{MgSO}_4$ ) i o kojoj vrsti betona se radi.

Dobijeni rezultati se mogu objasniti napredovanjem procesa hidratacije kod etalonskih uzoraka (ENPC1, ENPC2, ENMC1 i ENMC2). Manji vodocementni faktor je, prema očekivanjima, dao manju poroznost. Na ovu činjenicu ukazuje poređenje vrednosti ukupne poroznosti ENPC1 sa ENPC2. Tome je doprinelo smanjeno rastojanje između čestica, te bolji kontakt što je imalo za posledicu povećanje stepena hidratacije [183].

Uticaj metalurškog cementa CEM III na vrednost ukupne poroznosti nakon 28 dana (označeni sa "0") se ogleda kroz povećanje poroznosti u odnosu na etalon iste starosti napravljen od cementa CEM I, sa istim vodocementnim faktorom. Ono je očekivano s obzirom da je proces očvršćavanja ove vrste cementa usporen. Naime, poznato je da metalurški cement predstavlja mešavinu Portland cementa i najmanje 36% zgure. Zbog smanjenja sadržaja Portland cementa dodatno dolazi do izražaja "dillution" efekat. Prisustvo ovog efekta označava da zbog smanjenja količine Portland cementa u jedinici



zapremine maltera/betona dolazi i do smanjenja uticaja ovog veziva na sve osobine pomenutih betona.

Uzorci koji su bili 3 meseca potopljeni u sulfatnim rastvorima pokazuju smanjenje poroznosti u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke, kod betona sa većim vodocementnim faktorom kod obe vrste cementa (Slika IX.9a i Slika IX.9c). To ukazuje na početak reakcije jona iz sulfatnih rastvora sa cementnim kamenom, stvaranjem produkata hemijskih reakcija koji se talože u sistemu pora i smanjuju ukupnu poroznost. Kod sulfatnih rastvora gde je brzina hemijske reakcije veća, količina formiranih produkata je takođe veća. Kod betonske mešavine NPC1 reakcija se brže odvija u uslovima kada su uzorci potpuno potopljeni u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dok je kod betonske mešavine NMC1 situacija obrnuta. Moguće objašnjenje za pojavu brže hemijske reakcije u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u odnosu na rastvor  $\text{MgSO}_4$  za sistem NPC1 može biti formiranje magnezijum-hidroksida (brucita) kao spoljašnjeg sloja koji je prepreka prodoru sulfatnih jona u unutrašnjost uzorka. U slučaju uzoraka sa cementom CEM III stvara se manja količina brucita u odnosu na uzorke sa cementom CEM I (Prilog 15).

Nakon 6 meseci dolazi do povećanja poroznosti uzoraka u odnosu na period od 3 meseca, osim kod nekoliko uzoraka. Ovo povećanje je najizraženije kod uzoraka etalona za veći vodocementni faktor. Veoma je interesantno razmotriti razloge ove pojave. U literaturi nisu nađeni radovi koji su se bavili isključivo promenama morfoloških i teksturalnih promena produkata hidratacije kroz vreme. Rezultati ukupne poroznosti nakon 6 meseci nagoveštavaju da se termodinamička ravnoteža hidratiranih produkata iz nekih razloga poremetila što je verovatno dovelo do fazne transformacije pojedinih produkata hidratacije. Kod nekih uzoraka izloženih dejstvu rastvora sulfata dolazi do usporavanja procesa smanjenja ukupne poroznosti (NNPC2, MNPC2, NNMC1 i MNMC1) (Slika IX.9b i Slika IX.9c), dok kod drugih dolazi do povećanja. Ipak, vrednosti ukupne poroznosti kod ovih uzoraka su manji ili jednake vrednostima etalonskih uzoraka.

### **1.5. Živina porozimetrija- kritični prečnik i "threshold"**

Na osnovu rezultata živine porozimetrije dobijeni su dijagrami diferencijalnog rasporeda pora po veličini i dati u Prilogu 13. Uočava se da kod većine uzoraka, bez obzira na starost, postoji bimodalni raspored pora. Oštro definisan početni pik se nalazi u oblasti prečnika pora čije vrednosti se kreću u granicama 2-5 $\mu\text{m}$  što odgovara velikim kapilarama dok je drugi pik pomeren ka manjim vrednostima i odgovara prečnicima pora u oblasti 0,01-0,09 $\mu\text{m}$ . Ipak, u nekim slučajevima se i drugi pik javlja u oblasti velikih pora.

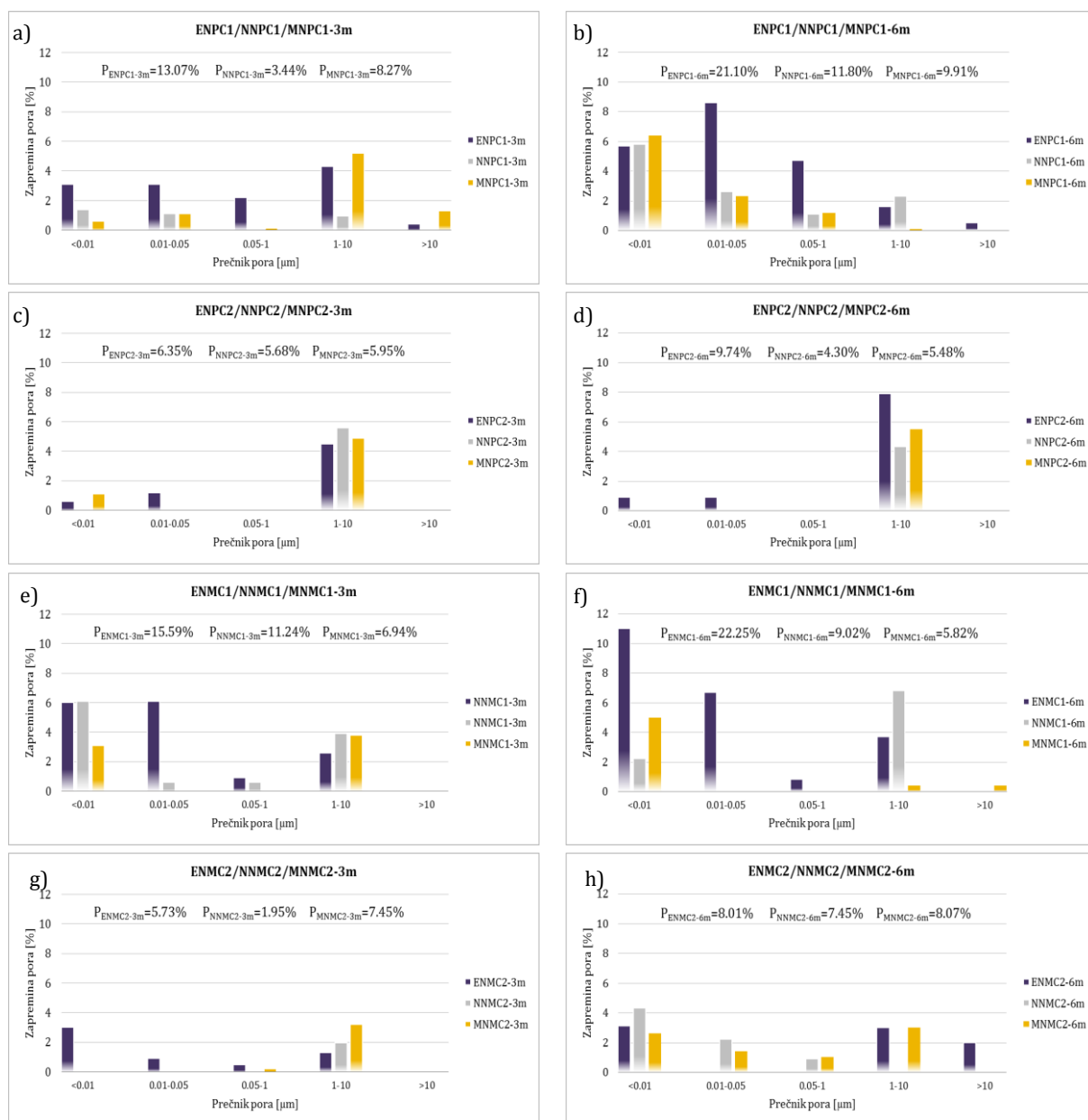
Vrednosti kritičnog prečnika i "threshold"-a su dati u Poglavlju Eksperimentalno istraživanje, (Tabela VIII.24). Primećuje se da se vrednosti kritičnog prečnika nakon 3 meseca boravka u rastvorima smanjuju a potom na 6 meseci donekle stabilizuju.

Međutim, kod "threshold"-a vrednosti (Tabela VIII.24) nisu u saglasnosti sa činjenicom iznetom u literaturi, gde se navodi da one postaju manje tokom vremena negovanja

uzoraka i smanjenjem vodocementnog faktora. Za većinu uzorake napravljenih sa prirodnim agregatom bez obzira da li su etaloni ili su izloženi delovanju sulfata vrednosti "threshold"-a su maksimalne nakon 3 meseca a potom se smanjuju na 6 meseci. Izuzetak su uzorci sa oznakom NNPC1, MNPC2, ENMC2 i MNMC2 koji imaju maksimalne vrednosti "threshold"-a za posmatrani period od 6 meseci.

### 1.6. Živina porozimetrija-raspodela pora po veličini

Na osnovu rezultata dobijenih pomoću živine porozimetrije napravljena je raspodela pora po veličini i rezultati su dati u Prilogu 12. Ovi rezultati prikazani preko dijagrama, raspoređeni po betonskim mešavinama i po periodu izlaganja rastvoru dati su na Slika IX.10.



Slika IX.10- Raspodela pora po veličini za etalonske uzorke i uzorke izložene delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub> kod uzoraka sa rečnim agregatom, za oba perioda izlaganja

Pri analizi raspodele pora po veličini potrebno je imati u vidu nekoliko činjenica. Naime, ispitivanja na SEM-u ukazuju da u procesu očvršćavanja cementa reakcija između vode i cementa kreće sa procesom rastvaranja čestica Portland cementa i prelaskom jona u vodeni rastvor. Kada koncentracija jona u rastvoru dostigne zasićenje, nastaju prvi kristali u prostoru između zrna. Ukoliko ima dosta vode (vodocementni factor veći od 0,42) koja popunjava prostor između zrna cementa, zrna postaju udaljena a rast kristala produkata hidratacije je neometan u različitim kristalografskim ravnima. Ovakav rast kristala proizvodi kapilarnu poroznost. Kada se proces hidratacije odvija na ovaj način kažemo da nastaju *spoljašnji produkti hidratacije ("outer products")* [183]. Zato se kod etalonskog uzorka ENPC1, gde je vodocementni factor 0,55 javljaju posebno male i srednje kapilarne pore, Slika IX.10. Njihov sadržaj se povećava nakon 6 meseci. Ova činjenica je u skladu sa napredovanjem procesa hidratacije i kristalizacije njihovih produkata, što ima za posledicu povećanje ukupne poroznosti i udela kapilarnih pora kod betonske mešavine sa vodocementnim faktorom 0,55. Kod etalonskih uzoraka ENPC2, sa manjim vodocementnim faktorom (0,38) sadržaj gore pomenutih pora se smanjuje, odnosno nestaje. Naime, kada je vodocementni faktor između 0,36 i 0,42, kao što je bio u betonskim mešavinama u ovom eksperimentu ( $w/c=0,38$ ), nema slobodnog prostora između zrna cementa. U tim uslovima dolazi do reakcije čvrsto-čvrsto koja se odvija difuzijom pri čemu nastaju produkti hidratacije u okviru zrna cementa. Produkti hidratacije su u obliku manjih kristala slabo definisane oblika, koji proizvode malu poroznost. Kada proces hidratacije teče u ovakvim uslovima kaže se da nastaju *unutrašnji produkti hidratacije ("inner products")* [183]. U ovakvim uslovima kapilarna poroznost je svedena na minimum, a čvrstoća betona je daleko veća. Ova saznanja su doprinela uvođenju koncepta pravljenja betona sa velikim čvrstoćama korišćenjem malih vodocementnih faktora. Otuda rezultati živine porozimetrije pokazuje veoma malu količinu malih i srednjih kapilarnih pora kod etalona ENPC2 nakon 3 meseca, Slika IX.10c. Ako uporedimo rezultate raspodele pora nakon 3 i 6 meseci, kod ove betonske mešavine, možemo zaključiti da je nakon 6 meseci udeo malih i srednjih kapilara skoro na istom nivou kao kod uzorka starosti 3 meseca, što nas upućuje na zaključak da je proces hidratacije kod ove betonske mešavine skoro završen nakon 3 meseca.

Kada su u pitanju uzorci koji su bili potopljeni u rastvore  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ , promene u raspodeli veličina pora nastaju usled reakcije sulfatnih jona sa produktima hidratacije, pri čemu nastaju produkti (etringit, gips) sa daleko većom zapreminom. Reakcija se odvija na mestima gde se nalaze produkti hidratacije. Do tih mesta sulfatni joni stižu transportom kroz kapilarne pore. Gips i etringit kada nastanu kristališu u kapilarnim porama ili u gelskoj strukturi. Promene u gelskoj strukturi nije moguće pratiti putem živine porozimetrije, ali promene u kapilarnoj poroznosti je moguće. Veća zapremina ovih produkata će učiniti da se ili smanji efektivni prečnik pore u kojoj se dešava hemijska reakcija ili da se pora potpuno popuni sa produktima reakcije (nestane). Ukoliko se smanjuje prečnik pora data pora može da pređe u kategoriju sa manjim opsegom prečnika pora na dijagramu. Na taj način se uvećava udeo tih pora u tom opsegu. Tako se može desiti da udeo tih pora postane veći od udela pora istog opsega

prečnika kod etalona. Osim smanjenja prečnika pore, udeo pora može postati veći ukoliko dolazi do ispiranja produkata hidratacije, tj. rastvaranja produkata hidratacije i njihovog prelaska u spoljašnji rastvor. U tom slučaju dolazi do povećanja kapilarne poroznosti. Treba napomenuti da pri nastanku produkata u reakciji sa sulfatnim jonima pri kristalizaciji može doći do pucanja zidova pora i njihovog ukрупnjavanja. U tom slučaju se povećava udeo krupnih kapilarnih pora.

Naime sa Slika IX.10a se može uočiti da su kod etalonskih uzoraka sa CEM I i  $w/c=0,55$  (ENPC1) zastupljene pore svih intervala, nakon oba posmatrana perioda (Slika IX.10a i Slika IX.10b), dok u slučaju manjeg vodocementnog faktora  $w/c=0,38$  (Slika IX.10c i Slika IX.10d), skoro jedino postojeće pore su one veličine  $1-10\mu\text{m}$ , kod svih uzoraka i za oba posmatrana perioda.

Raspodela pora betonskih uzoraka sa CEM I i  $w/c=0,55$  potopljenih u sulfatne rastvore, prikazana na Slika IX.10a, ukazuje da nakon 3 meseca izlaganja rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , manje je pora svih veličina u odnosu na etalonske uzorke iste starosti a dominantne su one veličine do  $0,05\mu\text{m}$ , dok uzorci potopljeni u rastvoru  $\text{MgSO}_4$  pokazuju manje pora veličine do  $1\mu\text{m}$  a dominantne su krupne pore veličine  $1-10\mu\text{m}$ . U poređenju sa raspodelom pora etalonskih uzoraka ovi uzorci nakon 3 meseca beleže smanjenje udela pora. Smanjenje udela pora je u najvećoj meri odraz taloženje produkata reakcije sa sulfatima. U opsegu malih i srednjih kapilarnih pora na sličan način se ponašaju uzorci izloženi dejstvu obe vrste sulfata. Izuzetak je uzorak potopljen 3 meseca u  $\text{MgSO}_4$  gde je udeo pora većih od  $10\mu\text{m}$  veći nego kod etalonskog uzorka. Ovaj podatak može da ukaže na ukрупnjavanje manjih pora usled pucanja zidova zbog kristalizacionog pritiska ili nekog drugog uzroka. Nakon 6 meseci, kod uzoraka potopljenih u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  nestaju pore veće od  $10\mu\text{m}$  a kod  $\text{MgSO}_4$  veće od  $1\mu\text{m}$ . Kod oba rastvora dominantne su sitne pore, veličine do  $0,01\mu\text{m}$ . Ovde je situacija slična kada se porede udeli pora kod uzoraka izloženih sulfatima i udeli etalonskih uzoraka. Izuzetak je povećanje udela pora u opsegu  $< 0,01\mu\text{m}$  koje je nešto veće za uzorke potopljene u  $\text{MgSO}_4$  u odnosu na  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , a oba uzorka beleže veći udeo u odnosu na etalon. Uzrok ove pojave je najverovatnije smanjenje prečnika kapilarnih pora u opsegu prečnika većih od  $0,01\mu\text{m}$ , usled taloženja produkata reakcije sa sulfatima na zidovima tih pora. Drugi razlog može biti ispiranje produkata hidratacije i na osnovu toga stvaranja novih pora. U opsegu pora većih od  $10\mu\text{m}$  veći udeo od udela kod uzoraka etalona ima uzorak potopljen u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Raspodela pora uzoraka betonskih mešavina sa CEM I i  $w/c=0,38$  potopljenih u rastvor sulfata karakterišu samo pore u intervalu  $> 1\mu\text{m}$ .

Kod analize rezultata raspodele udela pora kod uzoraka betonskih mešavina napravljenih sa cementom CEM III, važno je napomenuti neke činjenice vezane za proces hidratacije ove vrste cementa. Proces hidratacije zgure je spor. U pogledu mikrostrukture karakteriše je pojava *unutrašnjih produkata hidratacije ("inner products")*. Naime na samoj površini zrna zgure se obično nalaze produkti hidratacije CEM I. "Napad"  $\text{Ca}^{2+}$  jona dolazi spolja i u unutrašnjosti zrna zgure nastaju produkti

hidratacije (dominira C-S-H gel) poznati pod nazivom unutrašnji produkti ("inner products"). Njihova struktura je gušća, a u njoj preovlađuju pore u opsegu 3-5nm ( $3\text{-}5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ ) koje se vremenom ukрупnjavaju.

Analiza rezultata raspodele veličine pora kod uzoraka etalona upravo potvrđuje prethodno iznete činjenice vezane za proces hidratacije zgure. Naime kod uzoraka sa CEM III i  $w/c=0,55$  (Slika IX.10e) nakon 3 meseca se zapaža značajno povećanje učešća pora u opsegu malih i srednjih kapilarnih pora u odnosu na uzorke etalona na bazi CEM I i  $w/c=0,55$ . Njihovo učešće se još više povećava nakon 6 meseci (Slika IX.10f). Ovi podaci su u skladu sa procesom hidratacije zgure i razvojem mikrostrukture hidratiranih produkata. Kada se vodocementni faktor smanji (CEM III i  $w/c=0,38$ ) smanjuje se i udeo svih pora za obe starosti u odnosu na raspodelu pora uzoraka na bazi CEM III i  $w/c=0,55$ , ali je taj udeo veći u odnosu na uzorke etalona betonskih mešavina na bazi CEM I i  $w/c=0,38$ , u opsegu do  $1 \mu\text{m}$ .

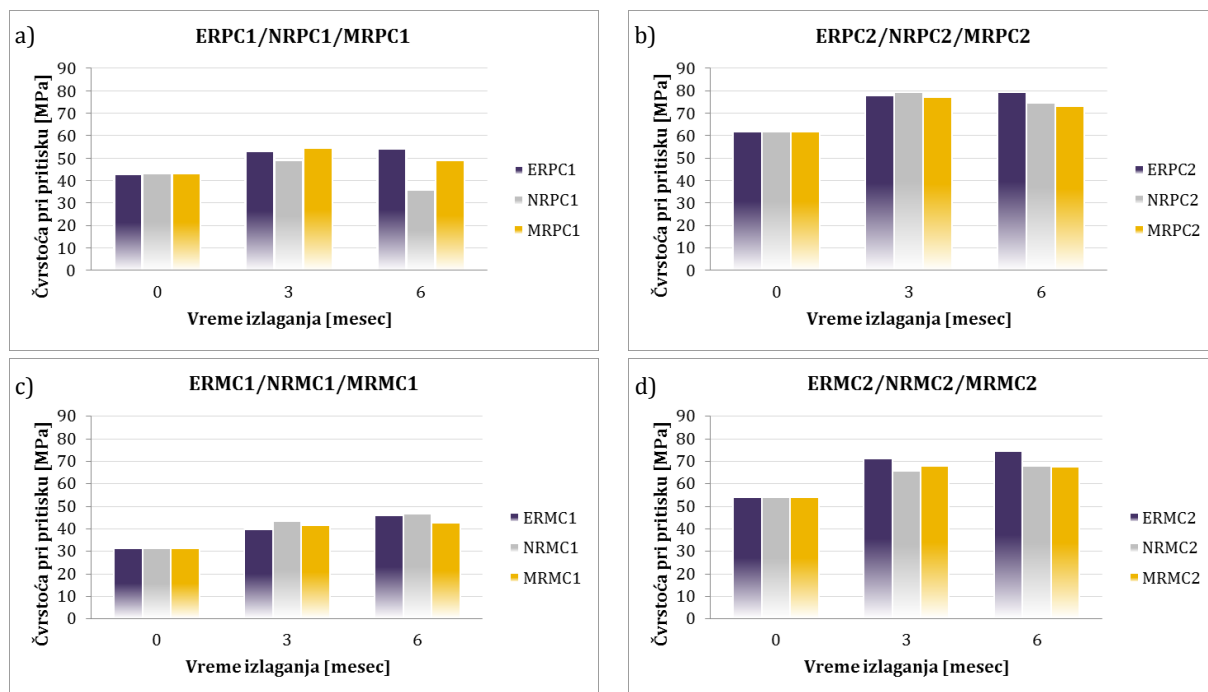
Analiza kod uzoraka sa CEM III i  $w/c=0,55$  (Slika IX.10e i Slika IX.10f) nakon 3 i 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima pokazuje da pora ima manje ili skoro nestaju pore veličine  $0,01\text{-}1 \mu\text{m}$  u odnosu na etalonske uzorke a povećava udeo pora u intervalu  $1\text{-}10 \mu\text{m}$ . Efikasnost produkata reakcije sa sulfatima u pogledu smanjenja udeo pora je najveća za pore u intervalu prečnika  $0,01\text{-}1 \mu\text{m}$  za obe starosti uzoraka.

Uzorci iz betonske mešavine sa CEM III i  $w/c=0,38$  (Slika IX.10g i Slika IX.10h) nakon 3 meseca u sulfatnom rastvoru gube pore manje od  $1 \mu\text{m}$  a povećavaju pore veličine  $1\text{-}10 \mu\text{m}$ . Na 6 meseci pojavljuju se pore veličine  $0,01\text{-}1 \mu\text{m}$ , a nestaju veće od  $1 \mu\text{m}$  u slučaju rastvora natrijum sulfata ili veće od  $10 \mu\text{m}$  kod magnezijum sulfata.

## 2. BETON SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

### 2.1. Čvrstoća pri pritisku

Rezultati čvrstoće pri pritisku ispitivanih vrsta betona sa recikliranim agregatom, nakon 3 i 6 meseci izlaganja uzorka delovanju sulfatnih rastvora (5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i 5% MgSO<sub>4</sub>) i boravka u zasićenoj krečnoj vodi (etalonski uzorci), kao i njihove čvrstoće pre potapanja u sulfatne rastvore (pri starosti od 28 dana), dati su u Poglavlju VIII.2.1, a grafički su prikazani na Slika IX.11.

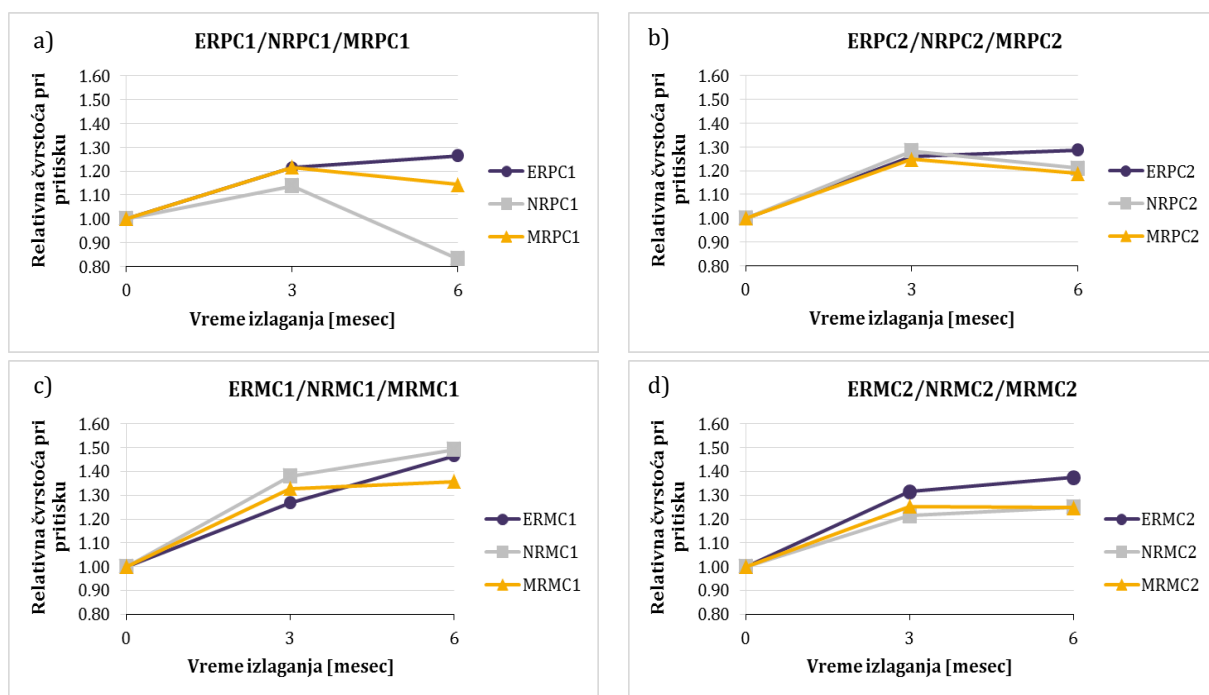


Slika IX.11 - Čvrstoća pri pritisku betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora, za sve mešavine sa recikliranim agregatom;

a) CEM I, RA, w/c=0,55, b) CEM I, RA, w/c=0,38, c) CEM III, RA, w/c=0,55, d) CEM III, RA, w/c=0,38

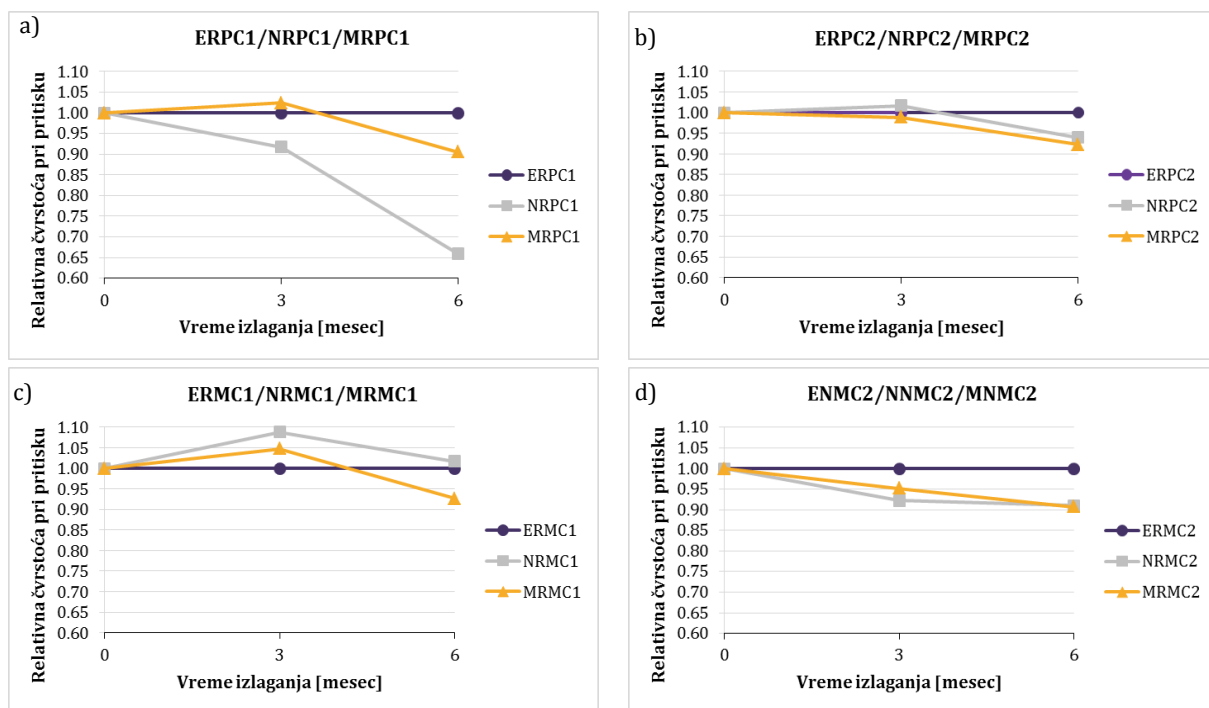
Kako bi se lakše sagledala promena čvrstoće kroz vreme, uzimajući u obzir vrstu rastvora kome su uzorci bili izloženi, formirani su odgovarajući dijagrami koji pokazuju promenu čvrstoće pri pritisku uzoraka koji su bili izloženi delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 3 i 6 meseci, u odnosu na čvrstoće uzoraka pre izlaganja delovanju ovim rastvorima i dati su na Slika IX.12. Analizirajući prikazane rezultate može se zaključiti da:

- Nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima svi betoni pokazuju povećanje čvrstoće pri pritisku u odnosu na početnu vrednost. Povećanje čvrstoće se kreće u granicama od 15% do 40%.
- Većina uzoraka pokazuje povećanje čvrstoće pri pritisku nakon 6 meseci izloženosti delovanju sulfatnim rastvorima u odnosu na početnu vrednost. Povećanje čvrstoće ide do 50%. Izuzetak u ovom slučaju je beton sa CEM I i w/c=0,55 koji je bio izložen delovanju Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (NRPC1). Kod ovih uzoraka registrovan je pad čvrstoće od 17%.



Slika IX.12 - Promena čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za sve mešavine sa rečnim agregatom; a) CEM I, NA, w/c=0,55, b) CEM I, NA, w/c=0,38, c) CEM III, NA, w/c=0,55, d) CEM III, NA, w/c=0,38

Promena čvrstoće pri pritisku uzoraka potopljenih u sulfatne rastvore u odnosu na čvrstoću pri pritisku odgovarajućih referentnih (etalonskih) uzoraka iste starosti prikazana je na Slika IX.13.



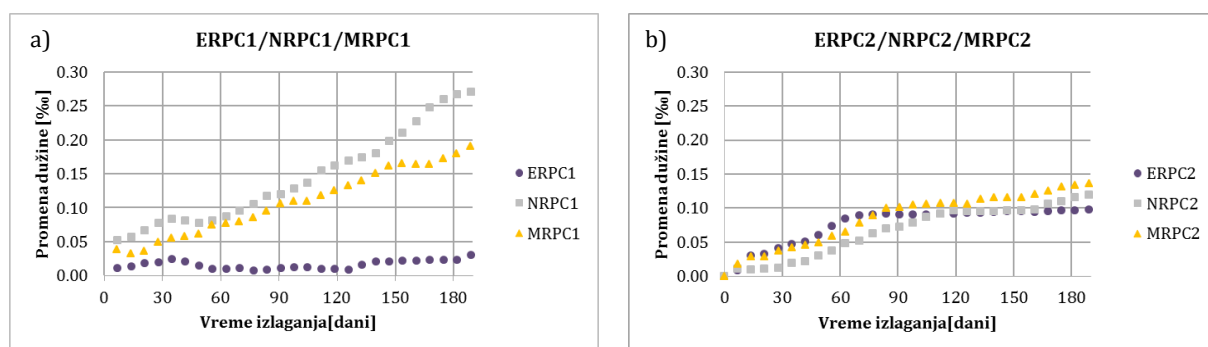
Slika IX.13- Promene čvrstoće pri pritisku betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom izloženih delovanju rastvora sulfata u odnosu na etalonske uzorke; a) CEM I, RA, w/c=0,55, b) CEM I, RA, w/c=0,38, c) CEM III, RA, w/c=0,55, d) CEM III, RA, w/c=0,38

Analizirajući dijagrame na Slika IX.13, može se uočiti:

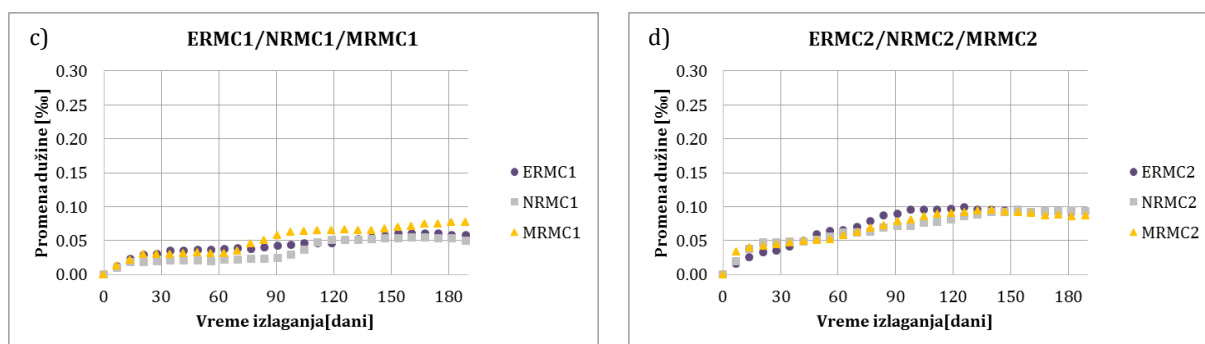
- Betoni sa cementom CEM I i oba vodocementna faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ), izloženi delovanju rastvora magnezijum sulfata (MRPC1 i MRPC2) u trajanju od 3 meseca, ne pokazuju značajne razlike u čvrstoći pri pritisku u odnosu na etalonske uzorke iste starosti, Slika IX.13a. Međutim, uzorci sa većim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,55$ ), koji su bili izloženi delovanju natrijum sulfata u trajanju od 3 meseca (NRPC1), pokazuju pad u čvrstoći pri pritisku od 8%, za razliku od uzoraka sa nižim vodocementnim faktorom, kod kojih nisu uočene promene u čvrstoći. Nakon 6 meseci izlaganja delovanju rastvora magnezijum sulfata uzorci betona, bez obzira na  $w/c$ , pokazuju pad u čvrstoći pri pritisku koji iznosi do 10%. Isti zaključak važi za uzorke sa nižim vodocementnim faktorom koji su bili izloženi delovanju rastvora natrijum sulfata (NRPC2), u periodu od 6 meseci, Slika IX.13b, dok je najveće smanjenje registrovano kod betona sa CEM I i  $w/c=0,55$ , nakon 6 meseci i iznosi 34% (NRPC1).
- Betonski uzorci sa CEM III ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) pokazuju razlike u čvrstoći pri pritisku i nakon 3 i nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima u odnosu na etalonske uzorke iste starosti, Slika IX.13c i Slika IX.13d. Nakon 3 meseca boravka u oba sulfatna rastvora, kod uzoraka sa  $w/c=0,55$ , dolazi do povećanja čvrstoće pri pritisku, koje iznosi do 10%, odnosno kod uzoraka sa  $w/c=0,38$ , dolazi do smanjenja čvrstoće za isti procenat. Nakon 6 meseci delovanja oba sulfatna rastvora, kod većine uzoraka dolazi do smanjenja čvrstoće pri pritisku koje iznosi do 10 %, osim u slučaju uzoraka sa  $w/c=0,55$  koji su izloženi delovanju rastvora natrijum sulfata, gde je vrednost nepromenjena.

## 2.2. Promena dužine

Promena dužine betonskih uzoraka koji su bili 6 meseci izloženi delovanju 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili 5%  $\text{MgSO}_4$  kao i etalonskih uzoraka koji su potopljeni u rastvor zasićene krečne vode (Poglavlje VIII-8.2.2), grafički su predstavljeni na Slika IX.14.







Slika IX.14- Promena dužine betonskih uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa recikliranim agregatom;  
a) CEM I, RA, w/c=0,55, b) CEM I, RA, w/c=0,38, c) CEM III, RA, w/c=0,55, d) CEM III, RA, w/c=0,38

Stvarne vrednosti ekspanzije uzoraka izloženih 3 i 6 meseci delovanju sulfatnih rastvora, i izračunate preko izraza (IX.1) date su u Tabela IX.7.

Tabela IX.7 - Stvarne vrednosti ekspanzije za uzorke sa recikliranim agregatom

Vreme držanja u sulfatnom rastvoru [meseci]	Uzorci							
	NRPC1	MRPC1	NRPC2	MRPC2	NRMC1	MRMC1	NRMC2	MRMC2
3	0,108	0,094	-0,018	0,011	-0,018	-0,007	-0,018	0,002
6	0,244	0,156	0,019	0,037	0,016	0,017	-0,011	-0,005

Analizirajući pojedinačno svaki dijagram sa Slika IX.14 uočava se sledeće:

- Dijagram na Slika IX.14a: Uzorci sa CEM I i w/c=0,55, potopljeni u oba sulfatna rastvora imaju značajne vrednosti ekspanzije koje se vremenom povećavaju i veće su od etalonskih. Nakon 3 meseca delovanja rastvora natrijum i magnezijum sulfata, povećanje dužine uzoraka u odnosu na etalonski uzorak iznosi 0,108‰ i 0,094‰, redom. U periodu 3-6 meseci ova razlika se povećava i nakon 6 meseci redom iznosi 0,244‰ i 0,156‰. Veće vrednosti ekspanzije imaju uzorci potopljeni u rastvor natrijum sulfata i razlika u odnosu na uzorke u magnezijum sulfatu se naglo povećava nakon 5 meseci boravka u sulfatnim rastvorima.
- Dijagram na Slika IX.14b: Upoređenjem vrednosti linearnih ekspanzija kod uzoraka sa CEM I i w/c=0,38, može se primetiti da u toku 3 meseca delovanja sulfatnih rastvora nema značajne razlike u odnosu na etalonske uzorke. Nakon 3 meseca dolazi do blage ekspanzije koja na 6 meseci iznosi 0,019‰ za uzorke u natrijum sulfatu i 0,037‰ za uzorke u magnezijum sulfatu.
- Dijagram na Slika IX.14c i Slika IX.14d: Upoređujući rezultate linearne ekspanzije kod uzoraka sa CEM III i oba vodocementna faktora (w/c=0,55 i w/c=0,38), može se uočiti da kod uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 6 meseci gotovo nema razlike u odnosu na etalonske uzorke i da vrsta rastvora nema uticaja.

Na osnovu ovih zaključaka, može se postaviti hipoteza da je razlika u ekspanziji između etalonskih uzoraka i uzoraka potopljenih u oba sulfatna rastvora, koji su spravljani sa CEM I i nižim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,38$ ), kao i uzoraka sa CEM III, za oba vodocementna faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) minorna. To su betonske mešavine RPC2, RMC1 i RMC2, Slika IX.14. Da bi se proverila ova hipoteza, primenjeni su statistički testovi koji porede varijanse dva uzorka ( $S^2$ ) i njihove aritmetičke sredine ( $\bar{x}$ ). Testiranje je obavljeno međusobnim upoređenjem vrednosti promena dužine uzoraka od iste betonske mešavine, koji su držani u različitim sulfatnim rastvorima, sa promenom dužine odgovarajućih etalonskih uzoraka. Parametri za oba statistička testa prikazani su u Tabela IX.8 a rezultati testiranja u Tabela IX.9.

Broj izmerenih vrednosti za svaki set je 27.

Za procenu postavljenih hipoteza korišćene su testne karakteristike  $F_0$  za poređenje varijansi i  $t_0$  za poređenje aritmetičkih sredina. Iz tabele [182] se na osnovu izabranog stepena značajnosti ( $\alpha=0,05$ ) i stepeni slobode ( $v=n-1=26$ ) očitava vrednost testne statistike  $F_\alpha$  (kvantil Snedekove F raspodele) koja je potrebna kod poređenja varijansi i u ovom slučaju iznosi 1,93.

Za testiranje aritmetičkih sredina, testna statistika  $t_\alpha$  (kvantil Studentove raspodele), je 2,01 za isti stepen značajnosti ( $\alpha=0,05$ ) i broj stepeni slobode od 52 ( $v=n_1+n_2+2=52$ ).

Tabela IX.8 – Parametri za testiranje varijansi i aritmetičke sredine uzoraka

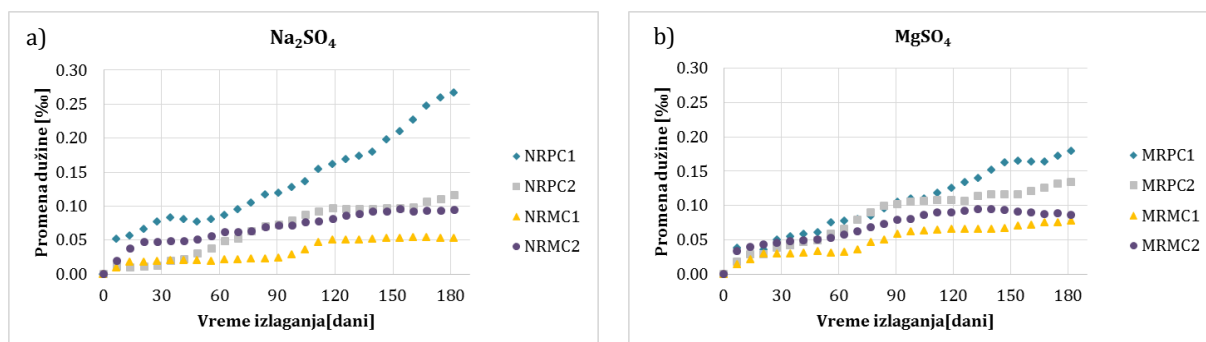
Par.	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
$\bar{x}$	0,07786	0,06334	0,08309	0,04132	0,03277	0,04691	0,07132	0,06650	0,06857
$S^2$	0,00109	0,00143	0,00155	0,00022	0,00029	0,00042	0,00085	0,00059	0,00059

Tabela IX.9 – Rezultati statističkog testa

Par.	ERPC2 NRPC2	ERPC2 MRPC2	ERMC1 NRMC1	ERMC1 MRMC1	ERMC2 NRMC2	ERMC2 MRMC2
$F_0$	1,309	1,420	1,304	1,902	1,438	1,438
$F_0 > F_\alpha$	ne	ne	ne	ne	ne	ne
S	0,03484	0,03567	0,03877	0,01759	0,026	0,026
$t_0$	1,5310	0,5387	0,8110	1,1679	0,671	0,389
$t_0 > t_\alpha$	ne	ne	ne	ne	ne	ne

Iz rezultata testa se može zaključiti da je postavljena hipoteza potvrđena i da se može prihvatiti, jer posmatrani skupovi imaju iste varijanse i aritmetičke sredine sa stepenom značajnosti od 0,05. To znači da posmatrane betonske mešavine (RPC2, RMC1 i RMC2) potopljene 6 meseci u rastvore 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili 5%  $\text{MgSO}_4$  imaju slične vrednosti promene dužine u odnosu na etalonske uzorke i da vrsta sulfatnog rastvora nema uticaja na promenu dužine posmatranih uzoraka.

Rezultati linearne ekspanzije uzoraka mogu se prikazati i u zavisnosti od vrste rastvora, Slika IX.15.



Slika IX.15- Promena dužine betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom;  
a) u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) u rastvoru  $\text{MgSO}_4$

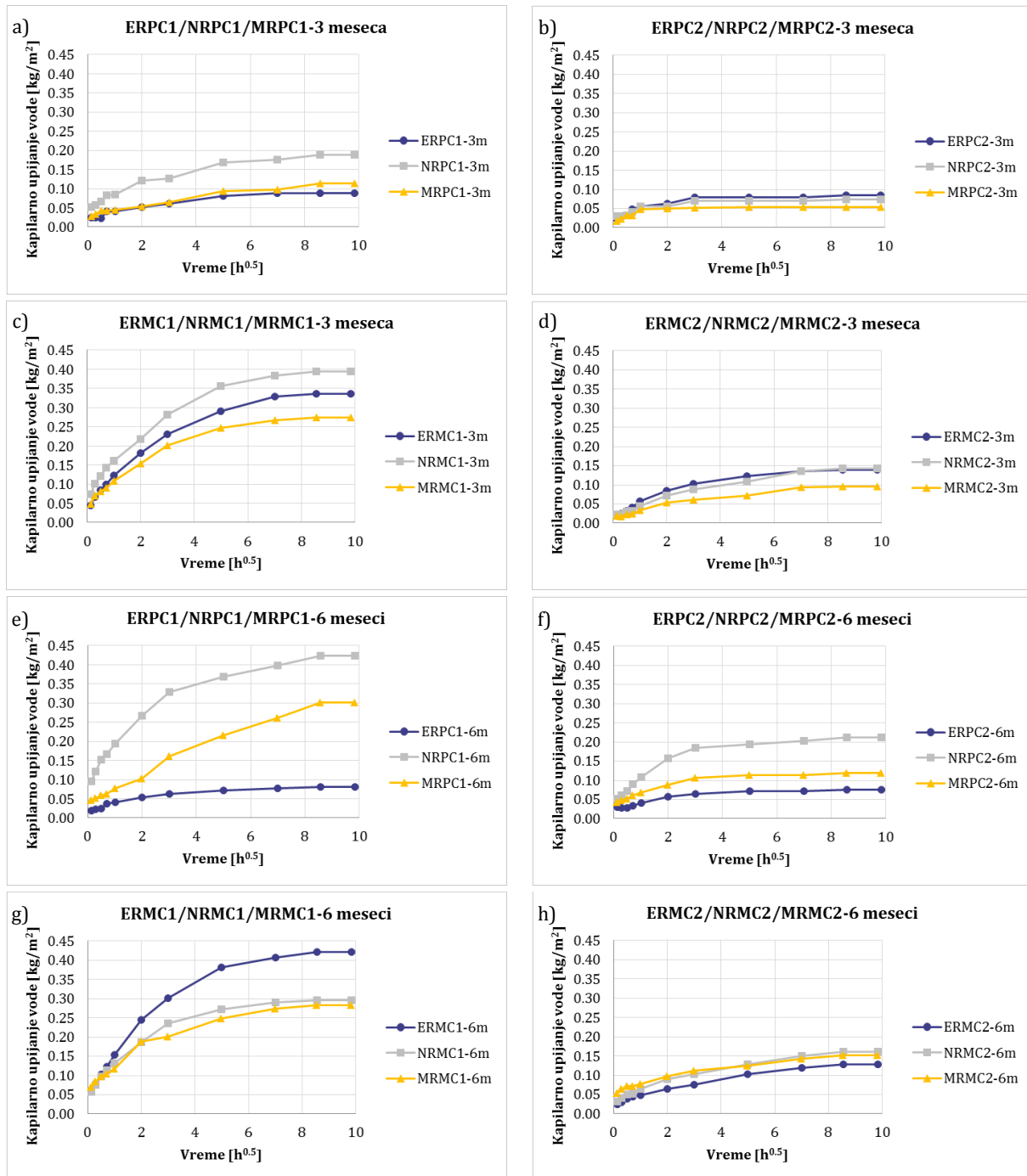
Posmatrajući dijagram na Slika IX.15a, na kome su prikazane promene dužine betonskih uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , uočava se da vrsta cementa ima uticaja u slučaju većeg vodocementnog faktora ( $w/c=0,55$ ) dok je u slučaju manjeg vodocementnog faktora ( $w/c=0,38$ ) uticaj cementa zanemarljiv. Za posmatrani period od 6 meseci, najveću ekspanziju ima beton sa CEM I i  $w/c=0,55$  dok je najmanja vrednost u slučaju betona sa CEM III i  $w/c=0,55$ .

Sa dijagrama na Slika IX.15b, na kome su prikazane promene dužine betonskih uzoraka potopljenih u rastvor  $\text{MgSO}_4$ , vidi se da je do približno četiri meseca delovanja ovog rastvora uticaj vodocementnog faktora i vrste cementa na vrednost ekspanzije uzoraka zanemarljiv. Nakon ovog perioda dolazi do naglog porasta ekspanzije u slučaju uzoraka sa CEM I, što znači da od tog perioda počinje značajan uticaj vrste cementa. Uticaj vodocementnog faktora je veći u slučaju betona sa CEM I u odnosu na betone sa CEM III, gde je uticaj ovog faktora zanemarljiv.

Analizom svih prikazanih rezultata uočava se da beton sa CEM I i  $w/c=0,55$  ima najveće vrednosti ekspanzije u oba sulfatna rastvora. Takođe, smanjenje vodocementnog faktora utiče na smanjenje vrednosti ekspanzije kod uzoraka sa CEM I, izloženih delovanju oba sulfatna rastvora, ali ovaj uticaj nije uočljiv kod uzoraka sa CEM III.

### 2.3. Kapilarno upijanje vode

Na osnovu rezultata kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka koji su dati u Poglavlju VIII.2.4, na Slika IX.16 prikazana je kinetika kapilarnog upijanja vode uzoraka sa recikliranim agregatom, nakon 3 i 6 meseci izlaganja delovanju sulfatnih rastvora.



Slika IX.16- Kapilarno upijanje vode uzoraka držanih u krečnoj vodi i izloženih delovanju sulfatnih rastvora za mešavine sa recikliranim agregatom; a) CEM I, RA, w/c=0,55 nakon 3 meseca, b) CEM I, RA, w/c=0,38 nakon 3 meseca, c) CEM III, RA, w/c=0,55 nakon 3 meseca, d) CEM III, RA, w/c=0,38 nakon 3 meseca, e) CEM I, RA, w/c=0,55 nakon 6 meseci, f) CEM I, RA, w/c=0,38 nakon 6 meseci, g) CEM III, RA, w/c=0,55 nakon 6 meseci, h) CEM III, RA, w/c=0,38 nakon 6 meseci

Na osnovu prikazanih dijagrama na Slika IX.16 (dijagrami a, b, c i d, upijanje vode nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima) i analize mogućnosti uspostavljanja zajedničke korelacije između kapilarnog upijanja vode i vremena upijanja, po vrstama betona izveden je sličan zaključak, kao u slučaju analize kapilarnog upijanja vode betona spravljenih sa rečnim agregatom, tj. da vrsta sulfatnog rastvora nema uticaja na način -

kinetiku upijanja vode, već da kinetika upijanja vode uglavnom zavisi od vrste betona (od vrste cementa i vodocementnog faktora). Izvedeni zaključak se ne može primeniti na rezultate kapilarnog upijanja vode nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, jer je na osnovu dijagrama na Slika IX.16 (dijagrami e, f, g i h, upijanje vode nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima) i analize mogućnosti uspostavljanja zajedničke korelacije između kapilarnog upijanja vode i vremena upijanja vode, po vrstama betona zaključeno je da, pored vrste betona, na kinetiku kapilarnog upijanja vode utiče i vrsta rastvora u slučaju betona spravljenih sa cementom CEM I. Izvedeni zaključak korespondira sa zaključkom koji je izveden za beton sa rečnim agregatom.

Sa analiziranih dijagrama se, takođe, može uočiti da betoni sa nižim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,38$ ) u većini slučajeva imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja vode, bez obzira na vrstu rastvora ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  i zasićena krečna voda).

Analizom koeficijenata kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka i uzoraka nakon 3 i 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima (Tabela IX.10), uočeno je:

- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka svih ispitivanih vrsta betona smanjuju se sa povećanjem starosti.
- Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka zavise od vrste cementa i veće su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I. Vodocementni faktor nema uticaja na vrednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka u slučaju betona sa CEM I, dok je u betonu sa CEM III i  $w/c=0,55$  dobijena veća vrednost ovog koeficijenta u odnosu na beton sa  $w/c=0,38$ , za obe analizirane starosti uzoraka.
- Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su 3 meseca boravili u sulfatnim rastvorima zavise od vrste cementa i vodocementnog faktora i veće su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I, kao i kod betona sa  $w/c=0,55$  u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$ , u okviru istog sulfatnog rastvora. Takođe je zaključeno da su vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode uvek manje u rastvoru magnezijum sulfata u odnosu na odgovarajuće vrednosti u natrijum sulfatu za istu vrstu betona (isti cement i isti  $w/c$ ).
- Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su 6 meseci boravili u sulfatnim rastvorima i dalje zavise od vrste cementa i vodocementnog faktora, ali i od vrste sulfatnog rastvora, tako da su u rastvoru magnezijum sulfata veće kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I i kod betona sa  $w/c=0,55$  u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$ . U rastvoru natrijum sulfata su vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode veće kod betona sa CEM I u odnosu na betone sa CEM III i kod betona sa  $w/c=0,55$  u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$ . Takođe je zaključeno, kao i na 3 meseca, da su vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode uvek manje u rastvoru magnezijum sulfata u odnosu na odgovarajuće vrednosti u natrijum sulfatu za istu vrstu betona (isti cement i isti  $w/c$ ).

- Koeficijenti kapilarnog upijanja etalonskih uzoraka pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci) su veći od odgovarajućih vrednosti nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima.
- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa  $w/c=0,38$ , koji su bili potopljeni 3 meseca u sulfatne rastvore, su manje od odgovarajućih vrednosti etalonskih uzoraka, bez obzira na vrstu cementa i vrstu sulfatnog rastvora. Kod betona sa  $w/c=0,55$ , predmetna razlika zavisi i od vrste cementa i od vrste rastvora.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su bili 6 meseci potopljeni u sulfatne rastvore su manji od odgovarajućih koeficijenata etalonskih uzoraka, osim kod betona sa CEM III i  $w/c=0,55$ .
- Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 3 meseca potapanja u sulfatne rastvore su uglavnom manje (kod 7 od 8 analiziranih kombinacija) od odgovarajućih koeficijenata uzoraka betona nakon 6 meseci boravka u istim rastvorima.

Tabela IX.10- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom, etaloni i nakon 3 i 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

$A_i$ [kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]	Uzorci											
	ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
0 meseci	0,119			0,076			0,200			0,087		
3 meseci	0,016	0,034	0,019	0,016	0,014	0,011	0,058	0,071	0,049	0,025	0,022	0,015
6 meseci	0,014	0,074	0,043	0,015	0,039	0,023	0,076	0,054	0,050	0,020	0,026	0,025

Konačne vrednosti upijanja vode posmatranih betonskih uzoraka pre potapanja u sulfatne rastvore i nakon 3 i 6 meseci boravka u njima date su u Tabela IX.11.

Tabela IX.11- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom [kg/m<sup>2</sup>]

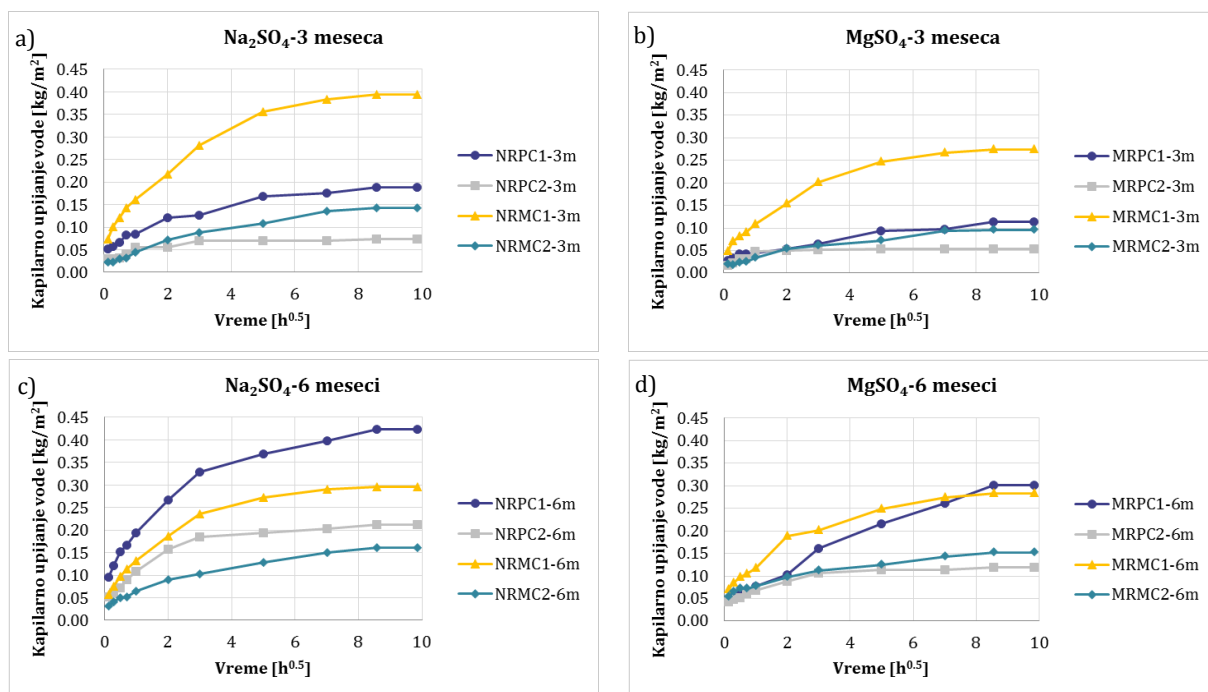
Vreme [mesec]	Uzorci											
	ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
0	0,668			0,415			1,037			0,468		
3	0,087	0,188	0,114	0,084	0,074	0,041	0,336	0,394	0,275	0,139	0,142	0,095
6	0,081	0,424	0,301	0,076	0,212	0,120	0,421	0,296	0,284	0,127	0,161	0,151

Iz prethodne tabele se uočava da najmanje kapilarno upijanje ima beton sa CEM I i  $w/c=0,38$  (ERPC2/NRPC2/MRPC2) za sva tri posmatrana perioda, bez obzira na vrstu rastvora (rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> i zasićena krečna voda), osim u slučaju kada su uzorci držani 6 meseci u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. U tom slučaju najmanje kapilarno upijanje imaju uzorci sa CEM III i  $w/c=0,38$  (NRMC2). Najveće vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 meseca boravka u rastvorima ima beton sa CEM III i  $w/c=0,55$  (ERMC1/NRMC1/MRMC1). Nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima najveće

vrednosti kapilarnog upijanja vode izmerene su kod betona CEM I i  $w/c=0,55$ , (NRPC1 i MRPC1) a u zasićenoj krečnoj vodi kod betona CEM III i  $w/c=0,55$ , (ERMCI). Upoređenjem vrednosti kapilarnog upijanja vode pre potapanja u sulfatne rastvore sa vrednostima nakon 3 i 6 meseci nastavka nege u krečnoj vodi ili boravka u sulfatnim rastvorima, uočava se da su se vrednosti upijanja vode značajno smanjile. Razlozi smanjenja upijanja vode su najverovatnije hidratacija cementa, a u nekim slučajevima i popunjavanje pora produktima sulfatne korozije.

Uticaj vrste cementa na veličinu kapilarnog upijanja vode se najbolje vidi na etalonskim uzorcima, i može se objasniti preko stepena hidratacije cementa. Cement CEM I ima bržu hidrataciju od CEM III, pa su vrednosti kapilarnog upijanje vode manje. Betoni spravljeni sa CEM I, generalno imaju manje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon boravka 3 meseca u sulfatnim rastvorima u odnosu na betone za čije spravljanje je korišćen CEM III, dok se za upijanje vode nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima to ne može tvrditi. Takođe se vidi da manji vodocementni faktor doprinosi značajnom smanjenju kapilarnog upijanja vode, bez obzira na dužinu boravka u rastvoru i bez obzira na vrstu rastvora.

Rezultati kapilarnog upijanja vode razdvojeni po rastvorima  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  dati su na Slika IX.17.



Slika IX.17- Kapilarno upijanje vode betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom; a) u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  nakon 3 meseca, b) u  $\text{MgSO}_4$  nakon 3 meseca c) u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  nakon 6 meseci, d) u  $\text{MgSO}_4$  nakon 6 meseci

Analizom rezultata prikazanih na prethodnim dijagramima može se primetiti da betonski uzorci sa cementom CEM III i  $w/c=0,55$ , imaju najveće vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 meseca boravka u oba sulfatna rastvora, dok nakon 6 meseci

boravka u istim rastvorima najveće vrednosti kapilarnog upijanja imaju uzorci sa CEM I i  $w/c=0,55$ . Takođe se može uočiti da su vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka sa cementom CEM I i oba vodocementna faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ), nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima značajno veće u odnosu na rezultate dobijene nakon 3 meseca. Kod uzoraka sa CEM III nije uočena tako značajna razlika, vrednosti su uglavnom iste ili blago povećane na 6 meseci u odnosu na 3 meseca.

Ako se međusobno uporede odgovarajuće vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima uočiće se da svi ispitivani betoni, bez obzira na vrstu cementa i vodocementni faktor, imaju veće upijanje vode nakon boravka u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u odnosu na upijanje vode nakon boravka rastvoru  $\text{MgSO}_4$ .

Na osnovu prikazanih analiza može se zaključiti da vrsta cementa ali i vodocementni faktor imaju veoma značajan uticaj na vrednost kapilarnog upijanja vode i kod uzoraka koji su negovani u krečnoj vodi i kod uzoraka koji su 3 meseca bili izloženi sulfatnim rastvorima, dok kod uzoraka koji su 6 meseci bili izloženi sulfatnim rastvorima, i uticaj vrste rastvora postaje značajan. Betoni spravljeni sa CEM I imaju manje kapilarno upijanje vode u odnosu na betone spravljene sa CEM III, osim u slučaju boravka 6 meseci u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Slika IX.17. Smanjenje vodocementnog faktora sa vrednosti 0,55 na 0,38, uzrokuje redukciju vrednosti kapilarnog upijanja kod svih uzoraka.

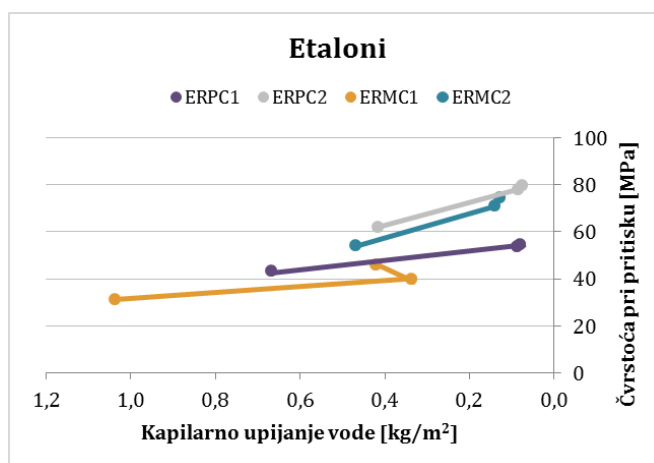
Kako bi se uspostavila veza između konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode i čvrstoće betona pri pritisku, formirana je Tabela IX.12.

*Tabela IX.12 - Vrednosti kapilarnog upijanja vode [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] i odgovarajućih čvrstoća pri pritisku [ $\text{MPa}$ ], betonski uzorci sa recikliranim agregatom*

Vreme [mesec]	Parametar	Uzorci											
		ERPC1	NRPC1	MRPC1	ERPC2	NRPC2	MRPC2	ERMC1	NRMC1	MRMC1	ERMC2	NRMC2	MRMC2
0	Uv	0,668			0,415			1,037			0,468		
	fp	43,1			61,8			31,3			54,1		
3	Uv	0,087	0,188	0,114	0,084	0,074	0,041	0,336	0,394	0,275	0,139	0,142	0,095
	fp	53,5	49,1	54,8	78,0	79,3	77,1	39,7	43,2	41,6	71,2	65,7	67,8
6	Uv	0,081	0,424	0,301	0,076	0,212	0,120	0,421	0,296	0,284	0,127	0,161	0,151
	fp	54,5	35,9	49,3	79,6	74,8	73,4	45,9	46,7	42,5	74,4	67,7	67,5

Na osnovu prikazanih rezultata uspostavljene su zavisnosti između vrednosti čvrstoće pri pritisku i konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka po vrstama betona i prikazane na Slika IX.18.





Slika IX.18- Promena čvrstoće pri pritisku i konačnih vrednosti kapilarnog upijanja etalonskih uzoraka kroz posmatrane periode (početni, 3 i 6 meseci)

Prva vrednost na dijagramu (gledano s leva na desno) za svaku seriju, predstavlja početnu čvrstoću pri pritisku/kapilarno upijanje, sledeća tačka su vrednosti nakon 3 meseca izlaganja delovanju sulfatnih rastvora i poslednja nakon 6 meseci. Prikazani dijagrami potvrđuju opšte poznat stav da se sa smanjenjem vrednosti kapilarnog upijanja povećavaju čvrstoće pri pritisku, kroz vreme, ali i da vrsta betona, odnosno vrsta cementa i vodocementni faktor, imaju značajan uticaj na oba parametra, tako da se ne može uspostaviti jedinstvena korelaciona veza između čvrstoće pri pritisku i kapilarnog upijanja vode. Izuzetak je betonska mešavina sa CEM III i  $w/c=0,55$  (ERMCI1).

Analizom rezultata kapilarnog upijanja vode i čvrstoće pri pritisku uzoraka potopljenih u sulfatne rastvore, zaključeno je da se ne mogu uspostaviti korelacione veze između ovih parametara, u funkciji perioda izloženosti, ni po betonskim mešavinama. Razlog za ovakav zaključak je što na vrednosti oba parametra različito utiču fizički i hemijski procesi koji se dešavaju tokom izloženosti betonskih uzoraka sulfatnim rastvorima.

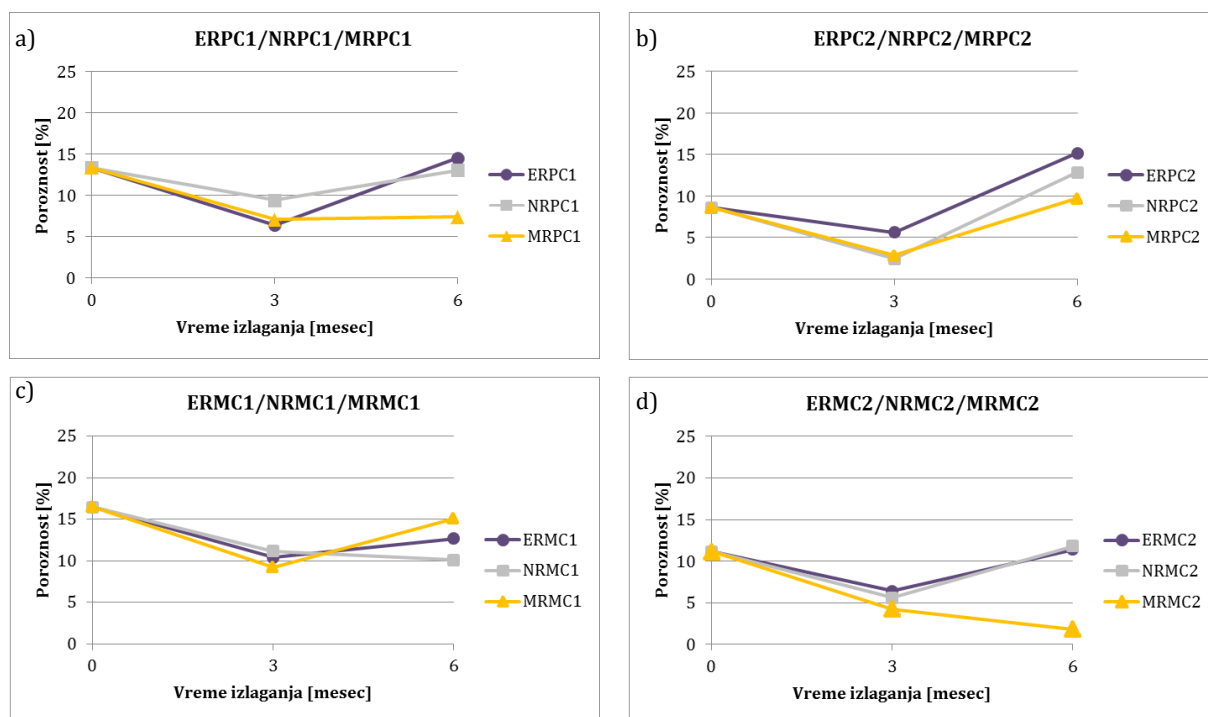
#### 2.4. Živina porozimetrija-ukupna poroznost, kritični prečnik i threshold

Osnovna karakteristika recikliranog agregata, koji je predmet istraživanja u ovom radu, je da sadrži malter koji potiče od betona od kog je nastao. Ovaj deo maltera čini da je njegova struktura poroznija u odnosu na normalan agregat i da ima više produkata hidratacije cementa. Stoga se upotrebom ovog agregata u novom betonu dobija veće učešće produkata hidratacije cementa u ukupnoj zapremini kao i drugačija mikrostruktura prelazne zone u odnosu na mikrostrukturu prelazne zone normalnog agregata.

Dok je kod normalnog agregata veza sa cementnim kamenom samo fizičke, kod recikliranog je pored fizičke i hemijske prirode. Hemijske veze su posledica postojanja pre svega neizreagovanih zrna cementa u delu maltera recikliranog agregata koji u dodiru sa vodom počinje da reaguje i povezuje se sa strukturom cementnog kamena u betonu. To povezivanje sa "novom" cementnom pastom može da se odvija preko spoljašnje površine zrna agregata ili prodorom nove paste u pore recikliranog agregata.

Ako voda koja ulazi u pore recikliranog agregata potiče iz cementne paste "novog" betona stvaraju se veze koje takođe utiču na mikrostrukturu. Osim toga, na poroznost tranzitne zone između recikliranog agregata i nove cementne paste utiče mogućnost da nova cementna pasta uđe u pore recikliranog agregata. U kojoj meri će pasta moći da prodre u te pore zavisi od njene pokretljivosti (viskoziteta) i veličine zrna cementa. Ako pretpostavimo da se veličina zrna cementa kreće oko 40  $\mu\text{m}$  jasno je da cementna pasta može ući samo u neke od pora maltera i to one veće. Osim "hemijske" veze između zrna recikliranog agregata i cementne paste se uspostavlja i fizička veza. S obzirom na veliku specifičnu površinu zrna recikliranog agregata broj kontakta između zrna ovog agregata i cementne paste je veći nego kod normalnog agregata i cementne paste. Ova činjenica će uticati na ukupnu poroznost. S obzirom na značaj poroznosti tranzitne zone za ukupnu poroznost i raspodelu pora može se očekivati da kod betona na bazi ovog agregata, pri analizi rezultata živine porozimetrije, uočimo neke sličnosti i razlike između pomenutih betonskih mešavina.

Vrednosti ukupne poroznosti etalonskih uzoraka kao i onih izloženih delovanju sulfata raspoređene prema vrsti betona za period pre potapanja u sulfatne rastvore kao i nakon 3 i 6 meseci držanja u njima prikazane su na Slika IX.19.



Slika IX.19- Promena ukupne poroznosti uzoraka betonskih mešavina od recikliranog agregata, po mešavinama

*Etalonski uzorci:* Kod svih etalonskih uzoraka se beleži smanjenje ukupne poroznosti nakon 3 meseca, a povećanje nakon 6 meseci. Ovaj trend je potpuno suprotan literaturnim podacima vezanim za promenu poroznosti kroz protok vremena. Moguće objašnjenje za ovu pojavu je promena pH vrednosti pornog rastvora.

Osim gore navedenog, analiza rezultata predstavljenih na slici ukazuje da vodocementni faktor ima najveći uticaj na ukupnu poroznost kada su u pitanju etalonski uzorci. Poroznosti uzoraka betonske mešavine ERPC1 ( $w/c=0,55$ ) sa oznakom "0" (pre potapanja u sulfatne rastvore), kao i nakon 3 i 6 meseci je veća od poroznosti odgovarajućeg uzorka etalona ERPC2( $w/c=0,38$ ). Slično je i sa betonskim mešavinama na bazi CEM III (ERMC1 i ERMC2). Najveći uticaj na vrednosti poroznosti ima vodocementni faktor.

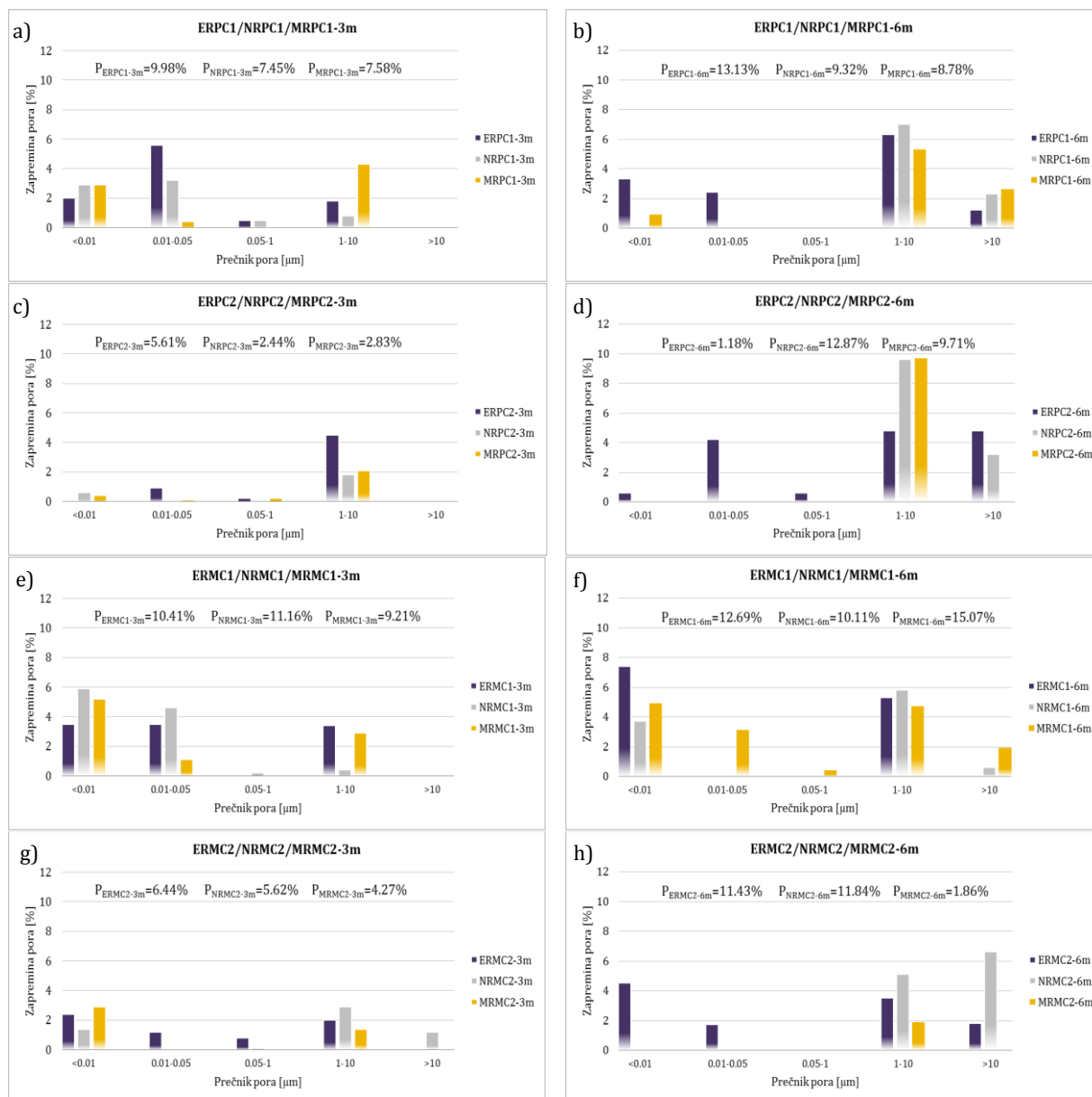
Nakon perioda od 3 meseca, uzorci koji su bili izloženi delovanju sulfatnih rastvora imaju smanjenje vrednosti ukupne poroznosti u odnosu na etalonske uzorke, osim u slučaju mešavine RPC2 gde ipak postoji razlika (Slika IX.19b). Do smanjenja vrednosti ukupne poroznosti kod betonskih mešavina izloženih dejstvu rastvora sulfata dolazi, kao što je već prethodno pomenuto prvenstveno usled taloženja produkata hemijske reakcije sulfatnih jona sa produktima hidratacije cemenata. Ukupna poroznost nakon 3 meseca se veoma malo promenila u odnosu etalonske uzorke. Ovo ukazuje da 3 meseca nije dovoljno dug period za početak sulfatne korozije. Nakon 6 meseci je došlo do povećanja poroznosti osim u slučaju uzoraka NRMC1 i MRMC2. SEM ispitivanja su pokazala da kod nekih uzoraka dolazi i do pojave pukotina Slika IX.44b, a kod istih su prisutni karbonati ili brucit. Povećanje poroznosti nakon 6 meseci ukazuje da sulfatna korozija postaje evidentna.

Kada se pogledaju vrednosti kritičnog prečnika (Tabela VIII.25), oštro definisan početni pik se nalazi u oblasti prečnika pora čije se vrednosti kreću u granicama 2-12 $\mu\text{m}$  što odgovara velikim kapilarama dok je drugi pik pomeren ka manjim vrednostima i odgovara prečnicima pora u oblasti 0,01-0,09 $\mu\text{m}$ . Vrednosti kritičnog prečnika se na 3 meseca smanjuju u oblasti malih kapilara uz pojavu drugog pika u oblasti velikih pora a potom na 6 meseci stabilizuju.

Vrednosti "threshold"-a (Tabela VIII.25) nisu u saglasnosti sa činjenicom da se smanjuju tokom vremena negovanja i smanjenjem vodocementnog faktora kao što je rečeno i u slučaju sa rečnim agregatom. Za sve uzorke napravljene sa recikliranim agregatom, vrednosti "threshold"-a rastu tokom vremena i dostižu maksimum na 6 meseci, osim kod uzoraka ERPC1 gde su smanjene nakon 3 meseca.

## 2.5. Živina porozimetrija-raspodela pora po veličini

Raspodela pora po veličini dobijena je na osnovu rezultata živine porozimetrije koji su dati u Prilogu 13. Rezultati su prikazani preko dijagrama i dati na Slika IX.20 raspoređeni prema betonskim mešavinama i prema periodu izlaganja sulfatnim rastvorima. Posmatraju se promene kod uzoraka izloženih delovanju sulfata u odnosu na etalonske iste starosti.



Slika IX.20 - Raspodela pora po veličini za etalonske uzorke i uzorke izložene delovanju rastvora  $Na_2SO_4$  i  $MgSO_4$  kod uzoraka sa recikliranim agregatom, za oba perioda izlaganja

Slično raspodeli pora kod etalona betonskih mešavina sa rečnim agregatom, kod etalona betonske mešavine na bazi recikliranog agregata veći vodocementni faktor (CEM I i  $w/c=0,55$ , CEM III i  $w/c=0,55$ ) utiče na povećanje udela kapilarnih pora do  $0,05\mu m$ . Objašnjenje za pojavu ovih pora je dato ranije. Pore iz oblasti krupnih kapilarnih pora u opsegu prečnika  $0,05-1\mu m$  ili ima malo ili skoro da uopšte nema, bez obzira o kojoj vrsti agregata, cementa, vodocementnog faktora ili o kojoj vrsti izloženosti nekom sulfatnom rastvoru se radi. Udeo pora većih od  $1\mu m$  se povećava nakon 6 meseci kod uzoraka sa smanjenim vodocementnim faktorom.

Za razliku od betonske mešavine sa CEM III,  $w/c=0,55$  i normalnim agregatom (NMC1), udeo kapilarnih pora se smanjio kod iste betonske mešavine sa recikliranim agregatom (RMC1) nakon 3 i 6 meseci. Kao što je već napomenuto prisustvo kapilarnih pora je

posledica uspornog procesa hidratacije CEM III. Manje učešće kapilarnih pora kod betonskih mešavina na bazi RA je verovatno posledica smanjenja odnosa hidratiranih produkata zgure i Portland cementa kao i smanjene poroznosti tranzitne zone. Smanjen odnosa hidratiranih produkata zgure i Portland cementa proističe iz činjenice da Portland cementa osim u CEM III ima u hidratisanom obliku u malteru recikiranog agregata.

Betonska mešavina sa CEM I i većim vodocementnim faktorom nakon 3 meseca izlaganja rastvorima  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ , najveće promene u udelu pora ima u intervalu  $0,01-0,05\mu\text{m}$  gde se njihov udeo u odnosu na etalonske uzorke iste starosti smanjuje ili gotovo nestaje (Slika IX.20a). Takođe u intervalu  $1-10\mu\text{m}$  dolazi do velikog povećanja udela kod uzoraka izloženih delovanju  $\text{MgSO}_4$ . Nakon 6 meseci u sulfatnim rastvorima pore manje od  $1\mu\text{m}$  skoro potpuno nestaju, povećava se udeo pora većih od  $10\mu\text{m}$  u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dok su u oba rastvora dominantne one u intervalu  $1-10\mu\text{m}$  (Slika IX.20b). Povećanje pora u ovom interval može da uputi na pojavu pukotina.

Kod svih uzoraka iz betonske mešavine sa cementom CEM I ali manjim vodocementnim faktorom, nakon 3 meseca držanja u rastvorima, gotovo jedino postojeće pore su one veličine  $1-10\mu\text{m}$  kojih je manje kod uzoraka držanih u sulfatnim rastvorima (Slika IX.20c). Nakon 6 meseci izlaganja uzoraka delovanju sulfatnih rastvora nestaju pore manje od  $1\mu\text{m}$  dok raste udeo pora veličine  $1-10\mu\text{m}$  koje postaju dominantne (Slika IX.20d).

Uzorci sa CEM III i  $w/c=0,55$  (Slika IX.20e) nakon 3 meseca delovanja rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  obuhvataju jedino pore manje od  $0,05\mu\text{m}$  kojih je više nego kod etalonskih uzoraka. Kod  $\text{MgSO}_4$  povećava se udeo pora manjih od  $0,01\mu\text{m}$  koje postaju dominantne zajedno sa onim u intervalu  $1-10\mu\text{m}$ . Nakon 6 meseci u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dominantne pore su one manje od  $0,01\mu\text{m}$  i veličine  $1-10\mu\text{m}$ , kao i kod etalona (Slika IX.20f). Kod  $\text{MgSO}_4$  se pojavljuju i pore  $0,01-0,05\mu\text{m}$  kao i veće od  $10\mu\text{m}$ .

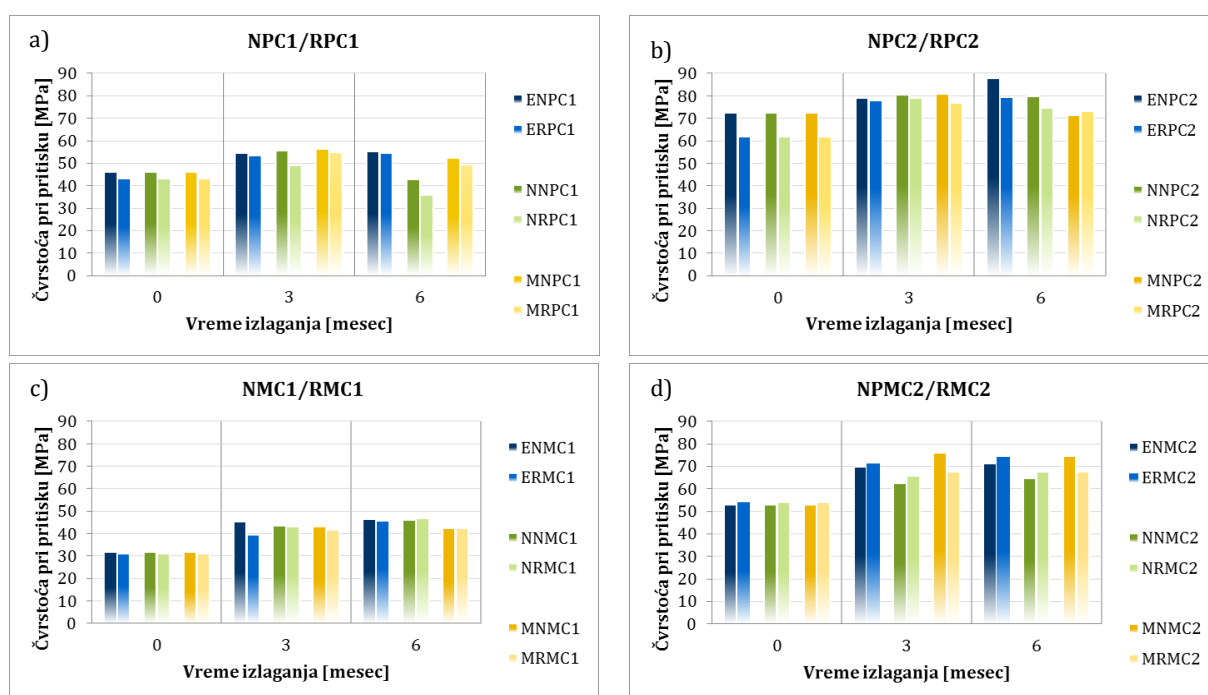
### 3. KOMPARATIVNA ANALIZA

Prethodni deo obuhvata analizu rezultata ispitivanja svojstava betona za svaku vrstu agregata pojedinačno (rečni i reciklirani). Komparativna analiza ima za cilj da analizira uticaj agregata na analizirana svojsva betona.

#### 3.1. Čvrstoća pri pritisku

Uticaj vrste agregata na čvrstoću betona pri pritisku dat je na dijagramima (Slika IX.21) gde su direktno poredene betonske mešavine sa različitom vrstom agregata.

Radi lakše analize, u Tabela IX.13 prikazane su razlike između odgovarajućih čvrstoća betona spravljenih sa rečnim i recikliranim agregatom.



Slika IX.21- Promena čvrstoće betona pri pritisku kod betonskih uzoraka po vrsti agregata za sve rastvove;

a) CEM I, NA,  $w/c=0,55$  i CEM I, RA,  $w/c=0,55$ , b) CEM I, NA,  $w/c=0,38$  i CEM I, RA,  $w/c=0,38$ , d) CEM III, NA,  $w/c=0,55$  i CEM II I, RA,  $w/c=0,55$ , e) CEM III, NA,  $w/c=0,38$  i CEM II I, RA,  $w/c=0,38$

Kod uzoraka sa cementom CEM I, svi uzorci sa rečnim agregatom imaju više čvrstoće u odnosu na uzorke sa recikliranim agregatom, bez obzira na posmatrani period, vodocementni faktor i vrstu rastvora (Slika IX.21a i Slika IX.21b). Izuzetak je uzorak sa recikliranim agregatom i manjim vodocementnim faktorom (0,38) potopljen u rastvor  $MgSO_4$  u trajanju od 6 meseci (MRPC2), koji ima malo više vrednosti čvrstoće (1,9MPa) u odnosu na uzorak sa rečnim agregatom (MNPC2), Slika IX.21b. Uticaj recikliranog agregata na vrednosti čvrstoće betona pri pritisku može se sagledati upoređenjem razlika čvrstoća etalonskih uzoraka za 0, 3 i 6 meseci od trenutka potapanja u sulfatne rastvove (Tabela IX.13).

Tabela IX.13 - Razlike između odgovarajućih čvrstoća pri pritisku [MPa], betonskih uzoraka sa rečnim i recikliranim agregatom

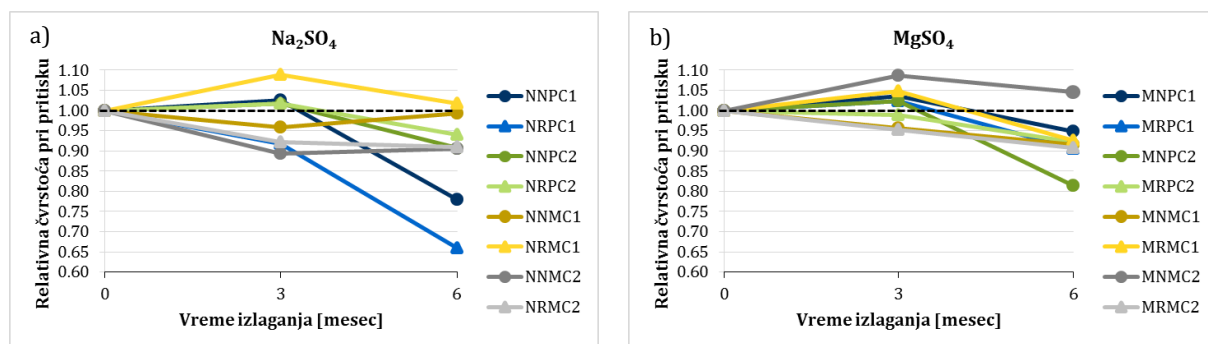
Uzorci	Čvrstoća, $f_p$ [MPa]			Uzorci	Čvrstoća, $f_p$ [MPa]			$\Delta f_p$ [MPa]		
	0	3	6		0	3	6	0	3	6
ENPC1	46,3	54,4	55,1	ERPC1	43,1	53,5	54,5	3,2	0,9	0,6
NNPC1	46,3	55,8	42,9	NRPC1	43,1	49,1	35,9	3,2	6,7	7
MNPC1	46,3	56,3	52,3	MRPC1	43,1	54,8	49,3	3,2	1,5	3
ENPC2	72,5	79,3	87,9	ERPC2	61,8	78,0	79,6	10,7	1,3	8,3
NNPC2	72,5	80,7	79,7	NRPC2	61,8	79,3	74,8	10,7	1,4	4,9
MNPC2	72,5	81,1	71,5	MRPC2	61,8	77,1	73,4	10,7	4,0	-1,9
ENMC1	31,8	45,3	46,4	ERMC1	31,3	39,7	45,9	0,5	5,6	0,5
NNMC1	31,8	43,4	46,1	NRMC1	31,3	43,2	46,7	0,5	0,2	-0,6
MNMC1	31,8	43,3	42,5	MRMC1	31,3	41,6	42,5	0,5	1,7	0
ENMC2	52,8	70,0	71,4	ERMC2	54,1	71,2	74,4	-1,3	-1,2	-3
NNMC2	52,8	62,6	64,7	NRMC2	54,1	65,7	67,7	-1,3	-3,1	-3
MNMC2	52,8	76,0	74,7	MRMC2	54,1	67,8	67,5	-1,3	8,2	7,2

U slučaju betona spravljenih sa CEM I i  $w/c=0,55$ , razlika između čvrstoća betona spravljenih sa rečnim i recikliranim agregatom se sa povećanjem starosti smanjuje, što se može objasniti povećanjem atezije između cementnog kamena i hrapavih zrna krupnog recikliranog agregata. Sličan trend je uočen i kod betona spravljenih sa CEM I i  $w/c=0,38$ , uz komentar da se za veće starosti razlika ponovo povećava, najverovatnije zbog limitiranih vrednosti čvrstoće krupnog recikliranog agregata. U slučaju betona spravljenih sa CEM I i sa oba vodocementna faktora, koji su bili 3 meseca potopljeni u sulfatne rastvore, uočeno je smanjenje razlike između čvrstoća betona sa rečnim i recikliranim agregatom, izuzev u slučaju betona sa  $w/c=0,55$  potopljenih u rastvor natrijum sulfata, pa se može zaključiti da su doprinosi produkata hidratacije i povećanje atezije između cementnog kamena i zrna krupnog recikliranog agregata veći od negativnog uticaja sulfatnih rasvora u periodu od tri meseca. Nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, razlika u predmetnim čvrstoćama se povećava, izuzev u slučaju delovanja rastvora magnezijum sulfata na beton sa  $w/c=0,38$ . Opisana razlika je jedino kod betona spravljenih sa  $w/c=0,55$  i izloženih rastvoru natrijum sulfata veća od početne razlike i nakon 3 i nakon 6 meseci boravka u predmetnom rastvoru.

Za uzorke sa cementom CEM III ne može se utvrditi jedinstveni trend kao kod uzoraka sa CEM I. U slučaju  $w/c=0,55$ , vrednosti odgovarajućih čvrstoća su približno jednake (Slika IX.21c). Malo odstupanje je kod etalonskih uzoraka nakon 3 meseca, gde uzorci sa rečnim agregatom imaju više čvrstoće nego uzorci sa recikliranim agregatom (za 5,6MPa). Kod  $w/c=0,38$  uzorci sa rečnim agregatom imaju manje vrednosti čvrstoće u odnosu na uzorke sa recikliranim agregatom, osim u slučaju kada su bili potopljeni u rastvor  $MgSO_4$  u trajanju od 3 i 6 meseci (Slika IX.21d).

Razlika čvrstoća etalonskih uzoraka betona spravljenih sa CEM III i  $w/c=0,55$  se u toku perioda od 3 meseca povećava, a nakon 6 meseci se smanjuje. Predmetno smanjenje se može tumačiti doprinosom zakasnele hidratacije cementa i povećanjem athezije između cementnog kamena i zrna recikliranog agregata. Razlika odgovarajućih čvrstoća etalonskih uzoraka betona sa rečnim i sa recikliranim agregatom spravljenih sa CEM III i  $w/c=0,38$  se u toku perioda od 3 meseca ne menja, a nakon 6 meseci se povećava, najverovatnije zbog zakasnele hidratacije cementa i povećanja athezije između cementnog kamena i zrna recikliranog agregata. Pomenuta razlika je mala i kreće se od 1,3MPa, na početku izlaganja sulfatnim rastvorima, do 3MPa, nakon 6 meseci od početka izlaganja sulfatnim rastvorima. Sličan trend je uočen i u slučaju izlaganja ovih betona dejstvu rastvora natrijum sulfata. Najveće razlike u odgovarajućim čvrstoćama betona spravljenih sa CEM III uočene su u slučaju kada su ovi betoni izloženi dejstvu rastvora magnezijum sulfata. Razlike su značajne, iznose oko 8MPa i pri tome je čvrstoća betona sa rečnim agregatom veća od čvrstoća betona sa recikliranim agregatom. Bez obzira na uočenu razliku u čvrstoćama betona sa rečnim i recikliranim agregatom, dobijene vrednosti čvrstoća betona sa recikliranim agregatom su i dalje visoke.

Da bi se bolje sagledao pad ili povećanje čvrstoće betona pri pritisku kod uzoraka koji su bili potopljeni u rastvore  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  u trajanju od 3 i 6 meseci u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke iste starosti, napravljeni su dijagrami promene čvrstoće za svaki rastvor posebno i prikazani na Slika IX.22.



Slika IX.22- Relativna promena čvrstoće pri pritisku kod svih betonskih uzoraka u odnosu na etalone iste starosti; a) u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) u rastvoru  $\text{MgSO}_4$

Čvrstoće pri pritisku uzoraka izloženih delovanju natrijum sulfata u trajanju od 3 meseca ne pokazuju značajne razlike u odnosu na etalonske uzorke iste starosti (Slika IX.22a). Za taj period karakteristična je promena čvrstoće (smanjenje ili povećanje) u granicama do  $\pm 10\%$ .

Nakon 6 meseci držanja u istom rastvoru, većina uzoraka ili ne pokazuje promene u čvrstoći pri pritisku u odnosu na etalonske ili je registrovano smanjenje čvrstoće do 10%. Izuzetak su uzorci sa cementom CEM I i  $w/c=0,55$  i obe vrste agregata (NNPC1, NRPC1), kod kojih pad čvrstoće iznosi 22% i 34%, za rečni, odnosno reciklirani agregat (Slika IX.22a).

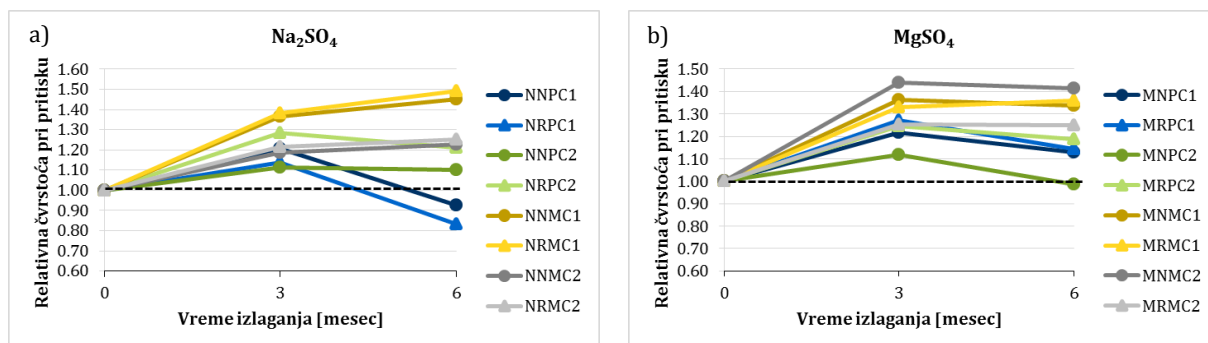


Uzorci izloženi delovanju magnezijum sulfata u trajanju od 3 meseca pokazuju malo povećanje (+10%) ili smanjenje čvrstoće (-5%) pri pritisku u odnosu na etalonske uzorke (Slika IX.22b).

Nakon 6 meseci, promene u čvrstoći su takođe u pomenutim granicama, povećanje (+5%) ili smanjenje čvrstoće (-10%) osim za beton sa cementom CEM I i  $w/c=0,38$  (MNPC2) kod kojeg je smanjenje iznosilo 19% (Slika IX.22b).

Ako se zajedno pogledaju svi uzorci izloženi delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ili  $\text{MgSO}_4$ , zaključuje se da najveće smanjenje čvrstoće nakon 6 meseci delovanja rastvora imaju uzorci NNPC1 i NRPC1, držani u natrijum sulfatu, koje redom iznosi 22% i 34%. Ako se uzme u obzir kriterijum koji je dat od strane Mehte [184] da se pad u čvrstoći od 25% može uzeti kao "otkaz" uzorka, onda uzorci napravljeni od cementa CEM I, sa  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (NRPC1) nemaju zadovoljavajuću otpornost na delovanje 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju od 6 meseci. Vrednosti bliske ovom kriterijumu imaju i uzorci NNPC1 (CEM I,  $w/c=0,55$ , rečni agregat,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Ako se uporede vrednosti promene čvrstoće pri pritisku uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 3 i 6 meseci sa čvrstoćama pri pritisku izmerenih neposredno pre potapanja u rastvore dobijaju se dijagrami predstavljeni na Slika IX.23.



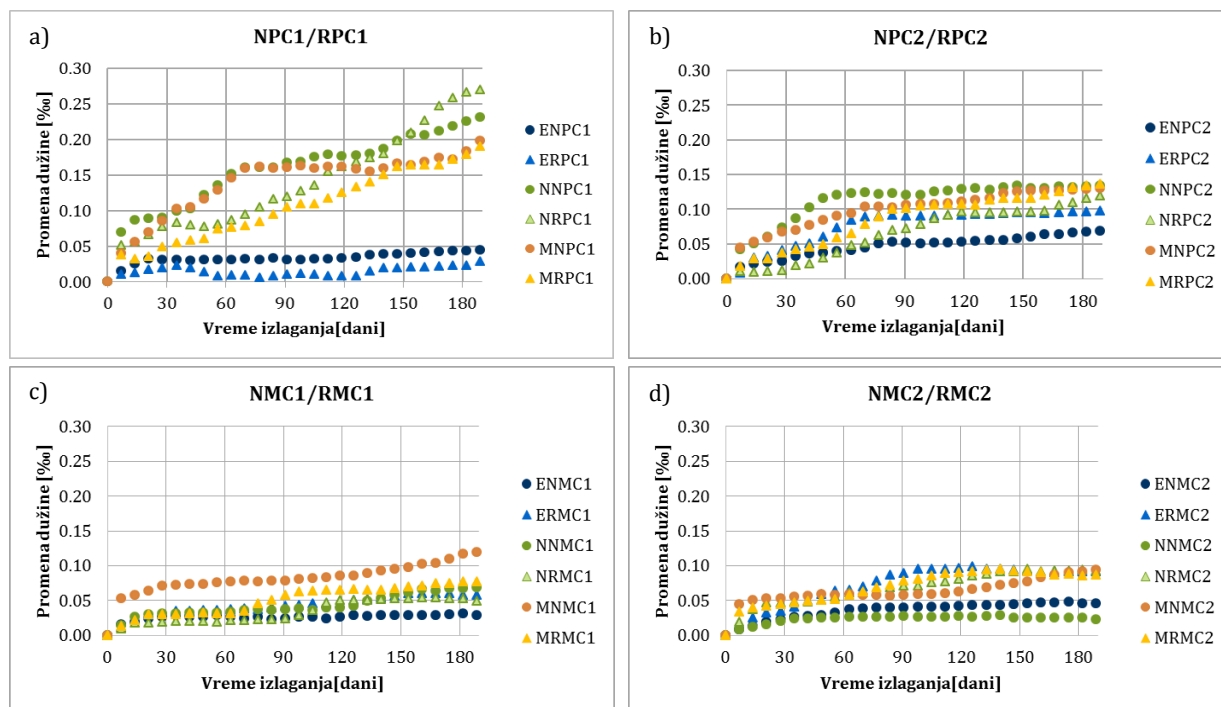
Slika IX.23- Relativna promena čvrstoće betona pri pritisku kod svih betonskih uzoraka u odnosu na početne čvrstoće; a) u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , b) u rastvoru  $\text{MgSO}_4$

Većina uzoraka izložena delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 3 i 6 meseci imaju povećanje čvrstoće pri pritisku u odnosu na početne vrednosti. Izuzetak su uzorci sa CEM I,  $w/c=0,55$  bez ozira na vrstu agregata, potopljani u rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju od 6 meseci (NNPC1, NRPC1). Smanjenja čvrstoće kod ovih uzoraka redom iznose 9% i 17%.

### 3.2. Promena dužine

Radi analize uticaja vrste agregata na promenu dužine tj. ekspanziju betonskih uzoraka u zavisnosti od dužine boravka u različitim rastvorima, formirani su odgovarajući dijagrami. Na dijagramima (Slika IX.24) je prikazana promena dužine betonskih uzoraka potopljenih u različite rastvore u toku 180 dana, tj. 6 meseci. Svaki pojedinačni dijagram se odnosi na 2 betonske mešavine, čiji uzorci su držani: u 5% rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , ili 5%

rastvoru  $MgSO_4$  ili u zasićenoj krečnoj vodi, a koje se međusobno razlikuju jedino po vrsti krupnog agregata.



Slika IX.24- Uporedni prikaz promene dužine betonskih uzoraka po vrsti agregata u svim rastvorima;

a) CEM I, NA,  $w/c=0,55$  i CEM I, RA,  $w/c=0,55$ , b) CEM I, NA,  $w/c=0,38$  i CEM I, RA,  $w/c=0,38$ , d) CEM III, NA,  $w/c=0,55$  i CEM II I, RA,  $w/c=0,55$ , e) CEM III, NA,  $w/c=0,38$  i CEM II I, RA,  $w/c=0,38$

U slučaju analize betonskih uzoraka spravljenih sa prirodnim rečnim agregatom negovanih u krečnoj vodi, zaključeno je da je promena dužine tokom vremena mala i da ne zavisi od vrste cementa i vodocementnog faktora. Razlika u promeni dužine nakon 3 i 6 meseci se kreće od 0,006‰ do 0,023‰.

Kada se uporede "linije" promene dužine betona spravljenih sa recikliranim agregatom i negovanih u krečnoj vodi, uočiće se da betoni sa većim vodocementnim faktorom imaju manje izraženu promenu tokom vremena i niže konačne vrednosti promene dužine u odnosu na uzorke betona sa nižim vodocementnim faktorom. Međutim, konačne vrednosti promene dužine su male i ne prelaze 0,1‰. Razlika u promeni dužine nakon 3 i 6 meseci se kreće od 0,002‰ do 0,018‰.

Upoređenjem "linije" promene dužine betona spravljenih sa rečnim i sa recikliranim agregatom negovanih u krečnoj vodi, konstatovano je da su promene dužine uzoraka veće kod betona sa recikliranim agregatom. Predmetne razlike u dužini se kreću od 0,023‰ do 0,049‰ za karakteristična vremena posmatranja od 3 i 6 meseci. Opisana razlika je logična i posledica je povećane količine cementnog kamena u betonu, pa samim tim i količine kapilarnih pora. Od navedene konstatacije odstupaju jedino betonski uzorci spravljeni sa CEM I i  $w/c=0,55$ , kod kojih je promena dužine veća kod uzoraka spravljenih sa rečnim agregatom i to za cca 0,02‰.

Pojava povećanja dimenzija uzoraka koji su potopljeni u vodu je, u tehnologiji betona, opisana kao "bubrenje betona". Prema literaturnim podacima [185] vrednosti bubrenja su male i mogu se zanemariti ako se kreću od 0,010‰-0,050‰.

Radi upoređenja "linija" promene dužine tokom vremena i sagledavanja uticaja vrste agregata na promenu dužine uzoraka betona, potopljenih u sulfatne rastvore, urađena je aproksimacija pravom linijom i određene su vrednosti nagiba pravih. Dobijeni rezultati prikazani su u Tabela IX.14.

Tabela IX.14 - Aproksimacija rezultata pravom linijom - nagibi pravih linija

Rastvor	Uzorci							
	NPC1	NPC2	NMC1	NMC2	RPC1	RPC2	RMC1	RMC2
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,0009	0,0012	0,0005	0,0007	0,0003	0,0003	0,00008	0,0004
MgSO <sub>4</sub>	0,0007	0,0009	0,0005	0,0007	0,0003	0,0004	0,0003	0,0004

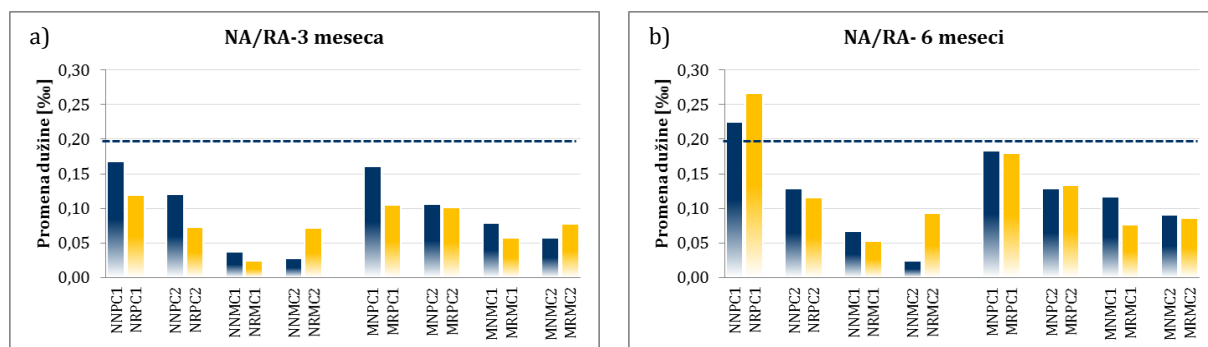
Analizom prikazanih vrednosti uočeno je:

- Najveći nagib "linije" promene dužine imaju uzorci od betona sa CEM I, w/c=0,55 i sa recikliranim agregatom, koji su potopljeni u rastvor natrijum sulfata, što ukazuje da ova vrsta betona ima najveću promenu dužine tokom vremena.
- Najveće vrednosti nagiba "linija" promene dužine bez obzira na vrstu sulfatnog rastvora, imaju betoni spravljeni sa CEM I i w/c=0,55 (NPC1 i RPC1), zatim slede betoni spravljeni sa CEM I i w/c=0,38, dok betoni spravljeni sa CEM III imaju najmanje vrednosti nagiba.
- U okviru istih grupa betona (ista vrsta cementa i isti vodocementni faktor) veći nagibi "linija" promene dužine su registrovani na uzorcima sa recikliranim agregatom. Međutim uočena razlika u nagibima je vrlo mala.
- Ekspanzija uzoraka ima uglavnom linearni tok, bez obzira na vrstu betona i rastvora. Izuzetak su uzorci spravljeni sa CEM I i rečnim argegom, koji su imali povremene stagnacije u prirastu, tj. imali su promenu u kinetici ekspanzije uzoraka, koja se može opisati kao bilinearna sa prelomnom tačkom na 60 dana.

Na osnovu prethodne analize zaključeno je da kinetika promene dužine prvenstveno zavisi od vrste cementa i vodocementnog faktora, a zatim od vrste agregata. Radi definisanja uticaja vrste agregata na vrednost ekspanzije uzoraka potopljenih u različite rastvore, formirani su Tabela IX.15 i odgovarajući dijagrami (Slika IX.25).

Tabela IX.15 - Izmerene vrednosti ekspanzije u mm/m (‰)etalonskih uzoraka i uzoraka potopljenih u rastvore natrijum sulfata i magnezijum sulfata nakon 3 i 6 meseci

Period	ENPC1	ERPC1	ENPC2	ERPC2	ENMC1	ERMC1	ENMC2	ERMC2	ENPC1	ERPC1	ENPC2	ERPC2	ENMC1	ERMC1	ENMC2	ERMC2
3	0,031	0,011	0,051	0,090	0,024	0,042	0,040	0,089	0,031	0,011	0,051	0,090	0,024	0,042	0,040	0,089
6	0,044	0,023	0,74	0,097	0,031	0,06	0,046	0,091	0,044	0,023	0,74	0,097	0,031	0,06	0,046	0,091
Period	NNPC1	NRPC1	NNPC2	NRPC2	NNMC1	NRMCM1	NNMC2	NRMCM2	MNPC1	MRPC1	MNPC2	MRPC2	MNMC1	MRMC1	MNMC2	MRMC2
3	0,168	0,119	0,120	0,072	0,037	0,024	0,027	0,071	0,161	0,105	0,106	0,101	0,079	0,058	0,057	0,078
6	0,225	0,267	0,129	0,116	0,067	0,053	0,025	0,093	0,183	0,179	0,129	0,134	0,177	0,077	0,091	0,086



Slika IX.25- Poređenje vrednosti promene dužine betonskih uzoraka po vrsti agregata za oba sulfatna rastvora; a) nakon 3 meseca, b) nakon 6 meseci

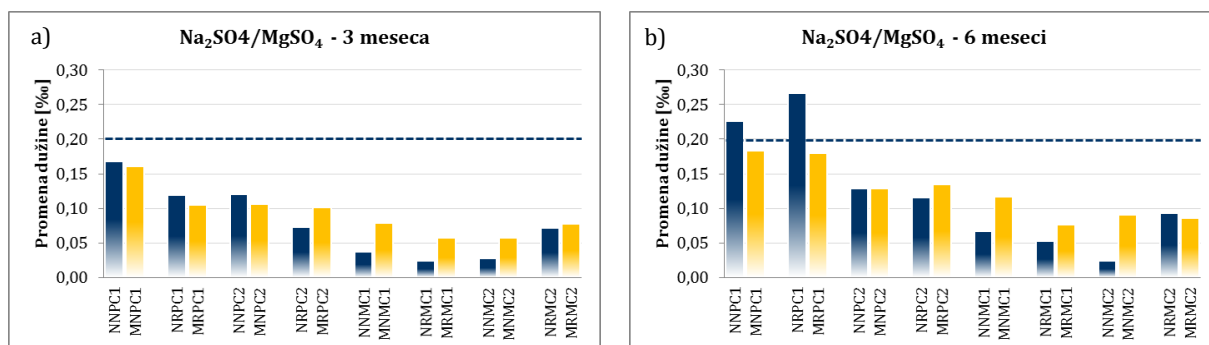
Analizom prikazanih rezultata za period od 3 meseca izlaganja sulfatnim rastvorima uočeno je da su vrednosti promene dužine (ekspanzije) uzoraka spravljenih sa recikliranim agregatom uvek manje u odnosu na odgovarajuće uzorke spravljene sa rečnim agregatom. Od ovog zaključka odstupaju jedino uzorci od betona sa CEM III,  $w/c=0,38$  i recikliranim agregatom, koji pokazuju veću ekspanziju u oba rastvora. Dobijene vrednosti ekspanzije su kod svih uzoraka betona, bez obzira na vrstu sulfatnog rastvora manje od kritične vrednosti prema kriterijumu Miller-a i Mansona\* [184].

\*Po kriterijumu, koji su pretpostavili Miller i Manson [184], beton se smatra neotpornim na delovanje sulfatnih rastvora, kada ekspanzija uzorka, koji je izložen delovanju sulfatnih rastvora, dostigne kritičnu vrednost od 0,2‰.

U periodu od 3-6 meseci boravka u rastvoru natrijum sulfata, uočeno je da uzorci betona koji su spravljeni sa recikliranim agregatom imaju brži prirast ekspanzije, tako da se razlika u promeni dužine između odgovarajućih uzoraka betona sa recikliranim i rečnim agregatom, nakon 6 meseci, smanjuje (beton CEM I i  $w/c=0,38$  i beton CEM III i  $w/c=0,55$ ), a za beton, koji je spravljen sa CEM I i  $w/c=0,55$ , dobijaju se veće vrednosti ekspanzije u slučaju primene recikliranog agregata. Međutim, obe vrednosti ekspanzije uzoraka betona spravljenih sa CEM I i  $w/c=0,55$ , bez obzira na vrstu agregata su veće od kritične vrednosti\*. Ekspanzija uzoraka od betona sa CEM III,  $w/c=0,38$  i sa recikliranim agregatom, koja je i na 3 meseca bila veća u odnosu na beton sa CEM III,  $w/c=0,38$  i sa rečnim agregatom, na 6 meseci je još veća, ali su stvarne vrednosti ekspanzije male i značajno su manje od kritične vrednosti\*.

U periodu od 3 do 6 meseci boravka u rastvoru magnezijum sulfata, uočeno je da vrednosti ekspanzije zavise od vrste cementa, tako da uzorci spravljeni od betona sa CEM I i recikliranim agregatom imaju veći prirast ekspanzije u odnosu na uzorke sa rečnim agregatom, dok su u slučaju primene CEM III dobijeni suprotni rezultati, tj. brži prirast ekspanzije je registrovan na uzorcima spravljenim sa rečnim agregatom. Izmerene vrednosti ekspanzije su manje od kritične\*.

Na dijagramima na Slika IX.26 prikazane su vrednosti promene dužine uzoraka betona potopljenih u sulfatne rastvore, koji su grupisani po dužini izloženosti (3 i 6 meseci).

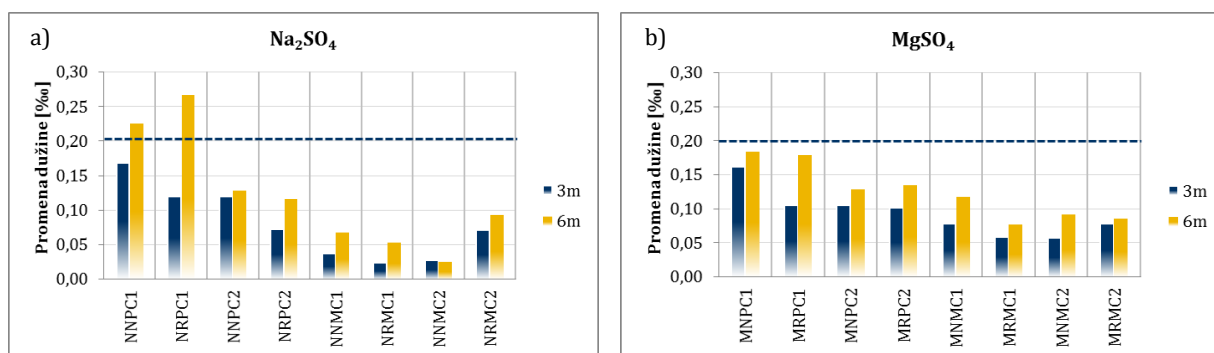


Slika IX.26- Poređenje vrednosti promene dužine betonskih uzoraka po sulfatnim rastvorima; a) nakon 3 meseca, b) nakon 6 meseci

Sa prikazanih dijagrama se uočava:

- Nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima uzorci betona sa rečnim agregatom imaju veću ekspanziju u rastvoru magnezijum sulfata ako su spravljani sa cementom CEM III, a u rastvoru natrijum sulfata, ako su spravljani sa CEMI. Isti zaključak se može doneti i za uzorke koji su 6 meseci bili izloženi sulfatnim rastvorima.
- Ekspanzija uzoraka betona, koji su spravljani sa recikliranim agregatom, je nakon 3 meseca boravka u magnezijum sulfatu veća od odgovarajuće ekspanzije uzoraka potopljenih u natrijum sulfat. Od navedenog zaključka odstupaju uzorci betona spravljani sa CEM I i  $w/c=0,55$ , kod kojih je registrovano veće skupljanje u rastvoru natrijum sulfata.
- Vrednosti ekspanzije uzoraka betona sa recikliranim agregatom nakon 6 meseci boravka u rastvoru natrijum sulfata su se značajnije povećale u odnosu na odgovarajuće vrednosti uzoraka potopljenih u rastvor magnezijum sulfata, tako da su i u slučaju betona sa CEM III i  $w/c=0,38$  prestigle vrednost ekspanzije u rastvoru magnezijum sulfata.

Vrednosti ekspanzije uzoraka nakon 3 i 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima, grupisane po rastvorima (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub>), prikazane su na Slika IX.27.

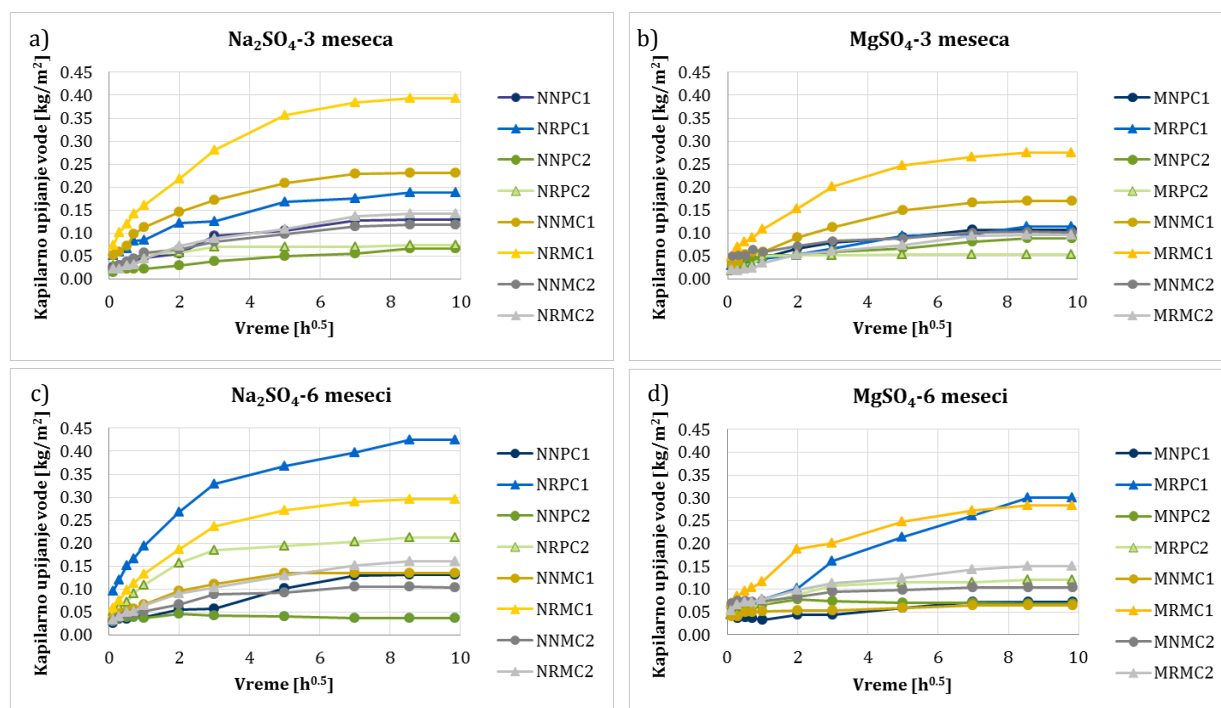


Slika IX.27- Poređenje vrednosti promene dužine uzoraka betonskih mešavina po periodu izloženosti sulfatnim rastvorima; a) u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, b) u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Upoređenjem prikazanih rezultata, primećeno je da su ekspanzije uzoraka betona na 6 meseci veće od odgovarajućih vrednosti na 3 meseca i u slučaju betona potopljenih u rastvor natrijum sulfata, a spravljenih sa CEM I i  $w/c=0,55$ , su veće od kritične vrednosti\*, za obe vrste krupnog agregata. Veoma blizu kritične vrednosti\* su i uzorci iz istih mešavina, koji su potopljeni 6 meseci u rastvor  $MgSO_4$  (Slika IX.27).

### 3.3. Kapilarno upijanje

Kinetika kapilarnog upijanja vode uzoraka koji su 3 i 6 meseci izloženi delovanju 5% rastvora  $Na_2SO_4$  ili  $MgSO_4$  prikazana je na Slika IX.28, gde su uzorci podeljeni po rastvorima i periodu izlaganja.



Slika IX.28- Kinetika kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka svih mešavina;  
a) u rastvoru  $Na_2SO_4$  nakon 3 meseca, b) u rastvoru  $MgSO_4$  nakon 3 meseca, c) u rastvoru  $Na_2SO_4$  nakon 6 meseci, d) u rastvoru  $MgSO_4$  nakon 6 meseci

Na prikazanim dijagramima uočeno je:

- Slika IX.28a (upijanje vode uzoraka koji su 3 meseca bili izloženi delovanju rastvora natrijum sulfata) Raspored linija prikazanih na predmetnom dijagramu pokazuje da kinetika kapilarnog upijanja vode zavisi od početnih parametara betonskih mešavina (vrste cementa, vodocementnog faktora, vrste agregata), a ne od agresivnog delovanja sulfatnog rastvora. Najintenzivniju kinetiku upijanja vode imaju uzorci betona sa CEM III,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RMC1), zatim uzorci betona sa CEM III,  $w/c=0,55$  i sa rečnim agregatom (NMC1), a najsporiji uzorci betona sa CEM I,  $w/c=0,38$  i sa rečnim agregatom (NPC2).
- Slika IX.28b (upijanje vode uzoraka koji su bili izloženi 3 meseca delovanju rastvora magnezijum sulfata): Raspored linija prikazanih na predmetnom dijagramu

pokazuje da je kinetika kapilarnog upijanja vode slična kao na Slika IX.28a, tj. da zavisi od početnih parametara betonskih mešavina. Najintenzivniju kinetiku upijanja vode imaju uzorci betona sa CEM III,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RMC1), zatim uzorci betona sa CEM III,  $w/c=0,55$  i sa rečnim agregatom (NMC1), a najsporiju uzorci betona sa CEM I,  $w/c=0,38$  i sa recikliranim agregatom (RPC2), uz napomenu da je i kinetika upijanja vode uzoraka betona sa sa CEM I,  $w/c=0,38$  i sa rečnim agregatom (NPC2) bliska najnižoj vrednosti.

- Slika IX.28c (upijanje vode uzoraka koji su bili izloženi 6 meseca delovanju rastvora natrijum sulfata): Raspored linija prikazanih na predmentnom dijagramu pokazuje da kinetika kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa CEM I,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RPC1) i uzoraka betona sa CEM I,  $w/c=0,38$  i sa recikliranim agregatom (RPC2), ne zavisi samo od početnih parametara već i od agresivnog delovanja sulfatnog rastvora. Najintenzivniju kinetiku upijanja vode imaju uzorci betona sa CEM I,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RPC1), zatim uzorci betona sa CEM III,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RMC1) i uzorci betona sa CEM I,  $w/c=0,38$  i sa recikliranim agregatom (RPC2), a najsporiju uzorci betona sa CEM I,  $w/c=0,38$  i sa rečnim agregatom (NPC2). Raspored prikazanih linija takođe pokazuje, da betoni spravljeni sa recikliranim agregatom i  $w/c=0,55$  imaju izraženiju kinetiku upijanja vode u odnosu na ostale betone.
- Slika IX.28d (upijanje vode uzoraka koji su 6 meseci bili izloženi delovanju rastvora magnezijum sulfata): Raspored linija prikazanih na predmetnom dijagramu pokazuje da su kinetike kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa CEM I,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RPC1) i uzoraka betona sa CEM III,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RMC1) bliske, tj. da kinetika kapilarnog upijanja vode uzoraka betona CEM I,  $w/c=0,55$  i sa recikliranim agregatom (RPC1) ne zavisi samo od početnih parametara već i od agresivnog delovanja sulfatnog rastvora. Kinetika kapilarnog upijanja vode ostalih vrsta betona, koji su boravili 6 meseci u rastvoru magnezijum sulfata, se nije bitnije promenila u odnosu na rezultate nakon 3 meseca. Raspored prikazanih linija takođe pokazuje, da betoni spravljeni sa recikliranim agregatom imaju izraženiju kinetiku upijanja vode u odnosu na betone sa rečnim agregatom.

Na osnovu prikazane analize, može se zaključiti da vrsta sulfatnog rastvora nema uticaja na kinetiku upijanja vode kod uzoraka betona koji su 3 meseca bili izloženi njihovom delovanju. U tom periodu kinetika upijanja vode zavisi od početnih parametara betonskih mešavina. Nakon 6 meseci delovanja sulfatnih rastvora na kinetiku upijanja vode uzoraka koji su bili potopljeni u rastvor natrijum sulfata dominantno utiče vrsta agregata, tako da betoni sa recikliranim agregatom imaju izraženiju kinetiku upijanja vode. Kao sledeći dominantni uticaj izdvaja se vrednost  $w/c$ . Analizom kinetike kapilarnog upijanja vode uzoraka koji su bili potopljeni 6 meseci u rastvor magnezijum sulfata zaključeno je da na kinetiku upijanja vode imaju približno isti uticaj vrsta agregata i  $w/c$ .

Upoređenjem vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode betona spravljenih sa rečnim agregatom sa odgovarajućim koeficijentima betona spravljenih sa recikliranim agregatom (Tabela IX.4 i Tabela IX.10) zaključeno je da su:

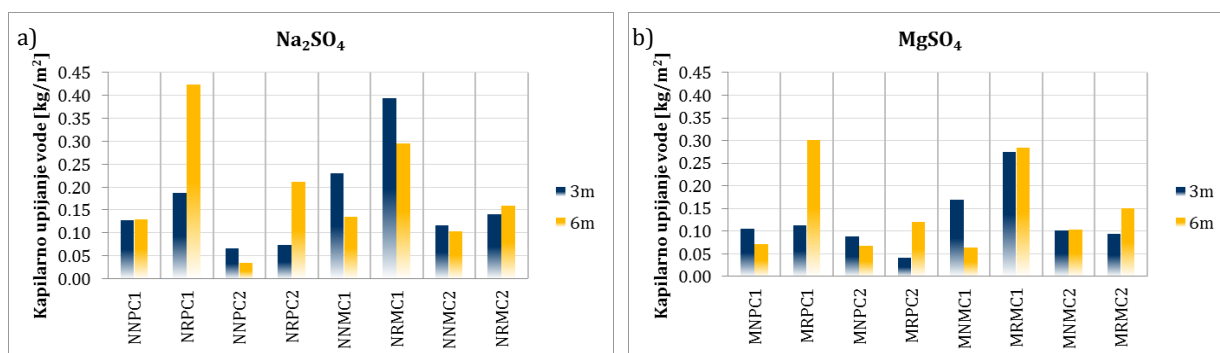
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka svih ispitivanih vrsta betona smanjuju se sa povećanjem starosti.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode etalonskih uzoraka betona sa recikliranim agregatom pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci) su veći od odgovarajućih koeficijenata betona sa rečnim agregatom.
- Međusobnim upoređenjem vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona nakon 3 i 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, uočeno je da se koeficijenti kapilarnog upijanja vode smanjuju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rasvorima. Ova zakonitost je uočena kod obe grupe betona, bez obzira na vrstu agregata.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima, veći su od odgovarajućih koeficijenata betona sa rečnim agregatom izuzev kod uzorka betona sa  $w/c=0,38$  koji su boravili 3 meseca u rastvoru magnezijum sulfata.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom koji su 6 meseci bili potopljeni u sulfatnim rastvorima veći su od odgovarajućih koeficijenata betona sa rečnim agregatom.

Za dalju analizu uzete su konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode za sve uzorke betona i formirana je Tabela IX.16 i dijagrami na Slika IX.29, na kojima su konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode grupisane po vrsti sulfatnog rastvora.

Tabela IX.16 - Izmerene vrednosti konačnog upijanja vode u  $kg/m^2$  etalonskih uzoraka i uzoraka potopljenih u rastvore natrijum sulfata i magnezijum sulfata nakon 3 i 6 meseci

Period [mesec]	NA				RA			
	ENPC1	ENPC2	ENMC1	ENMC2	ERPC1	ERPC2	ERMC1	ERMC2
0	0,729	0,193	0,676	0,367	0,668	0,415	1,037	0,468
3	0,141	0,076	0,187	0,064	0,087	0,084	0,336	0,139
6	0,043	0,027	0,147	0,087	0,081	0,076	0,421	0,127
	NNPC1	NNPC2	NNMC1	NNMC2	NRPC1	NRPC2	NRMC1	NRMC2
3	0,129	0,067	0,230	0,118	0,188	0,074	0,394	0,142
6	0,130	0,036	0,135	0,104	0,424	0,212	0,296	0,161
	MNPC1	MNPC2	MNMC1	MNMC2	MRPC1	MRPC2	MRMC1	MRMC2
3	0,106	0,088	0,170	0,102	0,114	0,041	0,275	0,095
6	0,072	0,068	0,065	0,104	0,301	0,120	0,284	0,151





Slika IX.29- Poređenje maksimalnih vrednosti kapilarnog upijanja betonskih uzoraka po periodu izlaganja delovanja sulfatnog rastvora; a) rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, b) rastvor MgSO<sub>4</sub>

Kapilarno upijanje vode etalonskih uzoraka betona se značajno smanjilo u periodu 0-6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima.

Upoređenjem vrednosti konačnog upijanja vode uzoraka betona koji su boravili u rastvoru natrijum sulfata uočeno je:

- U periodu između 3 i 6 meseci kapilarno upijanje vode uzoraka betona sa rečnim agregatom se smanjilo izuzev kod betona sa CEM I i  $w/c=0,55$  (NNPC1), kod koga je vrednost kapilarnog upijanja ostala nepromenjena.
- Kapilarno upijanje vode betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom ima suprotan trend u istom vremenskom periodu, tj. povećava se sa izuzetkom betona sa CEM III i  $w/c=0,55$  (NRMC1).
- Kapilarno upijanje vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom, bez obzira na vrstu cementa i  $w/c$ , je veće od odgovarajuće vrednosti kapilarnog upijanja uzoraka betona sa rečnim agregatom za oba vremenska perioda (3 i 6 meseci).

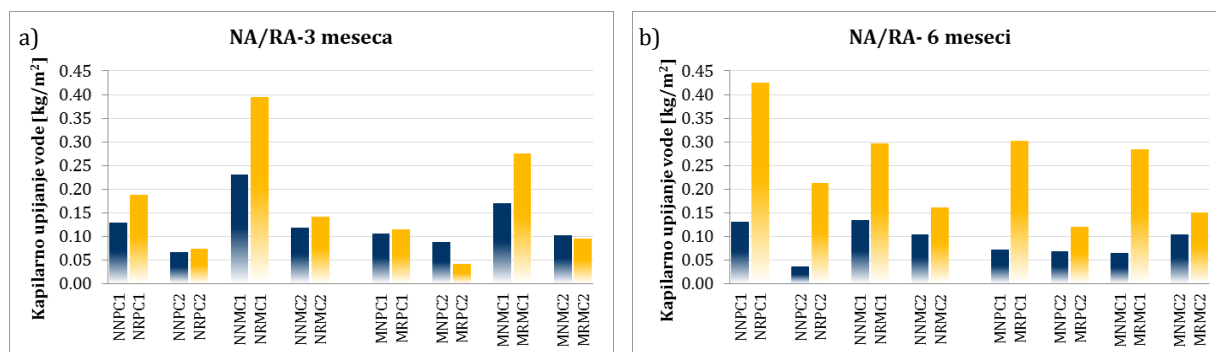
Upoređenjem vrednosti konačnog upijanja vode uzoraka betona koji su boravili u rastvoru magnezijum sulfata uočeno je:

- U periodu između 3 i 6 meseci kapilarno upijanje vode uzoraka betona sa rečnim agregatom se smanjilo izuzev kod betona sa CEM III i  $w/c=0,38$  (MNMC2), kod koga je vrednost kapilarnog upijanja ostala gotovo nepromenjena.
- Kapilarno upijanje vode betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom ima suprotan trend u istom vremenskom periodu, tj. povećava se.
- Kapilarno upijanje vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom nakon 3 meseca boravka u rastvoru magnezijum sulfata zavisi od vodocementnog faktora. Za vrednost  $w/c=0,55$  kapilarno upijanje vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom je veće od odgovarajuće vrednosti uzoraka betona sa rečnim agregatom, a za vrednost  $w/c=0,38$  je suprotan zaključak.
- Kapilarno upijanje vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom nakon 6 meseci boravka u rastvoru magnezijum sulfata je, bez obzira na vrstu cementa i  $w/c$ , veće od odgovarajuće vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa rečnim agregatom.

U slučaju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , kod većine uzoraka sa CEM I, vrednost kapilarnog upijanja vode nakon 6 meseci je bila veća u odnosu na 3 meseca, osim kod uzoraka NNPC2 (Slika IX.29a). Kod uzoraka sa CEM III je suprotan trend, nakon 6 meseci vrednosti kapilarnog upijanja su manje nego nakon 3 meseca, osim kod uzoraka NRMCM2. Na 3 meseca u ovom rastvoru maksimalnu vrednost upijanja imaju uzorci sa recikliranim agregatom NRMCM1 ( $0,394\text{kg/m}^2$ ) a na 6 meseci NRPC1 ( $0,424\text{kg/m}^2$ ).

Uticao vrste cementa na konačnu vrednost kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su boravili u rastvoru magnezijum sulfata nije tako lako uočljiv kao kod uzoraka koji su boravili u rastvoru natrijum sulfata. Naime, upoređenjem vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 i 6 meseci, kod uzoraka betona spravljenih sa CEM I ne može se sagledati uticaj vrste cementa na promenu kapilarnog upijanja vode. Na uzorcima betona spravljenim sa CEM III, vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 6 meseci su neznatno veće u odnosu na odgovarajuće vrednosti nakon 3 meseca boravka u rastvoru magnezijum sulfata izuzev betona NMC1. Maksimalne vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 meseca izlaganja rastvoru  $\text{MgSO}_4$  imaju uzorci sa recikliranim agregatom MRMC1 ( $0,275\text{kg/m}^2$ ) a na 6 meseci MRPC1 ( $0,301\text{kg/m}^2$ ).

Radi izvođenja generalnog zaključka o uticaju vrste agregata na vrednost kapilarnog upijanja vode formirani su odgovarajući dijagrami i prikazani na Slika IX.30.



Slika IX.30- Poređenje maksimalnih vrednosti kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka po vrsti agregata u oba sulfatna rastvora; a) nakon 3 meseca, b) nakon 6 meseci

Analizom prikazanih rezultata zaključeno je :

- Nakon 3 meseca izlaganja delovanju sulfatnih rastvora, veću vrednost kapilarnog upijanja vode imaju uzorci sa recikliranim agregatom, osim kod mešavine NPC2, potopljene u  $\text{MgSO}_4$ , (Slika IX.30a).
- Nakon 6 meseci izlaganja delovanju sulfatnih rastvora svi uzorci betona sa recikliranim agregatom imaju veće vrednosti kapilarnog upijanja (Slika IX.30b) bez obzira koji sulfatni rastvor je u pitanju.

### 3.4. Živina porozimetrija

Smanjenje vodocementnog faktora menja ukupnu poroznost i smanjuje njegovu vrednost za sve etalonske uzorke i za sve starosti. Poređenje vrednosti ukupne

poroznosti etalona betonskih mešavina sa rečnim i recikliranog agregatom zaključujemo da:

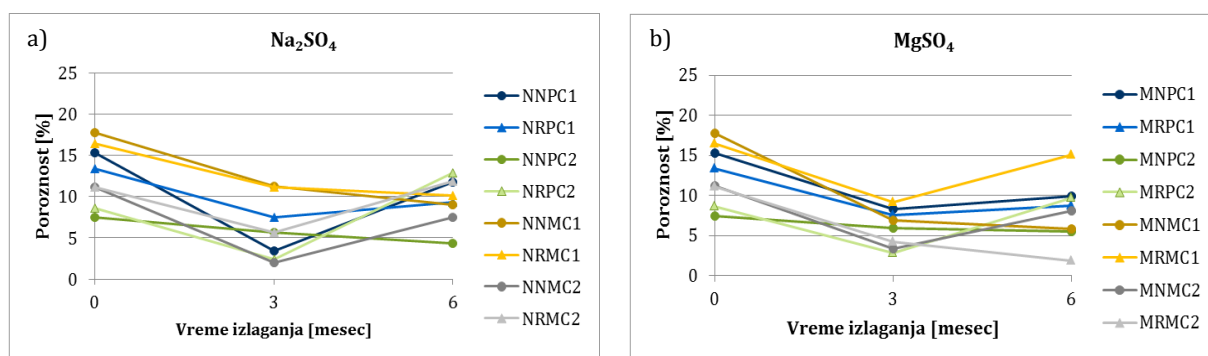
- Betonske mešavine sa većim vodocementnim faktorom, sa rečnim agregatom, za obe vrste cementa, za sve starosti, imaju veću poroznost od odgovarajućih betonskih mešavina na bazi recikliranog agregata.
- Kod betonskih mešavina napravljenih sa manjim vodocementnim faktorom trend je sličan za starost 0 i 3 meseca. Nakon 6 meseci poroznost betona na bazi recikliranog agregata se povećava.

U pogledu vrednosti ukupne poroznosti etalona betonskih mešavina sa rečnim i recikliranim agregatom zapaža se da:

- Na vrednost najviše utiče vrednost vodocementnog faktora. Za veći vodocementni faktor dobija se veća, a za manji vodocementni faktor manja vrednost ukupne poroznosti. U oba slučaja poroznost se smanjuje ili ostaje ista nakon 3 meseca. Nakon 6 meseci se povećava, s tim što je to povećanje veće kod betonskih mešavina sa rečnim agregatom i sa većim vodocementnim faktorom bez obzira na vrstu cementa. Kod recikliranog agregata značajnije povećanje se registruje samo za etalon ERPC2.
- Vrsta cementa ima uticaj na vrednost ukupne poroznosti. Veću poroznost imaju betonske mešavine napravljene sa CEM III.

Uticaj sulfatnih jona u pravcu smanjenja ukupne poroznosti je:

- veći kod betonskih mešavina sa većim vodocementnim faktorom za obe vrste cementa,
- sličan kod betonskih mešavina sa manjim vodocementnim faktorom.



Slika IX.31- Promena ukupne poroznosti uzoraka svih betonskih mešavina u rastvorima  $Na_2SO_4$  i  $MgSO_4$

Za uzorke izložene delovanju  $Na_2SO_4$ , pravilo koje važi za etalonske uzorke primenjivo je kod većine uzoraka osim kod NNPC2 (CEM I, rečni agregat,  $w/c=0,38$ ) na 3 meseca i NRPC2 (CEM I, reciklirani agregat i  $w/c=0,38$ ) i NRMC2 (CEM I, reciklirani agregat i  $w/c=0,38$ ) za 6 meseci (Slika IX.31a). Slično je i kod uzoraka izloženih delovanju  $MgSO_4$ , gde su izuzeci MNMC2 (CEM III, rečni agregat i  $w/c=0,38$ ) i MRPC2 (CEM I, reciklirani agregat,  $w/c=0,38$ ), Slika IX.31b.

Nakon 3 meseca izlaganja delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  minimalnu vrednost ukupne poroznosti imaju uzorci NNMC2 (1,95%) i NRPC2 (2,44%), oba sa  $w/c=0,38$ , dok je maksimalna vrednost kod uzoraka NNMC1 (11,24%) i NRMCM1 (11,16%) oba sa CEM III i  $w/c=0,55$  ali sa različitim agregatom. Kod uzoraka izloženih delovanju rastvora u trajanju od 6 meseci minimalna vrednost je kod uzoraka NNPC2 (4,3%) a maksimalna kod NRPC2 (12,87%), NRMCM2 (11,84%) i NNPC1 (11,8%), Slika IX.31a.

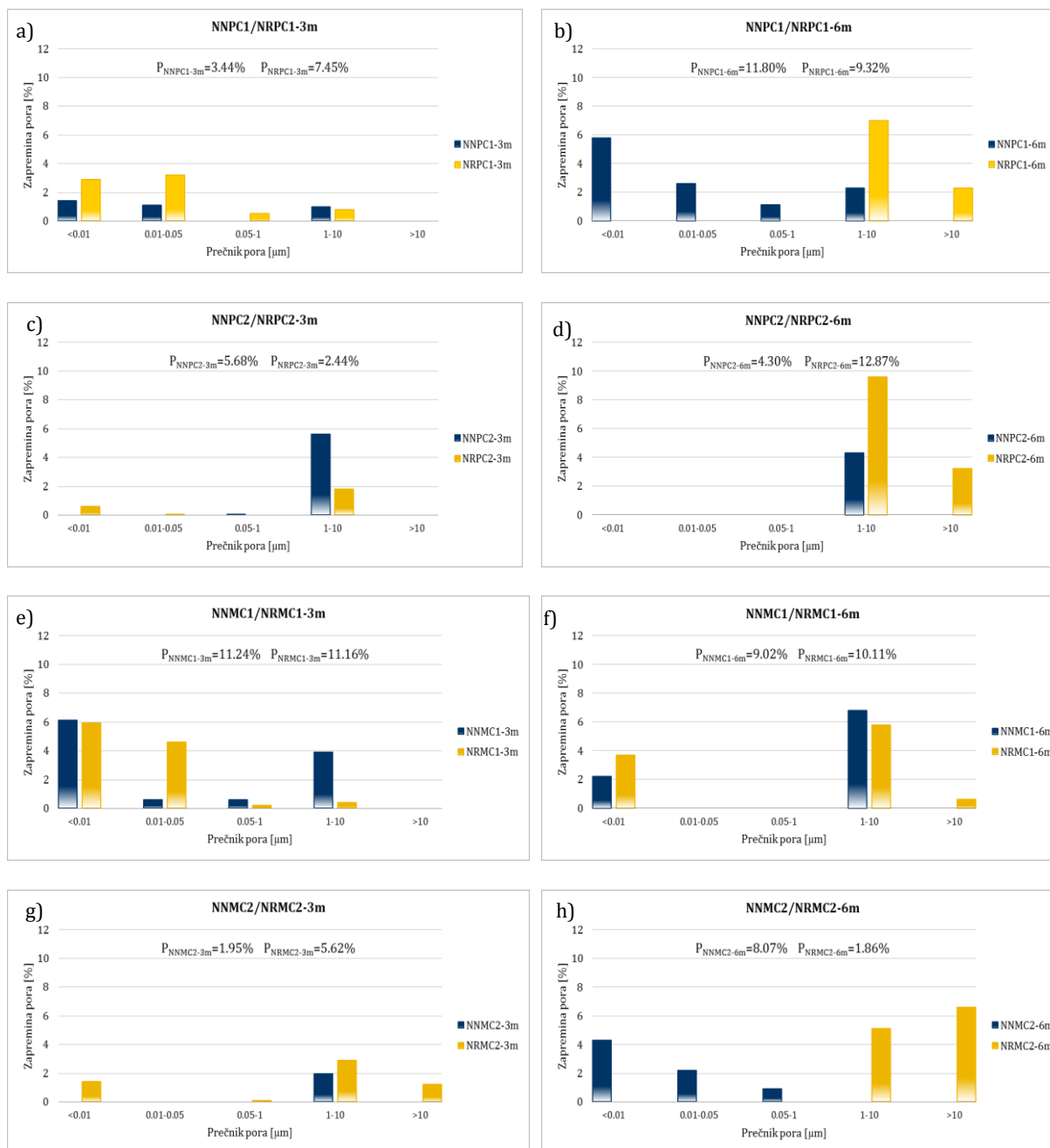
U slučaju rastvora  $\text{MgSO}_4$ , vrednosti ukupne poroznosti nakon 3 meseca delovanja kreću se u užim granicama u odnosu na uzorke u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (2,83-9,21%). Minimalna vrednost je kod istih uzoraka kao i u  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , MRPC2 (2,83%) i MNMC2 (3,36%) a maksimalna kod MRMC1 (9,21%) i MNPC1 (8,27%). Nakon 6 meseci, minimum je sada kod uzoraka MRMC2 (1,86%) a maksimum kod MRMC1 (15,07%), kao i kod rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Slika IX.31b.

Reciklirani agregat je uzrokovao smanjenje ukupne poroznosti kod etalonskih uzoraka onih betonskih mešavina sa višim vodocementnim faktorom (0,55), što se može objasniti činjenicom da u malteru vezanom za zrna agregata dolazi do dodatne hidratacije i tako smanjenja ukupne poroznosti. Ovo nije slučaj kod uzoraka napravljenim sa nižim vodocementnim faktorom (0,38). Reakcije rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  kao i naslage produkata u porama uzoraka menjaju ove utvrđene relacije koje važe za uzorke sa recikliranim agregatom i višim vodocementnim faktorom.

Krive dobijene pomoću rezultata živine porozimetrije pokazuju kod većine uzoraka bimodalnu a kod nekih uzoraka i trimodalnu raspodelu (Prilog 12). Deluju kao diskontinualne krive sa dva ili tri odvojena sistema. Vrednosti kritičnog prečnika teško je direktno upoređivati kod uzoraka sa normalnim i recikliranim agregatom jer postoje neslaganja u tipu raspodele (bimodalna, trimodalna..). Vrednosti "threshold"-a su kod većine uzoraka sa recikliranim agregatom i CEM I veće nego kod uzoraka sa istim sastavom ali sa rečnim agregatom, posmatrano za oba sulfatna rastvora i oba perioda. Izuzetak su uzorci MRPC1 nakon 3 meseca, NRPC1 i MRPC2 nakon 6. Kod uzoraka sa CEM III je suprotna situacija nego kod uzoraka sa CEM I ako posmatramo 3 meseca, tj. većina uzoraka sa recikliranim agregatom ima manju vrednost thresholda, osim u slučaju NRMCM1. Nakon 6 meseci svi uzorci sa recikliranim agregatom imaju veće vrednosti thresholda u odnosu na uzorke sa rečnim agregatom.

### 3.5. Živina porozimetrija-raspodela pora po veličini

Direktno poređenje raspodela pora kod betonskih mešavina sa istim sastavom ali različitom vrstom agregata izloženih delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju od 3 i 6 meseci prikazano je na Slika IX.32.



Slika IX.32- Uporedna raspodela pora po veličini za uzorke sa rečnim i recikliranim agregatom u  $Na_2SO_4$  za period od 3 i 6 meseci

Nakon 3 meseca u rastvoru  $Na_2SO_4$  uzorci sa CEM I, većim vodocementnim faktorom 0,55 a sa recikliranim agregatom (NRPC1), Slika IX.32a, imaju više pora u svim intervalima do  $1\mu m$  u odnosu na uzorke istog sastava ali sa rečnim agregatom (NNPC1). Ovaj podatak može da ukaže da se kod recikliranog agregata sulfatni joni možda više grupišu oko C-S-H jedinjenja i u gelskim porama. Širenje u tim porama je moglo da dovede do povećanja poroznosti do  $0,05\mu m$ . U oblasti  $1-10\mu m$  udeli su skoro izjednačeni a pora preko  $10\mu m$  u ovom slučaju nema. Nakon 6 meseci, uzorci sa rečnim agregatom imaju pore do  $10\mu m$  a oni sa recikliranim preko  $1\mu m$ . U oblasti "preklapanja"  $1-10\mu m$  veći udeo imaju uzorci sa recikliranim agregatom (Slika IX.32b).

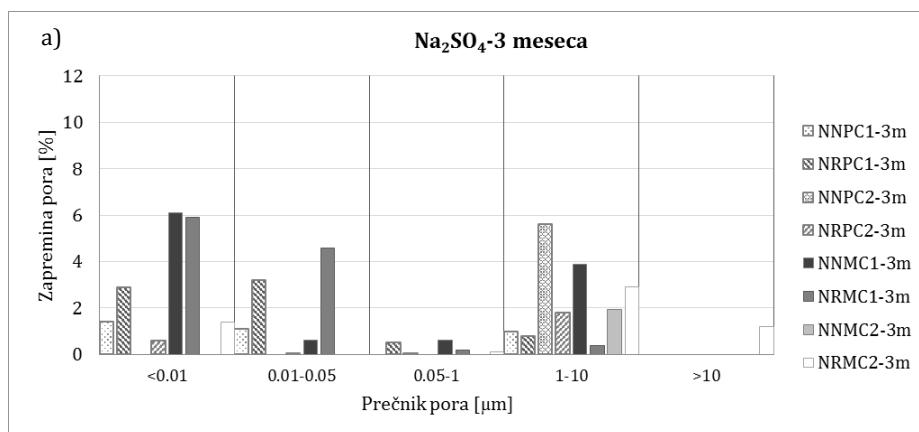
Kod uzoraka sa istim cementom ali manjim vodocementnim faktorom i kod obe vrste agregata (NNPC2, NRPC2), nakon 3 meseca u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , gotovo jedino postojeće pore jesu one veličine 1-10 $\mu\text{m}$  (Slika IX.32c) ali u većem procentu kod rečnog agregata. Kod uzoraka sa recikliranim agregatom postoje u malom procentu i pore manje od 0,01 $\mu\text{m}$ . Nakon 6 meseci izlaganja ostaju i dalje dominantne pore u intervalu 1-10 $\mu\text{m}$  ali se sada kod uzoraka sa recikliranim agregatom njima pridodaju i pore preko 10 $\mu\text{m}$  (Slika IX.32d).

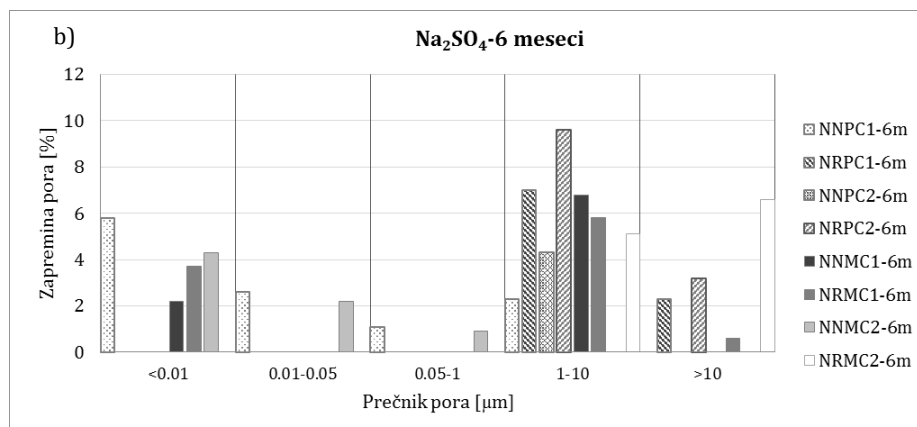
U slučaju uzoraka sa CEM III i većim vodocementnim faktorom, na 3 meseca delovanja rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Slika IX.32e), dominiraju najsitnije pore kod obe grupe uzoraka (NNMC1, NRMC1). Veće učešće sitnijih pora je u skladu sa činjenicom da reciklirani agregat ima u startu veću količinu C-S-H jedinjenja. Dodatno i produkti hidratacije CEM III imaju veću količinu C-S-H gela u odnosu na produkte hidratacije CEM I. Otuda i sulfatni joni imaju na raspolaganju najviše C-S-H gela za reakciju, pa se širenje koje se dešava usled reakcije gela sa sulfatnim jonima odražava na povećanje učešća pora u opsegu do 0,05  $\mu\text{m}$ .

Dodatne pore kod uzoraka sa rečnim agregatom jesu one u intervalu 1-10 $\mu\text{m}$  a kod uzoraka sa recikliranim agregatom su pore u intervalu 0,01-0,05 $\mu\text{m}$ . Ostali intervali pora su zastupljeni u zanemarljivom procentu. Nakon 6 meseci kod obe vrste agregata takođe dominiraju najsitnije pore ali u manjem procentu nego nakon 3 meseca, uz dodatak pora veličine 1-10 $\mu\text{m}$  (Slika IX.32f). Kod uzoraka sa recikliranim agregatom prisutne su u manjem procentu i pore veće od 10 $\mu\text{m}$ .

Kada se posmatraju uzorci sa istim cementom ali manjim vodocementnim faktorom i sa rečnim agregatom (NNMC2) nakon 3 meseca se uočavaju samo krupne pore veličine 1-10 $\mu\text{m}$  a u slučaju sa recikliranim agregatom (NRMC2) postoje i pore manje od 0,01 $\mu\text{m}$  kao i one preko 10 $\mu\text{m}$  (Slika..g). Nakon 6 meseci, uzorci sa rečnim agregatom imaju pore u svim intervalima do 1 $\mu\text{m}$  a uzorci sa recikliranim agregatom imaju pore veće od te vrednosti (Slika IX.32h).

Na narednoj Slika IX.33 prikazani su zajedno rezultati učešća pora po veličini svih uzoraka koji su izloženi delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  podeljeni po periodima izlaganja.



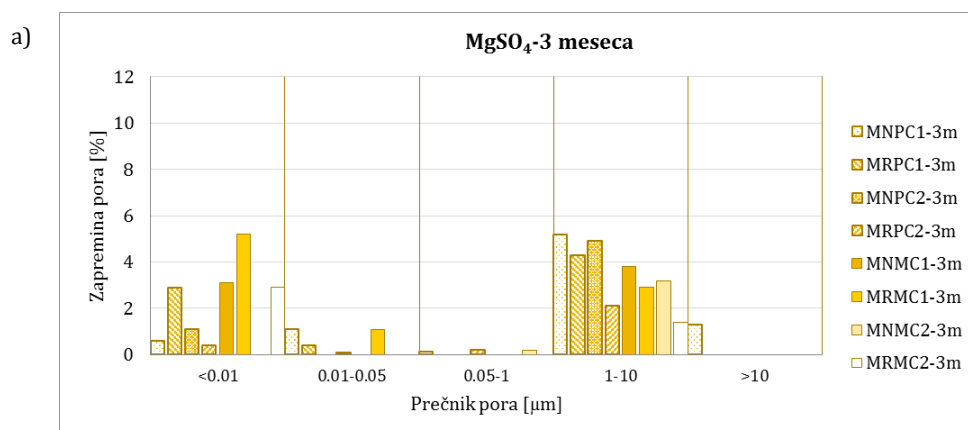


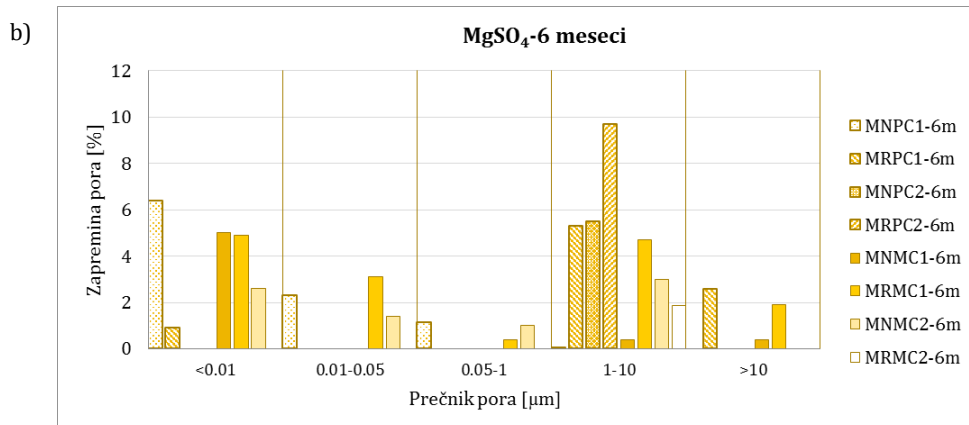
Slika IX.33- Raspodela pora po veličini za sve uzorke sa rečnim i recikliranim agregatom u Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> za periode od 3 i 6 meseci

Kod uzoraka koji su bili izloženi delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u trajanju od 3 meseca pore manje od 0,01μm su zastupljene kod većine uzoraka osim kod NNPC2 i NNMC2 a ovih pora najviše ima kod uzoraka NRPC1, NNMC1 i NRMC1 (Slika IX.33a). Nešto krupnijih pora (interval 0,01-0,05μm) ima takođe dosta kod NRPC1 i NRMC1. Krupne pore u intervalu 1-10μm postoje kod svih uzoraka a najviše kod NNPC2 i NNMC1. Pora veličine 0,05-1μm i preko 10μm skoro da nema nakon ovog perioda u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Nakon 6 meseci u istom rastvoru, menja se slika raspodela pora (Slika IX.33b). Udeo najsitnijih pora sada je smanjen ili je potpuno izostao u odnosu na 3 meseca, kod većine uzoraka osim kod NNPC1 i NNMC2 gde se povećao (Slika IX.33b). Sledeća dva interval 0,01-0,05μm i 0,05-1μm postoje jedino kod NNPC1 i NNMC2. A dominantni interval kod većine uzoraka je 1-10μm kojih najviše ima kod NRPC2 a nešto malo manje kod NRPC1 i NNMC1. Najkrupnijih pora najviše je kod NRMC2 a potom kod NRPC2 i NRPC1 a u malom procentu i kod NRMC1. Može se primetiti da nakon 6 meseci u Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> krupne pore preko 1μm dominiraju kod uzoraka sa recikliranim agregatom a jedini iz grupe uzoraka sa rečnim agregatom jeste NNMC1.

Na Slika IX.34 su prikazani rezultati raspodele pora po veličini za sve uzorke koji su bili izloženi delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub> u trajanju 3 ili 6 meseci.



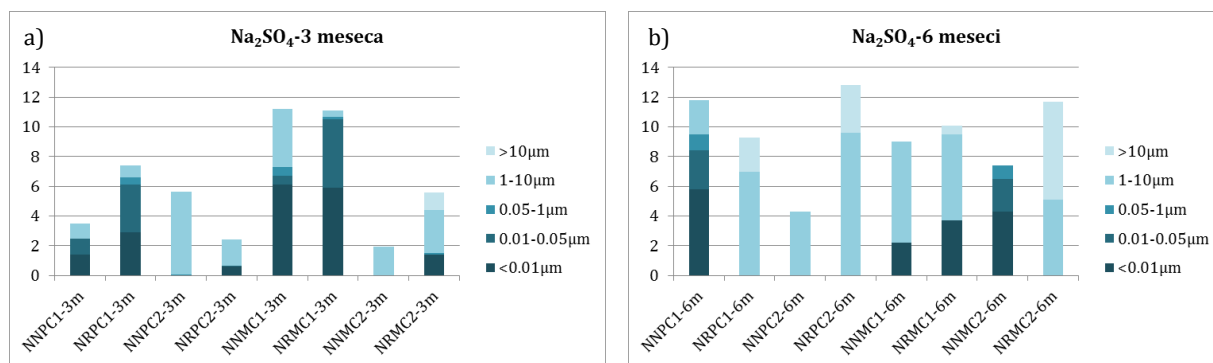


Slika IX.34- Raspodela pora po veličini za sve uzorke sa rečnim i recikliranim agregatom u MgSO<sub>4</sub> za periode od 3 i 6 meseci

Generalno se uočava da su nakon 3 meseca izlaganja delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub> dominantne pore koje su manje od 0,01μm i one u intervalu 1-10μm (Slika IX.34a). Ovih najsitnijih pora ima najviše kod uzoraka MRMC1 a potom slede MNMC1, MRPC1 i MRMC2. Pora u intervalu 1-10 najviše je kod MNPC1, MNPC2 i MRPC1 a potom kod MNMC1, MRMC1 i MNMC2 pri čemu nije velika razlika između njih. Pora u intervalu 0,01-0,05μm ima malo kod MNPC1 i MRMC1 dok je kod ostalih zanemarljiv procenat kao i kod onih u opsegu 0,05-1μm. Najkrupnijih pora ima samo kod uzoraka MNPC1 u malom procentu.

Nakon 6 meseci delovanja MgSO<sub>4</sub>, ponovo su kod većine uzoraka dominantni udeli pora manjih od 0,01 i onih u intervalu 1-10 ali uz pojavu pora i drugih veličina (Slika IX.34b). Najsitnijih pora ima najviše kod uzoraka MNPC1 a potom kod MNMC1 i MRMC1 pri čemu uzorci MNPC1 i MRMC1 imaju i pora iz narednog intervala 0,01-0,05μm. Pore u intervalu 1-10μm dominiraju a možda su i jedino postojeće kod uzoraka MRPC2 (najviše od svih uzoraka), MRPC1, MNPC2, potom kod MRMC1, MNMC2 i MRMC2. Najkrupnije pore postoje kod MRPC1 i MRMC1.

Rezultati sa dijagrama prikazanih na Slika IX.35 i Slika IX.36 mogu se predstaviti na drugačiji način, preko kumulativnih histograma čiji maksimum ujedno predstavlja ukupnu poroznost uzorka.







etrigite (Et) i gipsa (Gy). Dodatno je smanjenju količine portlandita, doprinela i pojava karbonizacije kod uzoraka.

Relativni intenzitet pika etringita raste prema sledećem rasporedu (ENPC1 i ERPC1)→(NNPC1 i NRPC1) →(MNPC1 i MRPC1). Dva glavna pika ove faze koji se inače nalaze na  $9,08^\circ$  i  $15,78^\circ$   $2\theta$  vrednosti su pomerene ka manjim vrednostima  $2\theta$ , što pokazuje da je došlo do uvođenja izvesnih supstanci u kristalnoj strukturi etringita, Slika IX.37. Prisustvo kalcijum monosulfoaluminata i kalcijum monokarboaluminata kao AFm faze, je zabeleženo kroz pikove malog intenziteta na  $9,5^\circ$   $2\theta$  i  $11,7^\circ$   $2\theta$ , redom [186],[187]. Inače prisustvo ovih faza je uticalo da se potom formira etringit od reaktivnog aluminijuma koji potiče iz ove dve faze, portlandita i sulfatnih jona, Slika IX.37.

Dok se primećuje da je etringit prisutan u svim uzorcima, kalcijum-monosulfat i kalcijum monokarbonat (AFm faza) su prisutne u uzorcima sa RCA dok kod uzoraka sa NA samo kod uzoraka NNPC1 (uzorci u rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

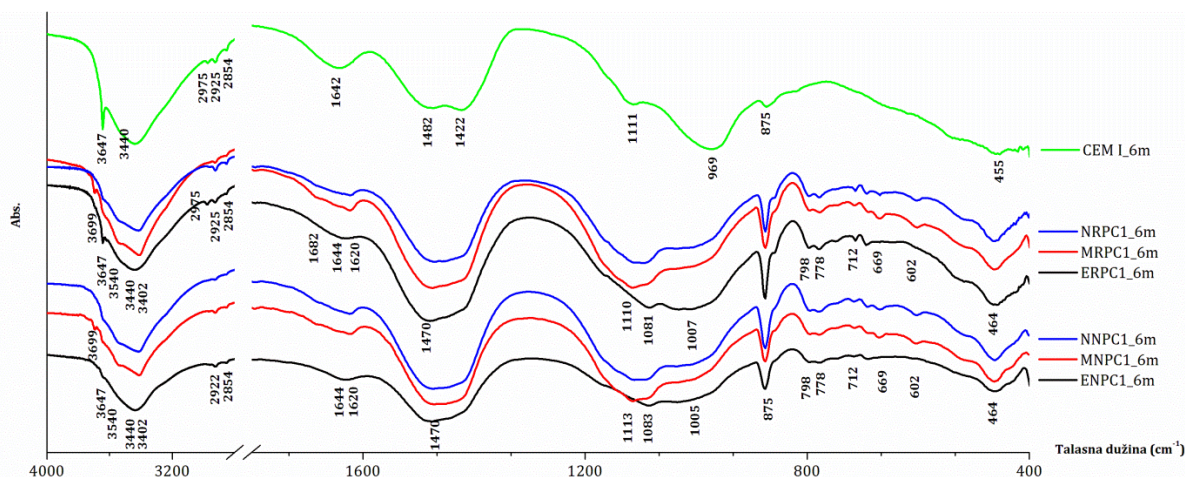
Prisustvo gipsa (Gy) je više izraženo kod uzoraka koji su bili izloženi delovanju sulfatnih rastvora u odnosu na etalonske uzorke. Između uzoraka koji su bili izloženi delovanju sulfatnih rastvora, najviši pik je uočen kod uzoraka NNPC1 (na  $22^\circ$   $2\theta$ ), što podrazumeva da je u tom slučaju bila najviša koncentracija sulfatnog rastvora dok je koncentracija reaktivnog aluminijuma bila najniža, tako stvarajući uslove za formiranje gipsa [83],[188].

Karbonati su prisutni u svim ispitivanim uzorcima, izuzev kod cementne paste sa cementom CEM I (Slika IX.37). Ova mineralna faza se pojavljuje u obliku kalcita, što se smatra najstabilnijim oblikom kalcijum-karbonata. Njegovo prisustvo ukazuje na pojavu karbonizacije [189],[190].

Uočava se i prisustvo kvarca i feldspata kod svih analiziranih uzoraka (osim kod cementne paste), kao zaostali deo zrna agregata. Dodatno je prisutan brucit u uzorcima MNPC1 i MRPC1, dok mineralna faza M-S-H nije pronađena. Takođe, tragovi  $\text{C}_3\text{S}$ -alit su prisutni, što ukazuje na prisustvo ostataka klinkera (Slika IX.37).

### 3.7. Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR)

Prema dobijenim FTIR spektrima (Slika IX.38), očigledno je da je potrošnja portlandita (pik na  $3643\text{cm}^{-1}$ ) veća u slučaju uzoraka izloženih delovanju sulfata u poređenju sa etalonskim uzorcima. Absorpciona traka na  $3699\text{cm}^{-1}$ , u slučaju uzoraka izloženih delovanju  $\text{MgSO}_4$  (MNPC1 i MRPC1) ukazuje na prisustvo mineralne faze brucit. Prisustvo je potvrđeno i preko XRD analize (Slika IX.38). Karakteristične absorpcione trake sulfata su obično prisutne u opsegu  $1100\text{-}1200\text{cm}^{-1}$  usled  $\nu_3$  vibracije  $\text{SO}_4^{2-}$  grupe.

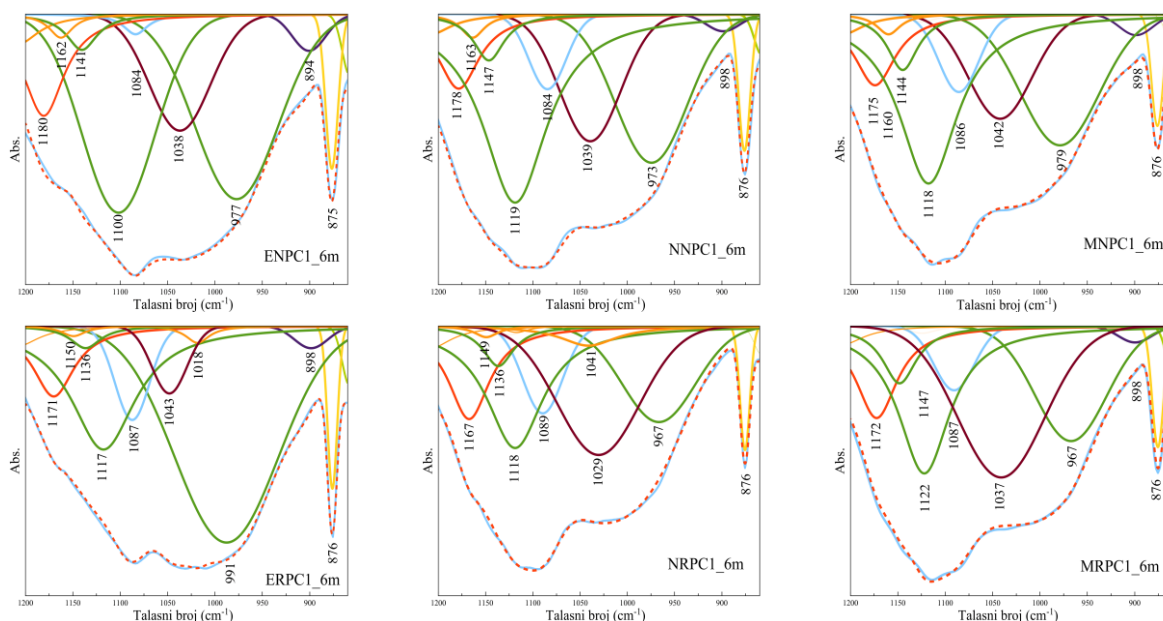


Slika IX.38 – FTIR rezultati etalonskih uzoraka i uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 6 meseci

Nekoliko mineralnih faza koje sadrže sulfatne grupe (kalcijum-monosulfat, etringit i gips) imaju preklapanje absorpcionih traka u određenom opsegu talasnih brojeva. Zato identifikovanje svake faze posebno može biti otežano. Međutim, vibracija  $\nu_2$  molekula vode u sulfatnim jedinjenjima-uglavnom gipsu (jedan pik na  $1623\text{cm}^{-1}$  i manji na  $1684\text{cm}^{-1}$ ) kao i  $\nu_3$  vibracija na  $3554\text{cm}^{-1}$  u gipsu, ukazuje na njegovo prisustvo. Absorpcione trake na  $1115\text{cm}^{-1}$ ,  $669\text{cm}^{-1}$  i  $601\text{cm}^{-1}$ , mogu biti pokazatelji prisustva gipsa i etringita.

Karakterističan set traka koje su centrirane oko  $1000\text{cm}^{-1}$  pripisuje se Si-O  $\nu_3$  asimetričnim valentnim vibracijama ( $\nu_3$  asimetričnom istezanju Si-O veza)  $Q^2$  tetraedra, i njegova srednja frekvencija varira u funkciji sa Ca/Si odnosom. Dobijeni spektri (Slika 2) pokazuju da su talasni brojevi absorpcionih traka koje su uobičajene za asimetrične valentne vibracije C-S-H gela smanjeni, što je mnogo naglašenije u slučaju uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora u poređenju sa etalonskim uzorcima. Takođe, traka na  $462\text{cm}^{-1}$ , koja se pripisuje vibracijama pri savijanju Si-O-Si ( $\text{SiO}_4$ ), pokazuje promene u C-S-H gelu usled dekalifikacije [191].

Dekonvolucija (Slika IX.39) unutar opsega talasnih brojeva  $1200\text{--}850\text{cm}^{-1}$  i fitovanje krivih, potvrđuju složenu strukturu ispitivanih uzoraka i obezbeđuju bolje razumevanje asimetričnog istezanja veza C-S-H gela na  $970\text{cm}^{-1}$ . Naime, pomeranje absorpcionog pika na  $977\text{cm}^{-1}$  za etalonske uzorke ENPC1 i  $991\text{cm}^{-1}$  za uzorke ERPC1, u odnosu na vrednost  $969\text{cm}^{-1}$  kod paste sa CEM I (Slika IX.39), ukazuje na pojavu dekalifikacije i polimerizacije C-S-H gela. Dodatno, intenzitet absorpcionog pika na  $991\text{cm}^{-1}$  je viši nego intenzitet pika sa centrom na  $977\text{cm}^{-1}$ , što ukazuje na veću količinu C-S-H gela u slučaju betona sa RCA, nego u slučaju betona sa NA. Ovo je verovatno posledica prisustva maltera vezanog u RCA.



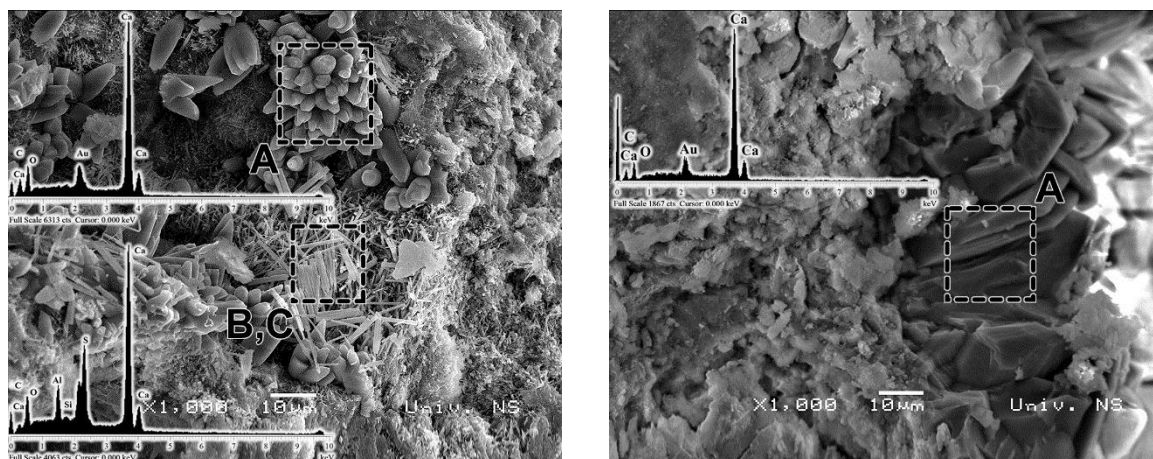
Slika IX.39 -Dekonvolucija asimetričnih Si-O veza u C-S-H gelu (FTIR analiza) za etalonske uzorke izložene delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 6 meseci

Da bi se odredile promene u strukturi C-S-H gela kod uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora u trajanju od 6 meseci, njihovi absorpcioni pikovi su poređeni sa odgovarajućim etalonskim. U poređenju sa etalonskim uzorkom ENPC1 ( $977\text{cm}^{-1}$ ), viši nivo dekalifikacije je uočen kod MNPC1, dok u slučaju uzorka NNPC1 pik je pomeren ka manjim vrednostima talasnih brojeva i ukazuje na rekalcifikaciju/polimerizaciju silikatnog lanca. Isto je dobijeno i u slučaju uzorka NRPC1 i MRPC1, kada se uporede sa ERPC1. Pojava rekalcifikacije se pripisuje procesu karbonizacije. Karbonizacija C-S-H gela ima za rezultat formiranje kalcijum karbonata i amorfne silike na šta ukazuje absorpciona traka na oko  $1080\text{ cm}^{-1}$ , Slika IX.39. Ova traka ukazuje na delimičnu razgradnju C-S-H gela usled karbonizacije. Uporedo sa sa pomenutim promenama u C-S-H gelu dolazi i do smanjenja intenziteta absorpcionog pika na  $875\text{cm}^{-1}$ . Na prisustvo karbonata još ukazuju i absorpcione trake na  $712\text{ cm}^{-1}$  i  $1430\text{ cm}^{-1}$ .

### 3.8. SEM-EDS analiza

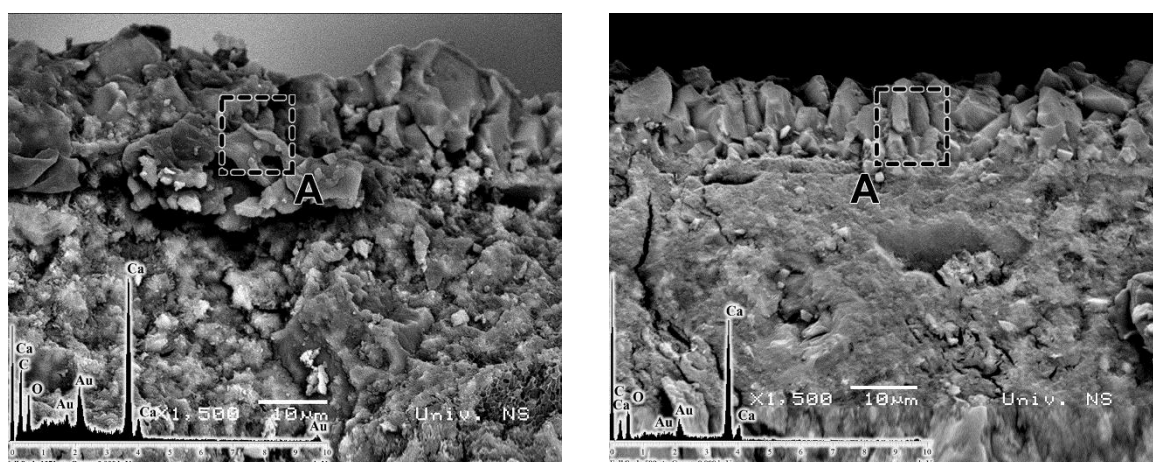
Iako promene koje se dešavaju usled hemijske reakcije jona iz sulfatnih rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$  nisu tako složene na hemijskom nivou, u mikrostrukturi su prisutne različite promene.

*Rastvor  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ :* Na Slika IX.40a se vidi prisustvo kristala kalcijum-karbonata (detalj A) koji su formirani kroz proces karbonizacije portlandita, nakon 3 meseca delovanja sulfatnog rastvora. Kristali su formirani odmah pored mešavine dve faze, etringita i C-S-H (detalji B i C). Scalny [7] pretpostavlja da formiranje primarnog etringita u vidu mikrokristala dispergovanih unutar C-S-H gela, uzrokuje ekspanziju gelske strukture i pojavu pukotina. Prisustvo kalcijum-karbonata se primećuje i kod uzorka nakon 6 meseci delovanja sulfatnog rastvora (Slika IX.40b).



Slika IX.40 - SEM slika uzoraka izloženih delovanju  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   
 a) NNPC1-3m, x1000, b) NNPC1-6m, x1000; A: kalcijum-karbonat, B: etringit, C: C-S-H gel

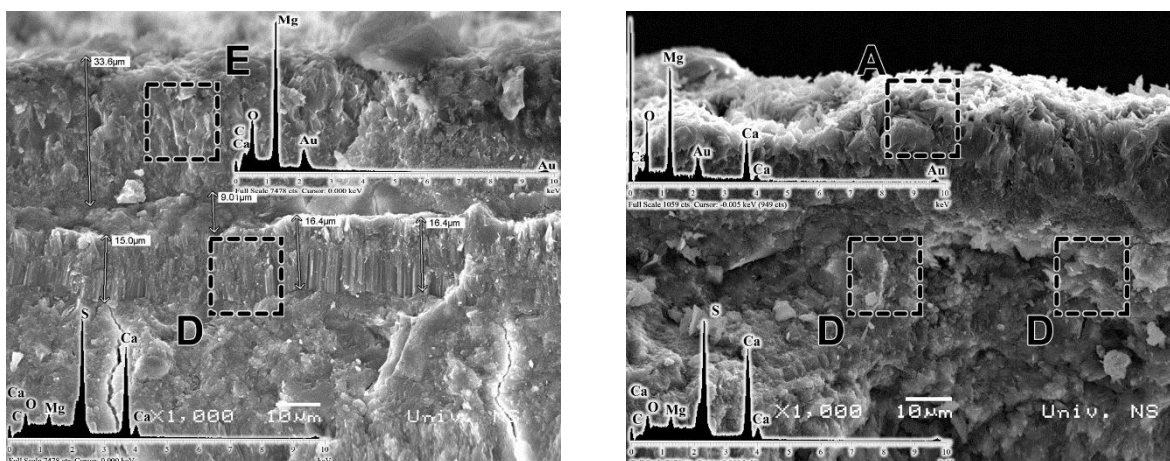
Slika IX.41 ilustruje razliku između poroznosti uzoraka sa višim vodocementnim faktorom (Slika IX.41a) i nižim (Slika IX.41b), u slučaju uzoraka sa RCA. Struktura sa višim vodocementnim faktorom je više porozna i, zato osetljivija na delovanje jona (crna boja predstavlja pore). Takođe se potvrđuje formiranje tankog sloja kalcijum-karbonata na površini uzorka, nakon delovanja  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



Slika IX.41 - Slika uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   
 a) NRPC1-6m, x1500, b) NRPC2-6m, x1500; A: kalcijum-karbonat

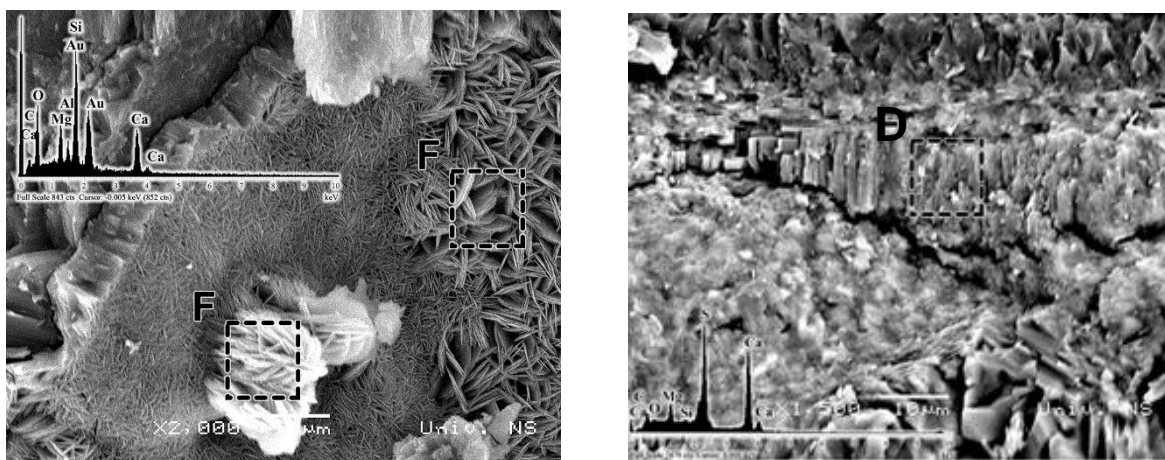
**Rastvor  $\text{MgSO}_4$ :** Na Slika IX.42 je prikazana površina betonskog uzorka nakon izlaganja delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$ . Nakon 3 meseca, na površini uzorka se formira sloj brucita debljine  $34\mu\text{m}$ , dok je odmah ispod njega kontinualni sloj gipsa (Slika IX.42a). Usled stvaranja sloja brucita ulazak jona  $\text{Mg}^{2+}$  je redukovano [192]. Sloj brucita nestaje u periodu između 3 i 6 meseci izlaganja uzorka delovanju rastvora magnezijum sulfata [87],[193]. Rezultati SEM analize pokazuju da dolazi do pucanja i nestajanja ovog sloja a pojave sloja kalcijum-karbonata na njegovom mestu, Slika IX.42b. XRD i FTIR analize potvrđuju njegovo prisustvo (Slika IX.37, Slika IX.38). Lokalno nestajanje brucita ukazuje na ubrzanje procesa degradacije uzorka. Gips je diskontinualno raspoređen ispod

karbonatnog sloja kod uzorka MNPC1, nakon 6 meseci delovanja rastvora  $MgSO_4$ , Slika IX.42.



Slika IX.42 – SEM slika uzoraka izloženih delovanju rastvora  $MgSO_4$   
a) MNPC1-3m, x1000, b) MNPC1-6m, x1000; A: kalcijum-karbonat, D: gips, E: brucit

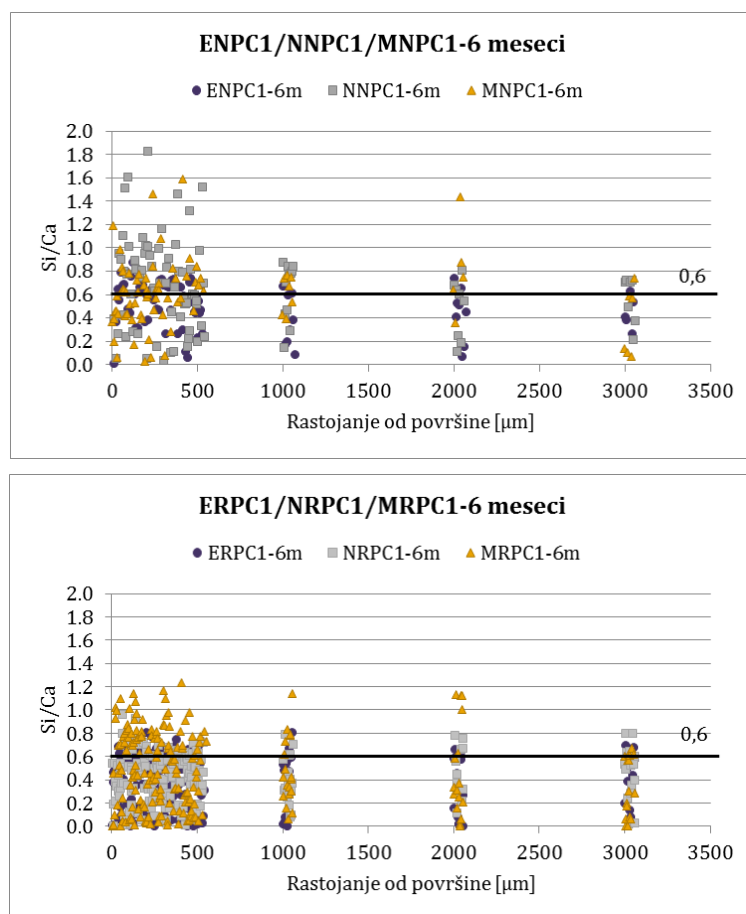
Jedan od razloga zašto hidratizovana zgora ima nižu kapilarnu poroznost u odnosu na hidratizovani običan cement i dobre mehaničke karakteristike je formiranje hidrotalcit faze [194],[195],[196]. To je praćeno povećanjem zapremine, Slika IX.43a. Slika IX.43b pokazuje da usled delovanja sulfatnog rastvora dolazi do pojave pukotina i između sloja gipsa i matriksa.



Slika IX.43 - SEM slika uzoraka izloženih delovanju rastvora  $MgSO_4$   
a) hidrotalcit faza u MNMC2-6m, x2000, b) MRPC1-6m, x1500; D: gips, F: hidrotalcit faza

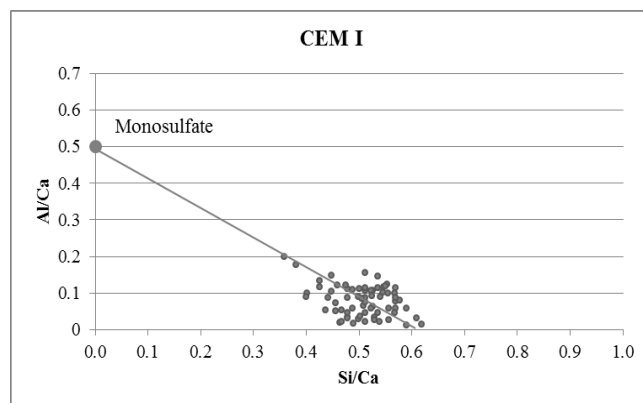
### 3.9. BSE-EDS analiza

EDS analize su korišćene za određivanje stepena dekalifikacije C-S-H gela i faznog sastava na nivou mikrokristala. Slika IX.44 pokazuje promene u dekalifikaciji uzorka koje su izražene kroz povećanje vrednosti atomskog odnosa Si/Ca, posmatrano od površine uzorka koja je bila izložena delovanju rastvora. Promene su prikazane za etalonske uzorke kao i uzorke izložene delovanju sulfatnih rastvora [83],[87], Slika IX.44.



Slika IX.44– Atomski odnos Si/Ca prikazan u odnosu na rastojanje od površine uzorka  
a) beton NPC1, b) beton RPC1

S obzirom da pesak iz maltera može imati uticaj na EDS rezultate, vrednost Si/Ca u C-S-H gelu, pre izlaganja delovanju sulfatnih rastvora, urađena je EDS analiza na pasti starosti 28 dana napravljenoj od cementa CEM I. Atomski odnos Si/Ca u C-S-H fazi je određen ekstrapolacijom linije koja kreće iz kalcijum monosulfata (Ms), prolazeći kroz C-S-H gel do preseka sa x osom, Slika IX.45.



Slika IX.45 – Atomski odnos Al/Ca u funkciji Si/Ca kod paste sa CEM I pri starosti od 28 dana

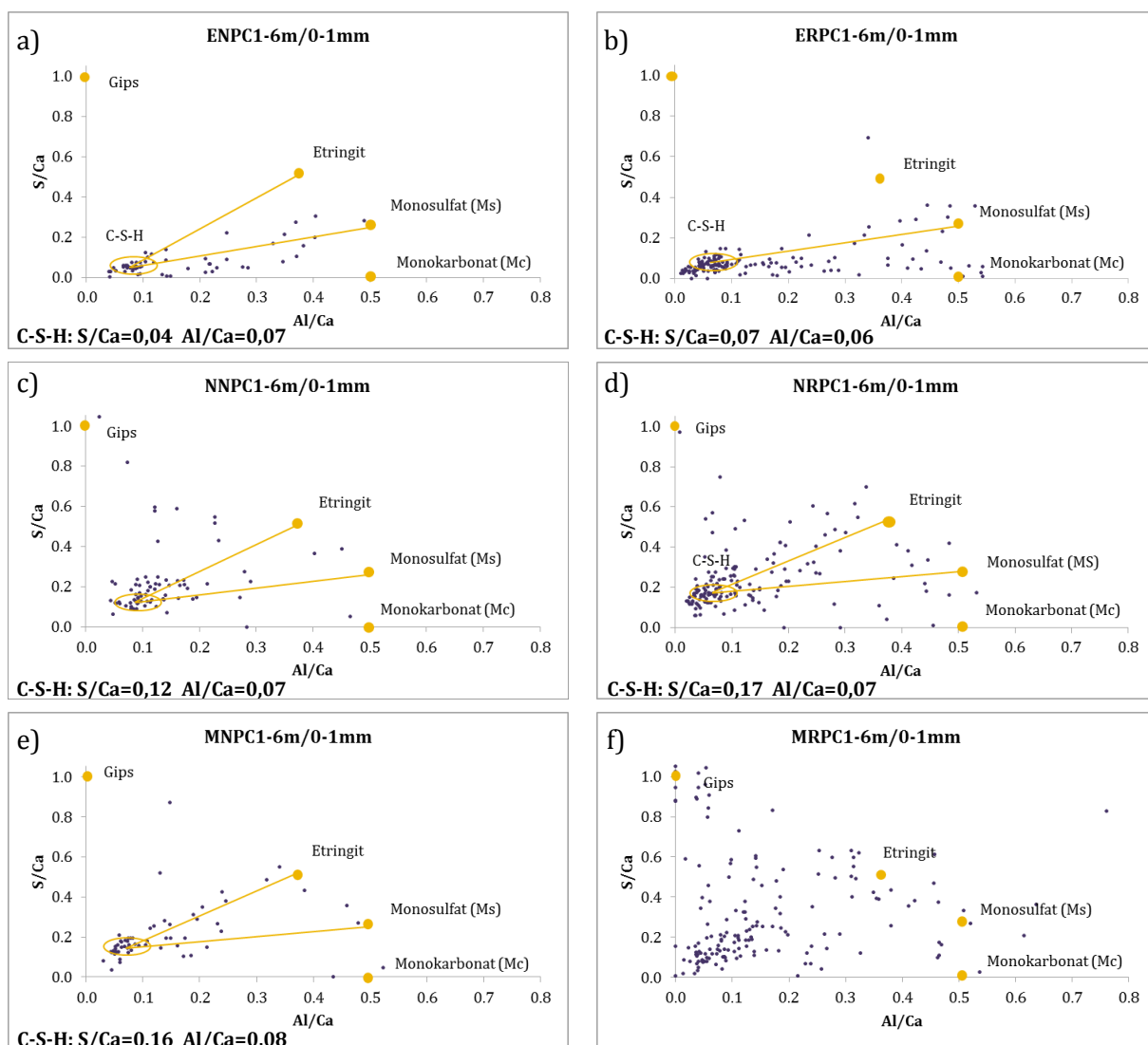
Dobijena vrednost za atomski odnos Si/Ca u C-S-H gelu je 0,6, i ona predstavlja referentnu vrednost za oba posmatrana betona (NPC1 i RPC1), Slika IX.45.

Slika IX.44 pokazuje da je dekalifikacija primetna do 2mm, i više naglašena kod uzoraka sa NA u odnosu na uzorke sa RCA. Kod uzoraka sa NA, dominantna je u prvih 0,5mm dok se značajno smanjuje na dubini od 1mm i veća kod uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (NNPC1). U slučaju uzoraka sa RCA, dekalifikacija je prisutna do dubine od 2mm, a više naglašena kod uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$  (MRPC1), Slika IX.44. Rezultati dekalifikacije dobijeni EDS analizom su u prvom trenutku suprotni rezultatima obuhvaćenim FTIR analizom. Naime, dekalifikacija je generalno karakterisana smanjenjem Ca/Si odnosa i ovde je to u suprotnosti sa povećanjem Ca/Si odnosa u FTIR rezultatima, što ukazuje na pojavu depolimerizacije C-S-H strukture. Međutim, FTIR rezultati takođe pokazuju i na pojavu silika gela, što može biti posledica dekompozicije C-S-H strukture, i uticati na smanjenje Ca/Si odnosa.

Produkti hidratacije portland cementa su u suštini mešavine različitih faza [197],[198][199]. Zato je važno odrediti koja faza je pomešana sa C-S-H gelom, jer je dokumentovano da ekspanzija uzoraka nije određena količinom etringita već je povezana sa mestom gde se on formira [199],[200]. Naime, pretpostavlja se da je ekspanzija uzrokovana razvojem kristalizacionog pritiska [201], kada je rast kristala ograničen. Ovo se dešava kada kristali etringita rastu u malim porama (reda veličine desetine nanometara), [200]. Formiranje etringita se pojavljuje na granici između tečnosti u porama i hidratiranih zrna koja u sebi sadrže reaktivni aluminijum. To su obično zrna AFm faze smeštene u okviru C-S-H gela [199]. Gelska poroznost spada u male pore (do 10nm) koje su gore spomenute, što podrazumeva da je rast kristala etringita koji se formiraju u njima ograničen i da je njihova veličina na nivou mikrokristala. Za odvijanje ovih procesa potrebno je dostići superzasićenje pornog rastvora u odnosu na kristale etringita [202]. Savremena istraživanja iz ove oblasti pokazuju da istovremeno postojanje kalcijum monosulfata i gipsa obezbeđuje superzasićenje u odnosu na etringit i omogućava da etringit bude stabilan [199].

Jedan od načina da se prati sastav pornog rastvora, što se smatra veoma bitnim za razvoj kristalizacionog pritiska, je da se pomoću EDS metode posmatra količina sulfata koja je absorbovana na C-S-H gel. U tom cilju se na graficima poput ovog prikazanom na Slika IX.46 pokazuju EDS rezultati analize uzoraka i stehiometrijski sastav etringita (E), AFm faze (kalcijum monosulfat-Ms, kalcijum monokarbonat-Mc) i gipsa (G) u uzorcima. Na slici su predstavljeni rezultati dobijeni EDS analizom do dubine 1mm u odnosu na površinu uzorka. Kada analizirana zapremina obuhvata mešavinu faza, položaj dobijenih tačaka može biti na liniji koja povezuje C-S-H gel i neku od tačaka obeleženih kao čista AFm ili AFt faza ili u regionu obuhvaćenom sa tri čiste faze [68]. U poslednjem slučaju, tačka prikazuje sastav mešavinu te tri faze. Sastav C-S-H gela je određen povlačenjem linije iz Ms ili Mc do preseka sa grupom tačaka koje odgovaraju sastavu C-S-H gela, Slika IX.46.





Slika IX.46 – Atomski odnosi S/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca za etalonske uzorke i one izložene delovanju sulfatnih ratsvora nakon 6 meseci

Fazni sastav etalonskih uzoraka prikazuje oblast na koju nisu delovali sulfatni joni. Slika IX.46a i Slika IX.46b pokazuju da u posmatranim etalonskim uzorcima preovlađuje mešavina tri faze (C-S-H, Ms i Mc). Čini se da karbonizacija utiče na stvaranje kalcijum monokarbonata. Postoji izvestan broj tačaka koje predstavljaju mešavinu C-S-H gela, E i Ms. Na Slici Slika IX.46b se vidi da C-S-H gel u uzorku ERPC1 sadrži veću količinu sulfatnih jona nego u slučaju uzorka ENPC1. Najverovatnije objašnjenje za ovu pojavu je uticaj faznog sastava maltera koji je vezan za reciklirani agregat u uzorku ERPC1. Dok u ERPC1, preovlađuje mešavina C-S-H/Mc, u uzorku ENPC1 je prisutna mešavina C-S-H/Ms a preovlađuju C-S-H/Mc.

Slika IX.46c i Slika IX.46d omogućavaju da se uoči razlika između AFm i AFt faza kao i odnosa S/Ca u uzorcima koji su bili izloženi delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u trajanju od 6 meseci. Na Slici Slika IX.46d se primećuje da C-S-H gel u uzorku NRPC1 obuhvata više etringita nego AFm faze u odnosu na uzorke NNPC1 ali i u odnosu na ERPC1. Osim etringita veoma je prisutan i gips kod oba uzorka. Uzorci takođe imaju i viši odnos S/Ca

u C-S-H gelu, ukazujući na smanjenje količine reaktivnog aluminijuma i povećanje koncentracije sulfata u pornom rastvoru (odnosi atoma u C-S-H su dati na slici). Ovo obezbeđuje uslove za stvaranje etringita iz AFm faze koja je izmešana sa C-S-H gelom, stvaranje superzasićenja pornog rastvora, kao i razvoj kristalizacionog pritiska. Generalno, kristali etringita koji nastaju unutar C-S-H gela su manji nego oni koji nastaju u većim porama. Zato na EDS rezultate utiču i faze koje se nalaze oko etringita i dobijene tačke su bliže sastavu C-S-H gela. Kada su kristali veći, dobijene tačke su bliže etringitu [1]. Na odgovarajući način je kod uzoraka NRPC1 formiran gips u blizini C-S-H gela, Slika IX.46d. Nastanak ove mešavine znači da je i gips uzeo kalcijum iz C-S-H gela za svoje formiranje [1]. Interesantno je da je najveća ekspanzija nakon 6 meseci upravo kod ovih uzoraka. Veće rasipanje tačaka kod uzorka NNPC1, kao i manji broj tačaka blizu C-S-H gela ukazuje na je manje etringita obuhvaćeno unutar C-S-H gela. Niža vrednost odnosa S/Ca (0,12) u C-S-H gelu za uzorak NNPC1 u odnosu na ovu vrednost u uzorku NRPC1 (0,17) može biti objašnjena odnosom Si/Ca prikazanim na Slika IX.44. Viša vrednost odnosa Si/Ca, koja je dobijena za uzorak NNPC1 u poređenju sa uzorkom NRPC1, posmatrano do 1mm dubine, ukazuje na manju mogućnost vezivanja sulfatnih jona. Naime, Barbarulo i ostali [203] su pokazali da se količina sulfata, koja je vezana u C-S-H gelu, povećava kada se povećavaju sledeći parametri: koncentracija sulfata u pornom rastvoru, atomski odnos Ca/Si u C-S-H gelu i temperatura. Dobijeni rezultati ukazuju da niži nivo dekalifikacije (niža vrednost odnosa Si/Ca) na 1mm od površine uzorka kod uzorka NRPC1 u poređenju sa uzorkom NNPC1 može voditi povećanju količine sulfata vezanih u C-S-H gelu. Na ovu vrednost, takođe, može da utiče i vrednost Al u C-S-H strukturi.

Kod uzorka MRPC1 se primećuje rasipanje tačaka u regionu koji se odnosi na mešavinu faza C-S-H, E i G faza, Slika IX.46f. Ovo ukazuje da je destabilizovan etringit i da je moguće formiranje gipsa u pukotinama formiranim u zoni izluživanja. Naime, u rezultatima dobijenim pomoću XRD-a, uočava se veliki intenzitet pika koji odgovara gipsu i tako ukazuje na mogućnost njegovog nastanka. Na Slika IX.44b se vidi visok nivo dekalifikacije kod uzorka MRPC1 do dubine od 2mm, što može da ukaže na formiranje M-S-H gela kojeg nije moguće identifikovati pomoću XRD i FTIR metode. Kada je u pitanju uzorak MNPC1, odnos S/Ca (0,16) je viši u poređenju sa uzorkom NNPC1 (0,12). Ova pojava, i bliska veza tri faze C-S-H gela, E i G, ukazuju na mogućnost stvaranja uslova za razvoj kristalizacionog pritiska i ekspanzije. Međutim, izgleda da je određena količina etringita bila destabilizovana, i na taj način se nisu uspostavili uslovi potrebni za razvoj kristalizacionog pritiska u slučaju uzorka MNPC1, Slika IX.46e, u poređenju sa uzorkom NNPC1, Slika IX.46c. Na osnovu rezultata XRD analize identifikovan je portlandit što pokazuje da proces izluživanja nije završen. Kod ovog uzorka vrednost ekspanzije je bila najmanja, u poređenju sa uzorcima NNPC1, NRPC1 i MRPC1.

### 3.10. Interpretacija rezultata ispitivanja metodom faktorijalnog eksperimenta

Eksperimentalnim ispitivanjem betona spravljenih sa dve vrste cementa, dve vrste agregata i dva vodocementna faktora, koji su negovani ili bili izloženi u tri različita rastvora (zasićena krečna voda, rastvori natrijum sulfat i magnezijum sulfat), dobijeni su podaci, na osnovu kojih su izvedeni zaključci o pojedinačnom uticaju analiziranih faktora na odabrana svojstva betona. U ovom poglavlju su rezultati ispitivanja iskorišćeni za sagledavanje istovremenog uticaja odabranih faktora na promenu dužinu (ekspanziju) uzoraka i vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode, kao i za utvrđivanje koji od analiziranih faktora ima najveći uticaj na predmetno svojstvo betona, kod uzoraka koji su 3 i 6 meseci boravili u 5% rastvorima  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ . Za realizaciju navedene "višeparametarske" analize odabrana je metoda *faktorijalnog eksperimenta*, koja se u osnovi sastoji od odgovarajućih matematičko-statističkih postupaka sa ciljem da se dobije matematički model procesa [205].

Ovakav tip analize omogućava proveru hipoteze o postojanju veze između posmatranih svojstava betona i variranih uticajnih faktora. Faktorijalnom analizom može se definisati i relativna veličina uticaja variranih parametara, a na osnovu njihove "značajnosti" može se formulisati najjednostavniji analitički oblik veze "promena dužine - uticajni parametri" i "vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja - uticajni parametri".

U cilju realizacije faktorijalnog eksperimenta, varirani su sledeći uticajni faktori:

- **FAKTOR  $Z_1$  - vrsta cementa**
  - cement CEM I 42,5R i
  - cement CEM III 32,5N LH/SR
- **FAKTOR  $Z_2$  - vrsta agregata**
  - rečni agregat (NA) i
  - reciklirani agregat (RA)
- **FAKTOR  $Z_3$  - vodocementni faktor**
  - $w/c=0,55$  i
  - $w/c=0,38$ .

Za ovako strukturiran faktorijalni eksperiment, koji omogućava obuhvatanje i istovremenu analizu tri varirana faktora, polazni podaci su:

$$N = x_i^n = 2^3 = 8 \quad (IX.2)$$

gde je:

$x_i$  - broj nivoa razmatranja (gornji i donji)

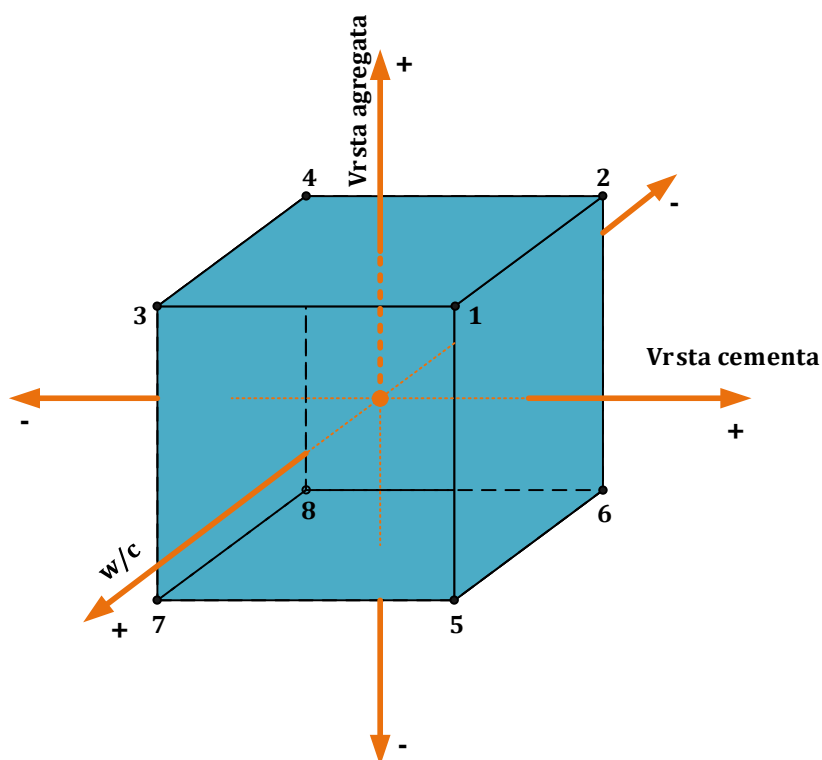
$n$  - broj uticajnih faktora ( $Z_1$  - cement,  $Z_2$  - agregat,  $Z_3$  - vodocementni faktor)

U Tabela IX.17 date su oznake i suštinsko značenje variranih faktora i nivoa njihovog razmatranja.

Tabela IX.17 - Opis uticajnih faktora i mogući nivo njihovog razmatranja

Uticajni faktor	Nivo razmatranja ( $x_i$ - kodirana bezdimenziona veličina)				
	donji nivo			gornji nivo	
	oznaka	opis	vrednost	opis parametra	vrednost
$Z_1$	vrsta cementa	<b>+1</b>	CEM I 42,5R	<b>-1</b>	CEM III 32,5N LH/SR
$Z_2$	vrsta agregata	<b>+1</b>	NA	<b>-1</b>	RA
$Z_3$	vodocementni faktor	<b>+1</b>	0,55	<b>-1</b>	0,38

Grafički prikaz ovih podataka, kao i obim mogućih analiza, dat je na zamišljenom modelu faktorijalnog eksperimenta (Slika IX.47.).



Slika IX.47 - Grafički model tro-parametarskog faktorijalnog eksperimenta

Centar faktorijalnog eksperimenta, odnosno zamišljenog modela - kocke, može se fizički tumačiti kao:

- Beton koji predstavlja sredinu između betona spravljenih sa cementom CEM I i CEM III.
- Beton koji predstavlja sredinu između betona sa rečnim i recikliranim agregatom.
- Beton koji predstavlja sredinu između betona sa  $w/c=0,55$  i betona sa  $w/c=0,38$ .

Svako teme zamišljenog modela predstavlja jednu kombinaciju uticajnih faktora, čime se dobija 8 različitih vrsta betonskih mešavina:

- teme 1 - beton sa CEM I, rečnim agregatom i  $w/c=0,55$  (NPC1)
- teme 2 - beton sa CEM I, rečnim agregatom i  $w/c=0,38$  (NPC2)
- teme 3 - beton sa CEM III, rečnim agregatom i  $w/c=0,55$  (NMC1)
- teme 4 - beton sa CEM III, rečnim agregatom i  $w/c=0,38$  (NMC2)
- teme 5 - beton sa CEM I, recikliranim agregatom i  $w/c=0,55$  (RPC1)
- teme 6 - beton sa CEM I, recikliranim agregatom i  $w/c=0,38$  (RPC2)
- teme 7 - beton sa CEM III, recikliranim agregatom i  $w/c=0,55$  (RMC1)
- teme 8 - beton sa CEM III, recikliranim agregatom i  $w/c=0,38$  (RMC2)

Sve vrednosti kodiranih bezdimenzionih veličina " $x_i$ ", kao i vrednosti njihovih odgovarajućih proizvoda, koje su potrebne za proračunavanje koeficijenata polinoma, date su u Tabela IX.18.

Tabela IX.18 - Vrednosti bezdimenzionih veličina  $x_i$  i njihovih proizvoda

N	Vrsta betonske mešavine	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	(N/M)NPC1	1	1	1	1	1	1	1
2	NPC2	1	1	-1	1	-1	-1	-1
3	NMC1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
4	NMC2	-1	1	-1	-1	1	-1	1
5	RPC1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
6	RPC2	1	-1	-1	-1	-1	1	1
7	RMC1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
8	RMC2	-1	-1	-1	1	1	1	-1

Funkcionalna zavisnost analiziranog svojstva od variranih parametara, u metodi faktorijalnog eksperimenta, aproksimira se polinomom sledećeg oblika:

$$f(Z_1, Z_2, Z_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (IX.3)$$

Koeficijenti polinoma određuju se pomoću sledećih izraza:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad (IX.4)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}y_j \quad (i=1, 2 \text{ i } 3) \quad (IX.5)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{kj} x_{mj} y_j \quad (k = 1, 2 \text{ i } 3, m = 1, 2 \text{ i } 3) \quad (IX.6)$$

$$b_{123} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{2j} x_{3j} y_j \quad (IX.7)$$

Pod funkcijom "y<sub>j</sub>", koja se koristi u prethodnim izrazima, podrazumeva se srednja vrednost pojedinačnih rezultata ispitivanja za određenu kombinaciju uticajnih parametra, odnosno za određenu vrstu betonske mešavine.

Nakon određivanja koeficijenata polinoma, odnosno analitičkog definisanja zavisnosti promene dužine uzorka ili vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode od istovremenog uticaja variranih parametara, mogu se uraditi i sledeće analize:

- analiza veličine uticaja variranih parametara, neposrednim upoređenjem njihovih apsolutnih vrednosti i
- analiza - testiranje "značajnosti" koeficijenata polinoma, u cilju pojednostavljenja analitičkog izraza (IX.3).

Za testiranje značajnosti koeficijenata polinoma potrebno je sračunati sledeće veličine:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^r (y_i - y_{sr})^2}{r - 1} \quad (IX.8)$$

gde je: r - broj pojedinačnih rezultata ispitivanja

$$S_{y, sr}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_{yj}^2}{N} \quad (IX.9)$$

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{y, sr}^2}{N \cdot n} \quad (IX.10)$$

$$t_i = \left| \frac{b_i}{S_{bi}} \right| \quad (IX.11)$$

Kriterijum kojim se ocenjuje "značajnost" pojedinih koeficijenata polinoma je:

$$t_i > t_{kr} \quad (IX.12)$$

Tablična vrednost koeficijenta "t<sub>kr</sub>" zavisi od:

- broja stepeni slobode  $f = N \cdot (n - 1)$  i
- nivoa značajnosti  $\alpha = 0.05$ .

U slučajevima kada je ispunjen uslov (IX.12 koeficijenti polinoma se prihvataju, a u suprotnom se mogu zanemariti, pri čemu kvalitet funkcionalne zavisnosti neće biti bitnije redukovan.

U nastavku su prikazani rezultati faktorijalnog eksperimenta za promenu dužine uzoraka i kapilarno upijanje vode.

### 3.10.1. Promena dužine

Na osnovu opisane metode tro-parametarske faktorijalne analize i eksperimentalnih vrednosti promene dužine uzoraka, sračunati su podaci potrebni za definisanje nepoznatih koeficijenta polinoma (IX.3. Svi neophodni ulazni podaci prikazani su u Tabela IX.19-Tabela IX.22.

*Tabela IX.19 - Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, u zavisnosti od analiziranih parametara*

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Pojedinačne vrednosti ekspanzije			$\epsilon_{sr}$	$S_y^2$
					[%]				
1	CEM I	NA	0,55	NNPC1	0,142	0,178	0,184	<b>0,168</b>	<b>0,0005</b>
2	CEM I	NA	0,38	NNPC2	0,124	0,119	0,118	<b>0,120</b>	<b>0,0000</b>
3	CEM III	NA	0,55	NNMC1	0,041	0,037	0,033	<b>0,037</b>	<b>0,0000</b>
4	CEM III	NA	0,38	NNMC2	0,026	0,040	0,016	<b>0,027</b>	<b>0,0001</b>
5	CEM I	RA	0,55	NRPC1	0,148	0,090	0,120	<b>0,119</b>	<b>0,0008</b>
6	CEM I	RA	0,38	NRPC2	0,069	0,077	0,071	<b>0,072</b>	<b>0,0000</b>
7	CEM III	RA	0,55	NRMC1	0,050	0,011	0,010	<b>0,024</b>	<b>0,0005</b>
8	CEM III	RA	0,38	NRMC2	0,096	0,071	0,046	<b>0,071</b>	<b>0,0006</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0027</b>

U Tabela IX.19 date su vrednosti variranih parametara, pojedinačne i srednje vrednosti promene dužine uzoraka betona koji su 3 meseca bili izloženi delovanju 5% rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, kao i vrednosti disperzija rezultata ispitivanja, određenih pomoću izraza (IX.8.

Analitički izraz zavisnosti promene dužine uzoraka od istovremenog uticaja sva tri varirana parametra, za uzorke izložene delovanju 5% rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, glasi:

$$\epsilon_{N,3m} = 0,080 + 0,040x_1 + 0,008x_2 + 0,007x_3 + 0,016x_1x_2 + 0,017x_1x_3 + 0,007x_2x_3 - 0,007x_1x_2x_3 \quad (IX.13)$$

Koeficijenti predmetnog polinoma sračunati su pomoću izraza (IX.4 - (IX.7.

Ulazni podaci za uzorke betona koji su 6 meseci bili izloženi delovanju 5% rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dati su u Tabela IX.20 a sračunati koeficijenti polinoma u okviru izraza (IX.14.

Tabela IX.20 - Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru  $Na_2SO_4$ , u zavisnosti od analiziranih parametara

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Pojedinačne vrednosti ekspanzije			$\epsilon_{sr}$	$S_y^2$
					[‰]				
1	CEM I	NA	0,55	NNPC1	0,142	0,178	0,184	<b>0,168</b>	<b>0,0005</b>
2	CEM I	NA	0,38	NNPC2	0,124	0,119	0,118	<b>0,120</b>	<b>0,0000</b>
3	CEM III	NA	0,55	NNMC1	0,041	0,037	0,033	<b>0,037</b>	<b>0,0000</b>
4	CEM III	NA	0,38	NNMC2	0,026	0,040	0,016	<b>0,027</b>	<b>0,0001</b>
5	CEM I	RA	0,55	NRPC1	0,148	0,090	0,120	<b>0,119</b>	<b>0,0008</b>
6	CEM I	RA	0,38	NRPC2	0,069	0,077	0,071	<b>0,072</b>	<b>0,0000</b>
7	CEM III	RA	0,55	NRMC1	0,050	0,011	0,010	<b>0,024</b>	<b>0,0005</b>
8	CEM III	RA	0,38	NRMC2	0,096	0,071	0,046	<b>0,071</b>	<b>0,0006</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0027</b>

$$\epsilon_{N,6m} = 0,122 + 0,062x_1 - 0,010x_2 + 0,031x_3 + 0,003x_1x_2 + 0,031x_1x_3 + 0,004x_2x_3 - 0,017x_1x_2x_3 \quad (IX.14)$$

Ulazni podaci za analizu promene dužine uzoraka betona koji su 3 meseca bili potopljeni u 5% rastvor  $MgSO_4$  prikazani su u Tabela IX.21, a analitička zavisnost promene dužine ovih uzoraka od istovremenog delovanja variranih uticaja, izrazom (IX.15).

Tabela IX.21- Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru  $MgSO_4$ , u zavisnosti od analiziranih parametara

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Pojedinačne vrednosti ekspanzije			$\epsilon_{sr}$	$S_y^2$
					[‰]				
1	CEM I	NA	0,55	MNPC1	0,156	0,166	0,161	<b>0,161</b>	<b>0,0000</b>
2	CEM I	NA	0,38	MNPC2	0,112	0,096	0,110	<b>0,106</b>	<b>0,0001</b>
3	CEM III	NA	0,55	MNMC1	0,071	0,091	0,074	<b>0,079</b>	<b>0,0001</b>
4	CEM III	NA	0,38	MNMC2	0,070	0,066	0,036	<b>0,057</b>	<b>0,0003</b>
5	CEM I	RA	0,55	MRPC1	0,106	0,098	0,112	<b>0,105</b>	<b>0,0000</b>
6	CEM I	RA	0,38	MRPC2	0,105	0,091	0,108	<b>0,101</b>	<b>0,0001</b>
7	CEM III	RA	0,55	MRMC1	0,068	0,071	0,036	<b>0,058</b>	<b>0,0004</b>
8	CEM III	RA	0,38	MRMC2	0,058	0,098	0,078	<b>0,078</b>	<b>0,0004</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0015</b>

$$\epsilon_{M,3m} = 0,093 + 0,025x_1 + 0,008x_2 + 0,008x_3 + 0,008x_1x_2 + 0,007x_1x_3 + 0,012x_2x_3 + 0,001x_1x_2x_3 \quad (IX.15)$$

Na isti način pripremljeni su i dati ulazni podaci za analizu promene dužine uzoraka betona koji su 6 meseci bili izloženi delovanju 5% rastvora  $MgSO_4$  (Tabela IX.22) kao i sračunati koeficijenti polinoma u okviru izraza (IX.16).



Tabela IX.22 - Vrednosti promene dužine uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru  $MgSO_4$ , u zavisnosti od analiziranih parametara

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Pojedinačne vrednosti ekspanzije			$\epsilon_{sr}$	$S_y^2$
					[%]				
1	CEM I	NA	0,55	MNPC1	0,218	0,216	0,116	<b>0,183</b>	<b>0,0034</b>
2	CEM I	NA	0,38	MNPC2	0,14	0,149	0,098	<b>0,129</b>	<b>0,0007</b>
3	CEM III	NA	0,55	MNMC1	0,108	0,124	0,12	<b>0,117</b>	<b>0,0001</b>
4	CEM III	NA	0,38	MNMC2	0,077	0,058	0,072	<b>0,069</b>	<b>0,0001</b>
5	CEM I	RA	0,55	MRPC1	0,166	0,182	0,19	<b>0,179</b>	<b>0,0001</b>
6	CEM I	RA	0,38	MRPC2	0,132	0,138	0,132	<b>0,134</b>	<b>0,0000</b>
7	CEM III	RA	0,55	MRMC1	0,076	0,085	0,071	<b>0,077</b>	<b>0,0001</b>
8	CEM III	RA	0,38	MRMC2	0,073	0,096	0,088	<b>0,086</b>	<b>0,0001</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0047</b>

$$\epsilon_{M,6m} = 0,122 + 0,035x_1 + 0,003x_2 + 0,017x_3 - 0,003x_1x_2 + 0,007x_1x_3 + 0,008x_2x_3 - 0,006x_1x_2x_3 \quad (IX.16)$$

Izrazima (IX.13)-(IX.16) jednoznačno su određene vrednosti promene dužine uzoraka (u rastvorima  $Na_2SO_4$  i  $MgSO_4$ , nakon 3 i 6 meseci) svih analiziranih vrsta betona u zavisnosti od kombinovanog uticaja upotrebljenih komponentnih materijala (vrste cementa, vrste agregata i vodocementnog faktora).

Vrednosti promene dužine za sve posmatrane uzorke, sračunate pomoću izraza (IX.13)-(IX.16), identične su sa dobijenim eksperimentalnim vrednostima, pa zbog toga nije potrebno testirati adekvatnost modela pomoću Fišerovog kriterijuma.

### **Analiza uticaja variranih parametara na promenu dužine (ekspanziju) uzoraka betona**

U cilju definisanja veličine uticaja variranih parametara, vrednosti koeficijenata polinoma za analizirane betonske uzorke (u rastvorima  $Na_2SO_4$  i  $MgSO_4$ , nakon 3 i 6 meseci), prikazane su u Tabela IX.23.

Tabela IX.23 - Koeficijenti polinoma za zavisnost " $\epsilon = f(Z_1, Z_2, Z_3)$ "

Uzorci	Koeficijenti polinoma							
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
N-3m	0,080	<b>0,040</b>	0,008	0,007	0,016	0,017	0,007	-0,007
N-6m	0,122	<b>0,062</b>	-0,010	0,031	0,003	0,031	0,004	-0,017
M-3m	0,093	<b>0,025</b>	0,008	0,008	0,008	0,007	0,012	0,001
M-6m	0,122	<b>0,035</b>	0,003	0,017	-0,003	0,007	0,008	-0,006

Koeficijenti polinoma definišu određenu vrstu uticaja, odnosno imaju sledeće fizičko značenje:

- $b_0$  - definiše prosečnu vrednost ekspanzije uzoraka betona držanih u istim uslovima i isti period,
- $b_1$  - definiše uticaj primene vrste cementa (znak "-" se odnosi na cement CEM III, a znak "+" na cement CEM I),
- $b_2$  - definiše uticaj vrste agregata (znak "-" se odnosi na rečni agregat, a znak "+" na reciklirani agregat),
- $b_3$  - definiše uticaj vodocementnog faktora (znak "-" se odnosi na beton sa  $w/c=0,55$ , a znak "+" na beton sa  $w/c=0,38$ ),
- $b_{12}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva primenjene vrste cementa i vrste agregata,
- $b_{13}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva primenjene vrste cementa i vodocementnog faktora,
- $b_{23}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva vrste agregata i vodocementnog faktora,
- $b_{123}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva primenjene vrste cementa, vrste agregata i vodocementnog faktora.

Znak "+", odnosno znak "-" ispred koeficijenata polinoma pokazuje koja od dve mogućnosti svakog pojedinačnog faktora ima bolji uticaj na vrednost ekspanzije posmatranih betonskih uzoraka.

Apsolutna vrednost koeficijenata polinoma govori o uticaju variranog faktora na vrednost ekspanzije posmatranih betonskih uzoraka. Veća apsolutna vrednost ukazuje na značajniji uticaj variranog faktora na ekspanziju uzoraka.

Analizom vrednosti koeficijenata polinoma iz Tabela IX.23, zaključeno je:

• *Uzorci potopljeni u rastvor  $Na_2SO_4$ :*

*3 meseca* - najveći uticaj na promenu dužine uzoraka ima vrsta cementa (koeficijent " $b_1$ "). Sledeći po veličini je kombinovani koeficijent " $b_{13}$ " (kombinovano dejstvo vrste cementa i vrednosti vodocementnog faktora). Uticaj vrste agregata i vrednosti vodocementnog faktora je skoro isti i značajno manji nego uticaj vrste cementa.

*6 meseci* - najveći uticaj na promenu dužine uzoraka ima vrsta cementa (koeficijent " $b_1$ "), kao i nakon 3 meseca. Sledeći po veličini su koeficijenti " $b_3$ " (uticaj vodocementnog faktora) i " $b_{13}$ " (kombinovano dejstvo vrste cementa i vodocementnog faktora). Uticaj vrste agregata je značajno manji nego uticaj ostala dva posmatrana parametra.

• *Uzorci potopljani u rastvor MgSO<sub>4</sub>:*

3 meseca - najveći uticaj na promenu dužine uzoraka ima takođe vrsta cementa (koeficijent "b<sub>1</sub>"). Sledeći po veličini je kombinovani koeficijent "b<sub>23</sub>" (kombinovano dejstvo vrste agregat i vrednosti vodocementnog faktora). Uticaj vrste agregata i vodocementnog faktora je značajno manji od uticaja vrste cementa.

6 meseci - najveći uticaj na promenu dužine uzoraka ima ponovo vrsta cementa (koeficijent "b<sub>1</sub>"). Sledeći po veličini je koeficijent "b<sub>3</sub>" (uticaj vodocementnog faktora). Svi ostali koeficijenti imaju značajno manje vrednosti.

Radi određivanja "značajnosti" koeficijenata polinoma " $\varepsilon=f(Z_1, Z_2, Z_3)$ ", izvršeno je testiranje pomoću "t" raspodele. Vrednosti testnih karakteristika sračunate su pomoću izraza (IX.8) - (IX.11) i prikazane su u Tabela IX.24.

*Tabela IX.24 - Vrednosti sračunatih testnih karakteristika kojima se ocenjuje značajnost koeficijenata polinoma " $\varepsilon=f(Z_1, Z_2, Z_3)$ "*

Testna karakteristika	Koeficijenti polinoma			
	N-3m	N-6m	M-3m	M-6m
S <sub>sr</sub> <sup>2</sup>	0,0027	0,0033	0,0015	0,0047
S <sub>bi</sub> <sup>2</sup>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
S <sub>bi</sub>	0,0106	0,0117	0,0078	0,0139
<b>t<sub>0</sub></b>	<b>7,5423</b>	<b>10,4449</b>	<b>11,9123</b>	<b>8,7495</b>
<b>t<sub>1</sub></b>	<b>3,7889</b>	<b>5,3601</b>	<b>3,2149</b>	<b>2,4798</b>
t <sub>2</sub>	0,7830	-0,8975	0,9581	0,2004
t <sub>3</sub>	0,6728	<b>2,6783</b>	0,9687	1,2533
t <sub>12</sub>	1,4990	0,2825	0,9687	-0,2184
t <sub>13</sub>	1,5620	<b>2,6282</b>	0,9155	0,5354
t <sub>23</sub>	0,6807	0,3182	1,4691	0,5893
t <sub>123</sub>	-0,6649	-1,4768	0,1597	-0,4278

Kritična tablična vrednost testne karakteristike iznosi **t<sub>kr</sub> = 2,1199**, za broj stepeni slobode f=16 i nivo značajnosti  $\alpha=0,05$ , a kriterijum za ocenu značajnosti definisan je izrazom (IX.12).

Upoređenjem vrednosti t<sub>kr</sub> sa vrednostima koeficijenata polinoma zaključeno je da se u slučaju uzoraka izloženih 3 meseca delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> mogu zanemariti svi koeficijenti osim "b<sub>0</sub>" i "b<sub>1</sub>", a nakon 6 meseci koeficijenti "b<sub>2</sub>", "b<sub>12</sub>", "b<sub>23</sub>" i "b<sub>123</sub>".

Kod uzoraka izloženih 3 i 6 meseci delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub> mogu se zanemariti svi koeficijenti osim "b<sub>0</sub>" i "b<sub>1</sub>".

Testiranjem "značajnosti" pojedinih koeficijenata polinoma utvrđeno je da se, osim koeficijenata "b<sub>0</sub>" i "b<sub>1</sub>", ostali koeficijenti polinoma mogu izostaviti iz analitičkih izraza (IX.13)-(IX.16), kod većine posmatranih uzoraka. Izuzeci su uzorci izloženi delovanju

natrijum sulfata u trajanju od 6 meseci gde se osim navedenih, zadržavaju i koeficijenti "b<sub>3</sub>" i "b<sub>13</sub>". Uprošćeni izrazi za analitičko određivanje promene dužine uzoraka glase:

$$\varepsilon_{N,3m}^* = 0,047 + 0,040x_1 \quad (IX.17)$$

$$\varepsilon_{N,6m}^* = 0,122 + 0,062x_1 + 0,031x_3 + 0,031x_{13} \quad (IX.18)$$

$$\varepsilon_{M,3m}^* = 0,093 + 0,025x_1 \quad (IX.19)$$

$$\varepsilon_{M,6m}^* = 0,122 + 0,035x_1 \quad (IX.20)$$

Na ovaj način su matematičkim putem potvrđeni zaključci, koji su izvedeni samo na osnovu vrednosti koeficijenata polinoma, o uticaju variranih parametara na promenu dužine uzoraka betona. Odbacivanjem pojedinih koeficijenata polinoma " $\varepsilon = f(Z_1, Z_2, Z_3)$ ", dobijaju se jednostavniji izrazi, ali se značajno povećavaju razlike između eksperimentalnih vrednosti promene dužine i vrednosti sračunatih pomoću faktorijalnog eksperimenta. Vrednosti sračunatih razlika, izraženih u procentima, prikazane su u Tabela IX.25 - Tabela IX.28.

Tabela IX.25 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	$\varepsilon$ [‰]	$\varepsilon^*$ [‰]	$\Delta\varepsilon$ [%]
1	NNPC1	CEM I	NA	0,55	0,168	0,120	-29
2	NNPC2	CEM I	NA	0,38	0,120	0,120	0
3	NNMC1	CEM III	NA	0,55	0,037	0,040	8
4	NNMC2	CEM III	NA	0,38	0,027	0,040	46
5	NRPC1	CEM I	RA	0,55	0,119	0,120	1
6	NRPC2	CEM I	RA	0,38	0,072	0,120	66
7	NRMC1	CEM III	RA	0,55	0,024	0,040	69
8	NRMC2	CEM III	RA	0,38	0,071	0,040	-44

Tabela IX.26 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	$\varepsilon$ [‰]	$\varepsilon^*$ [‰]	$\Delta\varepsilon$ [%]
1	NNPC1	CEM I	NA	0,55	0,225	0,246	9
2	NNPC2	CEM I	NA	0,38	0,129	0,122	-5
3	NNMC1	CEM III	NA	0,55	0,067	0,060	-10
4	NNMC2	CEM III	NA	0,38	0,024	0,060	150
5	NRPC1	CEM I	RA	0,55	0,267	0,246	-8
6	NRPC2	CEM I	RA	0,38	0,116	0,122	5
7	NRMC1	CEM III	RA	0,55	0,053	0,060	14
8	NRMC2	CEM III	RA	0,38	0,093	0,060	-36

Tabela IX.27 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora  $MgSO_4$ 

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	$\varepsilon$ [‰]	$\varepsilon^*$ [‰]	$\Delta\varepsilon$ [%]
1	MNPC1	CEM I	NA	0,55	0,161	0,118	-27
2	MNPC2	CEM I	NA	0,38	0,106	0,118	11
3	MNMC1	CEM III	NA	0,55	0,079	0,068	-14
4	MNMC2	CEM III	NA	0,38	0,057	0,068	19
5	MRPC1	CEM I	RA	0,55	0,105	0,118	12
6	MRPC2	CEM I	RA	0,38	0,101	0,118	16
7	MRMC1	CEM III	RA	0,55	0,058	0,068	17
8	MRMC2	CEM III	RA	0,38	0,078	0,068	-13

Tabela IX.28 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti promene dužine uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora  $MgSO_4$ 

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	$\varepsilon$ [‰]	$\varepsilon^*$ [‰]	$\Delta\varepsilon$ [%]
1	MNPC1	CEM I	NA	0,55	0,183	0,157	-14
2	MNPC2	CEM I	NA	0,38	0,129	0,157	22
3	MNMC1	CEM III	NA	0,55	0,117	0,087	-26
4	MNMC2	CEM III	NA	0,38	0,069	0,087	26
5	MRPC1	CEM I	RA	0,55	0,179	0,157	-12
6	MRPC2	CEM I	RA	0,38	0,134	0,157	17
7	MRMC1	CEM III	RA	0,55	0,077	0,087	13
8	MRMC2	CEM III	RA	0,38	0,086	0,087	2

Analizom razlika između eksperimentalnih vrednosti promene dužine i vrednosti sračunatih pomoću "uprošćenog" polinoma izrazi (IX.17)-(IX.20), konstatovano je da su odstupanja jako velika. Na osnovu toga je zaključeno da se analitički izrazi (IX.17)-(IX.20) ne mogu koristiti za prikaz i analizu promene dužine betonskih uzoraka, odnosno da ne treba odbacivati pojedine koeficijente iz polinoma.

### 3.10.2. Koeficijent kapilarnog upijanja vode

Na sličan način kao i kod promene dužine i ovde su na osnovu dobijenih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka sračunati podaci potrebni za definisanje nepoznatih koeficijenta polinoma (IX.3) i na taj način dobijena zavisnost između posmatrane karakteristike betona i variranih parametara. Svi neophodni ulazni podaci prikazani su u Tabela IX.29-Tabela IX.32.

Tabela IX.29 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , u zavisnosti od analiziranih parametara

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode			$A_{sr}$	$S_y^2$
					[kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]				
1	CEM I	NA	0,55	NNPC1	0,030	0,015	0,018	<b>0,021</b>	<b>0,0001</b>
2	CEM I	NA	0,38	NNPC2	0,010	0,010	0,010	<b>0,010</b>	<b>0,0000</b>
3	CEM III	NA	0,55	NNMC1	0,041	0,043	0,041	<b>0,042</b>	<b>0,0000</b>
4	CEM III	NA	0,38	NNMC2	0,020	0,020	0,019	<b>0,020</b>	<b>0,0000</b>
5	CEM I	RA	0,55	NRPC1	0,037	0,034	0,029	<b>0,033</b>	<b>0,0000</b>
6	CEM I	RA	0,38	NRPC2	0,013	0,014	0,013	<b>0,013</b>	<b>0,0000</b>
7	CEM III	RA	0,55	NRMC1	0,082	0,065	0,067	<b>0,071</b>	<b>0,0001</b>
8	CEM III	RA	0,38	NRMC2	0,020	0,023	0,022	<b>0,022</b>	<b>0,0000</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0002</b>

U Tabela IX.29 date su vrednosti variranih parametara, pojedinačne i srednje vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode kod uzoraka betona koji su 3 meseca bili izloženi delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , kao i vrednosti disperzija rezultata ispitivanja, određenih pomoću izraza (IX.8).

Analitički izraz zavisnosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode od istovremenog uticaja sva tri varirana parametra, za uzoraka betona koji su 3 meseca bili izloženi delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , glasi:

$$A_{N,3m} = 0,029 - 0,010x_1 - 0,006x_2 + 0,013x_3 + 0,002x_1x_2 - 0,005x_1x_3 - 0,005x_2x_3 + 0,002x_1x_2x_3 \quad (IX.21)$$

Koeficijenti predmetnog polinoma sračunati su pomoću izraza (IX.4) - (IX.7).

U Tabela IX.30 prikazani su ulazni podaci za analizu vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su 6 meseci bili izloženi delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , kao i sračunati koeficijenti polinoma u okviru izraza (IX.22).

Tabela IX.30 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , u zavisnosti od analiziranih parametara

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode			$A_{sr}$	$S_y^2$
					[kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]				
1	CEM I	NA	0,55	NNPC1	0,031	0,017	0,013	<b>0,020</b>	<b>0,0001</b>
2	CEM I	NA	0,38	NNPC2	0,009	0,007	0,008	<b>0,008</b>	<b>0,0000</b>
3	CEM III	NA	0,55	NNMC1	0,025	0,026	0,029	<b>0,027</b>	<b>0,0000</b>
4	CEM III	NA	0,38	NNMC2	0,016	0,020	0,020	<b>0,019</b>	<b>0,0000</b>
5	CEM I	RA	0,55	NRPC1	0,062	0,085	0,074	<b>0,074</b>	<b>0,0001</b>
6	CEM I	RA	0,38	NRPC2	0,037	0,038	0,041	<b>0,039</b>	<b>0,0000</b>
7	CEM III	RA	0,55	NRMC1	0,057	0,054	0,053	<b>0,055</b>	<b>0,0000</b>
8	CEM III	RA	0,38	NRMC2	0,026	0,028	0,024	<b>0,026</b>	<b>0,0000</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0002</b>

$$A_{N,6m} = 0,033 - 0,002x_1 - 0,015x_2 + 0,011x_3 - 0,006x_1x_2 + 0,001x_1x_3 - 0,005x_2x_3 + 0,000x_1x_2x_3 \quad (IX.22)$$

Ulazni podaci za analizu vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona koji su 3 meseca bili potopljeni u 5% rastvor  $MgSO_4$  prikazani su u Tabela IX.31, a analitička zavisnost promene vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode ovih uzoraka od istovremenog delovanja variranih uticaja, izrazom (IX.23).

Tabela IX.31 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 3 meseca boravka u 5% rastvoru  $MgSO_4$  u zavisnosti od analiziranih parametara

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode			$A_{sr}$	$S_y^2$
					[kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]				
1	CEM I	NA	0,55	MNPC1	0,020	0,017	0,018	<b>0,018</b>	<b>0,0000</b>
2	CEM I	NA	0,38	MNPC2	0,012	0,016	0,012	<b>0,013</b>	<b>0,0000</b>
3	CEM III	NA	0,55	MNMC1	0,024	0,025	0,040	<b>0,030</b>	<b>0,0001</b>
4	CEM III	NA	0,38	MNMC2	0,018	0,015	0,020	<b>0,018</b>	<b>0,0000</b>
5	CEM I	RA	0,55	MRPC1	0,017	0,017	0,022	<b>0,019</b>	<b>0,0000</b>
6	CEM I	RA	0,38	MRPC2	0,009	0,015	0,008	<b>0,011</b>	<b>0,0000</b>
7	CEM III	RA	0,55	MRMC1	0,050	0,052	0,046	<b>0,049</b>	<b>0,0000</b>
8	CEM III	RA	0,38	MRMC2	0,014	0,016	0,017	<b>0,016</b>	<b>0,0000</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0001</b>

$$A_{M,3m} = 0,022 - 0,006x_1 - 0,002x_2 + 0,007x_3 + 0,003x_1x_2 - 0,004x_1x_3 - 0,003x_2x_3 + 0,002x_1x_2x_3 \quad (IX.23)$$

Na isti način pripremljeni su i dati ulazni podaci za analizu vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka koji su 6 meseci bili izloženi delovanju 5% rastvora  $MgSO_4$  (Tabela IX.32) kao i sračunati koeficijenti polinoma u okviru izraza (IX.24).

Tabela IX.32 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru  $MgSO_4$  u zavisnosti od analiziranih parametara

N	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	Oznaka	Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode			$A_{sr}$	$S_y^2$
					[kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]				
1	CEM I	NA	0,55	MNPC1	0,012	0,012	0,011	<b>0,012</b>	<b>0,0000</b>
2	CEM I	NA	0,38	MNPC2	0,013	0,015	0,013	<b>0,014</b>	<b>0,0000</b>
3	CEM III	NA	0,55	MNMC1	0,008	0,012	0,015	<b>0,012</b>	<b>0,0000</b>
4	CEM III	NA	0,38	MNMC2	0,019	0,020	0,020	<b>0,020</b>	<b>0,0000</b>
5	CEM I	RA	0,55	MRPC1	0,044	0,039	0,046	<b>0,043</b>	<b>0,0000</b>
6	CEM I	RA	0,38	MRPC2	0,021	0,027	0,021	<b>0,023</b>	<b>0,0000</b>
7	CEM III	RA	0,55	MRMC1	0,049	0,050	0,050	<b>0,050</b>	<b>0,0000</b>
8	CEM III	RA	0,38	MRMC2	0,022	0,026	0,027	<b>0,025</b>	<b>0,0000</b>
								$\Sigma S_y^2$	<b>0,0000</b>

$$A_{M,6m} = 0,025 - 0,002x_1 - 0,011x_2 + 0,004x_3 + 0,000x_1x_2 + 0,000x_1x_3 - 0,007x_2x_3 + 0,001x_1x_2x_3 \quad (\text{IX.24})$$

Izrazima (IX.21)-(IX.24) jednoznačno su određene vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode uzoraka (u rastvorima  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ , nakon 3 i 6 meseci) svih analiziranih vrsta betona u zavisnosti od kombinovanog uticaja upotrebljenih komponentnih materijala (vrste cementa, vrste agregata i vodocementnog faktora). Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka za sve posmatrane uzorke, sračunate pomoću izraza (IX.21)-(IX.24), identične su sa dobijenim eksperimentalnim vrednostima, pa zbog toga nije potrebno testirati adekvatnost modela pomoću Fišerovog kriterijuma.

### ***Analiza uticaja variranih parametara na koeficijent kapilarnog upijanja vode***

U cilju definisanja veličine uticaja variranih parametara, vrednosti koeficijenata polinoma za analizirane betonske uzorke (u rastvorima  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ , nakon 3 i 6 meseci), prikazane su u Tabela IX.33.

Tabela IX.33 - Koeficijenti polinoma za zavisnost " $A = f(Z_1, Z_2, Z_3)$ "

Uzorci	Koeficijenti polinoma							
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
N-3m	0,029	-0,010	-0,006	<b>0,013</b>	0,002	-0,005	-0,005	0,002
N-6m	0,033	0,002	<b>-0,015</b>	0,011	-0,006	0,001	-0,005	0,000
M-3m	0,022	-0,006	-0,002	<b>0,007</b>	0,003	-0,004	-0,003	0,002
M-6m	0,025	-0,002	<b>-0,011</b>	0,004	0,000	0,000	-0,007	0,001

Koeficijenti polinoma definišu određenu vrstu uticaja, odnosno imaju sledeće fizičko značenje:

- $b_0$  - definiše prosečnu vrednost ekspanzije uzoraka betona držanih u istim uslovima i isti period,
- $b_1$  - definiše uticaj primene vrste cementa (znak "-" se odnosi na cement CEM III, a znak "+" na cement CEM I),
- $b_2$  - definiše uticaj vrste agregata (znak "-" se odnosi na rečni agregat, a znak "+" na reciklirani agregat),
- $b_3$  - definiše uticaj vodocementnog faktora (znak "-" se odnosi na beton sa  $w/c=0,55$ , a znak "+" na beton sa  $w/c=0,38$ ),
- $b_{12}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva primenjene vrste cementa i vrste agregata,
- $b_{13}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva primenjene vrste cementa i vodocementnog faktora,
- $b_{23}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva vrste agregata i vodocementnog faktora,
- $b_{123}$  - definiše dodatni uticaj usled kombinovanog dejstva primenjene vrste cementa, vrste agregata i vodocementnog faktora.



Znak "+", odnosno znak "-" ispred koeficijenata polinoma pokazuje koja od dve mogućnosti svakog pojedinačnog faktora ima bolji uticaj na vrednost ekspanzije posmatranih betonskih uzoraka.

Apsolutna vrednost koeficijenata polinoma govori o uticaju variranog faktora na vrednost ekspanzije posmatranih betonskih uzoraka. Veća apsolutna vrednost ukazuje na značajniji uticaj variranog faktora na ekspanziju uzoraka.

Analizom vrednosti koeficijenata polinoma iz Tabela IX.33, zaključeno je:

- *Uzorci potopljani u rastvor Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:*  
 3 meseca - najveći uticaj na koeficijent kapilarnog upijanja vode ima vrednost vodocementnog faktora (koeficijent "b<sub>3</sub>"), potom vrsta cementa (koeficijent "b<sub>1</sub>") dok ostali koeficijenti imaju značajno manje vrednosti  
 6 meseci - najveći uticaj na koeficijent kapilarnog upijanja vode ima vrsta agregata (koeficijent "b<sub>2</sub>"). Sledeći po veličini je koeficijent "b<sub>3</sub>" (uticaj vodocementnog faktora), dok je vrednost ostalih koeficijenata značajno manja.
- *Uzorci potopljani u rastvor MgSO<sub>4</sub>:*  
 3 meseca - najveći uticaj na koeficijent kapilarnog upijanja vode ima vrednost vodocementnog faktora (koeficijent "b<sub>3</sub>"), kao i uslučaju uzoraka izloženih delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u trajanju od 3 meseca. Odmah sledeći po veličini je koeficijent "b<sub>1</sub>" (uticaj vrste cementa).  
 6 meseci - najveći uticaj na koeficijent kapilarnog upijanja vode ima vrsta agregata (koeficijent "b<sub>2</sub>"), što je i uslučaju uzoraka u Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (6 meseci). Sledeći po veličini je kombinovani koeficijent "b<sub>23</sub>" (kombinovani uticaj vrste agregata i vodocementnog faktora), dok se ostali mogu smatrati zanemarljivim.

Radi određivanja "značajnosti" koeficijenata polinoma "A=f(Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>)", izvršeno je testiranje pomoću "t" raspodele. Vrednosti testnih karakteristika sračunate su pomoću izraza (IX.8)-(IX.11) i prikazane su u Tabela IX.34.

*Tabela IX.34 - Vrednosti sračunatih testnih karakteristika kojima se ocenjuje značajnost koeficijenata polinoma "A = f(Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>)"*

Testna karakteristika	Koeficijenti polinoma			
	N-3m	N-6m	M-3m	M-6m
S <sub>sr</sub> <sup>2</sup>	0,0002	0,0002	0,0001	0,0000
S <sub>bi</sub> <sup>2</sup>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
S <sub>bi</sub>	0,0027	0,0032	0,0023	0,0014
<b>t<sub>0</sub></b>	<b>10,8963</b>	<b>10,4328</b>	<b>9,3576</b>	<b>17,6894</b>
<b>t<sub>1</sub></b>	<b>-3,6008</b>	0,5738	<b>-2,7713</b>	-1,3148
<b>t<sub>2</sub></b>	<b>-2,2231</b>	<b>-4,6687</b>	-0,8278	<b>-7,5299</b>
<b>t<sub>3</sub></b>	<b>4,8219</b>	<b>3,2863</b>	<b>3,1672</b>	<b>3,1076</b>
<b>t<sub>12</sub></b>	0,7515	-1,9040	1,0797	0,2390
<b>t<sub>13</sub></b>	-1,9100	0,4173	-1,7635	0,1195
<b>t<sub>23</sub></b>	-1,7221	-1,6953	-1,3317	<b>-4,9004</b>
<b>t<sub>123</sub></b>	0,8767	-0,0782	1,0077	0,9562

Kritična tablična vrednost testne karakteristike iznosi  $t_{kr} = 2,1199$ , za broj stepeni slobode  $f=16$  i nivo značajnosti  $\alpha=0,05$ , a kriterijum za ocenu značajnosti definisan je izrazom (IX.12).

Upoređenjem vrednosti  $t_{kr}$  sa vrednostima koeficijenata polinoma zaključeno je da se u slučaju uzoraka izloženih 3 meseca delovanju rastvora  $Na_2SO_4$  mogu zanemariti svi kombinovani koeficijenti a nakon 6 meseci osim njih i koeficijent "b<sub>1</sub>".

Kod uzoraka izloženih 3 meseca delovanju rastvora  $MgSO_4$  mogu se zanemariti svi kombinovani koeficijenti i koeficijent "b<sub>2</sub>" a kod uzoraka izloženih delovanju rastvora  $MgSO_4$  u trajanju od 6 meseci koeficijenti "b<sub>1</sub>", "b<sub>12</sub>", "b<sub>13</sub>" i "b<sub>123</sub>".

Testiranjem "značajnosti" pojedinih koeficijenata polinoma utvrđeno je da se kod većine uzoraka mogu zanemariti kombinovani koeficijenti i ponegde pojedinačni. Uprošćeni izrazi za analitičko određivanje koeficijenta kapilarnog upijanja vode glase:

$$A^*_{N,3m} = 0,029 - 0,010x_1 - 0,006x_2 + 0,013x_3 \quad (IX.25)$$

$$A^*_{N,6m} = 0,033 - 0,015x_2 + 0,011x_3 \quad (IX.26)$$

$$A^*_{M,3m} = 0,022 - 0,006x_1 + 0,007x_3 \quad (IX.27)$$

$$A^*_{M,6m} = 0,025 - 0,011x_2 + 0,004x_3 - 0,007x_{23} \quad (IX.28)$$

Na ovaj način su matematičkim putem donekle potvrđeni zaključci, koji su izvedeni samo na osnovu vrednosti koeficijenata polinoma, o uticaju variranih parametara na koeficijent kapilarnog upijanja vode. Izuzeci se javljaju u slučaju uzoraka koji su 3 meseca bili izloženi delovanju rastvora  $Na_2SO_4$  gde se sada uključuje i uticaj vrste agregata (koeficijent "b<sub>2</sub>") kao i u slučaju uzoraka izloženih 6 meseci delovanju rastvora  $MgSO_4$  gde se dodaje i uticaj vodocementnog faktora (koeficijent "b<sub>3</sub>"). Odbacivanjem pojedinih koeficijenata polinoma " $A = f(Z_1, Z_2, Z_3)$ ", dobijaju se jednostavniji izrazi, ali se značajno povećavaju razlike između eksperimentalnih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode i vrednosti sračunatih pomoću faktorijalnog eksperimenta. Vrednosti sračunatih razlika, izraženih u procentima, prikazane su u Tabela IX.35 - Tabela IX.38.

Tabela IX.35 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora  $Na_2SO_4$

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	A [‰]	A* [‰]	ΔA [%]
1	NNPC1	CEM I	NA	0,55	0,021	0,026	24
2	NNPC2	CEM I	NA	0,38	0,010	0,000	-100
3	NNMC1	CEM III	NA	0,55	0,042	0,046	10
4	NNMC2	CEM III	NA	0,38	0,020	0,020	2
5	NRPC1	CEM I	RA	0,55	0,033	0,038	14
6	NRPC2	CEM I	RA	0,38	0,013	0,012	-10
7	NRMC1	CEM III	RA	0,55	0,071	0,058	-19
8	NRMC2	CEM III	RA	0,38	0,022	0,032	48

Tabela IX.36 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	A [‰]	A* [‰]	$\Delta A$ [%]
1	NNPC1	CEM I	NA	0,55	0,020	0,029	43
2	NNPC2	CEM I	NA	0,38	0,008	0,007	-13
3	NNMC1	CEM III	NA	0,55	0,027	0,029	9
4	NNMC2	CEM III	NA	0,38	0,019	0,007	-63
5	NRPC1	CEM I	RA	0,55	0,074	0,059	-20
6	NRPC2	CEM I	RA	0,38	0,039	0,037	-4
7	NRMC1	CEM III	RA	0,55	0,055	0,059	8
8	NRMC2	CEM III	RA	0,38	0,026	0,037	42

Tabela IX.37 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 3 meseca delovanju 5% rastvora  $\text{MgSO}_4$ 

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	A [‰]	A* [‰]	$\Delta A$ [%]
1	MNPC1	CEM I	NA	0,55	0,018	0,023	25
2	MNPC2	CEM I	NA	0,38	0,013	0,009	-33
3	MNMC1	CEM III	NA	0,55	0,030	0,035	18
4	MNMC2	CEM III	NA	0,38	0,018	0,021	19
5	MRPC1	CEM I	RA	0,55	0,019	0,023	23
6	MRPC2	CEM I	RA	0,38	0,011	0,009	-16
7	MRMC1	CEM III	RA	0,55	0,049	0,035	-29
8	MRMC2	CEM III	RA	0,38	0,016	0,021	34

Tabela IX.38 - Razlike između stvarnih i računskih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih 6 meseci delovanju 5% rastvora  $\text{MgSO}_4$ 

N	Oznaka	Vrsta cementa	Vrsta agregata	w/c	A [‰]	A* [‰]	$\Delta A$ [%]
1	MNPC1	CEM I	NA	0,55	0,012	0,011	-6
2	MNPC2	CEM I	NA	0,38	0,014	0,017	24
3	MNMC1	CEM III	NA	0,55	0,012	0,011	-6
4	MNMC2	CEM III	NA	0,38	0,020	0,017	-14
5	MRPC1	CEM I	RA	0,55	0,043	0,047	9
6	MRPC2	CEM I	RA	0,38	0,023	0,025	9
7	MRMC1	CEM III	RA	0,55	0,050	0,047	-5
8	MRMC2	CEM III	RA	0,38	0,025	0,025	0

Analizom razlika između eksperimentalnih vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode i vrednosti sračunatih pomoću "uprošćenog" polinoma (izrazi (IX.25) - (IX.28)),

konstatovano je da su odstupanja izuzetno velika. Na osnovu toga je zaključeno da se analitički izrazi (IX.25) - (IX.28) ne mogu koristiti za prikaz i analizu koeficijenta kapilarnog upijanja vode betonskih uzoraka, odnosno da ne treba odbacivati pojedine koeficijente iz polinoma.

### 3.11. Makroskopski pregled uzoraka i karakteristična oštećenja

Prva vidljiva oštećenja usled delovanja sulfatnih rastvora su uočena kod uzoraka betona spravljenih sa cementom CEM I, recikliranim agregatom i  $w/c=0,55$  (NRPC1), nakon 5 meseci boravka u 5% rastvoru  $Na_2SO_4$ . Primećena je pojava širih pukotina u vidu koncentričnih krugova i tanjih u radijalnom pravcu. Pukotine su dominantno locirane u spoljašnjem "prstenu" širine oko 2cm. U ispucalom delu uočena je značajna dezintegracija uzoraka, koja se manifestovala u krunjenju trošnog cementnog kamena i ispadanju zrna krupnog agregata. Opisana oštećenja su locirana na gornjoj površini uzoraka, Slika IX.48.



Slika IX.48 - Izgled uzoraka NRPC1 nakon 5 meseci boravka u rastvoru  $Na_2SO_4$

Nakon 6 meseci boravka u istom rastvoru primećuju se značajna oštećenja i kod uzoraka betona spravljenih sa cementom CEM I, rečnim krupnim agregatom i  $w/c=0,55$  (NNPC1). Oblik oštećenja je identičan kao kod uzoraka NRPC1, Slika IX.49.



Slika IX.49 - Izgled uzoraka NNPC1 nakon 6 meseci boravka u rastvoru  $Na_2SO_4$

Pojava pukotina na ivicama uzorka betona spravljenog sa cementom CEM I, recikliranim agregatom i  $w/c=0,55$  (**MRPC1**), izloženog delovanju 5% rastvora  $MgSO_4$ , primećena je nakon **6 meseci** boravka u pomenutom rastvoru. Delovi betona lako se odvajaju i drobe pod rukom, Slika IX.50.



Slika IX.50 - Izled uzoraka MRPC1 nakon 6 meseci boravka u rastvoru  $MgSO_4$

Kod ostalih uzoraka nisu uočena značajna oštećenja na spoljašnjim stranama nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru  $Na_2SO_4$  ili  $MgSO_4$ .

### 3.12. METODE ZA OCENU SULFATNE OTPORNOSTI BETONA

Za određivanje sulfatne otpornosti betona u okviru doktorske disertacije korišćene su tri metode:

- Promena (smanjenje) čvrstoće pri pritisku
- Promena dužine (ekspanzija) uzoraka i
- Promena (povećanje) koeficijenta kapilarnog upijanja vode i ukupnog kapilarnog upijanja vode.

Odabrane metode za određivanje sulfatne otpornosti betona nisu standardizovane, a predloženih kriterijuma za ocenu sulfatne otpornosti ima vrlo malo i često se razlikuju između sebe i za istu metodu ispitivanja. U slučaju ocenjivanja sulfatne otpornosti betona praćenjem promene čvrstoće betona pri pritisku, usvojen je kriterijum koji je predložio Mehta. Predmetni kriterijum glasi: prosečna vrednost čvrstoće pri pritisku nakon izlaganja delovanju sulfatnih rastvora mora iznositi najmanje 75% od odgovarajuće referentne vrednosti čvrstoće pri pritisku (etaloni), odnosno smanjenje čvrstoće pri pritisku veće od 25% ukazuje na "otkaz" betona.

U slučaju ocenjivanja sulfatne otpornosti betona praćenjem ekspanzije uzoraka odabran je kriterijum, koji su predložili Miller i Manson [184], a koji glasi: beton se smatra neotpornim na delovanje sulfatnih rastvora, kada ekspanzija uzorka, koji je izložen delovanju sulfatnih rastvora, dostigne kritičnu vrednost od 0,2‰.

Kriterijumi za ocenu sulfatne otpornosti betona praćenjem promene koeficijenta kapilarnog upijanja vode i ukupnog kapilarnog upijanja vode nisu pronađeni u dostupnoj literaturi, pa je odlučeno da se ispita mogućnost primene ove nedestruktivne metode za određivanje sulfatne otpornosti betona praćenjem promene koeficijenta kapilarnog upijanja vode i praćenjem promene konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode. Pretpostavljeno je da će se i koeficijent kapilarnog upijanja vode i kapilarno upijanje vode smanjivati kod betona otpornih na sulfatnu koroziju, a da će se obe vrednosti naglo povećati kada beton postane sulfatno neotporan.

Rezultati koji su korišćeni za analizu i ocenu sulfatne otpornosti ispitivanih vrsta betona u odabranim metodama, prikazani su u Tabela IX.39 i Tabela IX.40 u slučaju izlaganja uzoraka 5% rastvoru natrijum sulfata (3 i 6 meseci) i u Tabela IX.41 i Tabela IX.42 u slučaju izlaganja uzoraka 5% rastvoru magnezijum sulfata (3 i 6 meseci).

*Tabela IX.39– Vrednosti za ocenu slufatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 3 meseca u 5% rastvor natrijum sulfata*

Rastvor	Uzorci							
	NNPC1	NNPC2	NNMC1	NNMC2	NRPC1	NRPC2	NRMC1	NRMC2
$\Delta f_p$ [%]	2,6	1,8	-4,2	-11,6	-8,2	+1,7	8,8	-7,7
$\varepsilon$ [‰]	0,168	0,120	0,037	0,027	0,119	0,072	0,024	0,071
$A_i$ [kg/(m <sup>2</sup> ·h <sup>1/2</sup> )]	0,021	0,010	0,042	0,020	0,034	0,014	0,073	0,022
$U_v$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,129	0,067	0,230	0,118	0,188	0,074	0,394	0,142

*Tabela IX.40 – Vrednosti za ocenu slufatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 6 meseci u 5% rastvor natrijum sulfata*

Rastvor	Uzorci							
	NNPC1	NNPC2	NNMC1	NNMC2	NRPC1	NRPC2	NRMC1	NRMC2
$\Delta f_p$ [%]	-22,1	-9,3	-0,6	-9,4	-34,1	-6,0	1,7	-9,0
$\varepsilon$ [‰]	0,225	0,129	0,067	0,025	0,267	0,116	0,053	0,093
$A_i$ [kg/(m <sup>2</sup> ·h <sup>1/2</sup> )]	0,021	0,008	0,027	0,019	0,075	0,039	0,056	0,026
$U_v$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,130	0,036	0,135	0,104	0,424	0,212	0,296	0,161

*Tabela IX.41 – Vrednosti za ocenu slufatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 3 meseca u 5% rastvor magnezijum sulfata*

Rastvor	Uzorci							
	MNPC1	MNPC2	MNMC1	MNMC2	MRPC1	MRPC2	MRMC1	MRMC2
$\Delta f_p$ [%]	3,5	2,3	-4,2	8,6	2,4	-1,2	4,8	-4,8
$\varepsilon$ [‰]	0,161	0,106	0,079	0,057	0,105	0,101	0,058	0,078
$A_i$ [kg/(m <sup>2</sup> ·h <sup>1/2</sup> )]	0,018	0,013	0,030	0,018	0,019	0,011	0,050	0,015
$U_v$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,106	0,088	0,170	0,102	0,119	0,041	0,275	0,095

Tabela IX.42 – Vrednosti za ocenu sulfatne otpornosti izabranim metodama, uzorci potopljeni 6 meseci u 5% rastvor magnezijum sulfata

Rastvor	Uzorci							
	NNPC1	NNPC2	NNMC1	NNMC2	NRPC1	NRPC2	NRMC1	NRMC2
$\Delta f_p$ [%]	-5,0	-18,7	-8,4	4,6	-9,5	-7,8	-7,4	-9,3
$\varepsilon$ [‰]	0,183	0,129	0,117	0,091	0,179	0,134	0,077	0,086
$A_i$ [kg/(m <sup>2</sup> ·h <sup>1/2</sup> )]	0,012	0,014	0,012	0,020	0,044	0,023	0,051	0,025
$U_v$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,072	0,068	0,065	0,104	0,301	0,120	0,284	0,151

Rezultati analize prikazanih vrednosti su:

- Nakon 3 meseca boravka u 5% sulfatnim rastvorima, sve ispitivane vrste betona, bez obzira na vrstu primenjenog krupnog agregata (rečni ili reciklirani), vrstu cementa (CEM I ili CEM III) i vodocementni faktor (0,55 ili 0,38) imaju zadovoljavajuću sulfatnu otpornost i u rastvoru natrijum sulfata i u rastvoru magnezijum sulfata. Ovaj zaključak je izveden i u slučaju primene kriterijuma koji je predložio Mehta i u slučaju primene kriterijuma koji su predložili Miller i Manson.
- Nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru natrijum sulfata, u slučaju praćenja ekspanzije uzoraka i ocene sulfatne otpornosti korišćenjem kriterijuma koji su predložili Miller i Manson, dva betona, spravljena sa cementom CEM I i  $w/c=0,55$ , prvi sa krupnim recikliranim agregatom, a drugi sa krupnim rečnim agregatom, ocenjeni su kao sulfatno neotporni. Sličan zaključak je izveden i u slučaju praćenja smanjenja čvrstoće pri pritisku i korišćenja kriterijuma koji je predložio Mehta. Po ovom kriterijumu beton spravljn sa krupnim recikliranim agregatom, cementom CEM I i  $w/c=0,55$  je sulfatno neotporan, a beton spravljn sa krupnim rečnim agregatom, cementom CEM I i  $w/c=0,55$  je vrlo blizu kritične vrednosti.
- Nakon 6 meseci boravka u 5% rastvoru magnezijum sulfata, sve ispitivane vrste betona, bez obzira na vrstu primenjenog krupnog agregata (rečni ili reciklirani), vrstu cementa (CEM I ili CEM III) i vodocementni faktor (0,55 ili 0,38) imaju zadovoljavajuću sulfatnu otpornost. Ovaj zaključak je izveden i u slučaju primene kriterijuma koji je predložio Mehta i u slučaju primene kriterijuma koji su predložili Miller i Manson.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja imaju logične vrednosti jedino u okviru betona koji su izloženi istom sulfatnom rastvoru. Postavljena hipoteza da će se vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode prvo smanjivati, a kasnije povećavati, kada beton izgubi sulfatnu otpornost, je delimično tačna, jer na vrednost ovog koeficijenta značajan uticaj ima vrsta agregata i vrsta sulfatnog rastvora, a zatim i drugi parametri (vrsta cementa, stepen hidratacije,  $w/c...$ ), tako da je veoma teško oceniti sulfatnu otpornost pomoću predmetnog koeficijenta. Najveća vrednost koeficijenta kapilarnog upijanja je dobijena kod betona koji je spravljn sa recikliranim agregatom, cementom CEM I i  $w/c=0,55$ , nakon 6 meseci izlaganja 5% rastvoru natrijum sulfata, što se poklapa sa najvećom vrednošću smanjenja

čvrstoće pri pritisku i najvećom ekspanzijom. Međutim ovaj jedan rezultat nije dovoljan da bi se usvojila predložena hipoteza.

- Identičan zaključak se može napisati nakon analize rezultata ukupnog kapilarnog upijanja vode.

Radi lakšeg upoređenja odabranih metoda pokušano je da se uspostave monotone korelacione zavisnosti između rezultata koji su korišćeni za praćenje sulfatne otpornosti u okviru metoda. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabela IX.43:

Tabela IX.43 - Rezultati korelacionih analiza

Period boravka u sulfatnom rastvoru	Natrijum sulfat		Magnezijum sulfat	
	3 meseca	6 meseci	3 meseca	6 meseci
$f(\Delta f_p, \varepsilon)$	-	$\varepsilon_i = 0,0067 \Delta f_{pi} + 0,0528$ $R^2 = 0,904$	-	-
$f(\Delta f_p, A)$	-	-	-	-
$f(\Delta f_p, U_v)$	-	-	-	-
$f(\varepsilon, A)$	-	-	-	-
$f(\varepsilon, U_v)$	-	-	-	-

Na osnovu rezultata prikazanih u prethodnoj tabeli zaključeno je da se kvalitetna korelaciona veza može uspostaviti samo između čvrstoće pri pritisku i ekspanzije uzoraka betona koji su 6 meseci boravili u rastvoru natrijum sulfata. Ako se pogledaju vrednosti smanjenja čvrstoća pri pritisku nakon 3 meseca boravka u rastvoru natrijum sulfata, uočiće se da se smanjenje čvrstoće pri pritisku javlja kod 4 od 8 ispitivanih vrsta betona, da su vrednosti smanjenja čvrstoće pri pritisku male i da se kreću u granicama do 10%. Kod preostale 4 vrste betona registrovano je povećanje čvrstoće pri pritisku, takođe do 10%. Međutim, za istu dužinu boravka u rastvoru natrijum sulfata, kod svih uzoraka betona je registrovana makar i minimalna ekspanzija. U slučaju ovakvog rasporeda rezultata nije moguće uspostaviti jaku monotonu korelacionu vezu. Nakon 6 meseci boravka u natrijum sulfatu, registrovano je smanjenje čvrstoće pri pritisku kod 7 od 8 ispitivanih betona i ekspanzija svih odgovarajućih uzoraka betona, pa je bilo moguće uspostaviti jaku korelaciju.

Korelacione veze između smanjenja čvrstoće pri pritisku i ekspanzije uzoraka betona koji su 3 i 6 meseci bili izloženi delovanju rastvora magnezijum sulfata se nisu mogle uspostaviti. Razlog za nemogućnost uspostavljanja jake korelacione veze nakon 3 meseca boravka u rastvoru magnezijum sulfata je isti kao i u slučaju izlaganja betona dejstvu rastvora natrijum sulfata u periodu od 3 meseca. Nakon 6 meseci boravka u rastvoru magnezijum sulfata, takođe je registrovano smanjenje čvrstoće pri pritisku kod 7 od 8 ispitivanih betona i ekspanzija svih odgovarajućih uzoraka betona, kao i u slučaju boravka u rastvoru natrijum sulfata, ali ipak nije bilo moguće uspostaviti jaku korelaciju, jer parovi vrednosti ekspanzije i smanjenja čvrstoće pri pritisku ne korespondiraju jedni drugima.



Korelacione veze između smanjenja čvrstoće pri pritisku i koeficijenta kapilarnog upijanja vode i čvrstoće pri pritisku i ukupnog kapilarnog upijanja vode, takođe nisu mogle biti uspostavljene, za oba sulfatna rastvora i za oba perioda izloženosti. Mogući razlozi za ovakav zaključak su što na vrednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode i ukupnog upijanja vode značajan uticaj ima vrsta agregata, kao i kristalizacija soli sulfata koja se događa u toku procesa sušenja uzoraka radi ispitivanja kapilarnog upijanja vode.

Navedeno objašnjenje važi i za pokušaj uspostavljanja korelacionih veza između ekspanzije i koeficijenta kapilarnog upijanja vode i ekspanzije i ukupnog kapilarnog upijanja vode, za oba sulfatna rastvora i za oba perioda izloženosti.





X ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I  
PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA



## 1. UVOD

U okviru ovog poglavlja prikazani su rezultati analize uzoraka betona spravljenih sa dve vrste cementa (CEM I i CEM III), dva vodocementna faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) i dve vrste krupnog agregata (rečni – N i reciklirani R, koji je dobijen drobljenjem "starog" betona). Variranjem komponentnih materijala formirano je osam različitih betonskih mešavina, koje su, nakon dostizanja odgovarajuće zrelosti, izlagane 5% rastvorima natrijum sulfata i magnezijum sulfata u vremenskom periodu od 6 meseci. Otpornost uzoraka betona je proveravana pomoću jedne destruktivne i dve nedestruktivne metode. Odabrane metoda za proveru sulfatne otpornosti su:

- Promena (smanjenje) čvrstoće pri pritisku
- Promena dužine (ekspanzija) uzoraka
- Promena (povećanje) kapilarnog upijanja vode

Radi potpunijeg sagledavanja promena u mikrostrukturi i mineraloškom sastavu cementnog kamena usled interakcije između komponenata cementa i sulfatnih jedinjenja odabrane su sledeće metode za karakterizaciju materijala :

- MIP (Metoda živine porozimetrije),
- SEM (Skenirajuća elektronska mikroskopija),
- BSE (Skenirajuća elektronska mikroskopija sa povratno rasejanim elektronima),
- XRD (Rendgenostrurna analiza)
- FTIR (Infracrveni spektroskop sa Fourier-ovom transformacijom)

U nastavku teksta prikazani su zaključci po odabranim metodama za proveru sulfatne otpornosti, po vrstama upotrebljenog agregata, a zatim je data komparativna analiza u okviru koje su upoređeni rezultati dobijeni primenom odabranih metoda za proveru sulfatne otpornosti, radi izbora najpogodnije metode. Posebno je urađena ocena sulfatne otpornosti betona sa recikliranim krupnim agregatom u zavisnosti od vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora.

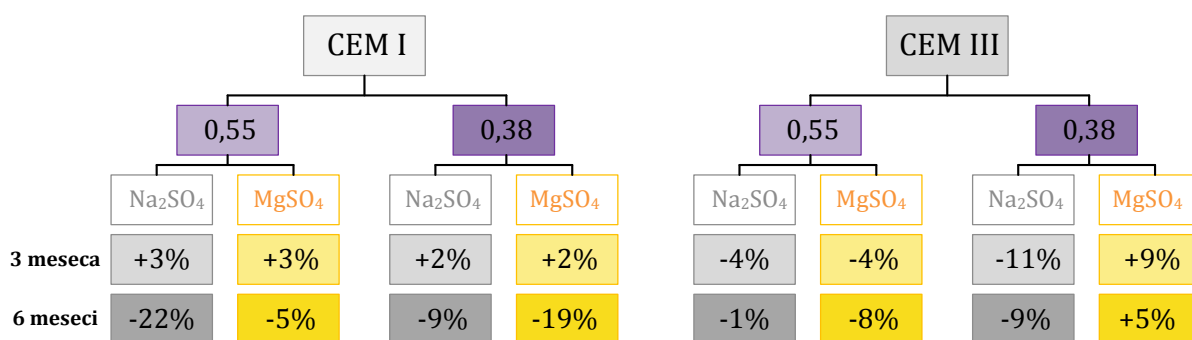
## 2. PROMENA ČVRSTOĆE PRI PRITISKU

Promena čvrstoće pri pritisku u zavisnosti od odabranog fizičkog i/ili hemijskog uticaja je široko rasprostranjena metoda, koja se koristi za ocenu kvaliteta/otpornosti betona. Najčešće korišćeni kriterijum je smanjenje čvrstoće pri pritisku u odnosu na odgovarajuću referentnu vrednost. U slučaju ocenjivanja sulfatne otpornosti betona predloženo je da prosečna vrednost čvrstoće pri pritisku nakon izaganja delovanju sulfatnih rastvora iznosi najmanje 75% od odgovarajuće referentne vrednosti čvrstoće pri pritisku (etaloni), odnosno da smanjenje čvrstoće pri pritisku veće od 25% ukazuje na "otkaz" betona [184].

## Rečni agregat

Uticaji vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora na promenu čvrstoće pri pritisku uzoraka betona sa krupnim rečnim agregatom nisu jasno vidljivi za period izloženosti sulfatnim rastvorima do 3 meseca (Slika X.1). Betoni spravljeni sa cementom CEM I, bez obzira na vrednost vodocementnog faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) i vrstu sulfatnog rastvora (natrijum sulfat ili magnezijum sulfat), nakon 3 meseca boravka u predmetnim rastvorima, ne pokazuju značajne razlike u čvrstoći pri pritisku u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke. U slučaju betonskih uzoraka sa cementom CEM III, potopljenih 3 meseca u oba sulfatna rastvora, vrednosti čvrstoće pri pritisku zavise od vodocementnog odnosa i vrste sulfatnog rastvora, međutim uticaj ova dva parametra na vrednost čvrstoće pri pritisku je u granicama  $\pm 10\%$  u odnosu na odgovarajuću referentnu čvrstoću.

Nakon 6 meseci izlaganja uzoraka betona sulfatnim rastvorima, analizirana tri parametra (vrsta cementa, vodocementni faktor i vrsta sulfatnog rastvora) počinju da utiču na promenu čvrstoće pri pritisku, ali sa različitim intenzitetom (Slika X.1). Svi betoni spravljeni sa CEM I pokazuju smanjenje čvrstoće pri pritisku u poređenju sa odgovarajućim referentnim betonima. Najveće smanjenje, od 22%, imao je beton sa  $w/c=0,55$ , potopljen u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Betoni sa cementom CEM III su manje osetljivi sa aspekta promene čvrstoće u odnosu na betone sa CEM I. Smanjenje čvrstoće betona sa CEM III ne prelazi 10% od odgovarajućih referentnih vrednosti, a pri nižem vodocementnom faktoru, u rastvoru magnezijum sulfata, registrovano je i izvesno povećanje čvrstoće pri pritisku.



Slika X.1 - Promena čvrstoće pri pritisku uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

Prema kriterijumu smanjenja čvrstoće pri pritisku, predloženog od strane Mehte [184], svi ispitivani betoni, spravljeni sa rečnim agregatom koji su nakon dostizanja odgovarajuće zrelosti bili izloženi delovanju 5% rastvora natrijum sulfata i 5% rastvora magnezijum sulfata, imaju zadovoljavajuću sulfatnu otpornost. Međutim, beton spravljen sa cementom CEM I i većim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,55$ ), koji je bio izložen 6 meseci rastvoru natrijum sulfata, ima smanjenje čvrstoće pri pritisku od 22%,

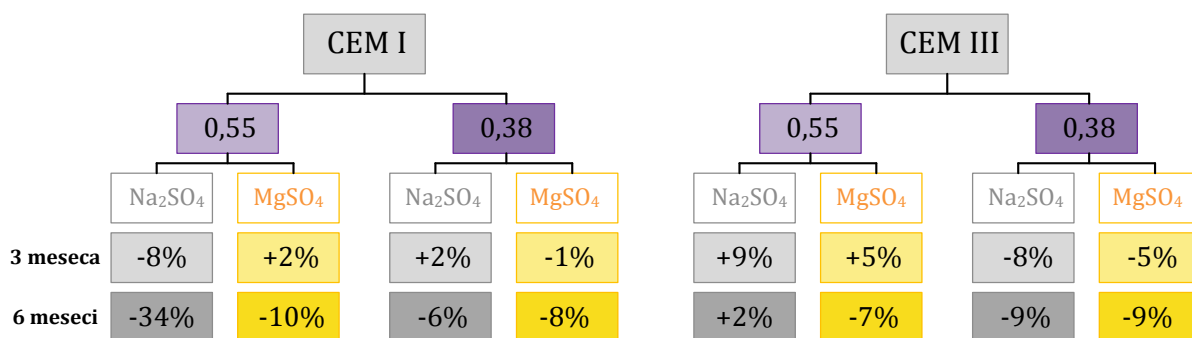
što je veoma blizu kritične vrednosti predložene od strane Mehte [184]. Većina ostalih ispitivanih vrsta betona iz ove grupe (86%) imaju smanjenje čvrstoće pri pritisku do 10% u odnosu na odgovarajuće etalonske vrednosti.

Dobijene vrednosti za ocenu sulfatne otpornosti zavise od variranih parametara (vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora). Sulfatna otpornost betona spravljenih sa rečnim agregatom nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima prvenstveno zavisi od mineraloškog sastava (vrste) cementa. Betoni spravljeni sa CEM III imaju zadovoljavajuću sulfatnu otpornost u oba sulfatna rastvora i za obe vrednosti vodocementnog faktora. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa CEM I zavisi od vrednosti vodocementnog faktora ali i od vrste sulfatnog rastvora. Beton sa CEM I i višim vodocementnim faktorom je osetljiviji na dejstvo rastvora natrijum sulfata jer je smanjenje čvrstoće pri pritisku ovog betona veoma blizu kritične vrednosti predložene od strane Mehte, nakon 6 meseci delovanja predmetnog rastvora.

### **Reciklirani agregat**

Uticaji vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora na promenu čvrstoće pri pritisku uzoraka betona sa krupnim recikliranim agregatom takođe nisu jasno vidljivi za period izloženosti sulfatnim rastvorima do 3 meseca (Slika X.2). Betoni spravljeni sa cementom CEM I, bez obzira na vrednost vodocementnog faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) i vrstu sulfatnog rastvora (natrijum sulfat ili magnezijum sulfat), nakon 3 meseca boravka u predmetnim rastvorima, ne pokazuju značajne razlike u čvrstoći pri pritisku u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke. Najveće smanjenje čvrstoće iznosi 8% i registrovano je kod betona sa većim vodocementnim faktorom u rasvoru natrijum sulfata. U slučaju betonskih uzoraka sa cementom CEM III potopljenih 3 meseca u oba sulfatna rastvora, vrednosti čvrstoće pri pritisku, zavise od vodocementnog odnosa. Uticaj vodocementnog faktora na vrednost čvrstoće pri pritisku je mali i u granicama je od  $\pm 10\%$  u odnosu na odgovarajuću referentnu čvrstoću.

Nakon 6 meseci izlaganja uzoraka betona sulfatnim rastvorima, analizirana tri parametra (vrsta cementa, vodocementni faktor i vrsta sulfatnog rastvora) počinju da utiču na promenu čvrstoće pri pritisku, ali sa različitim efektom (Slika X.2). Betoni spravljeni sa CEM I pokazuju smanjenje čvrstoće pri pritisku u poređenju sa odgovarajućim referentnim betonima. Najveće smanjenje, od 34%, imao je beton sa  $w/c=0,55$ , potopljen u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , dok kod ostalih vrsta betona predmetno smanjenje čvrstoće nije veće od 10%. Betoni sa cementom CEM III su manje osetljivi sa aspekta promene čvrstoće u odnosu na betone sa CEM I. Smanjenje čvrstoće betona sa CEM III ne prelazi 10% od odgovarajućih referentnih vrednosti.



Slika X.2 - Promena čvrstoće pri pritisku uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

Ocnom sulfatne otpornosti ispitivanih vrsta betona sa recikliranim krupnim agregatom nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima pomoću kriterijuma koji je predložio Mehta [184] zaključeno je da beton spravljen sa cementom CEM I i većim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,55$ ), koji je bio izložen 6 meseci rastvoru natrijum sulfata, ima smanjenje čvrstoće pri pritisku od 34%, što je veće od kritične vrednosti predložene od strane Mehte. Ostale ispitivane vrste betona iz ove grupe imaju smanjenje čvrstoće pri pritisku do 10% u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti .

Sulfatna otpornost betona spravljenih sa krupnim recikliranim agregatom nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima dominantno zavisi od mineraloškog sastava (vrste) cementa. Betoni spravljeni sa CEM III imaju zadovoljavajuću sulfatnu otpornost u oba sulfatna rastvora, bez obzira na vrednost vodocementnog faktora. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa CEM I zavisi od vrednosti vodocementnog faktora. Beton sa nižim vodocementnim faktorom ima zadovoljavajuću sulfatnu otpornost u oba sulfatna rastvora, dok kod betona sa višim vodocementnim faktorom sulfatna otpornost zavisi od vrste rastvora. Beton sa CEM I i višim vodocementnim faktorom je osetljiviji na dejstvo rastvora natrijum sulfata i nema zadovoljavajuću otpornost nakon 6 meseci delovanja predmetnog rastvora.

### Komparativna analiza

Na osnovu komparativne analize dobijenih vrednosti čvrstoća pri pritisku betona spravljenih sa krupnim rečnim i betona sa krupnim recikliranim agregatom, koji su bili izlagani različitim rastvorima (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata i 5% rastvor magnezijum sulfata) zaključeno je da vrsta agregata ima uticaja na sulfatnu otpornost, ali da je dominantniji uticaj vrste cementa. Analizom dobijenih rezultata sa aspekta vrste cementa zaključeno je:

- Betoni sa krupnim rečnim agregatom i sa cementom CEM I imaju veće čvrstoće u odnosu na odgovarajuće betone sa krupnim recikliranim agregatom, bez obzira na posmatrani period, vodocementni faktor i vrstu rastvora. Izuzetak je uzorak betona



- sa recikliranim agregatom i manjim vodocementnim faktorom (0,38), koji je bio 6 meseci potopljen u rastvor  $MgSO_4$ .
- U slučaju betona sa CEM I i  $w/c=0,55$ , razlika između čvrstoća etalonskih uzoraka betona spravljenih sa rečnim i recikliranim agregatom se sa povećanjem starosti smanjuje, što se može objasniti povećanjem athezije između cementnog kamena i hrapavih zrna krupnog recikliranog agregata. Sličan trend je uočen i kod betona spravljenih sa CEM I i  $w/c=0,38$ , uz komentar da se za veće starosti razlika između čvrstoća ponovo povećava, najverovatnije zbog limitiranih vrednosti čvrstoće krupnog recikliranog agregata.
  - U slučaju betona spravljenih sa CEM I i sa oba vodocementna faktora, koji su bili 3 meseca potopljani u sulfatne rastvore, razlika između čvrstoća betona sa rečnim i recikliranim agregatom se smanjuje, *pa se može zaključiti da su doprinosi produkata hidratacije i povećanje athezije između cementnog kamena i zrna krupnog recikliranog agregata veći od negativnog uticaja sulfatnih rastvora na čvrstoću pri pritisku*. Od ovog zaključka odstupaju uzorci betona sa  $w/c=0,55$  koji su potopljani u rastvor natrijum sulfata.
  - Nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, razlika između čvrstoća pri pritisku betona sa CEM I i sa rečnim agregatom i betona sa CEM I i sa recikliranim agregatom se povećava. *Uzroci uočene zakonitosti mogu biti negativno dejstvo sulfatnih rastvora i limitirane vrednosti čvrstoće krupnog recikliranog agregata*. Od uočene zakonitosti odstupaju betoni sa  $w/c=0,38$  u slučaju delovanja rastvora magnezijum sulfata.
  - Betoni sa cementom CEM III,  $w/c=0,55$  i krupnim rečnim agregatom imaju približno iste vrednosti čvrstoća pri pritisku sa odgovarajućim betonima sa recikliranim agregatom (u 6/7 kombinacija), bez obzira na posmatrani period (0, 3 i 6 meseci) i vrstu rastvora, uz konstataciju da su čvrstoće betona sa recikliranim agregatom manje od odgovarajućih sa rečnim agregatom. Suprotan zaključak je izveden upoređenjem istih betona samo sa  $w/c=0,38$  (u 5/7 kombinacija).
  - Čvrstoće pri pritisku etalonskih uzoraka betona spravljenih sa CEM III,  $w/c=0,55$  i rečnim agregatom su veće od čvrstoća odgovarajućih betona sa recikliranim agregatom. Razlika između predmetnih čvrstoća pri pritisku betona sa rečnim i sa recikliranim agregatom se u toku perioda od 3 meseca povećava, a nakon 6 meseci se smanjuje. *Predmetno smanjenje se može tumačiti doprinosom zakasnele hidratacije cementa i povećanjem athezije između cementnog kamena i zrna recikliranog agregata*.
  - Čvrstoće pri pritisku etalonskih uzoraka betona spravljenih sa CEM III,  $w/c=0,38$  i recikliranim agregatom su veće od čvrstoća odgovarajućih betona sa rečnim agregatom. Razlika između odgovarajućih čvrstoća betona sa rečnim i sa recikliranim agregatom se u toku perioda od 3 meseca ne menja, a nakon 6 meseci se povećava. *Predmetno povećanje je najverovatnije posledica zakasnele hidratacije cementa i povećanja athezije između cementnog kamena i zrna recikliranog agregata*.

Analizom dobijenih rezultata sa aspekta vrste sulfatnog rastvora zaključeno je:

- 5% rastvor natrijum sulfata nema uticaja na vrednost čvrstoće pri pritisku u periodu od 3 meseca. Uzorci betona koji su boravili u rastvora natrijum sulfata u trajanju od 3 meseca ne pokazuju značajnu promenu čvrstoće pri pritisku u odnosu na etalonske uzorke iste starosti. Za taj period karakteristična je promena čvrstoće (smanjenje ili povećanje) u granicama do  $\pm 10\%$ .
- Nakon 6 meseci držanja u rastvoru natrijum sulfata zaključeno je da predmetni sulfatni rastvor ima uticaja na vrednost čvrstoće pri pritisku, ali da njegov uticaj zavisi od vrste cementa i vodocementnog faktora. Naime, uzorci sa cementom CEM I i  $w/c=0,55$ , pokazuju pad čvrstoće od 22% za rečni agregat i 34% za reciklirani agregat. Ostale vrste betona nemaju značajniju promenu u čvrstoći pri pritisku (do 10%), u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke.
- 5% rastvor magnezijum sulfata ima manji uticaj na smanjenje čvrstoće pri pritisku za iste posmatrane vremenske periode u odnosu na 5% rastvor natrijum sulfata. Uzorci izloženi delovanju magnezijum sulfata u trajanju od 3 i 6 meseci pokazuju malo povećanje (+10%) ili smanjenje čvrstoće (-10%) pri pritisku u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke, osim betona sa cementom CEM I,  $w/c=0,38$  i rečnim agregatom kod kojeg smanjenje iznosi 19%.

*Prema kriterijumu koji je dat od strane Mehte [184] uzorci betona sa krupnim recikliranim agregatom, cementom CEM I i sa  $w/c=0,55$  nemaju zadovoljavajuću otpornost na delovanje 5%  $Na_2SO_4$  u trajanju od 6 meseci. Vrednosti bliske ovom kriterijumu imaju i uzorci betona sa rečnim agregatom, CEM I i  $w/c=0,55$  u istom sulfatnom rastvoru.*

*Betoni spravljeni sa CEM III imaju malo smanjenje čvrstoće pri pritisku i zadovoljavajuću sulfatnu otpornost za obe vrednosti vodocementnog faktora, obe vrste agregata i u oba sulfatna rastvora, tako da se može zaključiti da se sulfatna otpornost postiže izborom ove vrste cementa. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa CEM I zavisi od vrednosti vodocementnog faktora, od vrste agregata ali i od vrste sulfatnog rastvora. Beton sa CEM I, recikliranim agregatom i višim vodocementnim faktorom je osetljiviji na dejstvo rastvora natrijum sulfata i nema zadovoljavajuću otpornost nakon 6 meseci delovanja predmetnog rastvora. Da bi se postigli sulfatno otporni betoni sa recikliranim agregatom i CEM I, mora se usvajati niži vodocementni faktor.*

### **3. PROMENA DUŽINE (EKSPANZIJA)**

Promena dužine (ekspanzija) je još jedna, široko rasprostranjena metoda, koja se koristi za ocenu kvaliteta otpornosti betona. Za razliku od promene čvrstoće pri pritisku koja se svrstava u destruktivne metode, ova metoda je nedestruktivna. Najčešće korišćeni kriterijum je vrednost ekspanzije, odnosno povećanja dužine uzoraka koje se obično izražava u mm/m (‰) ili cm/m (%). U slučaju ocenjivanja sulfatne otpornosti betona usvojen je kriterijum predložen od strane Miller i Manson [184], po kojem je maksimalna vrednost ekspanzije (kritična vrednost) ograničena na 0,2‰.

## Rečni agregat

Uticaji vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora na promenu dužine uzoraka betona sa krupnim rečnim agregatom su uočljivi za period izloženosti sulfatnim rastvorima do 3 meseca (Slika X.3). Betoni spravljeni sa cementom CEM I, bez obzira na vrednost vodocementnog faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) i vrstu sulfatnog rastvora (natrijum sulfat ili magnezijum sulfat) nakon 3 meseca boravka u predmetnim rastvorima imaju značajno veće ekspanzije u odnosu na odgovarajuće betone spravljene sa cementom CEM III. Izmerene vrednosti ekspanzija betona spravljenih sa cementom CEM I su, za ovaj period izloženosti sulfatnim rastvorima, manje od kritične vrednosti. U slučaju betonskih uzoraka sa cementom CEM III potopljenih 3 meseca u oba sulfatna rastvora, vrednosti ekspanzije su male i uglavnom manje od 0,05‰, što se u praksi smatra za zanemarljive vrednosti [185].

Nakon 6 meseci izlaganja uzoraka betona sulfatnim rastvorima uočava se povećanje vrednosti ekspanzije u odnosu na vrednosti izmerene na 3 meseca (Slika X.3). Promena dužine je naročito izražena u betonu sa CEM I i  $w/c=0,55$  u oba rastvora, tako da je dostignuta kritična vrednost u rastvoru natrijum sulfata. Izmerene vrednosti ekspanzije betona sa CEM III su još uvek male i nešto su veće od granice zanemarivanja (0,05 ‰), osim kod betona sa  $w/c=0,55$  izloženog delovanju rastvora magnezijum sulfata, pri čemu kritična vrednost nije dostignuta.

	CEM I				CEM III			
	0,55		0,38		0,55		0,38	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
3 meseca	0,168	0,161	0,120	0,106	0,037	0,079	0,027	0,057
6 meseci	0,225	0,183	0,129	0,129	0,067	0,177	0,025	0,091

Slika X.3 - Vrednosti promene dužine uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

Ocnom sulfatne otpornosti ispitivanih vrsta betona sa rečnim krupnim agregatom nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima pomoću kriterijuma koji su predložili Miller i Manson [184] zaključeno je da jedino beton spravljen sa cementom CEM I i većim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,55$ ), koji je bio izložen 6 meseci rastvoru natrijum sulfata, ima ekspanziju od 0,225‰, što je veće od predložene kritične vrednosti.

Prema kriterijumu kritične vrednosti ekspanzije, predloženog od strane Miller-a i Manson-a, samo jedna vrsta betona od betona spravljenih sa rečnim agregatom, koji su nakon dostizanja odgovarajuće zrelosti bili izloženi delovanju 5% rastvora natrijum sulfata i 5% rastvoru magnezijum sulfata, nema zadovoljavajuću sulfatnu otpornost. Uočeno je da vrednosti za ocenu sulfatne otpornosti zavise od vrste cementa,

vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa rečnim agregatom nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima dominantno zavisi od mineraloškog sastava (vrste) cementa. Betoni spravljeni sa CEM III imaju malu ekspanziju i zadovoljavajuću sulfatnu otpornost za obe vrednosti vodocementnog faktora i u oba sulfatna rastvora, tako da se može zaključiti da se sulfatna otpornost postiže izborom ove vrste cementa. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa CEM I zavisi od vrednosti vodocementnog faktora ali i od vrste sulfatnog rastvora. Beton sa CEM I i višim vodocementnim faktorom je osetljiviji na dejstvo rastvora natrijum sulfata i nema zadovoljavajuću otpornost nakon 6 meseci delovanja predmetnog rastvora. Da bi se postigli sulfatno otporni betoni sa rečnim agregatom i CEM I, mora se usvajati niži vodocementni faktor.

### Reciklirani agregat

Uticaji vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora na promenu dužine uzoraka betona sa krupnim recikliranim agregatom su uočljivi i za period izloženosti sulfatnim rastvorima do 3 meseca (Slika X.4). Betoni spravljeni sa cementom CEM I, bez obzira na vrednost vodocementnog faktora, imaju veću ekspanziju u oba sulfatna rastvora u odnosu na ekspanziju odgovarajućih betona sa CEM III. Pri tome, uzorci betona sa CEM I i višim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,55$ ) imaju značajno veću ekspanziju u odnosu na odgovarajuće uzorke betona spravljenog sa cementom CEM III, dok je razlika u ekspanziji betona sa CEM I i nižim vodocementnim faktorom u odnosu na odgovarajući beton sa CEM III, mala. Izmerene vrednosti ekspanzija betona spravljenih sa cementom CEM I su, za ovaj period izloženosti sulfatnim rastvorima, manje od kritične vrednosti. U slučaju betonskih uzoraka sa cementom CEM III potopljenih 3 meseca u oba sulfatna rastvora, vrednosti ekspanzije su male i uglavnom su bliske vrednosti od 0,05‰, što se u praksi smatra za zanemarljive vrednosti [185].

Nakon 6 meseci izlaganja uzoraka betona sulfatnim rastvorima uočava se povećanje vrednosti ekspanzije u odnosu na vrednosti izmerene na 3 meseca (Slika X.4). Promena dužine je naročito izražena u betonu sa CEM I i  $w/c=0,55$  u oba rastvora, tako da je dostignuta kritična vrednost u rastvoru natrijum sulfata. Izmerene vrednosti ekspanzije betona sa CEM III su još uvek male i nešto su veće od granice zanemarivanja (0,05 ‰).

	CEM I				CEM III			
	0,55		0,38		0,55		0,38	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
3 meseca	0,119	0,105	0,072	0,101	0,024	0,058	0,071	0,078
6 meseci	0,267	0,179	0,116	0,134	0,053	0,077	0,093	0,086

Slika X.4 - Vrednosti promene dužine uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

Ocenom sulfatne otpornosti ispitivanih vrsta betona sa recikliranim krupnim agregatom nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima pomoću kriterijuma koji su predložili Miller i Manson [184] zaključeno je da jedino beton spravljen sa cementom CEM I i većim vodocementnim faktorom ( $w/c=0,55$ ), koji je bio izložen 6 meseci rastvoru natrijum sulfata, ima ekspanziju od 0,267‰, što je veće od predložene kritične vrednosti.

Prema kriterijumu kritične vrednosti ekspanzije, predloženog od strane Miller-a i Manson-a, samo jedna vrsta betona spravljenih sa krupnim recikliranim agregatom, koji su nakon dostizanja odgovarajuće zrelosti bili izloženi delovanju 5% rastvora natrijum sulfata i 5% rastvoru magnezijum sulfata, nema zadovoljavajuću sulfatnu otpornost. Uočeno je da vrednosti za ocenu sulfatne otpornosti zavise od vrste cementa, vodocementnog faktora i vrste sulfatnog rastvora. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa recikliranim agregatom nakon 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima dominantno zavisi od mineraloškog sastava (vrste) cementa. Betoni spravljeni sa CEM III imaju malu ekspanziju i zadovoljavajuću sulfatnu otpornost za obe vrednosti vodocementnog faktora i u oba sulfatna rastvora, tako da se može zaključiti da se sulfatna otpornost postiže izborom ove vrste cementa. Sulfatna otpornost betona spravljenih sa CEM I zavisi od vrednosti vodocementnog faktora ali i od vrste sulfatnog rastvora. Beton sa CEM I i višim vodocementnim faktorom je osetljiviji na dejstvo rastvora natrijum sulfata i nema zadovoljavajuću otpornost nakon 6 meseci delovanja predmetnog rastvora. Da bi se postigli sulfatno otporni betoni sa recikliranim agregatom i CEM I, mora se usvajati niži vodocementni faktor.

### **Komparativna analiza**

Na osnovu komparativne analize dobijenih vrednosti ekspanzije betona spravljenih sa krupnim rečnim i betona sa krupnim recikliranim agregatom (Slika X.3 i Slika X.4), koji su bili izlagani različitim rastvorima (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata i 5% rastvor magnezijum sulfata) zaključeno je:

- Ekspanzija uzoraka betona spravljenih sa recikliranim agregatom, koji su negovani u krečnoj vodi, je veća od betona sa rečnim agregatom. Razlika u ekspanziji se kreće od 0,02‰ do 0,049‰ za karakteristična vremena posmatranja od 3 i 6 meseci. Od navedenog zaključka odstupaju jedino betonski uzorci spravljeni sa CEM I i  $w/c=0,55$ , kod kojih je ekspanzija veća kod uzoraka sa rečnim agregatom za cca 0,02‰. *Sve izmerene vrednosti ekspanzija etalonskih uzoraka su male i mogu se zanemariti, jer se kreću od 0,010-0,050mm/m<sup>1</sup>(‰) [185].*
- Nakon 3 meseca izlaganja sulfatnim rastvorima ekspanzija uzoraka betona spravljenih sa recikliranim agregatom je uvek manja u odnosu na odgovarajuće uzorke spravljene sa rečnim agregatom. Od ovog zaključka odstupaju jedino uzorci od betona sa CEM III,  $w/c=0,38$  i recikliranim agregatom koji pokazuju veću ekspanziju u oba rastvora. *Sve izmerene vrednosti ekspanzije uzoraka betona su, u*

*oba sulfatna rastvora, manje od kritične vrednosti prema kriterijumu Miller-a i Mansona\* [184]. Detaljnijom analizom uočeno je da vrednosti ekspanzije dominantno zavise od vrste cementa, tako da betoni sa CEM I imaju veću ekspanziju u odnosu na betone sa CEM III.*

- Ekspanzija uzoraka betona, koji su 6 meseci boravili u sulfatnim rastvorima, zavisi prvenstveno od vrste cementa a potom i od vrste sulfatnog rastvora.
  - U rastvoru natrijum sulfata, ekspanzija dve vrste betona sa recikliranim agregatom (beton CEM I i  $w/c=0,38$  i beton CEM III i  $w/c=0,55$ ) je još uvek manja u odnosu na ekspanziju odgovarajućih betona sa rečnim agregatom. Izmerene vrednosti ekspanzije ove četiri vrste betona su manje od kritične vrednosti prema kriterijumu Miller-a i Mansona. Ekspanzija betona sa recikliranim agregatom, CEM III i sa  $w/c=0,38$ , koja je na 3 meseca bila veća u odnosu na odgovarajući beton sa rečnim agregatom, je i na 6 meseci zadržala isti trend, ali su stvarne vrednosti ekspanzije male i značajno su manje od kritične vrednosti prema kriterijumu Miller-a i Manson-a. *Ekspanzija betona sa CEM I i  $w/c=0,55$ , bez obzira na vrstu agregata, je veća od kritične vrednosti prema kriterijumu Miller-a i Manson-a.*
  - Ekspanzije svih uzoraka betona koji su 6 meseci boravili u rastvoru magnezijum sulfata su manje od kritične vrednosti prema kriterijumu Miller-a i Manson-a.

*Ukoliko se za ocenu sulfatne otpornosti betona koristi metoda praćenja promene dimenzija uzoraka zaključeno je da vrsta agregata ima minoran uticaj na sulfatnu otpornost betona koji su 6 meseci boravili u sulfatnim rastvorima. Vrsta sulfatnog rastvora ima uticaja na sulfatnu otpornost betona, bez obzira na vrstu agregata. U 5% rastvoru natrijum sulfata, sulfatna otpornost betona zavisi od primenjene vrste cementa. Svi betoni spravljeni sa cementom CEM III, bez obzira na vrednost vodocementnog faktora i vrstu krupnog agregata, su sulfatno otporni, dok sulfatna otpornost betona sa cementom CEM I zavisi od vodocementnog faktora. Betoni sa CEM I i  $w/c=0,55$  i obe vrste krupnog agregata su sulfatno neotporni. U 5% rastvoru magnezijum sulfata, sve ispitivane vrste betona su pokazale zadovoljavajuću otpornost. Detaljnijom analizom uočeno je da vrednosti ekspanzije dominantno zavise od vrste cementa, tako da betoni sa CEM I imaju veću ekspanziju u odnosu na betone sa CEM III.*

#### **4. KAPILARNO UPIJANJE VODE**

Pronađeno je da je promena kapilarnog upijanja vode betona koji su bili izlagani dejstvu rastvora sulfata analizirana samo u nekoliko istraživanja [24],[91][116]. U analizama su upoređivane vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode. U ovoj disertaciji je odlučeno da se ispita mogućnost primene ove nedestruktivne metode za određivanje sulfatne otpornosti betona upoređenjem koeficijenata kapilarnog upijanja vode i upoređenjem konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode. Pretpostavljeno je da će se i koeficijent kapilarnog upijanja vode i kapilarno upijanje vode smanjivati kod betona otpornih na sulfatnu koroziju, a da će se obe vrednosti naglo povećati kada beton

postane sulfatno neotporan. Na osnovu dobijenih rezultata i njihove analize zaključeno je:

### **Kinetika upijanja vode**

Vrsta sulfatnog rastvora nema uticaja na način-kinetiku upijanja vode betona koji su 3 meseca bili izloženi delovanju sulfatnih rastvora. Kinetika upijanja vode zavisi od vrste betona (vrste cementa, vrednosti vodocementnog faktora i vrste agregata). Međutim, nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, pored vrste betona, na kinetiku kapilarnog upijanja vode utiče i vrsta rastvora. Vrsta agregata ima značajan uticaj na kinetiku upijanja vode, naročito kod betona koji su bili izloženi dejstvu rastvora natrijum sulfata.

### **Koeficijent kapilarnog upijanja**

#### **Rečni agregat**

- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom se smanjuju tokom posmatranog vremenskog perioda (6 meseci) u odnosu na etalonske uzorake pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), bez obzira na vrstu rastvora (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata ili 5% rastvor magnezijum sulfata ) u kome su boravili (Slika X.5).
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode zavise od vrste cementa i vodocementnog odnosa i veći su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I, kao i kod betona sa  $w/c=0,55$  u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$  (Slika X.5). Ova zakonitost je uočena i kod etalonskih uzoraka i kod uzoraka koji su 3 i 6 meseci boravili u sulfatnim rastvorima, s napomenom da, kod uzoraka koji su izlagani sulfatnim rastvorima, uočena zakonitost važi u okviru istog sulfatnog rastvora.
- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode betona koji su 3 meseca bili potopljeni u sulfatne rastvore su takve da se ne može jasno sagledati uticaj analiziranih parametara na promenu ovog koeficijenta u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke, dok su, nakon 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, veći od odgovarajućih koeficijenata etalonskih uzoraka betona osim kod betona sa CEM III i  $w/c=0,55$  (Slika X.5).
- Međusobnim upoređenjem vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona nakon 3 i 6 meseci potapanja uočeno je da se koeficijenti kapilarnog upijanja vode smanjuju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rasvorima (6 od 8 analiziranih kombinacija) (Slika X.5).
- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode kod betona sa rečnim agregatom zavise i od vrste sulfatnog rastvora, ali je ova zavisnost povezana i sa vodocementnim faktorom, tako da su vrednosti predmentog koeficijenta veće u rastvoru natrijum sulfata za  $w/c=0,55$ , a u rastvoru magnezijum sulfata kada je  $w/c=0,38$  (Slika X.5).

	CEM I				CEM III			
	0,55		0,38		0,55		0,38	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
0 meseci	0,112	0,112	0,037	0,037	0,130	0,130	0,068	0,068
3 meseca	0,021	0,018	0,010	0,013	0,042	0,030	0,020	0,018
6 meseci	0,021	0,012	0,008	0,014	0,027	0,012	0,019	0,020

Slika X.5 - Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

### Reciklirani agregat

- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom se smanjuju tokom posmatranog vremenskog perioda (6 meseci) u odnosu na etalonske uzorake pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), bez obzira na vrstu rastvora (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata ili 5% rastvor magnezijum sulfata) u kome su boravili (Slika X.6).
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode zavise od vrste cementa i veći su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I, u slučaju etalonskih uzoraka i u slučaju uzoraka koji su 3 meseca boravili u istoj vrsti sulfatnog rastvora (Slika X.6). Nakon 6 meseci, uticaj vrste sulfatnog rastvora postaje dominantan u odnosu na uticaj vrste cementa, tako da su, u 5% rastvoru natrijum sulfata, dobijeni veći koeficijenti kapilarnog upijanja betona sa CEM I.
- Uticaj vodocementnog faktora na vrednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom je isti i ne zavisi od dužine vremena izlaganja sulfatnim rastvorima. Kod betona sa  $w/c=0,55$  dobijene su veće vrednosti ovog koeficijenta u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$ , u okviru istog sulfatnog rastvora (Slika X.6).
- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode betona koji su 3 meseca bili potopljeni u sulfatne rastvore zavise od vodocementnog odnosa i za  $w/c=0,38$  su manje od odgovarajućih vrednosti etalonskih uzoraka, a za  $w/c=0,55$  predmetna razlika zavisi i od vrste cementa i od vrste rastvora (Slika X.6). Nakon 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, koeficijenti kapilarnog upijanja su veći od odgovarajućih koeficijenata etalonskih uzoraka betona osim kod betona sa CEM III i  $w/c=0,55$ .
- Međusobnim upoređenjem vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona nakon 3 i 6 meseci potapanja uočeno je da se koeficijenti kapilarnog upijanja vode povećavaju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rastvorima (7 od 8 analiziranih kombinacija) (Slika X.6).



- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode kod betona sa recikliranim agregatom su uvek manje u rastvoru magnezijum sulfata u odnosu na odgovarajuće vrednosti u natrijum sulfatu za istu vrstu betona (isti cement i isti w/c) i u oba analizirana perioda izlaganja delovanju sulfatnih rastvora (Slika X.6.).

	CEM I				CEM III			
	0,55		0,38		0,55		0,38	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
0 meseci	0,122	0,122	0,077	0,077	0,204	0,204	0,089	0,089
3 meseca	0,034	0,019	0,014	0,011	0,073	0,050	0,022	0,015
6 meseci	0,075	0,044	0,039	0,023	0,056	0,051	0,026	0,025

Slika X.6 - Vrednostikoefficienta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

### Komparativna analiza

Upoređenjem vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode betona koji su spravljeni sa krupnim rečnim agregatom i betona spravljenim sa krupnim recikliranim agregatom zaključeno je (Slika X.5 i Slika X.6):

- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode se smanjuju tokom 6 meseci potapanja uzoraka betona u sulfatne rastvore u odnosu na etalonske uzorake pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), bez obzira na vrstu primenjenog agregata i vrstu rastvora (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata ili 5% rastvor magnezijum sulfata) u kome su uzorci betona boravili.
- Nakon 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, koeficijenti kapilarnog upijanja betona sa rečnim i recikliranim agregatom su veći od odgovarajućih koeficijenata etalonskih uzoraka betona osim kod betona sa CEM III i w/c=0,55.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), kao i nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, veći su od odgovarajućih koeficijenata betona sa rečnim agregatom, izuzev kod uzorka betona sa w/c=0,38, koji boravili 3 meseca u rastvoru magnezijum sulfata.
- Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode kod betona sa recikliranim agregatom su uvek manje u rastvoru magnezijum sulfata u odnosu na odgovarajuće vrednosti u natrijum sulfatu za istu vrstu betona, dok kod betona sa rečnim agregatom vrednosti predmentog koeficijenta zavise od w/c i veće su u rastvoru natrijum sulfata za w/c=0,55, a u rastvoru magnezijum sulfata kada je w/c=0,38.
- Međusobnim upoređenjem vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa krupnim recikliranim agregatom, nakon 3 i 6 meseci potapanja u sulfatne

rastvore, uočeno je da se koeficijenti kapilarnog upijanja vode povećavaju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rasvorima (7 od 8 analiziranih kombinacija), što je suprotno od zaključka izvedenog za beton sa rečnim agregatom.

- Na osnovu analize može se reći da dominantni uticaj na vrednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode ima vrsta agregata.

### **Konačna vrednost kapilarnog upijanja vode**

U analizi rezultata korišćene su vrednosti kapilarnog upijanja vode koje su dobijene nakon 97 sati testiranja uzoraka. Ove vrednosti su proglašene za "konačne", jer su razlike u promeni mase uzoraka između dva uzastopna merenja postale minorne. Na osnovu analiza sprovednih upoglavlju "Analiza i diskusija rezultata" izvučeni su sledeći zaključci:

#### **Rečni agregat**

- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim agregatom se smanjuju tokom posmatranog vremenskog perioda (6 meseci) u odnosu na etalonske uzorake pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), bez obzira na vrstu rastvora (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata ili 5% rastvor magnezijum sulfata) u kome su boravili (Slika X.7).
- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode zavise od vrste cementa i vodocementnog odnosa i veći su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I, kao i kod betona sa  $w/c=0,55$  u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$  (Slika X.7). Ova zakonitost je uočena i kod etalonskih uzoraka i kod uzoraka koji su 3 i 6 meseci boravili u sulfatnim rastvorima, s napomenom da, kod uzoraka koji su izlagani sulfatnim rastvorima, uočena zakonitost važi u okviru istog sulfatnog rastvora, a jedina razlika je uočena kod betona sa CEM III i  $w/c=0,55$  nakon 6 meseci izlaganja rastvoru magnezijum sulfata (Slika X.7).
- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betona, koji su 3 meseca bili potopljeni u sulfatne rastvore, su takve da se ne može jasno sagledati uticaj analiziranih parametara na njihovu vrednost u odnosu na vrednosti odgovarajućih etalonskih uzoraka, dok su konačne vrednosti kapilarnog upijanja betona nakon 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, veće od odgovarajućih vrednosti etalonskih uzoraka, osim kod betona sa CEM III i  $w/c=0,55$  (Slika X.7).
- Međusobnim upoređenjem konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona nakon 3 i 6 meseci potapanja uočeno je da se predmetne vrednosti smanjuju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rasvorima (6 od 8 analiziranih kombinacija) (Slika X.7).
- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode kod betona sa rečnim agregatom zavise i od vrste sulfatnog rastvora, i veće su u rastvoru natrijum sulfata, osim kod betona sa CEM I i  $w/c=0,38$  (Slika X.7).

	CEM I				CEM III			
	0,55		0,38		0,55		0,38	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
0 meseci	0,653	0,653	0,193	0,193	0,760	0,760	0,367	0,367
3 meseca	0,129	0,106	0,067	0,088	0,230	0,170	0,118	0,102
6 meseci	0,130	0,072	0,036	0,068	0,135	0,065	0,104	0,104

Slika X.7 - Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa rečnim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

### Reciklirani agregat:

- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom se smanjuju tokom posmatranog vremenskog perioda (6 meseci) u odnosu na etalonske uzorake pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), bez obzira na vrstu rastvora (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata ili 5% rastvor magnezijum sulfata) u kome su boravili (Slika X.8).
- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode zavise od vrste cementa i veći su kod betona sa CEM III u odnosu na betone sa CEM I, u slučaju etalonskih uzoraka i u slučaju uzoraka koji su 3 meseca boravili u istoj vrsti sulfatnog rastvora (Slika X.8). Nakon 6 meseci uticaj vrste sulfatnog rastvora postaje dominantan u odnosu na uticaj vrste cementa, tako da su, u 5% rastvoru natrijum sulfata, dobijeni veći kefcijenti kapilarnog upijanja betona sa CEM I.
- Uticaj vodocementnog faktora na konačnu vrednost kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom je isti i ne zavisi od dužine vremena izlaganja sulfatnim rastvorima. Kod betona sa  $w/c=0,55$  dobijene su veće vrednosti upijanja vode u odnosu na betone sa  $w/c=0,38$ , u okviru istog sulfatnog rastvora (Slika X.8).
- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betona koji su 3 meseca bili potopljeni u sulfatne rastvore prvenstveno zavise od vrste cementa. U betonima sa CEM I konačne vrednosti kapilarnog upijanja zavise od vodocementnog odnosa i za  $w/c=0,38$  su manje, a za  $w/c=0,55$  su veće od odgovarajućih vrednosti etalonskih uzoraka. U betonima sa CEM III konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode dominantno zavise od vrste rastvora i veće su u 5% rastvoru natrijum sulfata, a manje su u 5% rastvoru magnezijum sulfata od odgovarajućih vrednosti etalonskih uzoraka. Nakon 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, konačne vrednosti kapilarnog upijanja su veće od odgovarajućih vrednosti etalonskih uzoraka betona osim kod betona sa CEM III i  $w/c=0,55$  (Slika X.8).
- Međusobnim upoređenjem konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona nakon 3 i 6 meseci potapanja uočeno je da se vrednosti upijanja vode

povećavaju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rasvorima (7 od 8 analiziranih kombinacija) (Slika X.8).

- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom su uvek manje u rastvoru magnezijum sulfata u odnosu na odgovarajuće vrednosti u natrijum sulfatu za istu vrstu betona (isti cement i isti w/c) i u oba analizirana perioda izlaganja delovanju sulfatnih rastvora (Slika X.8).

	CEM I				CEM III			
	0,55		0,38		0,55		0,38	
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
0 meseci	0,668	0,668	0,415	0,415	1,037	1,037	0,468	0,468
3 meseca	0,188	0,114	0,074	0,041	0,394	0,275	0,142	0,095
6 meseci	0,424	0,301	0,212	0,120	0,296	0,284	0,161	0,151

Slika X.8 - Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od analiziranih parametara

### Komparativna analiza

Upoređenjem konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode betona koji su spravljani sa krupnim rečnim agregatom i betona spravljenim sa krupnim recikliranim agregatom zaključeno je (Slika X.7 i Slika X.8):

- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode pre potapanja u sulfatne rastvore, zavise od vrste agregata i veće su u betonima sa recikliranim agregatom. U okviru betona sa istom vrstom agregata konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode zavise od vrste cementa i veće su u betonima sa CEM III.
- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode se smanjuju tokom 6 meseci potapanja uzoraka betona u sulfatne rastvore u odnosu na etalonske uzorake pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), bez obzira na vrstu primenjenog agregata i vrstu rastvora (krečna voda, 5% rastvor natrijum sulfata ili 5% rastvor magnezijum sulfata) u kome su uzorci betona boravili.
- Nakon 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betona sa rečnim i recikliranim agregatom su veći od odgovarajućih vrednosti etalonskih uzoraka betona osim kod betona sa CEM III i w/c=0,55.
- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa recikliranim agregatom pre početka potapanja u sulfatne rastvore (0 meseci), kao i nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rasvorima, veće su od odgovarajućih vrednosti betona sa rečnim agregatom, izuzev kod uzorka betona sa w/c=0,38, koji boravili 3 meseca u rastvoru magnezijum sulfata.

- Konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode betona sa recikliranim agregatom i sa rečnim agregatom su manje u rastvoru magnezijum sulfata u odnosu na odgovarajuće vrednosti u natrijum sulfatu, u okviru iste vrste betona i za oba analizirana perioda izlaganja delovanju sulfatnih rastvora. Od ovog zaključka odstupa samo beton sa CEM I,  $w/c=0,38$  i rečnim agregatom, kod koga su dobijene veće konačne vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 3 i 6 meseci boravka u rastvoru magnezijum sulfata.
- Međusobnim upoređenjem konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode uzoraka betona sa krupnim recikliranim agregatom, nakon 3 i 6 meseci potapanja u sulfatne rastvore, uočeno je da se predmetne vrednosti povećavaju sa povećanjem dužine boravka u sulfatnim rastvorima (7 od 8 analiziranih kombinacija), što je suprotno od zaključka izvedenog za betone sa rečnim agregatom.
- Na osnovu analize može se reći da dominantni uticaj na vrednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode ima vrsta agregata.

Upoređenjem zaključaka koji su dobijeni analizom vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode sa zaključcima dobijenim analizom konačnih vrednosti kapilarnog upijanja vode ispitivanih vrsta betona, konstatovano je da su razlike u zaključcima minimalne.

*Oba parametra, koeficijent kapilarnog upijanja vode i konačna vrednost kapilarnog upijanja vode, se mogu ravnopravno, po sopstvenom izboru, koristiti za analizu kapilarnog upijanja vode. Izvesna prednost se daje koeficijentu kapilarnog upijanja vode, jer je i u odgovarajućim standardima propisan postupak za njegovo određivanje i mogu se pronaći rezultati istraživanja drugih autora.*

## 5. POROZNOST

Promene u strukturi pora etalona kao i uzoraka betona izloženih dejstvu sulfatnih jona su vrednovane kroz: vrednosti ukupne poroznosti, raspodelu pora, vrednosti kritičnog i "threshold" prečnika, pre svega u funkciji vrste upotrebljenog agregata (rečni agregat i reciklirani agregat od betona). Iako je prvenstveno praćen uticaj vrste agregata na prethodno pomenute vrednosti, sinergetski uticaj vrste agregata i sledećih parametara: vrste cementa, vodocementnog faktora i vremena izloženosti sulfatnim jonima (3 i 6 meseci) na strukturu pora je bio evidentan te je u tom smislu i ovde predstavljen.

### Rečni agregat

#### Ukupna poroznost

- Najveći uticaj na vrednosti ukupne poroznosti betonskih mešavina ima vodocementni faktor. Etalonski uzorci betonske mešavine sa CEM III i  $w/c=0,55$ , zbog usporenog procesa hidratacije, su imali najveće vrednosti ukupne poroznosti za sva tri posmatrana perioda (0, 3 i 6 meseci). Vrednosti poroznosti etalonskih uzoraka betonske mešavine sa CEM I  $w/c=0,38$  su se za posmatrani period od 6

meseci približile vrednostima ukupne poroznosti etalona betonske mešavine sa CEM III i  $w/c=0,55$ . Kod svih etalonskih uzoraka je zabeležen trend da se poroznost smanjila za period od 3 meseca a povećala za period od 6 meseci.

- Kod većine uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora (5% rastvor natrijum sulfata ili 5% rastvor magnezijum sulfata) u periodu od 3 i 6 meseci, ukupna poroznost je smanjenja u odnosu na etalonske uzorke iste starosti, osim u slučaju betonske mešavine sa CEM I i  $w/c=0,38$  za period od 3 meseca i mešavine sa CEM III i  $w/c=0,38$  period od 6 meseci, kada su jednake vrednostima kod odgovarajućih etalonskih uzoraka. Smanjenje ukupne poroznosti je posledica smanjenja prečnika ili zatvaranja pora u kojim dolazi do taloženja produkata reakcije sulfata sa produktima hidratacije.
- Vrednost ukupne poroznosti u zavisnosti od vrste sulfatnog rastvora ima trend opadanja za period od 3 meseca, dok za period od 6 meseci varira, kod obe vrste sulfatnog rastvora. U periodu od 3 meseca držanja u rastvoru, najveću poroznost imaju uzorci betonske mešavine sa CEM III i  $w/c=0,55$  izloženi delovanju natrijum sulfata, a najmanju uzorci sa istom vrstom cementa i u istom sulfatnom rastvoru ali manjim vodocementnim faktorom 0,38. Nakon 6 meseci se menja trend i maksimalna vrednost poroznosti je kod uzoraka sa CEM I i  $w/c=0,55$  izloženim delovanju natrijum sulfata a najmanja za uzorke sa istim cementom i u istom sulfatnom rastvoru ali sa  $w/c=0,38$ . Ovaj podatak upućuje na činjenicu da je do 3 meseca najveći značaj imala propusnost sistema pora, a sa produženjem držanja uzoraka u rastvoru postaje važnije koja vrsta cementa je u pitanju.

### Raspodela pora po veličini

- Najveći uticaj na raspodelu veličina pora etalonskih uzoraka ima vodocementni faktor i vrsta cementa, potom vreme držanja u zasićenom krečnom rastvoru.
- Veći vodocementni faktor dovodi do stvaranja "spoljašnjih produkata" hidratacije koji sa sobom uvode kapilarnu poroznost. Zato se kod etalonskih uzoraka betona sa CEM I i  $w/c=0,55$ , javljaju posebno male i srednje kapilarne pore. Njihov sadržaj se povećava za uzorke potopljene 6 meseci u krečni rastvor. Kod etalonskih uzoraka betona sa CEM I i  $w/c=0,38$ , sadržaj gore pomenutih pora se smanjuje odnosno nestaje jer se stvaraju produkti hidratacije veće gustine. Otuda rezultati živine porozimetrije pokazuje veoma malu količinu malih i srednjih kapilarnih pora kod ovih etalona nakon 3meseca. Ako uporedimo rezultate raspodele pora nakon 3 i 6 meseci, kod ove betonske mešavine, možemo zaključiti da je nakon 6 meseci udeo malih i srednjih kapilara skoro na istom nivou kao kod uzorka starosti 3 meseca, što nas upućuje na zaključak da je process hidratacije kod ove betonske mešavine skoro završen nakon 3 meseca. Etalonski uzorci betonskih mešavina sa CEM III i oba vodocementna faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) zbog usporenog procesa hidratacije imaju veću količinu kapilarnih pora u odnosu na etalonske uzorke betonskih mešavina sa CEM I i oba vodocementna faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ).

- Raspodela pora uzoraka betonske mešavine sa CEM I i  $w/c=0,55$  potopljenih u sulfatne rastvore, ukazuje da nakon 3 meseca izlaganja 5% rastvoru natrijum sulfata, u kapilarnim porama dolazi do taloženja produkata nastalih usled reakcije sa sulfatnim jonima jer je manje pora svih veličina u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke a dominantne su one pore veličine do  $0,05\mu\text{m}$ , dok uzorci potopljene u 5% rastvor magnezijum sulfata pokazuju manje pora veličine do  $1\mu\text{m}$  a dominantne su krupne pore veličine  $1-10\mu\text{m}$ . Nakon 6 meseci, kod uzoraka potopljenih u 5% rastvor natrijum sulfata nestaju pore veće od  $10\mu\text{m}$  a kod uzoraka potopljenih u 5% rastvor magnezijum sulfata veće od  $1\mu\text{m}$ .
- Raspodela pora kod uzoraka betonske mešavine sa CEM I i  $w/c=0,38$  potopljenih 3 i 6 meseci u oba sulfatna rastvora karakterišu samo pore u intervalu  $1-10\mu\text{m}$ .
- Analiza kod uzoraka betona sa CEM III i  $w/c=0,55$  nakon 3 i 6 meseci izlaganja sulfatnim rastvorima pokazuje da se udeo pora veličine  $0,01-1\mu\text{m}$  smanjuje ili skoro nestaje u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke a povećava udeo pora u intervalu  $1-10\mu\text{m}$ .
- Efikasnost produkata reakcije sa sulfatima u pogledu smanjenja udela pora je najveća za pore u intervalu prečnika  $0,01-1\mu\text{m}$  za sve uzorke.
- Uzorci iz betonske mešavine sa CEM III i  $w/c=0,38$  nakon 3 meseca u sulfatnom rastvoru gube pore manje od  $1\mu\text{m}$  a povećavaju pore veličine  $1-10\mu\text{m}$ . Na 6 meseci pojavljuju se pore veličine  $0,01-1\mu\text{m}$ , a nestaju veće od  $1\mu\text{m}$  u slučaju rastvora natrijum sulfata ili veće od  $10\mu\text{m}$  kod magnezijum sulfata.

### **Raspodela vrednosti kritičnih prečnika po veličini**

- Raspodela veličina kritičnih prečnika pora pokazuje bimodalni raspored pora kod uzoraka svih starosti. Oštro definisan početni pik se nalazi u oblasti prečnika pora čije vrednosti se kreću u granicama  $2-5\mu\text{m}$  što odgovara velikim kapilarama dok je drugi pik pomeren ka manjim vrednostima i odgovara prečnicima pora u oblasti  $0,01-0,09\mu\text{m}$ .
- Vrednosti kritičnog prečnika se smanjuju na 3 meseca potom na 6 meseci donekle stabilizuju pri čemu se u nekim slučajevima javlja i drugi pik u oblasti velikih pora.

### **Raspodela veličina prečnika pora koje odgovaraju "threshold" vrednosti**

- Vrednosti prečnika pora koje odgovaraju "threshold" vrednosti nisu u slaganju sa očekivanjima da postanu manje tokom vremena negovanja uzoraka i smanjenjem vodocementnog faktora. Za većinu uzorake napravljenih sa rečnim agregatom bez obzira da li su etaloni ili su bili izloženi delovanju sulfata vrednosti "threshold"-a su maksimalne nakon 3 meseca a potom se smanjuju na 6 meseci. Ima nekoliko izuzetaka koji imaju maksimalne vrednosti "threshold"-a za posmatrani period od 6 meseci.

## Reciklirani agregat

### Ukupna poroznost

- Kao i kod rečnog agregata i ovde najveći uticaj na vrednosti ukupne poroznosti etalonskih uzoraka betonskih mešavina ima vodocementni faktor. Betonska mešavina sa većim vodocementnim faktorom je imala veću poroznost. Etalonski uzorci betonske mešavine napravljene sa CEM III i  $w/c=0,55$ , zbog usporenog procesa hidratacije, imaju veće vrednosti ukupne poroznosti za sva tri posmatrana perioda (0, 3 i 6 meseci) u odnosu na vrednosti kod etalonskih uzoraka betona sa CEM I i  $w/c=0,55$ , ali razlike nisu značajne. Specifičnosti tranzitne zone su najviše došle do izražaja upravo kod ovih mešavina. Struktura formirana u procesu hidratacije je imala dovoljnu kompaktnost već kod uzoraka na početku ispitivanja (oznaka 0). Nakon 3 i 6 meseci se malo menjala. Kod svih etalonskih uzoraka je zabeležen sledeći trend: poroznost se smanjuje nakon 3 meseca hidratacije a povećava nakon 6 meseci.
- Kod svih uzoraka izloženih delovanju oba sulfatna rastvora dolazi do smanjenja ukupne poroznosti za posmatrani period od 3 meseca, a kod većine do povećanja za period od 6 meseci i vrednosti ne prelaze vrednosti koje odgovaraju etalonskim uzorcima.

### Raspodela pora po veličini prečnika pora

- Na raspodelu pora po veličini prečnika u najvećoj meri je uticao vodocementni faktor i vrsta cementa. Raspodela pora je bimodalna i obuhvata uglavnom pore u opsegu do  $0,05\mu\text{m}$ , kao i u intervalu  $1-10\mu\text{m}$  za sve etalonske uzorke i za oba posmatrana perioda (3 i 6 meseci). Udeo kapilarnih pora u opsegu do  $0,05\mu\text{m}$  za etalonske uzorke betonske mešavine sa CEM III i  $w/c=0,55$  nije veći od udela pora u istom opsegu za etalonske uzorke betonske mešavine sa CEM I i  $w/c=0,55$ . Smanjenje udela ovih pora je najverovatnije posledica smanjenja odnosa hidratiranih produkata zgre i Portland cementa, kao i smanjene poroznosti tranzitne zone.
- Etalonski uzorci betonskih mešavina sa obe vrste cementa i  $w/c=0,38$  imaju manji udeo kapilarnih pora prečnika do vrednosti  $0,05\mu\text{m}$  i nešto veći udeo pora većih od  $1\mu\text{m}$  u odnosu na raspodelu pora etalonskih uzoraka betonskih mešavina sa  $w/c=0,55$ .
- Raspodela pora uzoraka betonskih mešavina sa CEM I i  $w/c=0,55$  i CEM III i  $w/c=0,55$  potopljenih u oba sulfatna rastvora, ukazuje na povećanje udela pora za 3 meseca izlaganja dejstvu sulfata u opsegu do  $0,01\mu\text{m}$ .
- Betonska mešavina sa CEM I i  $w/c=0,55$  nakon 3 meseca izlaganja sulfatnim rastvorima, najveće promene ima u udelu pora ima u intervalu  $0,01-0,05\mu\text{m}$  gde se njihov udeo u odnosu na etalonske uzorke iste starosti smanjuje ili gotovo nestaje kao i u intervalu  $1-10\mu\text{m}$  dolazi do velikog povećanja udela kod uzoraka izloženih delovanju magnezijum sulfata. Nakon 6 meseci u sulfatnim rastvorima dominantne



su one pore u intervalu 1-10 $\mu$ m. Povećanje pora u ovom interval može da uputi na pojavu pukotina, što se može videti i na SEM-u.

- Kod svih uzoraka iz betonske mešavine sa CEM I i  $w/c=0,38$  nakon 3 meseca držanja u rastvorima, gotovo jedino postojeće pore su one veličine 1-10 $\mu$ m. Nakon 6 meseci izlaganja uzoraka delovanju sulfatnih rastvora nestaju pore manje od 1 $\mu$ m dok raste udeo pora veličine 1-10 $\mu$ m koje postaju dominantne.
- Uzorci sa CEM III i  $w/c=0,55$  nakon 3 meseca delovanja rastvora  $Na_2SO_4$  obuhvataju jedino pore manje od 0,05 $\mu$ m dok se kod  $MgSO_4$  povećava udeo pora manjih od 0,01 $\mu$ m koje postaju dominantne zajedno sa onim u intervalu 1-10 $\mu$ m. Nakon 6 meseci u  $Na_2SO_4$  dominantne pore su one manje od 0,01 $\mu$ m i veličine 1-10 $\mu$ m.
- U slučaju uzoraka sa CEM III i  $w/c=0,38$  nakon 3 meseca u sulfatnim rastvorima nema značajnih promena u odnosu na etalonske uzorke. Nakon 6 meseci nestaju sve pore a pojavljuju se jedino one veće od 1 $\mu$ m.

### **Raspodela vrednosti kritičnih prečnika po veličini**

- Kada se pogledaju vrednosti kritičnog prečnika oštro definisan početni pik se nalazi u oblasti prečnika pora čije se vrednosti kreću u granicama 2-12 $\mu$ m što odgovara velikim kapilarama dok je drugi pik pomeren ka manjim vrednostima i odgovara prečnicima pora u oblasti 0,01-0,09 $\mu$ m. Vrednosti kritičnog prečnika se na 3 meseca smanjuju u oblasti malih kapilara uz pojavu drugog pika u oblasti velikih pora a potom na 6 meseci stabilizuju.

### **Raspodela veličina prečnika pora koje odgovaraju "threshold" vrednosti**

- Za sve uzorke napravljene sa recikliranim agregatom, vrednosti "threshold"-a rastu tokom vremena i dostižu maksimum na 6 meseci.

### **Komparativna analiza**

#### **Ukupna poroznost**

Poređenje vrednosti ukupne poroznosti uzoraka betonskih mešavina na bazi rečnog i recikliranog agregata zaključujemo da:

- Etalonski uzorci betonskih mešavina sa rečnim agregatom imaju veću poroznost u odnosu na odgovarajuće uzorke betonskih mešavina sa recikliranim agregatom, bez obzira na vrstu cementa (CEM I i CEM III), vrednost vodocementnog faktora ( $w/c=0,55$  i  $w/c=0,38$ ) kao i posmatrani period (0, 3 i 6 meseci).
- Betonske mešavine na bazi rečnog agregata i na bazi recikliranog agregata, bez obzira na vrstu cementa (CEM I i CEM III) i vrednost vodocementnog faktora ( $w/s=0,55$  i  $w/s=0,38$ ), nakon izlaganja dejstvu sulfatnih rastvora u trajanju od 3 i 6 meseci, imaju manju ili jednaku ukupnu poroznost u odnosu na odgovarajuće etalonske uzorke.
- Upoređenjem vrednosti ukupnih poroznosti nakon 3 i 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima, zaključeno je da se poroznost povećava, ali, uglavnom ne prelazi

vrednosti ukupne poroznosti etalonskih uzoraka. Ovaj podatak ukazuje da do 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima preovladava taloženje produkata sulfatne korozije u slobodnom porom prostoru, a u periodu od 3 do 6 meseci dolazi do razlaganja ili do širenja produkata hemijskih reakcija koji dovode do ukрупnjavanja pora.

### Raspodela pora po veličini prečnika pora

- U pogledu raspodele pora uzoraka betonskih mešavina izloženih 3 meseca dejstvu 5% rastvora natrijum sulfata, najveće promene se zapažaju na uzorcima betonskih mešavina napravljenim od recikliranog agregata sa CEM I i  $w/c=0,55$ , koji imaju više pora u svim intervalima do  $1\mu\text{m}$  u odnosu na uzorke istog sastava ali sa rečnim agregatom. Povećanje udela pora u ovom intervalu može da ukaže na vezivanje sulfatnih jona za C-S-H gel u uslovima ograničenog, malog prostora koji je limitiran veličinom gelskih pora. Nedovoljan prostor za smeštaj nastalih produkata u gelskim porama dovodi do njihovog ukрупnjavanja i porasta udela pora u intervalu do  $0,05\mu\text{m}$ .
- Nakon 6 meseci kod uzoraka sa recikliranim agregatom se javljaju samo pore veće od  $1\mu\text{m}$ . Ovaj podatak ukazuje da su kristalizacioni pritisci, koji se razvijaju u ovim porama, narasli do nivoa da dolazi do ukрупnjavanja pora. Ovaj trend se ne odnosi na betonsku mešavinu sa CEM III i  $w/s=0,55$ .
- Slični odnosi važe i za uzorke izložene dejstvu 5%  $\text{MgSO}_4$ .

## 6. XRD-EDS-FTIR

Rendgenostruktorna analiza (XRD) je rađena na uzorcima betona koji su spravljani sa cementom CEM I,  $w/c=0,55$  i obe vrste krupnog agregata (rečnim agregatom i recikliranim agregatom) i ukazuje na nekoliko bitnih promena u faznom sastavu uzoraka betonskih mešavina nakon 6 meseci boravka u zasićenom krečnom rastvoru, 5% rastvoru natrijum sulfata i 5% rastvoru magnezijum sulfata. Identifikovano je da:

- Potrošnja portlandita u uzorcima betona sa rečnim agregatom raste prema redosledu: etalonski uzorci  $\rightarrow$  uzorci u 5%  $\text{MgSO}_4$   $\rightarrow$  uzorci u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , dok kod betona sa recikliranim agregatom raste po redosledu: etalonski uzorci  $\rightarrow$  uzorci u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $\rightarrow$  uzorci u 5%  $\text{MgSO}_4$ . Najveća količina portlandita je registrovana kod etalonskih uzoraka. Potrošnja portlandita se ne može vezati samo za reakcije sa sulfatnim jonima, s obzirom da je na osnovu rendgenostrukturne analize registrovan i proces karbonizacije. Proces karbonizacije i nastanak kalcita je prisutan kod svih uzoraka.
- Prisustvo etringita i gipsa ukazuje na napredovanje reakcije između produkata hidratacije cemenata i sulfatnih jona. Relativni intenziteti pika etringita rastu prema sledećem redosledu: etalonski uzorci  $\rightarrow$  uzorci u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$   $\rightarrow$  uzorci u 5%  $\text{MgSO}_4$ , bez obzira na vrstu upotrebljenog agregata, a prisustvo kalcijum monosulfata i kalcijum monokarbonata ukazuje da postoje preduslovi za dalju reakciju sa

sulfatnim jonima i nastanak novog etringita. Kada je u pitanju gips, najviši pik je uočen kod uzoraka betona sa rečnim agregatom potopljenih u 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Nastanak gipsa podrazumeva da se u analiziranim uzorcima koncentracija reaktivnog aluminijuma spustila na minimum, a koncentracija sulfata značajno porasla.

- Prisustvo brucita u uzorcima potopljenim u 5%  $\text{MgSO}_4$  ukazuje na određeno usporavanje reakcije sulfata sa produktima hidratacije. Mineralna faza M-S-H nije identifikovana.

Najznačajniji doprinos **FTIR** analize uzoraka betona koji su spravljani sa cementom CEM I,  $w/c=0,55$  i obe vrste krupnog agregata (rečnim agregatom i recikliranim agregatom) nakon 6 meseci boravka u zasićenom krečnom rastvoru, 5% rastvoru natrijum sulfata i 5% rastvoru magnezijum sulfata je:

- $\nu_3$  asimetrične vibracije pri istezanju Si-O-Si veza  $Q_2$  tetraedra, centrirane na  $1000\text{cm}^{-1}$  pokazuju da su talasni brojevi absorpcionih traka, koje su uobičajene za asimetrično istezanje veza u C-S-H gelu, smanjeni, što je mnogo naglašenije u slučaju uzoraka izloženih delovanju sulfatnih rastvora u poređenju sa etalonskim uzorcima i ukazuju na promenu odnosa Ca/Si u C-S-H gelu.
- Dekonvolucija prethodno pomenutog absorpcionog pika unutar opsega talasnih brojeva  $1200\text{-}850\text{cm}^{-1}$  i fitovanje krivih, ukazuje na pomeranje absorpcionog pika na  $977\text{cm}^{-1}$  za etalonske uzorke sa rečnim agregatom i  $991\text{cm}^{-1}$  za etalonske uzorke sa recikliranim agregatom, u odnosu na vrednost  $969\text{cm}^{-1}$  kod paste CEM I. Ovo pomeranje ukazuje na pojavu dekalifikacije i polimerizacije C-S-H gela.
- Intenzitet absorpcionog pika na  $991\text{cm}^{-1}$  za etalonske uzorke betona sa recikliranim agregatom, je viši nego intenzitet pika centriranog na  $977\text{cm}^{-1}$  kod odgovarajućeg betona sa rečnim agregatom, što ukazuje na veću količinu C-S-H gela u betonu sa recikliranim agregatom, nego u betonu sa rečnim agregatom.
- Upoređenjem talasnih brojeva absorpcionih traka etalonskog uzorka betona sa rečnim agregatom ( $977\text{cm}^{-1}$ ) i uzorka od istog betona izloženog dejstvu 5% rastvora magnezijum sulfata ( $979\text{cm}^{-1}$ ), uočen je viši nivo dekalifikacije kod betona izloženog delovanju 5% rastvora magnezijum sulfata, dok u slučaju uzorka iste betonske mešavine izloženog dejstvu 5% rastvora natrijum sulfata pik je pomeren ka manjim vrednostima talasne dužine ( $973\text{cm}^{-1}$ ) i ukazuje na rekalkifikaciju silikatnog lanca. Kod uzoraka betona sa recikliranim agregatom, koji su bili izloženi dejstvu 5% rastvora natrijum sulfata i dejstvu 5% rastvora magnezijum sulfata, uočeno je pomeranje absorpcionog pika ka manjoj vrednosti talasnog broja ( $967\text{cm}^{-1}$ ) u odnosu na vrednost odgovarajućeg etalona ( $991\text{cm}^{-1}$ ), što ukazuje na pojavu rekalkifikacije. Pojava rekalkifikacije ukazuje na karbonizaciju C-S-H gela, što je dodatno doprinelo degradaciji strukture materijala.

Na osnovu analize rezultata dobijenih pomoću **EDS** izvedeni su niže navedeni najvažniji zaključci. Prvi od navedenih zaključaka je opšteg karaktera, a ostali se odnose na analizu betona spravljanih sa cementom CEM I,  $w/c=0,55$  i obe vrste krupnog agregata (rečnim

agregatom i recikliranim agregatom) koji su izloženi delovanju sulfatnih rasvora u periodu od 6 meseci.

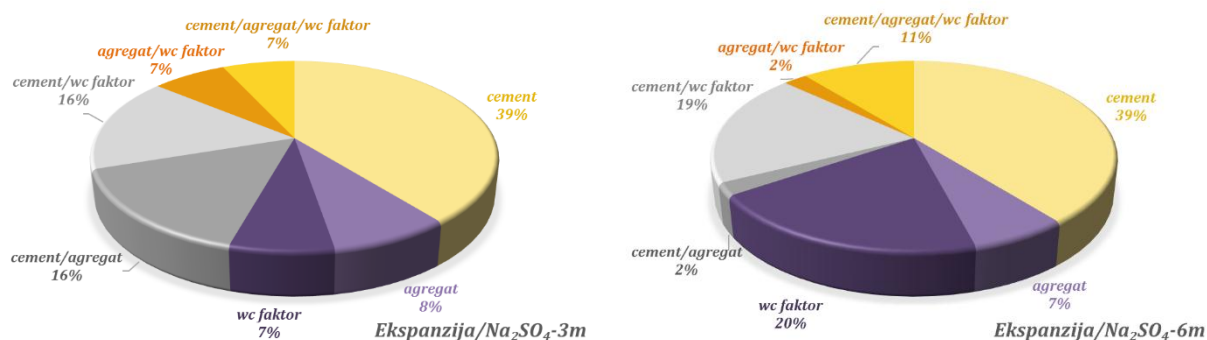
- Promene u mikrostrukтури koje se javljaju nakon izlaganja uzoraka delovanju sulfatnih rastvora su povezane sa smanjenjem čvrstoće pri pritisku i ekspanzijom. Promena čvrstoće pri pritisku pokazuje da je nakon početnog povećanja vrednosti, došlo do smanjenja, kod većine betonskih mešavina. Pretpostavlja se da je početni rast u čvrstoći pri pritisku (do 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima) povezan sa procesom hidratacije i taloženjem kristala etringita u krupnim porama u uzorcima sa CEM I, kao i nastankom hidrotalcita u uzorcima sa CEM III kada dolazi do popunjavanja pora. Nakon tog perioda dolazi do smanjenja čvrstoće pri pritisku, što je verovatno povezano sa ekspanzijom uzrokovanom fizičko-hemijskim procesima koji se dešavaju u uzorcima izloženim delovanju sulfatne korozije.
- EDS analizom je određena dubina dekalifikacije od 2mm u odnosu na površinu uzorka. Na osnovu analize rezultata utvrđeno je da dekalifikacija zavisi od vrste sulfatnog jona i vrste agregata. Beton sa rečnim agregatom je osetljiviji na rastvor natrijum sulfata, dok je beton sa recikliranim agregatom osetljiviji na delovanje rastvora magnezijum sulfata.
- Superzasićenje i ograničenje rasta kristala su dva preduslova neophodna za razvoj kristalnog pritiska. Beton sa recikliranim agregatom, koji je izložen delovanju rastvora natrijum sulfata, zadovoljava oba ova uslova. Naime, odnos S/Ca je bio najviši i uočeno je formiranje fine mešavine C-S-H gela, etringita, gipsa i AFm faze. Ovo ukazuje da su preduslovi za razvoj kristalizacionog pritiska prisutni u velikoj meri i da je ekspanzija u ovom slučaju bila najveća.

## 7. FAKTORIJALNI EKSPERIMENT

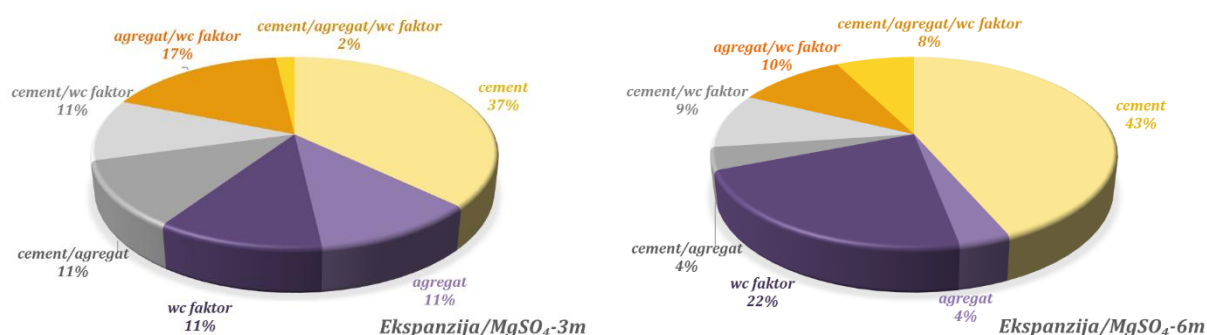
Rezultati dobijeni pomoću matematičko-statističke metode "Faktorijalni eksperiment" a koji se odnose na veličinu uticaja posmatranih parametara (vrsta cementa, vodocementni faktor i vrsta agregata), kako pojedinačno tako i njihove kombinacije, na izabrana svojstva betona (promena dužine i koeficijent kapilarnog upijanja) za uzorke izložene 3 i 6 meseci delovanju rastvora natrijum i magnezijum sulfata prikazani su u ovom delu.

### Promena dužine

Rezultati analize uticaja pomenutih parametara na promenu dužine uzoraka pomoću izabrane matematičko-statističke metode dati su na Slika X.9 za uzorke izložene delovanju rastvora natrijum sulfata u trajanju od 3 i 6 meseci i na Slika X.10 za uzorke izložene delovanju rastvora magnezijum sulfata u trajanju od 3 i 6 meseci.



Slika X.9 – Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na promenu dužine uzoraka izloženih delovanju rastvora Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> u trajanju 3 i 6 meseci

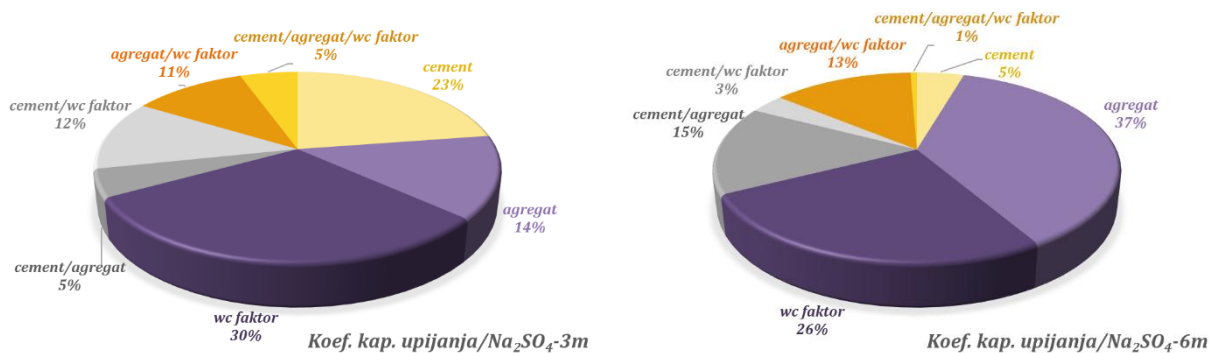


Slika X.10 - Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na promenu dužine uzoraka izloženih delovanju rastvora MgSO<sub>4</sub> u trajanju 3 i 6 meseci

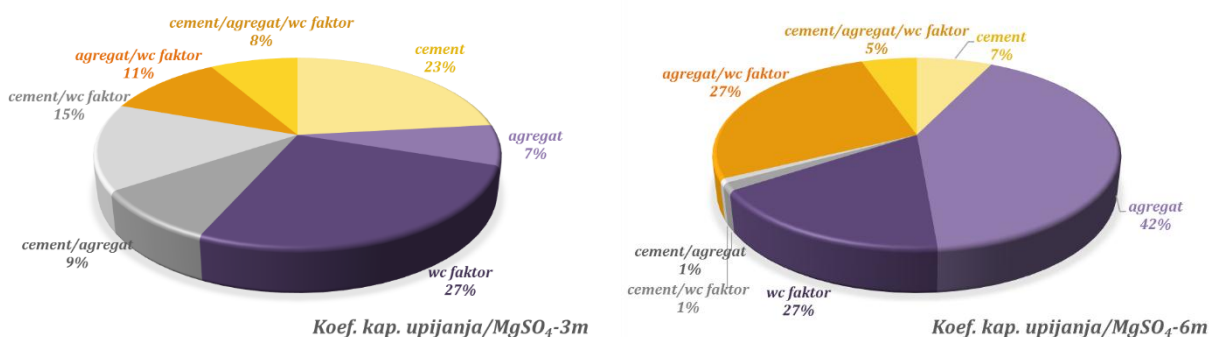
Dobijeni rezultati potvrđuju, sada matematički, već ono što je rečeno prilikom detaljne analize promene dužine o vrsti parametra koji ima dominantni uticaj na posmatrano svojstvo. Naime, ako posmatramo uticaj svakog pojedinačnog parametra, zaključuje se da nakon 3 meseca delovanja sulfatnih rastvora (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i MgSO<sub>4</sub>), dominantan uticaj na promenu dužine ima vrsta cementa, potom vrsta agregata i na kraju vodocementni faktor. Nakon 6 meseci, kod oba sulfatna rastvora, i dalje je dominantan uticaj cementa, ali potom sledi vodocementni faktor i na kraju agregat.

### Koeficijent kapilarnog upijanja vode

Rezultati analize uticaja pomenutih parametara na koeficijent kapilarnog upijanja vode uzoraka pomoću izabrane matematičko-statističke metode dati su na Slika X.11 za uzorke izložene delovanju rastvora natrijum sulfata u trajanju od 3 i 6 meseci i na Slika X.12 za uzorke izložene delovanju rastvora magnezijum sulfata u trajanju od 3 i 6 meseci.



Slika X.11 – Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na koeficijent kapilarnog upijanja vode uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  u trajanju 3 i 6 meseci



Slika X.12 - Rezultati faktorijalnog eksperimenta o uticaju posmatranih parametara na promenu dužine uzoraka izloženih delovanju rastvora  $\text{MgSO}_4$  u trajanju 3 i 6 meseci

I ovom slučaju je matematički potvrđen zaključak koji je izveden prilikom detaljne analize koeficijenta kapilarnog upijanja vode o vrsti parametra koji ima dominantni uticaj na posmatrano svojstvo. Nakon 3 meseca delovanja sulfatnih rastvora (i  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{MgSO}_4$ ) dominantan uticaj ima vrednost vodocementnog faktora, potom sledi vrsta cementa i na kraju vrsta agregata, posmatrajući pojedinačne uticaje svakog parametra. Nakon 6 meseci, kod oba sulfatna rastvora, dominantna je vrsta agregata, potom vodocementni faktor i na kraju vrsta cementa.

## 8. METODE ZA OCENU SULFATNE OTPORNOSTI BETONA

Na osnovu analize prikazane u poglavlju analiza i diskusija rezultata zaključeno je:

- Kriterijum za ocenu sulfatne otpornosti praćenjem smanjenja čvrstoće betona pri pritisku, predložen od strane Mehte i kriterijum za ocenu sulfatne otpornosti praćenjem ekspanzije uzoraka betona, koji su predložili Miller i Manson imaju isti zaključak o sulfatnoj otpornosti ispitivanih betona za period izloženosti sulfatnim rastvorima od 3 meseca, a veoma mala razlika u zaključku je primećena za period izloženosti od 6 meseci i to samo u rastvoru natrum sulfata. Uočena razlika u oceni

je prihvatljiva, s obzirom da su u pitanju nestandardizovane metode ispitivanja, bez jedinstvenih kriterijuma.

- Metoda praćenja smanjenja čvrstoće betona pri pritisku sa kriterijumom koji je predložio Mehta i metoda praćenja ekspanzije uzoraka betona sa kriterijumom koji su predložili Miller i Manson, mogu se ravnopravno koristiti za ocenu sulfatne otpornosti betona, ali se prednost daje metodi praćenja ekspanzije, zato što je nedestruktivna, ekspanzija se meri na istim uzorcima tokom trajanja eksperimenta, pa je potreban značajno manji broj uzoraka, jer etalonski uzorci nisu potrebni. Indirektno, navedene prednosti povlače za sobom i druge, kao što su manji prostor za organizaciju eksperimenta, niža cena itd.
- Određivanje sulfatne otpornosti preko parametara kapilarnog upijanja, kao što su koeficijent kapilarnog upijanja i ukupno kapilarno upijanje vode, je prema rezultatima ovog istraživanja i komplikovanije i nepouzadnije od prethodno spomenute dve metode, pa se ne preporučuje za praćenje sulfatne otpornosti betona.

Na osnovu detaljno urađene analize očigledno je da su betoni sa recikliranim agregatom od betona osetljiviji na delovanje sulfatne korozije nego betoni sa rečnim agregatom, ali da se zadovoljavajuća sulfatna otpornost betona sa recikliranim agregatom može postići uz upotrebu recikliranog agregata koji zadovoljava kriterijume date u EN 206 i ukoliko je odgovarajuća vrsta cementa upotrebljena (npr. CEM III LH/SR). Takođe, zadovoljavajuća sulfatna otpornost betona sa recikliranim agregatom, u posmatranom periodu, može se dobiti i upotrebom cementa CEM I ali samo ako je upotrebljen nizak vodocementni faktor ( $\leq 0.4$ ).

## 9. PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

U okviru terorijsko-istraživačkog dela je naglašeno da je pronađen relativno mali broj naučnih radova u kojima je istraživana sulfatna otpornost betona, a među njima je u samo nekoliko radova proučavana sulfatna otpornost betona sa recikliranim agregatom. U evropskim normama EN 206 je preporučeno da se reciklirani agregat ne koristi za izradu betona koji će biti izloženi hemijskoj agresiji. Međutim, ovim istraživanjem je dokazano da betoni sa recikliranim agregatom mogu ispuniti i zahteve koji se odnose na trajnost betona u hemijski agresivnim sredinama, kada je u pitanju agresivno dejstvo sulfata. Time je otvoreno jedno "novo polje" istraživanja u oblasti trajnosti betona. Oslanjajući se na rezultate istraživanja sulfatne otpornosti betona sa recikliranim agregatom koji su dobijeni u ovoj disertaciji, pravci daljih istraživanja bi bili:

Da se ispitivanje sulfatne otpornosti istraživanih vrsta betona produži na nekoliko godina (do dostizanja kritičnih vrednosti kod svih ispitivanih vrsta betona) kako bi se, uz pomoć posebnih programa za analizu eksperimentalnih rezultata, dobila prognoza sulfatne otpornosti betona u realnim uslovima (na realnim konstrukcijama i sulfatnim rastvorima).

Da se u betonima sa recikliranim agregatom umesto cementa CEM I i CEM III kao vezivo upotrebi kombinacija CEM I i većih količina letećeg pepela (>50%) i ispita njihova sulfatna otpornost. Ukoliko bi se dobili sulfatno otporni betoni, to bi bio veliki doprinos u oblasti održivog građevinarstva i zaštite životne sredine.

Da se umesto potpunog potapanja uzoraka u sulfatne rastvore koristi režim delimičnog potapanja uzoraka ili naizmeničnog sušenja i vlaženja, što je bliže realnim uslovima, ali i komplikovanije za analizu, jer se pored hemijske korozije (sulfatna korozija) javlja i fizička korozija (kristalizacija soli).

Da se obuhvate uticaji različitih jona koji mogu biti prisutni u strukturi recikliranog agregata zbog njegove izloženosti različitim uticajima, u pogledu dejstva sulfatnih jona. U tom pogledu bi bilo interesantno utvrditi kako prisustvo karbonatnih ili sulfatnih jona utiče na trajnost betona napravljenog sa recikliranim agregatom, u pogledu otpornosti na sulfatne jone.



# LITERATURA



**LITERATURA**

- [1] Chabrelie A. Mechanisms of degradation of concrete by external sulfate ions under laboratory and field conditions. PhD thesis;2010
- [2] Metha P. K, Gerwick Jr B. C. Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment. *Concrete International*. 1982; v. 10: 45-51
- [3] ACI Committee 201, 2000. Guide to durable concrete (ACI 201.2R-01). American Concrete Institute, Farmington Hills
- [4] Mehta K, Monteiro P. *Concrete, Microstructure, Properties and Materials*. Third Edition. McGraw-Hill.2006
- [5] John B. Stephens and Ramón L. Carrasquillo. Evaluating performance-based test and specifications for sulfate resistance in concrete. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin; Report No. 0- 1706-3. 2000
- [6] Bai J. Durability of sustainable concrete materials. UK
- [7] Skalny J, Marchand J, Odler I. *Sulfate Attack on Concrete*. Taylor and Francis, 2003
- [8] Bellmann F, Möser B, Stark J. Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen. *CemConcr Res* 2006;36:358 – 63
- [9] Neville M. A. *Properties of concrete*. Fourth and Final Edition. Edinburg Gate. England. 2004
- [10] Soutsos M. *Concrete durability. A practical guide to the design of durable concrete structures*. Thomas Telford. UK. 2010
- [11] Aligizaki K. K. pore Structure of Cement-Based Materials. Testing, interpretation and requirements. Taylor & Francis. London. 2006
- [12] Stutzman P. Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. *Cement & Concrete Composites* 2004; 26: 957–966
- [13] Mitić H. Diplomski rad. Utjecaj polimera na hidrataciju aluminatnog cementa. Zagreb. 2012
- [14] Winslow N. D, Diamond S. A mercury porosimetry study of the evolution of porosity in portland cement. 1969
- [15] Cook A. R, Hover C. K. Mercury porosimetry of hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research* 1999; 29: 933-943
- [16] Newman J, Choo S. B. *Advanced Concrete Technology. Constituent Materials*. Oxford. 2003
- [17] Ye G. Experimental Study and Numerical Simulation of the Development of the Microstructure and Permeability of Cementitious Materials. Master Thesis. China 2003
- [18] Stark J, Bollmann K. Delayed Ettringite Formation in Concrete. Bauhaus-University Weimar / Germany
- [19] Tam W. Y. V, Gaob F. X, Tam M. C, Ng M. K. Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 163: 823–828
- [20] Bonen D. A microstructural study of the effect produced by magnesium sulfate on plain and silica fume-bearing portland cement mortars. *Cement and Concrete Research* 1993; 23: 541-553
- [21] Bonen D, Cohen D. Menashi. Magnesium sulphate attack on Portland cement paste – I. Microstructural analysis. *Cement and Concrete Research* 1992; 22: 169-180
- [22] Lothenbach B, Bary B, Le Bescop P, Schmidt T, Leterrier N. Sulfate ingress in Portland cement. *Cement and Concrete Research* 2010; 40: 1211-1225

- [23] Xu A, Shayan A, Baburamani P. The methods for sulphate resistance of concrete and mechanism of sulphate attack. State of the art, Review Report 5. ARRB Transport Research Ltd. September 1998
- [24] Yildirim K, Sumer M. Effects of sodium chloride and magnesium sulfate concentration on the durability of cement mortar with and without fly ash. *Composites: Part B* 2013; 52: 56–61
- [25] Siddique R, Khan I. M. *Supplementary Cementing Materials*. Springer, Berlin 2011
- [26] Ogawa S, Nozaki T, Yamada K, Hirao H, Hooton D. R. Improvement on sulfate resistance of blended cement with high alumina slag. *Cement and Concrete Research* 2012; 42: 244-251
- [27] Sahmaran M, Kasap O, Duru K, Yaman I.O. Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cement and Concrete Composites* 2007; 29: 159-167
- [28] Chabreliè A, Müller U, Scrivener KL. Mechanisms of Degradation of Concrete by External Sulfate Ions under Laboratory and Field Conditions
- [29] Stark D. Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils. Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD097. Skokie, Illinois. 1989
- [30] Gollop S. R, Taylor F. W. H. Microstructural and Microanalytical studies of sulfate attack. II. Sulfate-resisting Portland cement: Ferrite Composition and Hydration Chemistry. *Cement and Concrete Research* 1994; 24: 1347-1358
- [31] Hidalgo A, Petit S, Domingo C, Alonso C, Andrade C. Microstructural characterization of leaching effects in cement pastes due to neutralisation of their alkaline nature Part I: Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research* 2007; 37: 63–70
- [32] Whittaker M, Zajac M, Ben Haha M, Bullerjahn F, Black L. The role of the alumina content of slag, plus the presence of additional sulfate on the hydration and microstructure of Portland cement-slag blends. *Cement and Concrete Research* 2014; 66: 91-101
- [33] Kruse A. K. Characterization of High-Calcium Fly Ash for Evaluating the Sulfate Resistance of Concrete, Master Thesis. The University of Texas at Austin. May 2012
- [34] SRPS EN 197-1. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Institute for standardization of Serbia; 2013
- [35] Pravilnik o kvalitetu cementa, Službeni glasnik RS, br. 34/2013
- [36] Radonjanin V, Malešev M, Marinković S. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Recycling Concrete* 2012; 58-72
- [37] Marinković B. S, Ignjatović S. I, Radonjanin S. V, Malešev M. M. Recycled Aggregate Concrete for Structural Use – An Overview of Technologies, Properties and Applications. *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*: 115 ACES Workshop, DOI 10.1007/978-94-007-1997-2\_7
- [38] Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, Ignjatović I. "Reciklirani agregat u konstrukcijskim betonima - tehnologija, svojstva, primena". *Naučno-stručni časopis za graditeljstvo Republike srpske "Savremeno graditeljstvo"* 2009; 02: 58-72, Banjaluka
- [39] Jevtić D, Zakić D, Savić A. "Specifičnosti tehnologije spravljanja betona na bazi recikliranog agregata", *Materijali i konstrukcije* 2009; 52/1: 52-62
- [40] Ignjatović I, Savić A, Marinković S. "Eksperimentalno ispitivanje betona od recikliranog agregata". *Građevinski kalendar* 2011, Savez građevinskih inženjera i tehničara Srbije, Decembar 2010; 43: 101-147

- [41] Despotović I, Grdić Z. "Svojstva i tehnologija samougrađujućeg betona sa posebnim osvrtom na mogućnost upotrebe recikliranog agregata za njegovo spravljanje", Građevinski kalendar 2011, Savez građevinskih inženjera i tehničara Srbije, Decembar 2010; 43: 148-193
- [42] McNeil K, Kang H.-K. T. Recycled Concrete Aggregates: A Review. International Journal of Concrete Structures and Materials 2013; vol.7, No.1: 61-69
- [43] Parekh N. D, Modhera D. C. Characterization of recycled aggregate concrete. International Journal of Advanced Engineering Technology 2011; Vol II, Issue IV: 321-330
- [44] Kwan H. W, Ramli M, Kam J. K, Sulieman Z. M. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. Construction and Building Materials 2012; 26: 565-573
- [45] Kiuchi T, Horiuchi E. An Experimental Study on Recycle Concrete by using High Quality Recycled Coarse Aggregate. Mem. Fac. Eng., Osaka City Univ. 2003; Vol. 44: 37 - 44
- [46] Abbasa A, Fathifazlb G, Fournierc B, Isgord O.B, Zavadile R, Razaqpurf A.G, Foo S. Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis. Materials characterization 2009; 60: 716 - 728
- [47] Xiaoa J, Lia J, Zhang Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. Cement and Concrete Research 2005; 35: 1187 - 1194
- [48] Tama W.Y. V, Gaob X.F, Tam .M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and Concrete Research 2005; 35: 1195 - 1203
- [49] Levy M. Salomon, Heleneb P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development Cement and Concrete Research 2004; 34: 1975 - 1980
- [50] Butler L, West S. J, Tighe L. S. Quantification of Recycled Concrete Aggregate (RCA) Properties for Usage in Bridges and Pavements: An Ontario Case Study. Annual Conference of the Transportation Association of Canada 2011, Edmonton, Alberta
- [51] Abbas A, Fathifazl G, Isgor O. B, Razaqpur A. G, Fournier B, Foo S. Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. Cement & Concrete Composites 2009; 31: 555-563
- [52] Tam W.Y. V, Tam M. C, Lea N. K. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. Resources, Conservation and Recycling 2007; 50: 82-101
- [53] Sánchez de Juan M, Gutiérrez A. P. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials 2009; 23: 872-877
- [54] Sri Ravindrarajah R, Tam CT. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. Mag Concr Res 1985; 37(130): 29-38
- [55] Agrela F, Sánchez de Juanb M, Ayusoa J, Geraldesh L. V, . Jiménez R. J. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete Construction and Building Materials 2011; 25: 3950-3955
- [56] Corral-Higuera R, Arredondo-Rea S.P, Neri-Flores M.A, Gómez-Soberón J.M, Almeraya Calderón F, Castorena-González J.H, Almaral-Sánchez J.L. Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Concrete with Recycled Concrete Aggregates and Supplementary Cementing Materials. International Journal of Electrochemical Science 2011; 6: 613 - 621

- [57] Lee Seung-Tae. Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. *Waste Management* 2009; 29: 2385-2391
- [58] De Schutter G, Audenaert K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. *Materials and Structures* 2004; 37: 591-596
- [59] Mindess S, Young J. F, Darwin D. *Concrete*. 2nd Ed., Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 2003
- [60] Kuroda M, Watanabe T, Terashi. Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash. *Cement and Concrete Research* 2000; 30: 253-258
- [61] Radeka M. Karakterizacija mikrostrukture tranzitne zone betona na bazi agregata od recikliranog betona pomoću SEM-a. *Materijali i Konstrukcije* 2009; 52: 74-81
- [62] Neville A. *Concrete, Neville's Insights and Issues*. Thomas Telford. 2006
- [63] Brandon D, Kaplan D.W. 2001: *Microstructural Characterisation of Metals*, second edition, 177- 189, John Wiley&Sons Ltd., Chichester, England.
- [64] Balendran V. R, Pang W. H, Wen X. H. Use of scanning electron microscopy in concrete studies. *Structural Survey* 1998; 16(3): 146-153
- [65] Scrivener L. K. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. *Cement & Concrete Composites* 2004; 26: 935-945
- [66] Diamond S. Cement paste microstructure-An overview at several levels. *Proceedings of the Conference on Hydraulic Cement Pastes. Their Structure and Properties*. Sheffield. CACA. UK, pp. 2-29
- [67] Havlica J, Sahu S. Mechanism of Ettringite and Monosulphate Formation. *Cement and Concrete Research* 1992; 22: 671-677
- [68] Winter N. *Scanning Electron Microscopy of Cement and Concrete*. WHD Microanalysis Consultants Ltd, Rendlesham, Woodbridge; UK: 2012.
- [69] *Essentials of modern materials science and engineering*. Jones Newell, John Wiley & Sons. 2009. USA
- [70] *Praktikum iz instrumentalne analize. Problemi i rešenja*. Valerija Gužvanj, Univerzitet u Novom Sadu. Novi Sad. 2011
- [71] Santhanam M, Cohen M, Olek J. Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars. *Cement and Concrete Research* 2006; 36: 2132-2137
- [72] Ferraris C, Stutzman P, Peltz M, Winpiger J. Developing a More Rapid Test to Assess Sulfate Resistance of Hydraulic Cements. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 2005 (September-October); 110: 529-540
- [73] Shnorhokian S. *Development of a Quantitative Accelerated Sulphate Attack Test for Mine Backfill*. PhD Thesis. Montreal. May 2009
- [74] Sotiriadis K, Nikolopoulou E, Tsvivilis S. Sulfate resistance of limestone cement concrete exposed to combined chloride and sulfate environment at low temperature. *Cement & Concrete Composites* 2012; 34: 903-910
- [75] Prasad J, Jain K. D, Ahuja K. A. Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* 2006; Vol. 7, No. 3: 259-268
- [76] Rozière E, Loukili A. Performance-based assessment of concrete resistance to leaching. *Cement & Concrete Composites* 2011; 33: 451-456
- [77] Rozière E, Loukili A, El Hachem R, Grondin F. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. *Cement and Concrete Research* 2009; 39: 1188-1198

- [78] E. Rozière, A. Loukili, R. El Hachem, F. Grondin. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. *Cement and Concrete Research* 2009; 39: 1188-1198
- [79] El-Hachem R, Rozière E, Grondin F, Loukili A. New procedure to investigate external sulphate attack on cementitious materials. *Cement & Concrete Composites* 2012; 34: 357-364
- [80] Planel D, Sercombe J, Le Bescop P, Adenot F, Torrenti -M. J. Long-term performance of cement paste during combined calcium leaching-sulfate attack: kinetics and size effect *Cement and Concrete Research* 2006; 36: 137-143
- [81] Bonen D, Cohen D. M. Magnesium sulfate attack on portland cement paste-II. Chemical and mineralogical analyses. *Cement and Concrete Research* 1992; 22: 707-718
- [82] Tri Phung Q, Maes N, Jacques D, De Schutter G, Ye G. Investigation of the changes in microstructure and transport properties of leached cement pastes accounting for mix composition. *Cement and Concrete Research* 2016; 79: 217-234
- [83] Gollop S. R, Taylor F. W. H. Microstructural and Microanalytical studies of sulfate attack. I. Ordinary portland cement paste. *Cement and Concrete Research* 1992; 22: 1027-1038
- [84] Bhatti I. J, Taylor C. P. Sulfate Resistance of Concrete Using Blended Cements or Supplementary Cementitious Materials. Portland Cement Association, Serial No. 2916a. Illinois. 2006
- [85] Brown W. P. Thaumasite formation and other forms of sulphate attack. *Cement & Concrete Composites* 2002; 24: 301-303
- [86] Hime G. W, Mather B. "Sulfate attack," or is it? *Cement and Concrete Research* 1999; 29: 789-791
- [87] Gollop S. R, Taylor F. W.H. Microstructural and Microanalytical Studies of Sulfate Attack. IV. Reactions of A Slag Cement Paste with Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research* 1996; Vol. 26, No. 7: 1013-1028
- [88] Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, Verstraete W. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research* 2000; 30: 623-634
- [89] Hekal E.E, Kishar E , Mostafa H. Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances. *Cement and Concrete Research* 2002; 32: 1421-1427
- [90] Baghabra Al-Amoudi S. O. Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. *Cement & Concrete Composites* 2002; 24: 305-316
- [91] Ganjian E, Sadeghi H. Pouya Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone *Cement and Concrete Research* 2005; 35: 1332-1343
- [92] Glasser P. F, Marchand J, Samson E. Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research* 2008; 38: 226-246
- [93] Kuzel -J. H. Initial Hydration Delayed-Ettringite Reactions Formation and Mechanisms in Portland of Cements. *Cement and Concrete Composites* 1996; 18: 195-203
- [94] Maes M, De Belie N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. *Cement & Concrete Composites* 2014; 53: 59-72
- [95] Collet G, Crammond J. N, Swamy N. R, Sharp H. J. The role of carbon dioxide in the formation of thaumasite. *Cement and Concrete Research* 2004; 34: 1599-1612

- [96] Sahmaran M, Kasap O, Duru K, Yaman O. I. Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cement & Concrete Composites* 2007; 29: 159-167
- [97] Brown W. P, Doerr A. Chemical changes in concrete due to the ingress of aggressive species. *Cement and Concrete Research* 2000; 30: 411-418
- [98] Brown W. P, Hooton D. R, Clark A. B. The co-existence of thaumasite and ettringite in concrete exposed to magnesium sulfate at room temperature and the influence of blast-furnace slag substitution on sulfate resistance. *Cement & Concrete Composites* 2003; 25: 939-945
- [99] Brunetaud X, Khelifa M-R, Al-Mukhtar M. Size effect of concrete samples on the kinetics of external sulfate attack. *Cement & Concrete Composites* 2012; 34: 370-376
- [100] Bellmann F, Stark J. Prevention of thaumasite formation in concrete exposed to sulphate attack. *Cement and Concrete Research* 2007; 37: 1215-1221
- [101] Irassar F. E, Bonavetti L. V, González M. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research* 2003; 33: 31-41
- [102] Sibbick G. R, Crammond J. N, Metcalf D. The microscopical characterisation of thaumasite. *Cement & Concrete Composites* 2003; 25: 831-837
- [103] Collepardi M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement & Concrete Composites* 2003; 25: 401-407
- [104] Tian B, Cohen D. M. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cement and Concrete Research* 2000; 30: 117-123
- [105] Bellmann F, Möser B, Stark J. Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen. *Cement and Concrete Research* 2006; 36: 358 – 363
- [106] Karakurt C, Bekir Topçu I. Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete. *Construction and Building Materials* 2011;25: 1789–1795
- [107] Müllauer W, Beddoe E. R, Heinz D. Sulfate attack expansion mechanisms. *Cement and Concrete Research* 2013; 52: 208-215
- [108] Hansen C. W, Offutt S. J. Gypsum and Anhydrite in Portland Cement. 2d ed.; U.S. Gypsum Co., Chicago, IL: 1969
- [109] Mehta K. P. Mechanism of sulfate attack on Portland cement, Concrete-another look. *Cement and Concrete Research* 1983; 13: 401-406
- [110] Mehta K. P. Mechanism of expansion associated with ettringite formation. *Cement and Concrete Research* 1973; 3: 1-6
- [111] AL-Salami E. A, Salem A. Effects of mix composition on the sulfate resistance of blended cements. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS* 2010; Vol. 06, No. 10: 43-47
- [112] Santhanam M, Cohen D. M, Olek J. Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed mechanisms. *Cement and Concrete Research* 2003; 33: 341-346
- [113] Yu C, Sun W, Scrivener K. Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research* 2013; 43: 105-111
- [114] Alexander M, Bertron A, De Belie N. Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments. State-of-the-Art Reports, RILEM TC211-PAE
- [115] Freeman R. B. Optimization of the physical and compositional characteristics of fly ash cement for the production of sulfate resistant concrete. PhD Thesis, University of Texas, 1992



- [116] Mangat S. P, El-Khatib M. J. Influence of initial curing on sulphate resistance of blended cement concrete. *Cement and Concrete Research* 1992; 22: 1089-1100
- [117] Osborne J. G. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cement and Concrete Composites* 1999; 21: 11-21
- [118] Shanahan N, Zayed A. Cement composition and sulfate attack Part I. *Cement and Concrete Research* 2007; 37: 618-623
- [119] Papworth F. Managing Consultant. Moving from Chemically Resistant Cement to Chemically Resistant Concrete. A Presentation to Golden Bay Cement
- [120] Gollop S. R, Taylor F. W.H. Microstructural and Microanalytical Studies of Sulfate Attack. V. Comparison of Different Slag Blends. *Cement and Concrete Research* 1996; Vol. 26, No. 7: 1029-1044
- [121] Schmidt T. Sulfate attack and the role of internal carbonate on the formation of thaumasite. PhD thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suisse, 2007
- [122] Saleh A. Chloride Induced Corrosion and Sulphate Attack – A Literature Review On Concrete Durability. The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA 2008: 1028-1040
- [123] Nielsen P, Nicolai S, Darimont A, Kestemont X. Influence of cement and aggregate type on thaumasite formation in concrete. *Cement and Concrete Composites* 2014; 53: 115-126
- [124] Taylor F. W. H, Famy C, Scrivener L. K. Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research* 2001; 31: 683-693
- [125] Santhanam M, Cohen D. M, Olek J. Sulfate attack research-whither now? *Cement and Concrete Research* 2001; 31: 845-851
- [126] Khatri P. R, Sirivivatnanon V, Yang L. J. Role Of Permeability in Sulphate Attack. *Cement and Concrete Research* 1997; Vol 27, No. 8: 1179-1189
- [127] Gabrisová A, Havlica J. Stability of calcium sulphotoaluminate hydrates in water solutions with various pH values. *Cement and Concrete Research* 1991; 21: 1023-1027
- [128] Baghabra Al-Amoudi O. S. Sulfate Attack And Reinforcement Corrosion In Plain And Blended Cements Exposed To Sulfate Environments. *Building and Environment* 1998; Vol. 33, No. 1: 53-61
- [129] El-Hachem R, Rozière E, Grondin F, Loukili A. Multi-criteria analysis of the mechanism of degradation of Portland cement based mortars exposed to external sulphate attack. *Cement and Concrete Research* 2012; 42: 1327-1335
- [130] Alexander M, Bertron A, De Belie N. Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments. State-of-the-Art Report, RILEM TC 211 – PAE;2013
- [131] Song S, Jennings M. H. Pore solution chemistry of alkali-activated ground granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research* 1999; 29: 159-170
- [132] Jallad N. K, Santhanam M, Cohen D. M. Stability and reactivity of thaumasite at different pH levels. *Cement and Concrete Research* 2003; 33: 433-437
- [133] Allahverdi A, Škvára F. Acidic corrosion of hydrated cement based materials Part 1. - mechanism of the phenomenon. *Ceramics – Silikáty* 2000; 44 (3):114-120
- [134] Chen J. J, Thomas J. J, Taylor F. W. H, . Jennings M. H. Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research* 2004; 34: 1499-1519
- [135] Gruyaert E, Van den Heede P, Maes M, De Belie N. Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests. *Cement and Concrete Research* 2012; 42: 173-185

- [136] Cigrovski I. Some Aspects of the Delayed Ettringite formation in concrete – A review.
- [137] Neville Adam. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research* 2004; 34: 1275-1296
- [138] Ramyar K, İnan G. Sodium sulfate attack on plain and blended cements *Building and Environment* 2007; 42: 1368-1372
- [139] Scherer W. G. Structure and properties of gels. *Cement and Concrete Research* 1999; 29: 1149-1157
- [140] Crammond J. N. The thaumasite form of sulfate attack in the UK. *Cement & Concrete Composites* 2003; 25: 809-818
- [141] Nied D, Enemark-Rasmussen K, L'Hopital E, Skibsted J, Lothenbach B. Properties of magnesium silicate hydrates (M-S-H). *Cement and Concrete Research* 2016; 79: 323-332
- [142] Atahan N. H, Dikme D. Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack. *Construction and Building Materials* 2011; 25: 3450-3457
- [143] Chindapasirt P, Homwuttiwong S, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research* 2004; 34: 1087-1092
- [144] Sideris K.K, Savva E. A, Papayianni J. Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements. *Cement & Concrete Composites* 2006; 28: 47-56
- [145] Santhanam M, Cohen D. M, Olek J. Mechanism of sulfate attack: A fresh look, Part 1: Summary of experimental results. *Cement and Concrete Research* 2002; 32: 915-921
- [146] Mielich O, Öttl C. Practical investigation of the sulfate resistance of Concrete from construction units. *Otto-Graf-Journal* 2004; 15:135-152
- [147] Bellmann F, Erfurt W, Ludwig H.-M. Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources. *Cement & Concrete Composites* 2012; 34: 86-93
- [148] Higgins D.D. Increased sulfate resistance of ggbs concrete in the presence of carbonate. *Cement & Concrete Composites* 2003; 25: 913-919
- [149] Higgins D.D, Crammond J. N. Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack. *Cement & Concrete Composites* 2003; 25: 921-929
- [150] Berndt M.L. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 2009; 23: 2606-2613
- [151] Nabil M. Al-Akhras. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research* 2006; 36: 1727-1734
- [152] Guangcheng L, Youjun X, Xuguang T. Evaluating Deterioration of Concrete by Sulfate Attack. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* Sept 2007; Vol. 22, No. 3: 572-576
- [153] Diab M. A, Awad M. Abd E, Elyamany E. H, Abd Elmoaty M. Abd E. Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack. *Construction and Building Materials* 2012; 36: 311-318
- [154] Sotiriadis K, Nikolopoulou E, Tsivilis S, Pavlou A, Chaniotakis E, Swamy N. R. The effect of chlorides on the thaumasite form of sulfate attack of limestone cement concrete containing mineral admixtures at low temperature. *Construction and Building Materials* 2013; 43: 156-164
- [155] Miao C, Mu R, Tian Q, Sun W. Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fiber reinforcement. *Cement and Concrete Research* 2002; 32: 31-34
- [156] Monteiro J. M. P, Kurtis E. K. Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack. *Cement and Concrete Research* 2003; 33: 987-993

- [157] Zhang M, Chen J, Lv Y, Wang D, Ye J. Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate-chloride ions. *Construction and Building Materials* 2013; 39: 26-32
- [158] Dehwah F. H.A. Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete deterioration and morphological changes in cement hydrates. *Construction and Building Materials* 2007; 21: 29-39
- [159] Ouyang W, Chen J, Jiang M. Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack. *Construction and Building Materials* 2014; 53: 419-424
- [160] Brown W. P, Badger S. The distributions of bound sulfates and chlorides in concrete subjected to mixed NaCl, MgSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> attack. *Cement and Concrete Research* 2000; 30: 1535-1542
- [161] Cao T. H, Bucea L, Ray A, Yozghatlian S. The Effect of Cement Composition and pH of Environment on Sulfate Resistance of Portland Cements and Blended Cements. *Cement and Concrete Composites* 1997; 19: 161-171
- [162] Hwang P. J, Shim B. H, Lim S, Ann Y. K. Enhancing the Durability Properties of Concrete Containing Recycled Aggregate by the Use of Pozzolanic Materials. *Journal of Civil Engineering* 2013; 17 (1):155-163
- [163] Tangchirapat W, Khamklai S, Jaturapitakkul C. Use of ground palm oil fuel ash to improve strength, sulfate resistance, and water permeability of concrete containing high amount of recycled concrete aggregates. *Materials and Design* 2012; 41: 150-157
- [164] SRPS EN 196-1: Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2008
- [165] SRPS EN 196-3: Metode ispitivanja cementa - Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010
- [166] SRPS EN 196-6: Metode ispitivanja cementa — Deo 6: Određivanje finoće mliva. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2011.
- [167] SRPS EN 197-1: Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013
- [168] SRPS EN 933-1: Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata — Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava — Metoda prosejavanja. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
- [169] SRPS EN 933-4: Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata - Deo 4: Određivanje oblika zrna - Indeks oblika. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010
- [170] SRPS EN 1097-2: Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata — Deo 2: Metode određivanja otpornosti na drobljenje. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013
- [171] SRPS EN 1097-6: Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Deo 6: Određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2007
- [172] SRPS EN 1744-6: Ispitivanja hemijskih svojstava agregata - Deo 6: Određivanje uticaja recikliranog agregata na početno vreme vezivanja cementa. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2008
- [173] SRPS EN 933-11: Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata - Deo 11: Klasifikacija sastojaka krupnog recikliranog agregata. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2009
- [174] SRPS EN 12620: Agregati za beton Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010
- [175] SRPS EN 206-1: Beton — Deo 1: Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2011
- [176] SRPS EN 12350-2: Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010

- [177] SRPS ISO 6276: Beton-Zbijeni sveži beton-Određivanje zapreminske mase. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 1997
- [178] ISS. SRPS EN 12390-3: Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010
- [179] UNI. UNI 11307: Testing for hardened concrete: Shrinkage determination. Milano; 2008.
- [180] SRPS EN 12390-8: Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010
- [181] SRPS U.M8.300: Merenje kapilarnog upijanja vode i utvrđivanje koeficijenta kapilarnog upijanja vode građevinskih materijala. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 1985.
- [182] Flašar A. Kontrola kvaliteta u građevinarstvu. Novi Sad.1984
- [183] Aitcin PC. High Performance Concrete. E&FN SPON. 1998
- [184] Ghafoori N, Diawara H, Beasley S. Resistance to external sodium sulfate attack for early-opening-to-traffic Portland cement concrete. *Cement and Concrete Composites* 2008;30:444-454
- [185] Bjegović D, Štirmer N. Teorija i tehnologija betona. Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Zagreb 2015
- [186] Matschei T, Lothenbach B, Glasser F.P. The AFm phase in Portland cement. *Cement and Concrete Research* 2007;37:118-130
- [187] Kocaba V. Development and Evaluation of Methods to Follow Microstructural Development of Cementitious Systems Including Slags. PhD thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suisse. 2010
- [188] Kunther W, Lothenbach B, Scrivener KL. On the relevance of volume increase for the length changes of mortar bars in sulfate solutions. *Cement and Concrete Research* 2013;46:23-29
- [189] Hunnicutta A. W. Characterization of Calcium-silicate-hydrate and calcium-alumino-silicate-hydrate. PhD thesis. University of Illinois at Urbana. USA 2013
- [190] Puertas F, Goñi S, Hernández M.S, Varga C, Guerrero A. Comparative study of accelerated decalcification process among C3S, grey and white cement pastes. *Cement and Concrete Composites* 2012;34:384-391
- [191] Lodeiro G, Macphee D.E, Palomo A, Fernández-Jiménez A. Effect of alkalis on fresh C-S-H gels. FTIR analysis. *Cement and Concrete Research* 2009;39:147-153
- [192] Alexander M, Bertron A, De Belie N. Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments. State-of-the-Art Report, RILEM TC 211 - PAE;2013
- [193] Gu, K, Jin F, Al-Tabbaa A, Shi B, Tang C. *J Mater CivEng* 2016; 28 (2): ISSN 0899-1561 , DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001392](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001392)
- [194] Whittaker M, Zajec M, Haha MB, Bullerjahn F, Black L. The role of the aluminium content of slag, plus the presence of additional sulphate on the hydration and microstructure of Portland cement-slag blends. *Cement and Concrete Reserch* 2014;66:91-101
- [195] Gu K, Jin F, Al-Tabbaa A, Shi B. Activation of ground granulated blast furnace slag by using calcined dolomite. *Construction and Building Materials* 2014;68:252-258
- [196] Gu K, Jin F, Al-Tabbaa A, Shi B, Liu J. Mechanical and hydration properties of ground granulated blastfurnace slag pastes activated with MgO-CaO mixtures. *Construction and Building Materials* 2014;69:101-108

- [197] Nielsen EP, Herfort D, Geiker MR. Phase equilibria of hydrated Portland cement. *Cement and Concrete Research* 2005;35:109–115
- [198] Scrivener KL. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. *Cement and Concrete Composites* 2004;26:935-945
- [199] Kunther W, Lothenbach B, Scrivener KL. On the relevance of volume increase for the length changes of mortar bars in sulfate solutions. *Cement and Concrete Research* 2013;46:23–29
- [200] Yu C, Sun W, Scrivener K. Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research* 2013;43:105-111
- [201] Flatt R. J, Scherer G.W. Thermodynamics of crystallization stresses in DEF. *Cement and Concrete Research* 2008;38:325–336
- [202] Min D, Mingshu T. Formation and expansion of ettringite crystals. *Cement and Concrete Research* 1994; 24:119–126
- [203] Barbarulo R, Peycelon H, Leclercq S. Chemical equilibria between C–S–H and ettringite, at 20 and 85 °C. *Cement and Concrete Research* 2007;37:1176–1181
- [204] Kunther W, Lothenbach B, Skibsted J. Influence of the Ca/Si ratio of the C–S–H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure. *Cement and Concrete Research* 2015;69:37–49
- [205] Malešev M. Parametarska analiza uticaja novih vrsta cementa proizvedenih prema EN 197-1 na osnovna svojstva betona. Doktorska disertacija. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Beograd, 2003
- [206] Schmidt T. Sulfate attack and the role of internal carbonate on the formation of thumasite. PhD thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Suisse, 2007



**PRILOZI**

## PRILOG 1

### Određivanje fizičko-mehaničkih svojstava cementa

Ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava cementa je izvršeno prema standardima SRPS EN 196-1, SRPS EN 196-3 i SRPS EN 196-6.

Tabela 1– Fizička svojstva upotrebljenih cementa

Svojstvo	Vrsta cementa	
	CEM I 42,5R	CEM III/B 32,5N LH/SR
Finoća mliva [%]	3,0	3,1
Specifična površina [cm <sup>2</sup> /g]	3910 (3813)	5648 (5047)
Specifična masa [g/cm <sup>3</sup> ]	3,179	2,965
Standardna konzistencija [%]	28,8	30,2
Početak vezivanja [min]	195	180
Kraj vezivanja [min]	285	270
Stalnost zapremine (Le Chatelier) [mm]	1	1

Tabela 2 – Mehanička svojstva upotrebljenih cementa

Vrsta cementa	Čvrstoća pri pritisku [MPa]		Čvrstoća na zatezanje pri savijanju [MPa]	
	2 dana	28 dana	2 dana	28 dana
	CEM I 42,5R	24,5	43,5	5,4
CEM III/B 32,5N LH/SR	7,7	36,1	2,2	8,3

Tabela 3 – Hemijski sastav cementa (%)

Parametar	Jedinica	CEM I 42,5R	CEM III/B 32,5N LH/SR
NO	%	0,37	0,63
SiO <sub>2</sub>	%	20,98	31,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5,51	6,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,58	1,39
CaO	%	61,96	15,50
MgO	%	2,50	6,27
SO <sub>3</sub>	%	3,60	2,43
Na <sub>2</sub> O	%	0,22	0,23
K <sub>2</sub> O	%	0,74	0,61
Cl	%	0,03	0,02
Slobodan CaO	%	1,11	0,31
Gubitak žarenjem	%	1,35	2,64



*Tabela 4 – Mineraloški sastav cemenata (%)*

<b>Parametar</b>	<b>Jedinica</b>	<b>CEM I 42,5R</b>	<b>CEM III/B 32,5N LH/SR</b>
C <sub>3</sub> S	%	58,41	21,05
C <sub>2</sub> S	%	14,65	5,11
C <sub>3</sub> A	%	6,22	2,19
C <sub>4</sub> AF	%	8,99	2,93
CaCO <sub>3</sub>	%	0,45	2,27
Gips	%	1,89	1,47
Poluhidrat	%	0,99	0,28
SO <sub>3</sub>	%	2,23	1,40
Amorfna faza	%	4,67	56,69
Ostalo	%	1,5	6,60

## PRILOG 2

### Određivanje svojstava agregata

#### A. Rečni agregat

Granulometrijski sastav frakcija rečnog agregata, sadržaj sastojaka koji mogu biti štetni za fizičko-mehanička svojstva agregata kao i neka fizička svojstva ispitana su prema standardima SRPS EN 933-1, SRPS EN 933-4, SRPS EN 1097-2, SRPS EN 1097-6, SRPS EN 12620, SRPS EN 206, SRPS B8.004, B.B8.038, B.B8.037, B.B8.034, B.B8.039, B.B8.042, B.B8.044.

*Tabela 5 – Granulometrijski sastav prirodnog rečnog agregata 0/4*

	<b>Dno</b>	<b>0,125</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>31,5</b>
$a_{i/1}$ [g]	9,0	116,0	385,0	129,0	70,0	98,0	44,0	4,0	0	0
$a_{i/2}$ [g]	8,0	107,0	387,0	135,0	78,0	102,0	44,0	0	0	0
$a_i$ [g]	8,5	11,5	386,0	132,0	74,0	100,0	44,0	2,0	0	0
$O_i$ [g]	858,0	849,5	738,0	352,0	220,0	146,0	46,0	2,0	0	0
$P_i$ [%]	100	99,0	86,0	41,0	25,6	17,0	5,4	0,2	0	0
<b><math>Y_i</math> [%]</b>	<b>0</b>	<b>1,0</b>	<b>14,0</b>	<b>59,0</b>	<b>74,4</b>	<b>83,0</b>	<b>94,6</b>	<b>99,8</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

*Tabela 6 – Granulometrijski sastav prirodnog rečnog agregata 4/8*

	<b>Dno</b>	<b>0,125</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>31,5</b>
$a_{i/1}$ [g]	1,0	0	0	0	1	88,0	1425,0	92,0	0	0
$a_{i/2}$ [g]	3,0	3,0	6,0	6,0	9,0	83,0	1385,0	54,0	0	0
$a_i$ [g]	2,0	1,5	3,0	3,0	5,0	85,5	1405,0	73,0	0	0
$O_i$ [g]	1578,0	1576,0	1574,5	1571,5	1568,5	1563,5	1478,0	73,0	0	0
$P_i$ [%]	100	99,9	99,8	99,6	99,4	99,1	93,7	4,6	0	0
<b><math>Y_i</math> [%]</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	<b>0,9</b>	<b>6,3</b>	<b>95,4</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

*Tabela 7 – Granulometrijski sastav prirodnog rečnog agregata 8/16*

	<b>Dno</b>	<b>0,125</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>31,5</b>
$a_{i/1}$ [g]	2,0	0	0	0	2,0	7,0	245,0	7761,0	213,0	0
$a_{i/2}$ [g]	3,0	1,0	0	0	2,0	12,0	358,0	7478,0	153,0	0
$a_i$ [g]	2,5	0,5	0	0	2,0	9,5	301,5	7619,5	183,0	0
$O_i$ [g]	8118,5	8116,0	8115,5	8115,5	8115,5	8113,5	8104,0	7802,5	183,0	0
$P_i$ [%]	100	100	100	100	100	99,9	99,8	96,1	2,3	0
<b><math>Y_i</math> [%]</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>3,9</b>	<b>97,7</b>	<b>100</b>

Modul finoće sitnog agregata (frakcije 0/4) iznosi

$$M = \frac{\sum P_i}{100} = \frac{\sum (100 - Y_i)}{100} = 2,74$$

Tabela 8 – Fizička svojstva rečnog agregata

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat		
			0/4mm	4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1	-	0,78	0	0
Oblik zrna	EN 933-4	≤SI <sub>55</sub>	-	8,5 (SI <sub>15</sub> )	16,0 (SI <sub>20</sub> )
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097-2	≤LA <sub>50</sub>	23,8 (LA <sub>25</sub> )	23,8 (LA <sub>25</sub> )	25,3 (LA <sub>30</sub> )
Zapreminska masa u suvom stanju [kg/m <sup>3</sup> ]	EN 1097-6	-	2650	2650	2650
Upijanje vode [%]	EN 1097-6	-	1,0	0,6	0,6

## B. Reciklirani agregat

Granulometrijski sastav frakcija recikliranog agregata kao i neka fizička svojstva ispitana su prema standardima SRPS EN 933-1, SRPS EN 933-4, SRPS EN 933-11, SRPS EN 1097-2, SRPS EN 1097-6, SRPS EN 1744-6, SRPS EN 12620 i SRPS EN 206.

Tabela 9 – Granulometrijski sastav recikliranog agregat 4/8

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
a <sub>i/1</sub> [g]	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5	81,5	1482,3	13,0	0	0
a <sub>i/2</sub> [g]	0,4	0,2	0,1	0,2	0,5	59,5	1451,8	13,7	0	0
a <sub>i</sub> [g]	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	70,5	1467,1	13,4	0	0
O <sub>i</sub> [g]	1552,8	1552,4	1552,1	1551,9	1551,4	1550,9	1480,4	13,4	0	0
P <sub>i</sub> [%]	100	100	100	99,9	99,9	99,9	95,3	0,9	0	0
<b>Y<sub>i</sub> [%]</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>4,7</b>	<b>99,1</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Tabela 10 – Granulometrijski sastav recikliranog agregata 8/16

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
a <sub>i/1</sub> [g]	2,6	1,2	1,4	1,0	1,0	2,6	174,8	7706,5	123,5	0
a <sub>i/2</sub> [g]	2,1	1,0	1,5	1,8	2,6	4,8	119	7759,5	110,6	0
a <sub>i</sub> [g]	2,4	1,1	1,5	1,4	1,8	3,7	146,9	7733,0	117,1	0
O <sub>i</sub> [g]	8008,8	8006,4	8005,3	8003,9	8002,5	8000,7	7997,0	7850,1	117,1	0
P <sub>i</sub> [%]	100	100	100	99,9	99,9	99,9	99,9	98,0	1,5	0
<b>Y<sub>i</sub> [%]</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>2,0</b>	<b>98,5</b>	<b>100</b>

Tabela 11 – Fizička svojstva recikliranog agregata

Svojstvo	Standard	Preporuka (prema EN 206)	Rezultat	
			4/8mm	8/16mm
Količina sitnih čestica [%]	EN 933-1	-	0,03	0,04
Oblik zrna	EN 933-4	≤SI <sub>55</sub>	7,2 (SI <sub>15</sub> )	4,1 (SI <sub>15</sub> )
Otpornost na drobljenje (LA)	EN 1097-2	≤LA <sub>50</sub>	27,8 (LA <sub>30</sub> )	27,8 (LA <sub>30</sub> )
Zapreminska masa u suvom stanju [kg/m <sup>3</sup> ]	EN 1097-6	≥2100kg/m <sup>3</sup>	2340	2340
Upijanje vode [%]	EN 1097-6	-	3,0*	2,2*
Uticaj na vreme početka vezivanja [min]	EN 1744-6	≤A <sub>40</sub>	25 (A <sub>40</sub> )	25 (A <sub>40</sub> )

\* nakon 30 minuta

## PRILOG 3

### Granulometrijski sastav mešavine agregata

Za određivanje učešća pojedinih frakcija agregata i granulometrijskog sastava mešavine agregata, pretpostavljeno je da granulometrijski sastav mešavine odgovara Fuler-ovoj krivi sa analitičkim izrazom:

$$Y_i = 100 \sqrt{\frac{d_i}{D}} \%$$

gde su:

- $Y_i$  – prolazi mešavine kroz i-to sito (%)
- $d_i$  – otvor i-tog sita (mm)
- $D$  – nominalno najkrupnije zrno agregata (mm)

$$Y_4 = 100 \sqrt{\frac{4}{16}} = 50\% \qquad Y_8 = 100 \sqrt{\frac{8}{16}} = 70,7\%$$

$$\begin{aligned} 94,6 \cdot X_{0/4} + 6,3 \cdot X_{4/8} + 0,2 \cdot X_{8/16} &= 50 & X_{0/4} &= 0,515 & X_{0/4} &= 0,52 \\ 99,8 \cdot X_{0/4} + 95,4 \cdot X_{4/8} + 3,9 \cdot X_{8/16} &= 70,7 & X_{4/8} &= 0,193 & X_{4/8} &= 0,19 \\ X_{0/4} + X_{4/8} + X_{8/16} &= 1 & X_{8/16} &= 0,291 & X_{8/16} &= 0,29 \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{usvojeno} \\ \\ \\ \end{array}$$

*Tabela 12 – Granulometrijski sastav mešavine agregata za betone sa rečnim agregatom (NPC1, NPC2, NMC1, NMC2)*

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$X_{0/4} \cdot Y_{i,0/4}$	0,0	0,5	7,3	30,7	38,7	43,2	49,2	51,9	52,0	52,0
$X_{4/8} \cdot Y_{i,4/8}$	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	1,2	18,1	19,0	19,0
$X_{8/16} \cdot Y_{i,8/16}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	28,3	29,0
<b>Y<sub>M</sub></b>	0,0	0,5	7,3	30,8	38,8	43,4	50,4	71,2	99,3	100,0
<b>Y<sub>M</sub></b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>31</b>	<b>39</b>	<b>43</b>	<b>50</b>	<b>71</b>	<b>99</b>	<b>100</b>
Referentne	0	0	3	7	12	21	36	60	100	100
krive	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100

*Tabela 13 – Granulometrijski sastav mešavine agregata za betone sa recikliranim agregatom (RPC1, RPC2, RMC1, RMC2)*

	Dno	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
$X_{0/4} \cdot Y_{i,0/4}$	0,0	0,5	7,3	30,7	38,7	43,2	49,2	51,9	52,0	52,0
$X_{4/8} \cdot Y_{i,4/8}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	18,8	19,0	19,0
$X_{8/16} \cdot Y_{i,8/16}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	28,6	29,0
<b>Y<sub>M</sub></b>	0,0	0,5	7,3	30,7	38,7	43,2	50,1	71,3	99,6	100,0
<b>Y<sub>M</sub></b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>31</b>	<b>39</b>	<b>43</b>	<b>50</b>	<b>71</b>	<b>99</b>	<b>100</b>
Referentne	0	0	3	7	12	21	36	60	100	100
krive	0	0	8	20	32	42	56	76	100	100

## PRILOG 4

### Određivanje sastava betonskih mešavina

#### A. Betonska mešavina NPC1

Sastav betonske mešavine NPC1 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, rečnim, sitnim i krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,55) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- pretpostavljena količina cementa:  $m_c=350\text{kg/m}^3$ ;
- količina vode je određena na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_1=m_v/m_c=0,55$  i iznosi  $m_v=192,5\text{kg/m}^3$ , tako da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$

$$\bar{V}_{cp} = \frac{350}{3100} + \frac{192,5}{1000} = 0,305\text{m}^3$$

- učešća pojedinih frakcija agregata usvojena su tako da granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata odgovara Fuller-ovoj krivi. Određivanje učešća frakcija agregata dato je u Prilogu 3 i njihove vrednosti su:
  - frakcija 0/4 -  $X_{0/4}=52\%$
  - frakcija 4/8 -  $X_{4/8}=19\%$
  - frakcija 8/16 -  $X_{8/16}=29\%$

- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :

$$\frac{350}{3100} + \frac{192,5}{1000} + \frac{m_a}{2650} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1788 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:
  - frakcija 0/4 -  $m_{0/4}=930\text{kg}$
  - frakcija 4/8 -  $m_{4/8}=340\text{kg}$
  - frakcija 8/16 -  $m_{8/16}=518\text{kg}$

- zapreminska masa svežeg betona (računska):

$$\gamma_{b,sv} = 350 + 192,5 + 1788 = 2330\text{kg/m}^3$$

#### B. Betonska mešavina NPC2

Sastav betonske mešavine NPC2 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, rečnim, sitnim i krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,38) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina vode i cementa određena je na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_2=m_v/m_c=0,38$ , usvojene količine superplastifikatora (Sika ViscoCrete 3070) od 0,8% u odnosu na masu cementa i uslova da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$ :

$$\frac{m_c}{3100} + \frac{0,38 \cdot m_c}{1000} + \frac{0,008 \cdot m_c}{1090} = 0,3 \rightarrow m_c = 423 \text{ kg/m}^3$$

$$m_v = 160,7 \approx 161 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{spk}} = 3,4 \text{ kg/m}^3$$

- učešća frakcija agregata su ista kao kod betonske mešavine NPC1 i iznose:
  - frakcija 0/4 -  $X_{0/4}=52\%$
  - frakcija 4/8 -  $X_{4/8}=19\%$
  - frakcija 8/16 -  $X_{8/16}=29\%$
- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :

$$\frac{423}{3100} + \frac{161}{1000} + \frac{3,4}{1090} + \frac{m_a}{2650} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1800 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima (kao kod mešavine NPC1) iznose:
  - frakcija 0/4 -  $m_{0/4}=936\text{kg}$
  - frakcija 4/8 -  $m_{4/8}=342\text{kg}$
  - frakcija 8/16 -  $m_{8/16}=522\text{kg}$
- zapreminska masa svežeg betona (računska):

$$\gamma_{b,sv} = 423 + 161 + 3,4 + 1800 = 2387 \text{ kg/m}^3$$

### C. Betonska mešavina NMC1

Sastav betonske mešavine NMC1 (beton spravljen sa metalurškim cementom-CEM III, rečnim, sitnim i krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,55) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina vode i cementa određena je na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_1=m_v/m_c=0,55$  i uslova da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$ :

$$\frac{m_c}{2965} + \frac{0,55 \cdot m_c}{1000} = 0,3\text{m}^3 \rightarrow m_c = 338 \text{ kg/m}^3$$

$$m_v = 186 \text{ kg/m}^3$$

- učešća frakcija agregata su ista kao kod betonske mešavine NPC1 i iznose:
  - frakcija 0/4 -  $X_{0/4}=52\%$
  - frakcija 4/8 -  $X_{4/8}=19\%$
  - frakcija 8/16 -  $X_{8/16}=29\%$
- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :

$$\frac{338}{2965} + \frac{186}{1000} + \frac{m_a}{2650} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1800 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:
  - frakcija 0/4 -  $m_{0/4}=936\text{kg}$
  - frakcija 4/8 -  $m_{4/8}=342\text{kg}$

- frakcija 8/16 –  $m_{8/16}=522\text{kg}$
- zapreminska masa svežeg betona (računska):  

$$\gamma_{b,sv} = 338 + 186 + 1800 = 2324\text{kg/m}^3$$

#### D. Betonska mešavina NMC2

Sastav betonske mešavine NMC2 (beton spravljen sa metalurškim cementom-CEM III, rečnim, sitnim i krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,38) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina vode i cementa određena je na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_2=m_v/m_c=0,38$ , usvojene količine superplastifikatora (Sika ViscoCrete 5500HP) od 0,4% u odnosu na masu cementa i uslova da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$ :

$$\frac{m_c}{2965} + \frac{0,38 \cdot m_c}{1000} + \frac{0,004 \cdot m_c}{1080} = 0,3\text{m}^3 \rightarrow m_c = 416\text{kg/m}^3$$

$$m_v = 158\text{kg/m}^3$$

$$m_{\text{spk}} = 1,66\text{kg/m}^3$$

- učešća frakcija agregata su ista kao kod betonske mešavine NPC1 i iznose:
  - frakcija 0/4 –  $X_{0/4}=52\%$
  - frakcija 4/8 –  $X_{4/8}=19\%$
  - frakcija 8/16 –  $X_{8/16}=29\%$
- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :  

$$\frac{416}{2965} + \frac{158}{1000} + \frac{1,66}{1080} + \frac{m_a}{2650} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1802 \text{ kg/m}^3$$
- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:
  - frakcija 0/4 –  $m_{0/4}=937\text{kg}$
  - frakcija 4/8 –  $m_{4/8}=342\text{kg}$
  - frakcija 8/16 –  $m_{8/16}=523\text{kg}$
- zapreminska masa svežeg betona (računska):  

$$\gamma_{b,sv} = 416 + 158 + 1,66 + 1802 = 2377,7 \approx 2378\text{kg/m}^3$$

#### E. Betonska mešavina RPC1

Sastav betonske mešavine RPC1 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, rečnim sitnim i recikliranim krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,55) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- pretpostavljena količina cementa:  $m_c=350\text{kg/m}^3$ ;
- količina vode je određena na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_1=m_v/m_c=0,55$  i iznosi  $m_v=192,5\text{kg/m}^3$ , tako da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$

$$\bar{V}_{cp} = \frac{350}{3100} + \frac{192,5}{1000} = 0,305\text{m}^3$$



- učešća pojedinih frakcija agregata usvojena su tako da granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata odgovara Fuller-ovoj krivi. Određivanje učešća frakcija agregata dato je u Prilogu 3 i njihove vrednosti su:

- frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $X_{0/4}=52\%$
- frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $X_{4/8}=19\%$
- frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $X_{8/16}=29\%$

- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta\rho=2\%$ :

$$\frac{350}{3100} + \frac{192,5}{1000} + \frac{0,52 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,48 \cdot m_a}{2340} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1681 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $m_{0/4}=874\text{kg}$
- frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $m_{4/8}=319\text{kg}$
- frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $m_{8/16}=487\text{kg}$

- količina vode koju upija reciklirani agregat:  $m_v = 20,2 \text{ kg/m}^3$
- zapreminska masa betona (računska):

$$\gamma_{b,sv} = 350 + 192,5 + 1681 + 20,2 = 2243,7 \approx 2244\text{kg/m}^3$$

## F. Betonska mešavina RPC2

Sastav betonske mešavine RPC2 (beton spravljen sa portland cementom-CEM I, rečnim sitnim i recikliranim krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,38) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina vode i cementa određena je na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_2=m_v/m_c=0,38$ , usvojene količine superplastifikatora (Sika ViscoCrete 3070) od 0,4% u odnosu na masu cementa i uslova da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$ :

$$\frac{m_c}{3100} + \frac{0,38 \cdot m_c}{1000} + \frac{0,004 \cdot m_c}{1090} = 0,3 \rightarrow m_c = 425 \text{ kg/m}^3$$

$$m_v = 162\text{kg/m}^3$$

$$m_{spk} = 1,7\text{kg/m}^3$$

- učešća frakcija agregata su ista kao kod betonske mešavine NPC1 i iznose:

- frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $X_{0/4}=52\%$
- frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $X_{4/8}=19\%$
- frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $X_{8/16}=29\%$

- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta\rho=2\%$ :

$$\frac{425}{3100} + \frac{162}{1000} + \frac{1,7}{1090} + \frac{0,52 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,48 \cdot m_a}{2340} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1693 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:
  - frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $m_{0/4}=880\text{kg}$
  - frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $m_{4/8}=322\text{kg}$
  - frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $m_{8/16}=491\text{kg}$
- količina vode koju upija reciklirani agregat:  $m_v = 20,5 \text{ kg/m}^3$
- zapreminska masa betona (računska):

$$\gamma_{b,sv} = 425 + 162 + 1693 + 1,7 + 20,5 = 2302\text{kg/m}^3$$

## G. Betonska mešavina RMC1

Sastav betonske mešavine RMC1 (beton spravljen sa metalurškim cementom-CEM III, rečnim sitnim i recikliranim krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,55) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa i vode je određena na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_1=m_v/m_c=0,55$  i uslova da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$ :

$$\frac{m_c}{2965} + \frac{0,55 \cdot m_c}{1000} = 0,3\text{m}^3 \rightarrow m_c = 338\text{kg/m}^3,$$

$$m_v = 186\text{kg/m}^3$$

- učešća pojedinih frakcija agregata usvojena su tako da granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata odgovara Fuler-ovoj krivi. Određivanje učešća frakcija agregata dato je u Prilogu 3 i njihove vrednosti su:
  - frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $X_{0/4}=52\%$
  - frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $X_{4/8}=19\%$
  - frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $X_{8/16}=29\%$

- količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :

$$\frac{338}{2965} + \frac{186}{1000} + \frac{0,52 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,48 \cdot m_a}{2340} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1694 \text{ kg/m}^3$$

- količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:
  - frakcija 0/4 (rečni agregat) –  $m_{0/4}=881\text{kg}$
  - frakcija 4/8 (reciklirani agregat) –  $m_{4/8}=322\text{kg}$
  - frakcija 8/16 (reciklirani agregat) –  $m_{8/16}=491\text{kg}$

- količina vode koju upija reciklirani agregat:  $m_v = 20,5 \text{ kg/m}^3$
- zapreminska masa betona (računska):

$$\gamma_{b,sv} = 338 + 186 + 1694 + 20,5 = 2238,5\text{kg/m}^3$$

## H. Betonska mešavina RMC2

Sastav betonske mešavine RMC2 (beton spravljen sa metalurškim cementom-CEM III, rečnim sitnim i recikliranim krupnim agregatom, vodocementnog faktora 0,38) određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina vode i cementa određena je na osnovu usvojenog vodocementnog faktora  $w_2=m_v/m_c=0,38$ , usvojene količine superplastifikatora (Sika ViscoCrete 3070) od

0,8% u odnosu na masu cementa i uslova da ukupna količina cementne paste iznosi  $\sim 0,3\text{m}^3$ :

$$\frac{m_c}{2965} + \frac{0,38 \cdot m_c}{1000} + \frac{0,008 \cdot m_c}{1090} = 0,3 \rightarrow m_c = 414 \text{ kg/m}^3$$

$$m_v = 157 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{\text{spk}} = 3,3 \text{ kg/m}^3$$

• učešća frakcija agregata su ista kao kod betonske mešavine NPC1 i iznose:

- frakcija 0/4 (rečni agregat) -  $X_{0/4}=52\%$
- frakcija 4/8 (reciklirani agregat) -  $X_{4/8}=19\%$
- frakcija 8/16 (reciklirani agregat) -  $X_{8/16}=29\%$

• količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha  $\Delta p=2\%$ :

$$\frac{414}{2965} + \frac{157}{1000} + \frac{3,3}{1090} + \frac{0,52 \cdot m_a}{2650} + \frac{0,48 \cdot m_a}{2340} + 0,02 = 1 \rightarrow m_a = 1695 \text{ kg/m}^3$$

• količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- frakcija 0/4 (rečni agregat) -  $m_{0/4}=881\text{kg}$
- frakcija 4/8 (reciklirani agregat) -  $m_{4/8}=322\text{kg}$
- frakcija 8/16 (reciklirani agregat) -  $m_{8/16}=492\text{kg}$

• količina vode koju upija reciklirani agregat:  $m_v = 20,5 \text{ kg/m}^3$

• zapreminska masa betona (računska):

$$\gamma_{b,sv} = 414 + 157 + 1695 + 3,3 + 20,5 = 2290 \text{ kg/m}^3$$

## PRILOG 5

### Određivanje konzistencije

Tabela 14 – Konzistencija betona

Oznaka betona	Vrsta hem. dodatka	Sleganje [mm]
		$\Delta h$
NPC1	-	5,5
NPC2	Sika VSC 3070	4,0
NMC1	Sika VSC 3070	5,0
NMC2	Sika VSC 5500	12,0
RPC1	-	15,0
RPC2	Sika VSC 3070	5,0
RMC1	-	4,0
RMC2	Sika VSC 3070	10,0

## PRILOG 6

### Određivanje zapreminske mase svežeg betona

Zapreminska masa svežeg betona je izračunata prema izrazu:

$$\gamma_{b,sv} = \frac{m_{k,pun} - m_k}{V_k} = \frac{m_{b,sv}}{V_k}$$

gde su:

- $m_k$  – masa praznog kalupa (kg)
- $m_{k,pun}$  – masa punog kalupa (kg)
- $m_{b,sv}$  – masa svežeg betona (kg)
- $V_k$  – zapremina kalupa (kalup oblika kocke ivice 150mm) (m<sup>3</sup>)

#### A. Beton sa rečnim agregatom

*Tabela 15 – Zapreminska masa svežeg betona NPC1*

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
NPC1/1	9,615	17,445	7,830	2320	
NPC1/2	9,580	17,380	7,800	2311	<b>2314</b>
NPC1/3	9,620	17,420	7,800	2311	

*Tabela 16 – Zapreminska masa svežeg betona NPC2*

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
NPC2/1	9,615	17,550	7,935	2351	
NPC2/2	9,580	17,505	7,925	2348	<b>2350</b>
NPC2/3	9,620	17,555	7,935	2351	

*Tabela 17 – Zapreminska masa svežeg betona NMC1*

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
NMC1/1	9,615	17,340	7,725	2289	
NMC1/2	9,580	17,340	7,760	2299	<b>2307</b>
NMC1/3	9,620	17,490	7,870	2332	

*Tabela 18 – Zapreminska masa svežeg betona NMC2*

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
NMC2/1	9,615	17,545	7,930	2350	
NMC2/2	9,580	17,470	7,890	2338	<b>2342</b>
NMC2/3	9,620	17,510	7,890	2338	

## B. Beton sa recikliranim agregatom

Tabela 19 – Zapreminska masa svežeg betona RPC1

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
RPC1/1	9,615	17,230	7,615	2256	
RPC1/2	9,580	17,155	7,575	2244	<b>2248</b>
RPC1/3	9,620	17,195	7,575	2244	

Tabela 20 – Zapreminska masa svežeg betona RPC2

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
RPC2/1	9,615	17,385	7,770	2302	
RPC2/2	9,580	17,420	7,840	2323	<b>2310</b>
RPC2/3	9,620	17,400	7,780	2305	

Tabela 21 – Zapreminska masa svežeg betona RMC1

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
RMC1/1	9,615	17,190	7,575	2244	
RMC1/2	9,580	17,190	7,610	2255	<b>2251</b>
RMC1/3	9,620	17,230	7,610	2255	

Tabela 22 – Zapreminska masa svežeg betona RMC2

Uzorak	$m_k$ [kg]	$m_{k,pun}$ [kg]	$m_{b,sv}$ [kg]	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
RMC2/1	9,615	17,340	7,725	2289	
RMC2/2	9,580	17,330	7,750	2296	<b>2292</b>
RMC2/3	9,620	17,350	7,730	2290	

## PRILOG 7

### Određivanje zapreminske mase očvrsllog, prirodno vlažnog betona

Zapreminska masa očvrsllog, prirodno vlažnog betona je izračunata prema izrazu:

$$\gamma_{b,pv} = \frac{m_{b,pv}}{V_b}$$

gde su:

- $m_{b,pv}$  – masa prirodno vlažnog betonskog uzorka (kg)
- $V_b$  – zapremina uzorka ( $m^3$ )
- $\gamma_{b,pv}$  – zapreminska masa prirodno vlažnog betona ( $kg/m^3$ )

#### A. Beton sa rečnim agregatom

*Tabela 23 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrsllog betona NPC1*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [ $kg/m^3$ ]
NPC1/1	7,749		
NPC1/2	7,720	7,713	2285
NPC1/3	7,713		

*Tabela 24 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrsllog betona NPC2*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [ $kg/m^3$ ]
NPC2/1	7,880		
NPC2/2	7,965	7,937	2352
NPC2/3	7,966		

*Tabela 25 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrsllog betona NMC1*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [ $kg/m^3$ ]
NMC1/1	7,682		
NMC1/2	7,649	7,710	2284
NMC1/3	7,798		

*Tabela 26 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrsllog betona NMC2*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [ $kg/m^3$ ]
NMC2/1	7,882		
NMC2/2	7,880	7,900	2341
NMC2/3	7,937		

## B. Beton sa recikliranim agregatom

*Tabela 27 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrslog betona RPC1*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
RPC1/1	7,413		
RPC1/2	7,503	7,467	2212
RPC1/3	7,485		

*Tabela 28 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrslog betona RPC2*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
RPC2/1	7,750		
RPC2/2	7,756	7,741	2294
RPC2/3	7,718		

*Tabela 29 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrslog betona NMC1*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
RMC1/1	7,512		
RMC1/2	7,478	7,502	2223
RMC1/3	7,516		

*Tabela 30 – Zapreminska masa prirodno vlažnog očvrslog betona NMC2*

Oznaka betona	$m_{b,pv}$ [kg]	$m_{b,pv,sr}$ [kg]	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
RMC2/1	7,692		
RMC2/2	7,692	7,678	2275
RMC2/3	7,650		



## PRILOG 8

### Određivanje čvrstoće pri pritisku (SRPS EN 12390-3)

Čvrstoća pri pritisku je sračunata prema izrazu:

$$f_c = \frac{P}{A} \cdot 10^3$$

gde su:

- $f_c$  – čvrstoća pri pritisku (MPa)
- P – sila loma (kN)
- A – površina betonskog tela na koju deluje sila (mm<sup>2</sup>)

#### A. Beton sa rečnim agregatom

##### A.1. Beton NPC1

*Tabela 31 – Čvrstoća pri pritisku betona NPC1 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)*

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	$f_c$ [MPa]	$f_{c,sr,15}$ [MPa]	$f_{c,sr,20}$ [MPa]
NPC1/1	150,6	150,3	150,1	7,840	2308	1131,4	50,0		
NPC1/2	150,7	149,9	150,0	7,834	2312	1093,7	48,4	<b>48,8</b>	<b>46,3</b>
NPC1/3	151,4	149,9	150,4	7,871	2307	1085,7	47,9		

*Tabela 32 – Čvrstoća pri pritisku betona NPC1 nakon 3 meseca držanja u rastvoru*

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	$f_c$ [MPa]	$f_{c,sr}$ [MPa]	$f_{c,sr,20}$ [MPa]
ENPC1/1	101,4	98,9	1,805	2259	429,9	53,2		
ENPC1/2	101,4	99,1	1,803	2252	416,4	51,6	<b>53,3</b>	<b>54,4</b>
ENPC1/3	102,0	99,6	1,818	2233	450,9	55,2		
NNPC1/1	99,2	100,1	1,770	2290	430,4	55,8		
NNPC1/2	99,0	100,2	1,774	2301	404,6	52,6	<b>54,8</b>	<b>55,8</b>
NNPC1/3	99,0	100,7	1,789	2307	430,4	55,9		
MNPC1/1	99,2	99,2	1,770	2312	423,7	54,9		
MNPC1/2	99,4	100,6	1,774	2276	440,5	56,9	<b>55,2</b>	<b>56,3</b>
MNPC1/3	99,2	99,0	1,789	2341	415,2	53,8		

*Tabela 33 – Čvrstoća pri pritisku betona NPC1 nakon 6 meseci držanja u rastvoru*

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	$f_c$ [MPa]	$f_{c,sr}$ [MPa]	$f_{c,sr,20}$ [MPa]
ENPC1/1	98,9	100,0	1,762	2295	394,0	51,3		
ENPC1/2	98,6	100,3	1,783	2329	422,5	55,3	<b>54,0</b>	<b>55,1</b>
ENPC1/3	98,7	98,8	1,744	2308	424,5	55,5		
NNPC1/1	101,7	99,8	1,802	2223	297,6	36,6		
NNPC1/2	100,1	99,1	1,769	2268	358,6	45,6	<b>42,1</b>	<b>42,9</b>
NNPC1/3	101,6	99,1	1,787	2223	357,3	44,1		
MNPC1/1	103,0	99,5	1,820	2197	424,0	50,9		
MNPC1/2	99,8	99,1	1,779	2299	411,6	52,7	<b>51,3</b>	<b>52,3</b>
MNPC1/3	102,5	98,9	1,822	2234	414,1	50,2		

## A.2. Beton NPC2

Tabela 34 – Čvrstoća pri pritisku betona NPC2 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,15</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
NPC2/1	149,9	151,8	149,8	7,976	2340	1731,8	76,1		
NPC2/2	150,1	151,1	149,9	7,960	2343	1724,0	76,1	<b>76,3</b>	<b>72,5</b>
NPC2/3	150,0	151,1	149,7	7,976	2351	1737,2	76,7		

Tabela 35 – Čvrstoća pri pritisku betona NPC2 nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ENPC2/1	99,1	99,7	1,767	2324	631,1	81,9		
ENPC2/2	98,6	99,7	1,789	2350	528,9	69,3	<b>77,7</b>	<b>79,3</b>
ENPC2/3	99,1	99,5	1,806	2354	632,2	82,0		
NNPC2/1	99,2	98,5	1,743	2293	596,2	77,2		
NNPC2/2	98,7	101,8	1,859	2388	621,9	81,3	<b>79,1</b>	<b>80,7</b>
NNPC2/3	98,9	98,9	1,810	2381	605,6	78,8		
MNPC2/1	99,6	101,1	1,846	2346	580,1	74,5		
MNPC2/2	99,1	98,9	1,815	2380	624,0	80,9	<b>79,5</b>	<b>81,1</b>
MNPC2/3	98,8	98,1	1,793	2383	636,2	83,0		

Tabela 36 – Čvrstoća pri pritisku betona NPC2 nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ENPC2/1	99,1	100,5	1,823	2355	667,1	86,6		
ENPC2/2	99,1	99,4	1,790	2336	685,1	88,9	<b>86,2</b>	<b>87,9</b>
ENPC2/3	98,8	100,1	1,832	2390	635,1	82,9		
NNPC2/1	99,0	99,4	1,796	2351	593,1	77,1		
NNPC2/2	99,0	99,4	1,813	2371	599,4	77,9	<b>78,2</b>	<b>79,7</b>
NNPC2/3	99,1	99,8	1,819	2363	613,2	79,5		
MNPC2/1	99,3	100,4	1,837	2364	612,7	79,2		
MNPC2/2	98,8	100,5	1,822	2364	500,1	65,2	<b>70,1</b>	<b>71,5</b>
MNPC2/3	99,1	100,8	1,837	2367	508,6	66,0		

## A.3. Beton NMC1

Tabela 37 – Čvrstoća pri pritisku betona NMC1 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,15</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
NMC1/1	149,6	149,9	149,7	7,757	2311	761,3	34,0		
NMC1/2	150,1	150,1	149,8	7,787	2308	755,9	33,6	<b>33,4</b>	<b>31,8</b>
NMC1/3	149,9	151,3	149,9	7,786	2291	743,0	32,8		

Tabela 38 – Čvrstoća pri pritisku betona NMC1 nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ENMC1/1	99,2	100,3	1,792	2314	343,6	44,5		
ENMC1/2	99,1	99,1	1,756	2298	356,8	46,3	<b>44,4</b>	<b>45,3</b>
ENMC1/3	98,9	98,8	1,763	2327	326,4	42,6		
NNMC1/1	99,2	98,9	1,742	2278	325,8	42,1		
NNMC1/2	98,7	98,5	1,745	2317	330,9	43,3	<b>42,6</b>	<b>43,4</b>
NNMC1/3	99,0	100,2	1,761	2282	325,5	42,3		
MNMC1/1	99,1	95,4	1,681	2284	335,2	43,5		
MNMC1/2	98,8	97,5	1,715	2296	303,2	39,6	<b>42,4</b>	<b>43,3</b>
MNMC1/3	98,8	97,1	1,729	2323	338,7	44,2		

Tabela 39 – Čvrstoća pri pritisku betona NMC1 nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ENMC1/1	99,0	96,5	1,714	2308	345,8	44,9		
ENMC1/2	98,9	95,5	1,710	2331	346,9	45,2	<b>45,5</b>	<b>46,4</b>
ENMC1/3	98,9	98,1	1,745	2316	357,3	46,5		
NNMC1/1	99,9	99,7	1,763	2258	356,8	45,6		
NNMC1/2	98,9	99,1	1,758	2308	351,8	45,8	<b>45,2</b>	<b>46,1</b>
NNMC1/3	99,2	100,9	1,775	2275	341,0	44,1		
MNMC1/1	99,1	100,3	1,778	2300	324,6	42,1		
MNMC1/2	99,1	99,8	1,781	2315	342,2	44,4	<b>41,7</b>	<b>42,5</b>
MNMC1/3	99,0	99,6	1,751	2284	297,4	38,6		

#### A.4. Beton NMC2

Tabela 40 – Čvrstoća pri pritisku betona NMC2 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,15</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
NMC2/1	149,7	150,6	149,9	7,979	2361	1280,9	56,8		
NMC2/2	150,1	150,9	149,8	7,886	2324	1309,7	57,8	<b>55,6</b>	<b>52,8</b>
NMC2/3	149,7	151,3	150,0	7,947	2339	1183,4	52,2		

Tabela 41 – Čvrstoća pri pritisku betona NMC2 nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap. masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ENMC2/1	98,7	99,0	1,787	2358	530,3	69,3		
ENMC2/2	99,1	99,8	1,791	2329	525,7	68,3	<b>68,6</b>	<b>70,0</b>
ENMC2/3	98,7	99,4	1,796	2361	521,9	68,2		
NNMC2/1	99,0	99,1	1,777	2329	470,5	61,1		
NNMC2/2	98,5	100,0	1,803	2366	488,1	64,0	<b>61,4</b>	<b>62,6</b>
NNMC2/3	99,2	99,2	1,783	2328	455,8	59,0		
MNMC2/1	99,0	99,8	1,800	2345	605,5	78,7		
MNMC2/2	99,0	99,3	1,789	2342	543,5	70,7	<b>74,5</b>	<b>76,0</b>
MNMC2/3	98,8	101,5	1,821	2344	568,5	74,3		

Tabela 42 – Čvrstoća pri pritisku betona NMC2 nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ENMC2/1	98,8	100,5	1,806	2343	547,8	71,4		
ENMC2/2	99,1	99,8	1,789	2325	551,2	71,5	<b>70,0</b>	<b>71,4</b>
ENMC2/3	99,0	99,5	1,797	2345	516,3	67,1		
NNMC2/1	98,8	101,9	1,832	2349	482,3	63,0		
NNMC2/2	99,6	101,2	1,806	2293	504,8	64,9	<b>63,4</b>	<b>64,7</b>
NNMC2/3	99,1	103,1	1,853	2334	481,3	62,5		
MNMC2/1	99,0	101,7	1,844	2359	601,6	78,3		
MNMC2/2	98,9	101,4	1,848	2374	564,0	73,5	<b>73,2</b>	<b>74,7</b>
MNMC2/3	99,4	102,0	1,842	2330	527,0	68,0		

## B. Beton sa recikliranim agregatom

### B.1. Beton RPC1

Tabela 43 – Čvrstoća pri pritisku betona RPC1 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,15</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
RPC1/1	150,0	150,5	149,9	7,625	2255	1041,2	46,1		
RPC1/2	149,9	149,4	150,4	7,601	2258	1038,4	46,4	<b>45,4</b>	<b>43,1</b>
RPC1/3	149,9	150,3	150,0	7,604	2250	981,9	43,6		

Tabela 44 – Čvrstoća pri pritisku betona RPC1 nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERPC1/1	98,8	101,3	1,765	2273	407,6	53,2		
ERPC1/2	99,2	100,2	1,757	2270	406,9	52,7	<b>52,5</b>	<b>53,5</b>
ERPC1/3	99,8	101,6	1,759	2212	403,4	51,6		
NRPC1/1	99,1	99,6	1,754	2285	378,8	49,1		
NRPC1/2	99,6	100,4	1,751	2242	383,4	49,3	<b>48,2</b>	<b>49,1</b>
NRPC1/3	99,1	99,9	1,723	2239	355,5	46,1		
MRPC1/1	98,4	99,0	1,727	2295	414,2	54,5		
MRPC1/2	99,4	99,7	1,719	2224	404,9	52,2	<b>53,7</b>	<b>54,8</b>
MRPC1/3	99,2	100,1	1,744	2255	420,2	54,4		

Tabela 45 – Čvrstoća pri pritisku betona RPC1 nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERPC1/1	99,0	101,3	1,753	2248	402,5	52,3		
ERPC1/2	98,9	101,0	1,761	2273	424,8	55,4	<b>53,4</b>	<b>54,5</b>
ERPC1/3	99,5	101,0	1,762	2247	408,7	52,6		
NRPC1/1	99,3	101,5	1,781	2264	248,3	32,1		
NRPC1/2	99,4	99,1	1,742	2268	298,9	38,6	<b>35,2</b>	<b>35,9</b>
NRPC1/3	99,4	101,2	1,749	2228	270,6	34,9		
MRPC1/1	99,5	100,9	1,768	2255	390,7	50,3		
MRPC1/2	99,8	102,4	1,791	2238	362,9	46,4	<b>48,4</b>	<b>49,3</b>
MRPC1/3	99,2	100,0	1,738	2250	373,4	48,3		

## B.2. Beton RPC2

Tabela 46 – Čvrstoća pri pritisku betona RPC2 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,15</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
RPC2/1	150,4	153,3	149,9	7,877	2279	1512,7	65,6		
RPC2/2	149,8	152,9	149,9	7,875	2294	1448,9	63,3	65,1	61,8
RPC2/3	149,8	153,5	149,9	7,868	2283	1525,0	66,3		

Tabela 47 – Čvrstoća pri pritisku betona RPC2 nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERPC2/1	98,9	100,9	1,762	2277	608,3	79,3		
ERPC2/2	98,8	99,9	1,766	2308	520,8	68,0	76,5	78,0
ERPC2/3	99,0	100,3	1,760	2283	631,6	82,1		
NRPC2/1	99,4	98,4	1,723	2257	613,5	79,1		
NRPC2/2	98,8	99,2	1,736	2286	607,1	79,3	77,7	79,3
NRPC2/3	98,7	99,2	1,744	2298	572,8	74,9		
MRPC2/1	99,0	99,2	1,756	2303	561,7	73,1		
MRPC2/2	99,1	99,7	1,758	2284	594,2	77,0	75,6	77,1
MRPC2/3	98,6	99,3	1,733	2286	585,4	76,7		

Tabela 48 – Čvrstoća pri pritisku betona RPC2 nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERPC2/1	98,7	99,0	1,764	2328	635,9	83,1		
ERPC2/2	99,2	98,3	1,741	2294	602,9	78,1	78,1	79,6
ERPC2/3	99,3	99,9	1,765	2283	565,5	73,1		
NRPC2/1	99,2	100,8	1,787	2294	598,5	77,4		
NRPC2/2	99,0	100,6	1,786	2305	527	68,5	73,3	74,8
NRPC2/3	99,2	99,3	1,769	2307	571,4	74,0		
MRPC2/1	98,9	100,5	1,770	2295	586,5	76,4		
MRPC2/2	99,1	100,1	1,757	2276	545,7	70,7	72,0	73,4
MRPC2/3	99,1	100,1	1,769	2290	531,1	68,8		

## B.3. Beton RMC1

Tabela 49 – Čvrstoća pri pritisku betona RMC1 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,15</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
RMC1/1	149,7	151,5	150,1	7,593	2231	745,8	32,9		
RMC1/2	149,9	150,8	149,8	7,589	2241	729,4	32,3	32,9	31,3
RMC1/3	150,1	152,9	149,8	7,659	2227	770,2	33,6		

Tabela 50 – Čvrstoća pri pritisku betona RMC1 nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERMC1/1	99,1	99,2	1,693	2216	233	30,3		
ERMC1/2	99,3	98,5	1,699	2229	334,1	43,2	<b>38,9</b>	<b>39,7</b>
ERMC1/3	99,5	100,6	1,735	2220	337,1	43,4		
NRMC1/1	98,9	98,7	1,704	2247	331,8	43,2		
NRMC1/2	99,1	97,8	1,683	2234	326,8	42,4	<b>42,4</b>	<b>43,2</b>
NRMC1/3	99,2	99,9	1,723	2233	321,1	41,6		
MRMC1/1	99,0	98,1	1,684	2231	310,1	40,3		
MRMC1/2	99,1	98,9	1,704	2236	322,4	41,8	<b>40,8</b>	<b>41,6</b>
MRMC1/3	98,6	99,1	1,675	2216	307,3	40,3		

Tabela 51 – Čvrstoća pri pritisku betona RMC1 nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERMC1/1	99,0	100,1	1,727	2244	329,5	42,8		
ERMC1/2	98,7	100,9	1,754	2272	349,1	45,6	<b>45,0</b>	<b>45,9</b>
ERMC1/3	98,7	99,1	1,725	2275	355,0	46,4		
NRMC1/1	98,7	100,3	1,733	2261	355,0	46,5		
NRMC1/2	99,0	101,4	1,738	2230	351,6	45,7	<b>45,8</b>	<b>46,7</b>
NRMC1/3	99,1	98,9	1,711	2245	347,8	45,2		
MRMC1/1	99,2	100,3	1,723	2226	324,4	42,0		
MRMC1/2	99,2	100,1	1,730	2236	325,5	42,1	<b>41,7</b>	<b>42,5</b>
MRMC1/3	99,3	99,7	1,711	2217	317,5	41,0		

#### B.4. Beton RMC2

Tabela 52 – Čvrstoća pri pritisku betona RMC2 na 28 dana (pre potapanja u rastvor)

Oznaka uzorka	Dužina [mm]	Širina [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,15</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
RMC2/1	149,8	152,5	149,9	7,775	2270	1328,9	58,2		
RMC2/2	149,8	151,1	149,8	7,709	2273	1256,6	55,5	<b>57,0</b>	<b>54,1</b>
RMC2/3	150,0	152,6	149,8	7,789	2273	1310,2	57,3		

Tabela 53 – Čvrstoća pri pritisku betona RMC2 nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERMC2/1	99,3	100,4	1,751	2254	529,4	68,4		
ERMC2/2	98,8	99,6	1,756	2299	544,0	71,0	<b>69,8</b>	<b>71,2</b>
ERMC2/3	98,8	100,2	1,759	2289	536,8	70,0		
NRMC2/1	98,8	100,3	1,749	2275	489,4	63,8		
NRMC2/2	98,9	101,3	1,763	2267	505,4	65,8	<b>64,4</b>	<b>65,7</b>
NRMC2/3	99,3	101,2	1,760	2247	491,6	63,5		
MRMC2/1	99,2	100,3	1,747	2253	538,6	69,7		
MRMC2/2	99,4	100,7	1,749	2239	497,4	64,1	<b>66,5</b>	<b>67,8</b>
MRMC2/3	98,7	99,6	1,739	2282	502,5	65,7		

Tabela 54 – Čvrstoća pri pritisku betona RMC2 nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Oznaka uzorka	Ø [mm]	Visina [mm]	Masa [kg]	Zap, masa [kg/m <sup>3</sup> ]	P [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c,sr</sub> [MPa]	f <sub>c,sr,20</sub> [MPa]
ERMC2/1	99,1	100,2	1,763	2283	562,1	72,9		
ERMC2/2	98,8	100,0	1,753	2291	548,3	71,6	<b>72,9</b>	<b>74,4</b>
ERMC2/3	99,1	100,2	1,754	2272	572,6	74,3		
NRMC2/1	99,1	100,6	1,749	2255	514,7	66,8		
NRMC2/2	98,4	100,0	1,739	2288	533,3	70,1	<b>66,4</b>	<b>67,7</b>
NRMC2/3	99,2	100,0	1,752	2269	479,6	62,1		
MRMC2/1	99,1	99,9	1,742	2264	500,9	65,0		
MRMC2/2	99,3	99,9	1,761	2278	508,2	65,7	<b>66,2</b>	<b>67,5</b>
MRMC2/3	99,2	100,5	1,770	2278	524,4	67,9		

## PRILOG 9

### Određivanje promene dužine betonskih uzoraka

#### A. Promena dužine betonskih uzoraka sa rečnim agregatom (UNI 11307)

##### A.1. Promena dužine betonskih uzoraka NPC1

Tabela 55 – Promena dužine betonskih uzoraka ENPC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u sulfatnom rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
16.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
23.3.2015	7	1	0,021	0,016
		2	0,014	
		3	0,013	
30.3.2015	14	1	0,045	0,026
		2	0,010	
		3	0,023	
6.4.2015	21	1	0,032	0,033
		2	0,029	
		3	0,037	
13.4.2015	28	1	0,012	0,031
		2	0,022	
		3	0,060	
20.4.2015	35	1	0,010	0,031
		2	0,022	
		3	0,060	
27.4.2015	42	1	0,031	0,030
		2	0,022	
		3	0,038	
4.5.2015	49	1	0,046	0,031
		2	0,026	
		3	0,020	
11.5.2015	56	1	0,028	0,031
		2	0,039	
		3	0,027	
18.5.2015	63	1	0,025	0,031
		2	0,005	
		3	0,064	



Tabela 56 – Promena dužine betonskih uzoraka ENPC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
25.5.2015	70	1	0,028	0,033
		2	0,033	
		3	0,037	
1.6.2015	77	1	0,054	0,031
		2	0,015	
		3	0,024	
8.6.2015	84	1	0,025	0,034
		2	0,056	
		3	0,020	
15.6.2015	91	1	0,015	0,031
		2	0,012	
		3	0,066	
22.6.2015	98	1	0,029	0,031
		2	0,034	
		3	0,031	
29.6.2015	105	1	0,036	0,032
		2	0,025	
		3	0,036	
6.7.2015	112	1	0,031	0,033
		2	0,033	
		3	0,034	
13.7.2015	119	1	0,031	0,034
		2	0,014	
		3	0,056	
20.7.2015	126	1	0,052	0,037
		2	0,000	
		3	0,058	
27.7.2015	133	1	0,034	0,038
		2	0,044	
		3	0,036	
3.8.2015	140	1	0,022	0,039
		2	0,030	
		3	0,065	
10.8.2015	147	1	0,041	0,038
		2	0,032	
		3	0,042	
17.8.2015	154	1	0,041	0,040
		2	0,038	
		3	0,040	
24.8.2015	161	1	0,045	0,042
		2	0,048	
		3	0,032	

Tabela 57 – Promena dužine betonskih uzoraka ENPC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
31.8.2015	168	1	0,014	0,042
		2	0,020	
		3	0,093	
7.9.2015	175	1	0,020	0,044
		2	0,036	
		3	0,075	
14.9.2015	182	1	0,031	0,044
		2	0,043	
		3	0,057	

Tabela 58 – Promena dužine betonskih uzoraka NNPC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
17.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
24.3.2015	7	1	0,068	0,069
		2	0,052	
		3	0,088	
31.3.2015	14	1	0,100	0,087
		2	0,090	
		3	0,070	
7.4.2015	21	1	0,104	0,089
		2	0,084	
		3	0,080	
14.4.2015	28	1	0,095	0,090
		2	0,094	
		3	0,082	
21.4.2015	35	1	0,122	0,099
		2	0,078	
		3	0,098	
28.4.2015	42	1	0,112	0,103
		2	0,098	
		3	0,100	
5.5.2015	49	1	0,121	0,122
		2	0,115	
		3	0,131	
12.5.2015	56	1	0,128	0,149
		2	0,142	
		3	0,178	

Tabela 59 – Ekspanzija uzoraka NNPC1- nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
14.4.2015	28	1	0,095	0,090
		2	0,094	
		3	0,082	
21.4.2015	35	1	0,122	0,099
		2	0,078	
		3	0,098	
28.4.2015	42	1	0,112	0,103
		2	0,098	
		3	0,100	
5.5.2015	49	1	0,121	0,122
		2	0,115	
		3	0,131	
12.5.2015	56	1	0,128	0,149
		2	0,142	
		3	0,178	
19.5.2015	63	1	0,154	0,152
		2	0,15	
		3	0,152	
26.5.2015	70	1	0,152	0,161
		2	0,148	
		3	0,182	
2.6.2015	77	1	0,159	0,161
		2	0,166	
		3	0,158	
9.6.2015	84	1	0,158	0,160
		2	0,163	
		3	0,16	
16.6.2015	91	1	0,142	0,168
		2	0,178	
		3	0,184	
23.6.2015	98	1	0,171	0,169
		2	0,165	
		3	0,171	
30.6.2015	105	1	0,173	0,176
		2	0,176	
		3	0,178	
7.7.2015	112	1	0,174	0,179
		2	0,173	
		3	0,190	
14.7.2015	119	1	0,180	0,177
		2	0,170	
		3	0,180	

Tabela 60 – Promena dužine betonskih uzoraka NNPC1- nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
21.7.2015	126	1	0,174	0,178
		2	0,184	
		3	0,176	
28.7.2015	133	1	0,182	0,180
		2	0,187	
		3	0,171	
4.8.2015	140	1	0,184	0,187
		2	0,186	
		3	0,190	
11.8.2015	147	1	0,198	0,198
		2	0,205	
		3	0,190	
18.8.2015	154	1	0,214	0,207
		2	0,209	
		3	0,197	
25.8.2015	161	1	0,208	0,206
		2	0,180	
		3	0,230	
1.9.2015	168	1	0,205	0,211
		2	0,207	
		3	0,221	
8.9.2015	175	1	0,207	0,219
		2	0,225	
		3	0,224	
15.9.2015	182	1	0,205	0,225
		2	0,226	
		3	0,245	

Tabela 61 – Promena dužine betonskih uzoraka MNPC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
18.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
25.3.2015	7	1	0,068	0,041
		2	0,044	
		3	0,010	
1.4.2015	14	1	0,084	0,057
		2	0,076	
		3	0,010	

Tabela 62 – Promena dužine betonskih uzoraka MNPC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
8.4.2015	21	1	0,087	0,070
		2	0,077	
		3	0,045	
15.4.2015	28	1	0,074	0,086
		2	0,092	
		3	0,091	
22.4.2015	35	1	0,144	0,103
		2	0,134	
		3	0,032	
29.4.2015	42	1	0,144	0,105
		2	0,110	
		3	0,062	
6.5.2015	49	1	0,164	0,117
		2	0,134	
		3	0,052	
13.5.2015	56	1	0,178	0,129
		2	0,150	
		3	0,058	
20.5.2015	63	1	0,146	0,146
		2	0,150	
		3	0,141	
27.5.2015	70	1	0,184	0,160
		2	0,190	
		3	0,106	
3.6.2015	77	1	0,168	0,162
		2	0,161	
		3	0,158	
10.6.2015	84	1	0,170	0,160
		2	0,170	
		3	0,141	
17.6.2015	91	1	0,156	0,161
		2	0,166	
		3	0,161	
24.6.2015	98	1	0,188	0,163
		2	0,204	
		3	0,098	
1.7.2015	105	1	0,175	0,160
		2	0,167	
		3	0,139	

Tabela 63 – Promena dužine betonskih uzoraka MNPC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
8.7.2015	112	1	0,152	0,161
		2	0,167	
		3	0,165	
15.7.2015	119	1	0,184	0,162
		2	0,160	
		3	0,142	
22.7.2015	126	1	0,176	0,158
		2	0,176	
		3	0,122	
29.7.2015	133	1	0,164	0,155
		2	0,194	
		3	0,108	
05.8.2015	140	1	0,204	0,159
		2	0,188	
		3	0,086	
12.8.2015	147	1	0,179	0,166
		2	0,187	
		3	0,132	
19.8.2015	154	1	0,198	0,165
		2	0,190	
		3	0,106	
26.8.2015	161	1	0,178	0,169
		2	0,178	
		3	0,151	
2.9.2015	168	1	0,204	0,174
		2	0,190	
		3	0,128	
9.9.2015	175	1	0,204	0,172
		2	0,204	
		3	0,108	
16.9.2015	182	1	0,218	0,183
		2	0,216	
		3	0,116	

## A.2. Promena dužine betonskih uzoraka NPC2

Tabela 64 – Promena dužine betonskih uzoraka ENPC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
23.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
30.3.2015	7	1	0,026	0,016
		2	0,014	
		3	0,008	
6.4.2015	14	1	0,025	0,021
		2	0,021	
		3	0,018	
13.4.2015	21	1	0,034	0,023
		2	0,002	
		3	0,034	
20.4.2015	28	1	0,034	0,025
		2	0,016	
		3	0,024	
27.4.2015	35	1	0,050	0,032
		2	0,012	
		3	0,034	
4.5.2015	42	1	0,051	0,036
		2	0,032	
		3	0,024	
11.5.2015	49	1	0,028	0,037
		2	0,037	
		3	0,047	
18.5.2015	56	1	0,034	0,039
		2	0,039	
		3	0,043	
25.5.2015	63	1	0,043	0,040
		2	0,041	
		3	0,037	
1.6.2015	70	1	0,056	0,045
		2	0,036	
		3	0,042	
8.6.2015	77	1	0,047	0,050
		2	0,049	
		3	0,055	
15.6.2015	84	1	0,070	0,053
		2	0,050	
		3	0,038	

Tabela 65 – Promena dužine betonskih uzoraka ENPC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
22.6.2015	91	1	0,064	0,051
		2	0,050	
		3	0,040	
29.6.2015	98	1	0,063	0,050
		2	0,052	
		3	0,035	
6.7.2015	105	1	0,052	0,051
		2	0,053	
		3	0,049	
13.7.2015	112	1	0,059	0,051
		2	0,052	
		3	0,042	
20.7.2015	119	1	0,061	0,052
		2	0,045	
		3	0,051	
27.7.2015	126	1	0,059	0,053
		2	0,053	
		3	0,048	
3.8.2015	133	1	0,063	0,055
		2	0,043	
		3	0,058	
10.8.2015	140	1	0,064	0,056
		2	0,052	
		3	0,051	
17.8.2015	147	1	0,061	0,058
		2	0,053	
		3	0,059	
24.8.2015	154	1	0,062	0,060
		2	0,056	
		3	0,062	
31.08.2015	161	1	0,073	0,063
		2	0,064	
		3	0,053	
7.9.2015	168	1	0,064	0,064
		2	0,059	
		3	0,068	
14.9.2015	175	1	0,071	0,066
		2	0,061	
		3	0,065	
21.9.2015	182	1	0,078	0,074
		2	0,064	
		3	0,080	



Tabela 66 – Promena dužine betonskih uzoraka NNPC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
24.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
31.3.2015	7	1	0,050	0,041
		2	0,048	
		3	0,026	
7.4.2015	14	1	0,060	0,051
		2	0,058	
		3	0,034	
14.4.2015	21	1	0,064	0,060
		2	0,059	
		3	0,057	
21.4.2015	28	1	0,078	0,073
		2	0,084	
		3	0,056	
28.4.2015	35	1	0,087	0,087
		2	0,079	
		3	0,094	
5.5.2015	42	1	0,106	0,102
		2	0,098	
		3	0,103	
12.5.2015	49	1	0,132	0,116
		2	0,122	
		3	0,094	
19.5.2015	56	1	0,128	0,119
		2	0,124	
		3	0,106	
26.5.2015	63	1	0,150	0,123
		2	0,120	
		3	0,100	
2.6.2015	70	1	0,131	0,125
		2	0,129	
		3	0,114	
9.6.2015	77	1	0,125	0,122
		2	0,118	
		3	0,122	
16.6.2015	84	1	0,135	0,122
		2	0,134	
		3	0,098	
23.6.2015	91	1	0,124	0,120
		2	0,119	
		3	0,118	

Tabela 67 – Promena dužine betonskih uzoraka NNPC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
30.6.2015	98	1	0,118	0,120
		2	0,119	
		3	0,122	
7.7.2015	105	1	0,138	0,125
		2	0,138	
		3	0,100	
14.7.2015	112	1	0,144	0,126
		2	0,144	
		3	0,090	
21.7.2015	119	1	0,128	0,129
		2	0,129	
		3	0,129	
28.7.2015	126	1	0,136	0,130
		2	0,126	
		3	0,129	
4.8.2015	133	1	0,140	0,128
		2	0,140	
		3	0,104	
11.8.2015	140	1	0,186	0,131
		2	0,098	
		3	0,110	
18.8.2015	147	1	0,147	0,133
		2	0,129	
		3	0,124	
25.8.2015	154	1	0,164	0,131
		2	0,106	
		3	0,122	
1.9.2015	161	1	0,146	0,130
		2	0,124	
		3	0,120	
8.9.2015	168	1	0,144	0,132
		2	0,138	
		3	0,114	
15.9.2015	175	1	0,148	0,125
		2	0,136	
		3	0,092	
22.9.2015	182	1	0,144	0,129
		2	0,128	
		3	0,114	

Tabela 68 – Promena dužine betonskih uzoraka MNPC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
25.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
1.4.2015	7	1	0,076	0,045
		2	0,042	
		3	0,016	
8.4.2015	14	1	0,082	0,053
		2	0,030	
		3	0,046	
15.4.2015	21	1	0,059	0,059
		2	0,064	
		3	0,054	
22.4.2015	28	1	0,104	0,067
		2	0,056	
		3	0,040	
29.4.2015	35	1	0,082	0,070
		2	0,065	
		3	0,062	
6.5.2015	42	1	0,102	0,077
		2	0,058	
		3	0,072	
13.5.2015	49	1	0,108	0,084
		2	0,088	
		3	0,056	
20.5.2015	56	1	0,118	0,090
		2	0,074	
		3	0,077	
27.5.2015	63	1	0,095	0,093
		2	0,093	
		3	0,091	
3.6.2015	70	1	0,122	0,103
		2	0,120	
		3	0,068	
10.6.2015	77	1	0,106	0,103
		2	0,106	
		3	0,098	
17.6.2015	84	1	0,120	0,102
		2	0,098	
		3	0,088	
24.6.2015	91	1	0,112	0,106
		2	0,096	
		3	0,110	

Tabela 69 – Promena dužine betonskih uzoraka MNPC2-nastavak table

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
1.7.2015	98	1	0,105	0,107
		2	0,116	
		3	0,100	
8.7.2015	105	1	0,125	0,107
		2	0,097	
		3	0,098	
15.7.2015	112	1	0,126	0,108
		2	0,112	
		3	0,085	
22.7.2015	119	1	0,127	0,110
		2	0,100	
		3	0,103	
29.7.2015	126	1	0,128	0,113
		2	0,116	
		3	0,094	
5.8.2015	133	1	0,146	0,116
		2	0,116	
		3	0,086	
12.8.2015	140	1	0,131	0,123
		2	0,119	
		3	0,119	
19.8.2015	147	1	0,148	0,126
		2	0,121	
		3	0,108	
26.8.2015	154	1	0,141	0,127
		2	0,103	
		3	0,136	
2.9.2015	161	1	0,141	0,126
		2	0,126	
		3	0,112	
9.9.2015	168	1	0,129	0,126
		2	0,134	
		3	0,115	
16.9.2015	175	1	0,138	0,128
		2	0,116	
		3	0,129	
23.9.2015	182	1	0,140	0,129
		2	0,149	
		3	0,098	

### A.3. Promena dužine betonskih uzoraka NMC1

Tabela 70 – Promena dužine betonskih uzoraka ENMC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
30.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
6.4.2015	7	1	0,015	0,015
		2	0,006	
		3	0,024	
13.4.2015	14	1	0,024	0,019
		2	0,012	
		3	0,020	
20.4.2015	21	1	0,034	0,023
		2	0,008	
		3	0,028	
27.4.2015	28	1	0,020	0,026
		2	0,002	
		3	0,056	
4.5.2015	35	1	0,019	0,029
		2	0,032	
		3	0,036	
11.5.2015	42	1	0,026	0,026
		2	0,010	
		3	0,043	
18.5.2015	49	1	0,018	0,027
		2	0,018	
		3	0,044	
25.5.2015	56	1	0,014	0,028
		2	0,018	
		3	0,052	
1.6.2015	63	1	0,025	0,027
		2	0,029	
		3	0,026	
8.6.2015	70	1	0,028	0,023
		2	0,036	
		3	0,006	
15.6.2015	77	1	0,008	0,026
		2	0,018	
		3	0,052	
22.6.2015	84	1	0,002	0,023
		2	0,020	
		3	0,046	
29.6.2015	91	1	0,021	0,024
		2	0,018	
		3	0,032	

Tabela 71 – Ekspanzija uzoraka ENMC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
6.7.2015	98	1	0,019	0,026
		2	0,022	
		3	0,036	
13.7.2015	105	1	0,018	0,026
		2	0,014	
		3	0,046	
20.7.2015	112	1	0,000	0,024
		2	0,002	
		3	0,070	
27.7.2015	119	1	0,022	0,027
		2	0,034	
		3	0,024	
3.8.2015	126	1	0,019	0,029
		2	0,026	
		3	0,042	
10.8.2015	133	1	0,010	0,027
		2	0,006	
		3	0,066	
17.8.2015	140	1	0,019	0,029
		2	0,031	
		3	0,037	
24.8.2015	147	1	0,024	0,028
		2	0,012	
		3	0,048	
31.8.2015	154	1	0,042	0,029
		2	0,002	
		3	0,042	
7.9.2015	161	1	0,040	0,029
		2	0,018	
		3	0,028	
14.9.2015	168	1	0,004	0,028
		2	0,026	
		3	0,054	
21.9.2015	175	1	0,031	0,030
		2	0,017	
		3	0,041	
28.9.2015	182	1	0,002	0,031
		2	0,010	
		3	0,080	

Tabela 72 – Promena dužine betonskih uzoraka NNMC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
31.3.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
7.4.2015	7	1	0,013	0,014
		2	0,011	
		3	0,018	
14.4.2015	14	1	0,032	0,026
		2	0,012	
		3	0,034	
21.4.2015	21	1	0,032	0,030
		2	0,028	
		3	0,030	
28.4.2015	28	1	0,048	0,031
		2	0,022	
		3	0,024	
5.5.2015	35	1	0,042	0,031
		2	0,002	
		3	0,050	
12.5.2015	42	1	0,052	0,033
		2	0,019	
		3	0,027	
19.5.2015	49	1	0,046	0,033
		2	0,010	
		3	0,042	
26.5.2015	56	1	0,031	0,032
		2	0,029	
		3	0,036	
2.6.2015	63	1	0,042	0,033
		2	0,029	
		3	0,028	
9.6.2015	70	1	0,045	0,036
		2	0,028	
		3	0,034	
16.6.2015	77	1	0,054	0,037
		2	0,027	
		3	0,029	
23.6.2015	84	1	0,054	0,035
		2	0,021	
		3	0,031	
30.6.2015	91	1	0,041	0,037
		2	0,037	
		3	0,033	

Tabela 73 – Promena dužine betonskih uzoraka NNMC1- nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
7.7.2015	98	1	0,045	0,038
		2	0,018	
		3	0,051	
14.7.2015	105	1	0,066	0,036
		2	0,002	
		3	0,040	
21.7.2015	112	1	0,039	0,039
		2	0,032	
		3	0,046	
28.7.2015	119	1	0,039	0,040
		2	0,041	
		3	0,039	
4.8.2015	126	1	0,048	0,042
		2	0,038	
		3	0,041	
11.8.2015	133	1	0,062	0,049
		2	0,042	
		3	0,043	
18.8.2015	140	1	0,053	0,052
		2	0,051	
		3	0,053	
25.8.2015	147	1	0,049	0,057
		2	0,065	
		3	0,057	
1.9.2015	154	1	0,060	0,061
		2	0,075	
		3	0,049	
8.9.2015	161	1	0,070	0,066
		2	0,074	
		3	0,053	
15.9.2015	168	1	0,058	0,064
		2	0,086	
		3	0,048	
22.9.2015	175	1	0,088	0,067
		2	0,038	
		3	0,074	
29.9.2015	182	1	0,078	0,067
		2	0,065	
		3	0,058	



Tabela 74 – Promena dužine betonskih uzoraka MNMC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
1.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
8.4.2015	7	1	0,044	0,053
		2	0,034	
		3	0,080	
15.4.2015	14	1	0,072	0,058
		2	0,048	
		3	0,054	
22.4.2015	21	1	0,071	0,063
		2	0,048	
		3	0,071	
29.4.2015	28	1	0,041	0,070
		2	0,059	
		3	0,110	
6.5.2015	35	1	0,071	0,072
		2	0,065	
		3	0,081	
13.5.2015	42	1	0,082	0,074
		2	0,068	
		3	0,071	
20.5.2015	49	1	0,084	0,074
		2	0,068	
		3	0,070	
27.5.2015	56	1	0,083	0,076
		2	0,075	
		3	0,069	
3.6.2015	63	1	0,084	0,077
		2	0,079	
		3	0,068	
10.6.2015	70	1	0,092	0,078
		2	0,087	
		3	0,055	
17.6.2015	77	1	0,069	0,076
		2	0,074	
		3	0,086	
24.6.2015	84	1	0,081	0,078
		2	0,087	
		3	0,066	
1.7.2015	91	1	0,071	0,079
		2	0,091	
		3	0,074	

Tabela 75 – Promena dužine betonskih uzoraka MNMC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
8.7.2015	98	1	0,084	0,080
		2	0,083	
		3	0,074	
15.7.2015	105	1	0,082	0,081
		2	0,087	
		3	0,075	
22.7.2015	112	1	0,076	0,083
		2	0,097	
		3	0,077	
29.7.2015	119	1	0,088	0,085
		2	0,093	
		3	0,074	
5.8.2015	126	1	0,095	0,086
		2	0,079	
		3	0,083	
12.8.2015	133	1	0,092	0,089
		2	0,101	
		3	0,073	
19.8.2015	140	1	0,103	0,092
		2	0,086	
		3	0,088	
26.8.2015	147	1	0,086	0,095
		2	0,112	
		3	0,086	
2.9.2015	154	1	0,108	0,098
		2	0,078	
		3	0,107	
9.9.2015	161	1	0,082	0,102
		2	0,074	
		3	0,150	
16.9.2015	168	1	0,100	0,103
		2	0,124	
		3	0,086	
23.9.2015	175	1	0,101	0,109
		2	0,111	
		3	0,114	
30.9.2015	182	1	0,108	0,117
		2	0,124	
		3	0,120	

#### A.4. Promena dužine betonskih uzoraka NMC2

Tabela 76 – Promena dužine betonskih uzoraka ENMC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
6.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
13.4.2015	7	1	0,008	0,008
		2	0,010	
		3	0,006	
20.4.2015	14	1	0,016	0,013
		2	0,010	
		3	0,014	
27.4.2015	21	1	0,014	0,019
		2	0,022	
		3	0,022	
4.5.2015	28	1	0,027	0,022
		2	0,025	
		3	0,015	
11.5.2015	35	1	0,024	0,027
		2	0,038	
		3	0,018	
18.5.2015	42	1	0,035	0,028
		2	0,027	
		3	0,022	
25.5.2015	49	1	0,037	0,029
		2	0,037	
		3	0,012	
1.6.2015	56	1	0,035	0,033
		2	0,036	
		3	0,027	
8.6.2015	63	1	0,008	0,037
		2	0,012	
		3	0,092	
15.6.2015	70	1	0,002	0,039
		2	0,046	
		3	0,068	
22.6.2015	77	1	0,047	0,039
		2	0,036	
		3	0,033	
29.6.2015	84	1	0,045	0,039
		2	0,040	
		3	0,032	
6.7.2015	91	1	0,032	0,040
		2	0,054	
		3	0,034	

Tabela 77 – Promena dužine betonskih uzoraka ENMC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
13.7.2015	98	1	0,038	0,040
		2	0,047	
		3	0,036	
20.7.2015	105	1	0,029	0,040
		2	0,047	
		3	0,045	
27.7.2015	112	1	0,045	0,041
		2	0,038	
		3	0,039	
3.8.2015	119	1	0,052	0,042
		2	0,042	
		3	0,031	
10.8.2015	126	1	0,041	0,043
		2	0,033	
		3	0,054	
17.8.2015	133	1	0,042	0,043
		2	0,039	
		3	0,047	
24.8.2015	140	1	0,058	0,043
		2	0,046	
		3	0,024	
31.8.2015	147	1	0,041	0,044
		2	0,051	
		3	0,039	
7.9.2015	154	1	0,048	0,046
		2	0,031	
		3	0,058	
14.9.2015	161	1	0,061	0,047
		2	0,046	
		3	0,033	
21.9.2015	168	1	0,056	0,047
		2	0,053	
		3	0,031	
28.9.2015	175	1	0,058	0,047
		2	0,070	
		3	0,014	
5.10.2015	182	1	0,068	0,046
		2	0,070	
		3	0,000	

Tabela 78 – Promena dužine betonskih uzoraka NNMC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
7.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
14.4.2015	7	1	0,006	0,008
		2	0,007	
		3	0,011	
21.4.2015	14	1	0,010	0,011
		2	0,018	
		3	0,006	
28.4.2015	21	1	0,012	0,015
		2	0,018	
		3	0,016	
5.5.2015	28	1	0,020	0,020
		2	0,025	
		3	0,016	
12.5.2015	35	1	0,038	0,023
		2	0,028	
		3	0,004	
19.5.2015	42	1	0,026	0,024
		2	0,040	
		3	0,006	
26.5.2015	49	1	0,024	0,025
		2	0,044	
		3	0,006	
2.6.2015	56	1	0,032	0,025
		2	0,038	
		3	0,006	
9.6.2015	63	1	0,018	0,027
		2	0,024	
		3	0,038	
16.6.2015	70	1	0,019	0,027
		2	0,023	
		3	0,038	
23.6.2015	77	1	0,028	0,027
		2	0,022	
		3	0,030	
30.6.2015	84	1	0,028	0,026
		2	0,017	
		3	0,033	
7.7.2015	91	1	0,026	0,027
		2	0,040	
		3	0,016	

Tabela 79 Promena dužine betonskih uzoraka NNMC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
14.7.2015	98	1	0,025	0,026
		2	0,050	
		3	0,002	
21.7.2015	105	1	0,031	0,026
		2	0,023	
		3	0,025	
28.7.2015	112	1	0,040	0,027
		2	0,022	
		3	0,018	
4.8.2015	119	1	0,030	0,027
		2	0,032	
		3	0,018	
11.8.2015	126	1	0,034	0,026
		2	0,038	
		3	0,005	
18.8.2015	133	1	0,025	0,027
		2	0,019	
		3	0,037	
25.8.2015	140	1	0,024	0,028
		2	0,033	
		3	0,027	
1.9.2015	147	1	0,032	0,024
		2	0,029	
		3	0,012	
8.9.2015	154	1	0,032	0,025
		2	0,030	
		3	0,012	
15.9.2015	161	1	0,028	0,025
		2	0,044	
		3	0,002	
22.9.2015	168	1	0,030	0,025
		2	0,025	
		3	0,020	
29.9.2015	175	1	0,034	0,025
		2	0,042	
		3	0,000	
6.10.2015	182	1	0,030	0,025
		2	0,042	
		3	0,002	

Tabela 80 – Promena dužine betonskih uzoraka MNMC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
8.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
15.4.2015	7	1	0,048	0,045
		2	0,044	
		3	0,042	
22.4.2015	14	1	0,061	0,050
		2	0,049	
		3	0,041	
29.4.2015	21	1	0,059	0,052
		2	0,041	
		3	0,057	
6.5.2015	28	1	0,062	0,052
		2	0,048	
		3	0,047	
13.5.2015	35	1	0,082	0,055
		2	0,038	
		3	0,044	
20.5.2015	42	1	0,074	0,056
		2	0,055	
		3	0,039	
27.5.2015	49	1	0,076	0,059
		2	0,074	
		3	0,026	
3.6.2015	56	1	0,094	0,058
		2	0,048	
		3	0,032	
10.6.2015	63	1	0,063	0,059
		2	0,051	
		3	0,063	
17.6.2015	70	1	0,073	0,058
		2	0,049	
		3	0,052	
24.6.2015	77	1	0,069	0,058
		2	0,062	
		3	0,042	
1.7.2015	84	1	0,058	0,056
		2	0,062	
		3	0,049	
8.7.2015	91	1	0,070	0,057
		2	0,066	
		3	0,036	

Tabela 81 – Promena dužine betonskih uzoraka MNMC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
15.7.2015	98	1	0,071	0,059
		2	0,061	
		3	0,044	
22.7.2015	105	1	0,060	0,059
		2	0,048	
		3	0,068	
29.7.2015	112	1	0,076	0,060
		2	0,057	
		3	0,048	
5.8.2015	119	1	0,078	0,062
		2	0,070	
		3	0,038	
12.8.2015	126	1	0,077	0,066
		2	0,058	
		3	0,072	
19.8.2015	133	1	0,085	0,069
		2	0,072	
		3	0,060	
26.8.2015	140	1	0,095	0,072
		2	0,050	
		3	0,079	
2.9.2015	147	1	0,075	0,075
		2	0,071	
		3	0,084	
9.9.2015	154	1	0,094	0,077
		2	0,078	
		3	0,076	
16.9.2015	161	1	0,094	0,083
		2	0,071	
		3	0,095	
23.9.2015	168	1	0,106	0,087
		2	0,083	
		3	0,079	
30.9.2015	175	1	0,123	0,089
		2	0,070	
		3	0,081	
6.10.2015	182	1	0,077	0,091
		2	0,058	
		3	0,072	



## B. Promena dužine betonskih uzoraka sa recikliranim agregatom (UNI 11307)

### B.1. Promena dužine betonskih uzoraka RPC1

Tabela 82 – Promena dužine betonskih uzoraka ERPC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
13.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
20.4.2015	7	1	0,014	0,011
		2	0,014	
		3	0,004	
27.4.2015	14	1	0,018	0,013
		2	0,016	
		3	0,004	
4.5.2015	21	1	0,021	0,018
		2	0,016	
		3	0,018	
11.5.2015	28	1	0,000	0,019
		2	0,020	
		3	0,038	
18.5.2015	35	1	0,008	0,023
		2	0,034	
		3	0,028	
25.5.2015	42	1	0,023	0,020
		2	0,017	
		3	0,020	
1.6.2015	49	1	0,016	0,014
		2	0,010	
		3	0,016	
8.6.2015	56	1	0,002	0,009
		2	0,012	
		3	0,012	
15.6.2015	63	1	0,012	0,010
		2	0,006	
		3	0,013	
22.6.2015	70	1	0,010	0,010
		2	0,008	
		3	0,012	
29.6.2015	77	1	0,000	0,007
		2	0,016	
		3	0,004	
6.7.2015	84	1	0,000	0,008
		2	0,014	
		3	0,010	

Tabela 83 – Promena dužine betonskih uzoraka ERPC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
13.7.2015	91	1	0,004	0,011
		2	0,020	
		3	0,008	
20.7.2015	98	1	0,009	0,012
		2	0,012	
		3	0,014	
27.7.2015	105	1	0,011	0,011
		2	0,008	
		3	0,015	
3.8.2015	112	1	0,009	0,009
		2	0,012	
		3	0,006	
10.8.2015	119	1	0,008	0,009
		2	0,006	
		3	0,012	
17.8.2015	126	1	0,004	0,008
		2	0,010	
		3	0,010	
24.8.2015	133	1	0,021	0,015
		2	0,021	
		3	0,004	
31.8.2015	140	1	0,048	0,020
		2	0,010	
		3	0,002	
7.9.2015	147	1	0,002	0,020
		2	0,032	
		3	0,026	
14.9.2015	154	1	0,028	0,021
		2	0,017	
		3	0,018	
21.9.2015	161	1	0,028	0,021
		2	0,022	
		3	0,013	
28.9.2015	168	1	0,023	0,022
		2	0,018	
		3	0,025	
5.10.2015	175	1	0,021	0,023
		2	0,027	
		3	0,021	
12.10.2015	182	1	0,010	0,023
		2	0,040	
		3	0,018	

Tabela 84 – Promena dužine betonskih uzoraka NRPC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
14.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
21.4.2015	7	1	0,070	0,051
		2	0,050	
		3	0,034	
28.4.2015	14	1	0,066	0,056
		2	0,066	
		3	0,036	
5.5.2015	21	1	0,071	0,066
		2	0,065	
		3	0,062	
12.5.2015	28	1	0,088	0,077
		2	0,124	
		3	0,020	
19.5.2015	35	1	0,106	0,083
		2	0,102	
		3	0,042	
26.5.2015	42	1	0,088	0,080
		2	0,096	
		3	0,056	
2.6.2015	49	1	0,110	0,077
		2	0,092	
		3	0,030	
9.6.2015	56	1	0,108	0,081
		2	0,084	
		3	0,050	
16.6.2015	63	1	0,108	0,087
		2	0,116	
		3	0,036	
23.6.2015	70	1	0,122	0,095
		2	0,126	
		3	0,038	
30.6.2015	77	1	0,105	0,105
		2	0,099	
		3	0,111	
7.7.2015	84	1	0,132	0,117
		2	0,108	
		3	0,110	
14.7.2015	91	1	0,148	0,119
		2	0,090	
		3	0,120	

Tabela 85 – Promena dužine betonskih uzoraka NRPC1- nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
21.7.2015	98	1	0,144	0,128
		2	0,128	
		3	0,113	
28.7.2015	105	1	0,125	0,136
		2	0,142	
		3	0,141	
4.8.2015	112	1	0,192	0,155
		2	0,150	
		3	0,122	
11.8.2015	119	1	0,188	0,162
		2	0,165	
		3	0,134	
18.8.2015	126	1	0,187	0,169
		2	0,175	
		3	0,144	
25.8.2015	133	1	0,196	0,174
		2	0,161	
		3	0,165	
1.9.2015	140	1	0,211	0,180
		2	0,185	
		3	0,144	
8.9.2015	147	1	0,230	0,198
		2	0,195	
		3	0,169	
15.9.2015	154	1	0,264	0,210
		2	0,198	
		3	0,168	
22.9.2015	161	1	0,256	0,227
		2	0,225	
		3	0,200	
29.9.2015	168	1	0,279	0,247
		2	0,252	
		3	0,211	
6.10.2015	175	1	0,291	0,259
		2	0,271	
		3	0,215	
13.10.2015	182	1	0,314	0,267
		2	0,244	
		3	0,242	

Tabela 86 – Promena dužine betonskih uzoraka MRPC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
15.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
22.4.2015	7	1	0,034	0,038
		2	0,024	
		3	0,056	
29.4.2015	14	1	0,044	0,032
		2	0,026	
		3	0,026	
6.5.2015	21	1	0,044	0,035
		2	0,030	
		3	0,032	
13.5.2015	28	1	0,062	0,049
		2	0,042	
		3	0,044	
20.5.2015	35	1	0,062	0,055
		2	0,042	
		3	0,060	
27.5.2015	42	1	0,071	0,058
		2	0,058	
		3	0,045	
3.6.2015	49	1	0,058	0,061
		2	0,060	
		3	0,064	
10.6.2015	56	1	0,062	0,075
		2	0,070	
		3	0,092	
17.6.2015	63	1	0,080	0,077
		2	0,074	
		3	0,078	
24.6.2015	70	1	0,076	0,079
		2	0,086	
		3	0,076	
1.7.2015	77	1	0,092	0,085
		2	0,083	
		3	0,079	
8.7.2015	84	1	0,102	0,095
		2	0,097	
		3	0,087	
15.7.2015	91	1	0,106	0,105
		2	0,098	
		3	0,112	

Tabela 87 – Promena dužine betonskih uzoraka MRPC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
22.7.2015	98	1	0,100	0,109
		2	0,118	
		3	0,110	
29.7.2015	105	1	0,124	0,110
		2	0,114	
		3	0,092	
5.8.2015	112	1	0,121	0,118
		2	0,118	
		3	0,115	
12.8.2015	119	1	0,129	0,125
		2	0,118	
		3	0,128	
19.8.2015	126	1	0,144	0,133
		2	0,132	
		3	0,123	
26.8.2015	133	1	0,145	0,140
		2	0,138	
		3	0,138	
2.9.2015	140	1	0,147	0,151
		2	0,153	
		3	0,152	
9.9.2015	147	1	0,146	0,162
		2	0,144	
		3	0,196	
16.9.2015	154	1	0,146	0,165
		2	0,174	
		3	0,174	
23.9.2015	161	1	0,160	0,164
		2	0,166	
		3	0,166	
30.9.2015	168	1	0,146	0,164
		2	0,166	
		3	0,180	
7.10.2015	175	1	0,154	0,172
		2	0,172	
		3	0,190	
14.10.2015	182	1	0,166	0,179
		2	0,182	
		3	0,190	

## B.2. Promena dužine betonskih uzoraka RPC2

Tabela 88 – Promena dužine betonskih uzoraka ERPC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
20.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
27.4.2015	7	1	0,014	0,008
		2	0,008	
		3	0,002	
4.5.2015	14	1	0,041	0,030
		2	0,018	
		3	0,031	
11.5.2015	21	1	0,042	0,032
		2	0,028	
		3	0,025	
18.5.2015	28	1	0,051	0,040
		2	0,028	
		3	0,041	
25.5.2015	35	1	0,031	0,047
		2	0,057	
		3	0,052	
1.6.2015	42	1	0,051	0,050
		2	0,048	
		3	0,052	
8.6.2015	49	1	0,062	0,060
		2	0,058	
		3	0,061	
15.6.2015	56	1	0,072	0,073
		2	0,064	
		3	0,082	
22.6.2015	63	1	0,078	0,084
		2	0,091	
		3	0,082	
29.6.2015	70	1	0,074	0,089
		2	0,082	
		3	0,110	
6.7.2015	77	1	0,091	0,090
		2	0,086	
		3	0,093	
13.7.2015	84	1	0,081	0,091
		2	0,091	
		3	0,101	
20.7.2015	91	1	0,098	0,090
		2	0,082	
		3	0,090	

Tabela 89 – Promena dužine betonskih uzoraka ERPC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
27.7.2015	98	1	0,079	0,090
		2	0,089	
		3	0,102	
3.8.2015	105	1	0,106	0,090
		2	0,088	
		3	0,076	
10.8.2015	112	1	0,097	0,091
		2	0,091	
		3	0,085	
17.8.2015	119	1	0,108	0,092
		2	0,086	
		3	0,082	
24.8.2015	126	1	0,086	0,092
		2	0,106	
		3	0,084	
31.8.2015	133	1	0,108	0,093
		2	0,092	
		3	0,078	
7.9.2015	140	1	0,108	0,094
		2	0,086	
		3	0,089	
14.9.2015	147	1	0,104	0,095
		2	0,091	
		3	0,089	
21.9.2015	154	1	0,086	0,095
		2	0,098	
		3	0,100	
28.9.2015	161	1	0,100	0,094
		2	0,092	
		3	0,091	
5.10.2015	168	1	0,093	0,095
		2	0,087	
		3	0,104	
12.10.2015	175	1	0,109	0,096
		2	0,083	
		3	0,096	
19.10.2015	182	1	0,104	0,097
		2	0,087	
		3	0,099	



Tabela 90 – Promena dužine betonskih uzoraka NRPC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
21.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
28.4.2015	7	1	0,018	0,010
		2	0,004	
		3	0,008	
5.5.2015	14	1	0,004	0,009
		2	0,000	
		3	0,022	
12.5.2015	21	1	0,011	0,010
		2	0,004	
		3	0,015	
19.5.2015	28	1	0,008	0,012
		2	0,006	
		3	0,022	
26.5.2015	35	1	0,020	0,019
		2	0,017	
		3	0,021	
2.6.2015	42	1	0,028	0,021
		2	0,006	
		3	0,029	
9.6.2015	49	1	0,032	0,031
		2	0,025	
		3	0,035	
16.6.2015	56	1	0,038	0,037
		2	0,026	
		3	0,048	
23.6.2015	63	1	0,046	0,047
		2	0,040	
		3	0,056	
30.6.2015	70	1	0,052	0,051
		2	0,044	
		3	0,058	
7.7.2015	77	1	0,074	0,062
		2	0,048	
		3	0,064	
14.7.2015	84	1	0,067	0,070
		2	0,068	
		3	0,075	
21.7.2015	91	1	0,069	0,072
		2	0,077	
		3	0,071	

Tabela 91 – Promena dužine betonskih uzoraka NRPC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
28.7.2015	98	1	0,074	0,078
		2	0,084	
		3	0,077	
4.8.2015	105	1	0,090	0,086
		2	0,082	
		3	0,086	
11.8.2015	112	1	0,090	0,091
		2	0,090	
		3	0,094	
18.8.2015	119	1	0,120	0,106
		2	0,092	
		3	0,106	
25.8.2015	126	1	0,098	0,095
		2	0,093	
		3	0,094	
1.9.2015	133	1	0,102	0,095
		2	0,092	
		3	0,092	
8.9.2015	140	1	0,096	0,095
		2	0,069	
		3	0,121	
15.9.2015	147	1	0,091	0,096
		2	0,084	
		3	0,114	
22.9.2015	154	1	0,089	0,097
		2	0,093	
		3	0,109	
29.9.2015	161	1	0,092	0,098
		2	0,095	
		3	0,107	
6.10.2015	168	1	0,098	0,106
		2	0,100	
		3	0,121	
13.10.2015	175	1	0,108	0,109
		2	0,095	
		3	0,124	
20.10.2015	182	1	0,114	0,116
		2	0,100	
		3	0,134	

Tabela 92 – Promena dužine betonskih uzoraka MRPC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
22.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
29.4.2015	7	1	0,021	0,018
		2	0,011	
		3	0,022	
6.5.2015	14	1	0,028	0,028
		2	0,024	
		3	0,032	
13.5.2015	21	1	0,036	0,028
		2	0,044	
		3	0,004	
20.5.2015	28	1	0,048	0,037
		2	0,052	
		3	0,012	
27.5.2015	35	1	0,052	0,042
		2	0,042	
		3	0,031	
3.6.2015	42	1	0,046	0,046
		2	0,044	
		3	0,048	
10.6.2015	49	1	0,066	0,049
		2	0,058	
		3	0,022	
17.6.2015	56	1	0,094	0,059
		2	0,044	
		3	0,038	
24.6.2015	63	1	0,068	0,065
		2	0,076	
		3	0,051	
1.7.2015	70	1	0,094	0,078
		2	0,062	
		3	0,078	
8.7.2015	77	1	0,085	0,089
		2	0,090	
		3	0,092	
15.7.2015	84	1	0,122	0,099
		2	0,060	
		3	0,116	
22.7.2015	91	1	0,105	0,101
		2	0,091	
		3	0,108	

Tabela 93 – Promena dužine betonskih uzoraka MRPC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
29.7.2015	98	1	0,117	0,105
		2	0,096	
		3	0,101	
5.8.2015	105	1	0,109	0,106
		2	0,099	
		3	0,110	
12.8.2015	112	1	0,110	0,107
		2	0,104	
		3	0,106	
19.8.2015	119	1	0,140	0,107
		2	0,094	
		3	0,086	
26.8.2015	126	1	0,119	0,106
		2	0,098	
		3	0,100	
2.9.2015	133	1	0,091	0,113
		2	0,113	
		3	0,134	
9.9.2015	140	1	0,121	0,116
		2	0,109	
		3	0,117	
16.9.2015	147	1	0,121	0,116
		2	0,102	
		3	0,124	
23.9.2015	154	1	0,126	0,115
		2	0,134	
		3	0,086	
30.9.2015	161	1	0,130	0,124
		2	0,140	
		3	0,103	
7.10.2015	168	1	0,133	0,125
		2	0,131	
		3	0,112	
14.10.2015	175	1	0,140	0,131
		2	0,126	
		3	0,128	
21.10.2015	182	1	0,132	0,134
		2	0,138	
		3	0,132	

### B.3. Promena dužine betonskih uzoraka RMC1

Tabela 94 – Promena dužine betonskih uzoraka ERMC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
27.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
4.5.2015	7	1	0,012	0,011
		2	0,009	
		3	0,011	
11.5.2015	14	1	0,024	0,022
		2	0,002	
		3	0,040	
18.5.2015	21	1	0,041	0,028
		2	0,027	
		3	0,017	
25.5.2015	28	1	0,020	0,030
		2	0,038	
		3	0,032	
1.6.2015	35	1	0,035	0,035
		2	0,042	
		3	0,028	
8.6.2015	42	1	0,045	0,035
		2	0,052	
		3	0,009	
15.6.2015	49	1	0,012	0,035
		2	0,061	
		3	0,032	
22.6.2015	56	1	0,029	0,036
		2	0,036	
		3	0,044	
29.6.2015	63	1	0,039	0,037
		2	0,042	
		3	0,029	
6.7.2015	70	1	0,052	0,038
		2	0,020	
		3	0,042	
13.7.2015	77	1	0,010	0,037
		2	0,062	
		3	0,040	
20.7.2015	84	1	0,004	0,039
		2	0,004	
		3	0,109	
27.7.2015	91	1	0,030	0,042
		2	0,036	
		3	0,060	

Tabela 95 – Promena dužine betonskih uzoraka ERMC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
3.8.2015	98	1	0,020	0,046
		2	0,034	
		3	0,084	
10.8.2015	105	1	0,040	0,045
		2	0,040	
		3	0,056	
17.8.2015	112	1	0,035	0,045
		2	0,058	
		3	0,042	
24.8.2015	119	1	0,064	0,045
		2	0,006	
		3	0,066	
31.8.2015	126	1	0,031	0,050
		2	0,046	
		3	0,073	
7.9.2015	133	1	0,036	0,052
		2	0,062	
		3	0,058	
14.9.2015	140	1	0,052	0,038
		2	0,020	
		3	0,042	
28.9.2015	147	1	0,065	0,054
		2	0,015	
		3	0,081	
5.10.2015	154	1	0,061	0,057
		2	0,052	
		3	0,057	
12.10.2015	161	1	0,081	0,060
		2	0,038	
		3	0,060	
19.10.2015	168	1	0,075	0,060
		2	0,026	
		3	0,079	
26.10.2015	175	1	0,062	0,060
		2	0,038	
		3	0,080	
28.9.2015	182	1	0,081	0,060
		2	0,021	
		3	0,078	

Tabela 96 – Promena dužine betonskih uzoraka NRMC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
28.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
5.5.2015	7	1	0,005	0,009
		2	0,009	
		3	0,012	
12.5.2015	14	1	0,002	0,018
		2	0,026	
		3	0,026	
19.5.2015	21	1	0,044	0,017
		2	0,000	
		3	0,008	
26.5.2015	28	1	0,035	0,019
		2	0,015	
		3	0,008	
2.6.2015	35	1	0,039	0,019
		2	0,015	
		3	0,004	
9.6.2015	42	1	0,031	0,020
		2	0,010	
		3	0,018	
16.6.2015	49	1	0,026	0,020
		2	0,015	
		3	0,018	
23.6.2015	56	1	0,042	0,019
		2	0,008	
		3	0,008	
30.6.2015	63	1	0,025	0,020
		2	0,019	
		3	0,016	
7.7.2015	70	1	0,046	0,022
		2	0,011	
		3	0,008	
14.7.2015	77	1	0,039	0,022
		2	0,010	
		3	0,016	
21.7.2015	84	1	0,032	0,023
		2	0,030	
		3	0,006	
28.7.2015	91	1	0,050	0,024
		2	0,011	
		3	0,010	

Tabela 97 – Ekspanzija uzoraka NRMC1- nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
4.8.2015	98	1	0,062	0,029
		2	0,018	
		3	0,006	
11.8.2015	105	1	0,054	0,035
		2	0,032	
		3	0,020	
18.8.2015	112	1	0,076	0,035
		2	0,026	
		3	0,038	
25.8.2015	119	1	0,088	0,051
		2	0,048	
		3	0,016	
1.9.2015	126	1	0,074	0,050
		2	0,042	
		3	0,033	
8.9.2015	133	1	0,069	0,050
		2	0,042	
		3	0,039	
15.9.2015	140	1	0,074	0,051
		2	0,026	
		3	0,054	
22.9.2015	147	1	0,076	0,053
		2	0,048	
		3	0,036	
29.9.2015	154	1	0,068	0,053
		2	0,042	
		3	0,050	
6.10.2015	161	1	0,068	0,053
		2	0,048	
		3	0,044	
13.10.2015	168	1	0,060	0,053
		2	0,054	
		3	0,046	
20.10.2015	175	1	0,071	0,053
		2	0,054	
		3	0,034	
27.10.2015	182	1	0,063	0,053
		2	0,042	
		3	0,053	



Tabela 98 – Promena dužine betonskih uzoraka MRMC1

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
29.4.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
6.5.2015	7	1	0,012	0,013
		2	0,016	
		3	0,012	
13.5.2015	14	1	0,012	0,021
		2	0,028	
		3	0,022	
20.5.2015	21	1	0,010	0,029
		2	0,054	
		3	0,024	
27.5.2015	28	1	0,034	0,029
		2	0,036	
		3	0,018	
3.6.2015	35	1	0,034	0,030
		2	0,034	
		3	0,022	
10.6.2015	42	1	0,032	0,031
		2	0,039	
		3	0,021	
17.6.2015	49	1	0,034	0,033
		2	0,044	
		3	0,020	
24.6.2015	56	1	0,028	0,031
		2	0,038	
		3	0,026	
1.7.2015	63	1	0,032	0,031
		2	0,032	
		3	0,030	
8.7.2015	70	1	0,042	0,035
		2	0,025	
		3	0,039	
15.7.2015	77	1	0,051	0,046
		2	0,047	
		3	0,040	
22.7.2015	84	1	0,054	0,050
		2	0,065	
		3	0,032	
29.7.2015	91	1	0,068	0,058
		2	0,071	
		3	0,036	

Tabela 99 – Promena dužine betonskih uzoraka MRMC1-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
5.8.2015	98	1	0,065	0,062
		2	0,070	
		3	0,051	
12.8.2015	105	1	0,076	0,063
		2	0,050	
		3	0,064	
19.8.2015	112	1	0,049	0,065
		2	0,081	
		3	0,064	
26.8.2015	119	1	0,062	0,065
		2	0,081	
		3	0,053	
2.9.2015	126	1	0,073	0,065
		2	0,059	
		3	0,063	
9.9.2015	133	1	0,075	0,065
		2	0,061	
		3	0,059	
16.9.2015	140	1	0,070	0,065
		2	0,058	
		3	0,068	
23.9.2015	147	1	0,065	0,067
		2	0,073	
		3	0,064	
30.9.2015	154	1	0,068	0,070
		2	0,083	
		3	0,058	
7.10.2015	161	1	0,070	0,071
		2	0,084	
		3	0,060	
14.10.2015	168	1	0,082	0,075
		2	0,071	
		3	0,071	
21.10.2015	175	1	0,079	0,075
		2	0,073	
		3	0,072	
28.10.2015	182	1	0,076	0,077
		2	0,085	
		3	0,071	

#### B.4. Promena dužine betonskih uzoraka RMC2

Tabela 100 – Promena dužine betonskih uzoraka ERMC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
4.5.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
11.5.2015	7	1	0,011	0,016
		2	0,016	
		3	0,020	
18.5.2015	14	1	0,011	0,024
		2	0,002	
		3	0,060	
25.5.2015	21	1	0,028	0,033
		2	0,028	
		3	0,042	
1.6.2015	28	1	0,025	0,034
		2	0,026	
		3	0,052	
8.6.2015	35	1	0,043	0,040
		2	0,032	
		3	0,046	
15.6.2015	42	1	0,006	0,049
		2	0,020	
		3	0,122	
22.6.2015	49	1	0,012	0,059
		2	0,035	
		3	0,130	
29.6.2015	56	1	0,041	0,063
		2	0,037	
		3	0,112	
6.7.2015	63	1	0,028	0,064
		2	0,038	
		3	0,127	
13.7.2015	70	1	0,065	0,070
		2	0,047	
		3	0,098	
20.7.2015	77	1	0,035	0,078
		2	0,112	
		3	0,086	
27.7.2015	84	1	0,035	0,087
		2	0,119	
		3	0,106	
3.8.2015	91	1	0,050	0,089
		2	0,132	
		3	0,085	

Tabela 101 – Promena dužine betonskih uzoraka ERM2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
10.8.2015	98	1	0,045	0,094
		2	0,106	
		3	0,131	
17.8.2015	105	1	0,072	0,095
		2	0,096	
		3	0,118	
24.8.2015	112	1	0,062	0,095
		2	0,106	
		3	0,118	
31.8.2015	119	1	0,075	0,097
		2	0,102	
		3	0,113	
7.9.2015	126	1	0,062	0,099
		2	0,099	
		3	0,135	
14.9.2015	133	1	0,071	0,095
		2	0,106	
		3	0,108	
21.9.2015	140	1	0,072	0,095
		2	0,114	
		3	0,099	
28.9.2015	147	1	0,078	0,094
		2	0,110	
		3	0,094	
5.10.2015	154	1	0,071	0,093
		2	0,109	
		3	0,100	
12.10.2015	161	1	0,074	0,090
		2	0,100	
		3	0,096	
19.10.2015	168	1	0,068	0,090
		2	0,105	
		3	0,098	
26.10.2015	175	1	0,068	0,091
		2	0,102	
		3	0,103	
2.11.2015	182	1	0,066	0,091
		2	0,098	
		3	0,108	

Tabela 102 – Promena dužine betonskih uzoraka NRMC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
5.5.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
12.5.2015	7	1	0,021	0,018
		2	0,019	
		3	0,015	
19.5.2015	14	1	0,050	0,037
		2	0,030	
		3	0,032	
26.5.2015	21	1	0,085	0,047
		2	0,043	
		3	0,012	
2.6.2015	28	1	0,068	0,047
		2	0,041	
		3	0,032	
9.6.2015	35	1	0,068	0,047
		2	0,060	
		3	0,014	
16.6.2015	42	1	0,065	0,048
		2	0,039	
		3	0,039	
23.6.2015	49	1	0,072	0,050
		2	0,038	
		3	0,039	
30.6.2015	56	1	0,077	0,055
		2	0,045	
		3	0,042	
7.7.2015	63	1	0,068	0,060
		2	0,040	
		3	0,071	
14.7.2015	70	1	0,056	0,061
		2	0,052	
		3	0,074	
21.7.2015	77	1	0,034	0,063
		2	0,066	
		3	0,088	
28.7.2015	84	1	0,095	0,068
		2	0,058	
		3	0,051	
4.8.2015	91	1	0,096	0,071
		2	0,071	
		3	0,046	

Tabela 103 – Promena dužine betonskih uzoraka NRM2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
11.8.2015	98	1	0,094	0,071
		2	0,060	
		3	0,058	
18.8.2015	105	1	0,106	0,076
		2	0,058	
		3	0,063	
25.8.2015	112	1	0,102	0,077
		2	0,064	
		3	0,065	
1.9.2015	119	1	0,092	0,080
		2	0,076	
		3	0,072	
8.9.2015	126	1	0,089	0,086
		2	0,076	
		3	0,092	
15.9.2015	133	1	0,120	0,087
		2	0,082	
		3	0,060	
22.9.2015	140	1	0,128	0,091
		2	0,071	
		3	0,075	
29.9.2015	147	1	0,116	0,091
		2	0,062	
		3	0,096	
6.10.2015	154	1	0,118	0,095
		2	0,080	
		3	0,086	
13.10.2015	161	1	0,111	0,091
		2	0,091	
		3	0,071	
20.10.2015	168	1	0,102	0,092
		2	0,104	
		3	0,071	
27.10.2015	175	1	0,114	0,093
		2	0,116	
		3	0,048	
3.11.2015	182	1	0,100	0,093
		2	0,095	
		3	0,085	

Tabela 104 – Promena dužine betonskih uzoraka MRMC2

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost [mm/m]	Srednja vrednost [mm/m]
6.5.2015	0	1	0,000	0,000
		2	0,000	
		3	0,000	
13.5.2015	7	1	0,022	0,033
		2	0,032	
		3	0,046	
20.5.2015	14	1	0,030	0,039
		2	0,056	
		3	0,030	
27.5.2015	21	1	0,060	0,042
		2	0,034	
		3	0,032	
3.6.2015	28	1	0,036	0,045
		2	0,042	
		3	0,056	
10.6.2015	35	1	0,054	0,047
		2	0,051	
		3	0,036	
17.6.2015	42	1	0,062	0,049
		2	0,058	
		3	0,026	
24.6.2015	49	1	0,061	0,050
		2	0,047	
		3	0,042	
1.7.2015	56	1	0,030	0,052
		2	0,080	
		3	0,046	
8.7.2015	63	1	0,055	0,058
		2	0,061	
		3	0,057	
15.7.2015	70	1	0,061	0,062
		2	0,068	
		3	0,058	
22.7.2015	77	1	0,059	0,068
		2	0,081	
		3	0,064	
29.7.2015	84	1	0,071	0,072
		2	0,083	
		3	0,062	
5.8.2015	91	1	0,058	0,078
		2	0,098	
		3	0,078	

Tabela 105 – Promena dužine betonskih uzoraka MRMC2-nastavak tabele

Datum ispitivanja	Vreme držanja u rastvoru [dani]	Uzorak	Izmerena vrednost	Srednja vrednost
12.8.2015	98	1	0,090	0,080
		2	0,081	
		3	0,070	
19.8.2015	105	1	0,091	0,086
		2	0,082	
		3	0,084	
26.8.2015	112	1	0,088	0,089
		2	0,101	
		3	0,077	
2.9.2015	119	1	0,083	0,089
		2	0,109	
		3	0,076	
16.9.2015	126	1	0,091	0,091
		2	0,109	
		3	0,074	
23.9.2015	133	1	0,089	0,094
		2	0,102	
		3	0,090	
30.9.2015	140	1	0,105	0,095
		2	0,098	
		3	0,081	
7.10.2015	147	1	0,054	0,081
		2	0,094	
		3	0,094	
14.10.2015	154	1	0,094	0,091
		2	0,088	
		3	0,092	
21.10.2015	161	1	0,092	0,090
		2	0,086	
		3	0,091	
28.10.2015	168	1	0,080	0,087
		2	0,082	
		3	0,098	
4.11.2015	175	1	0,080	0,088
		2	0,081	
		3	0,102	
16.9.2015	182	1	0,073	0,086
		2	0,096	
		3	0,088	



## PRILOG 10

### Određivanje upijanja vode pod pritiskom (EN 12390-8)

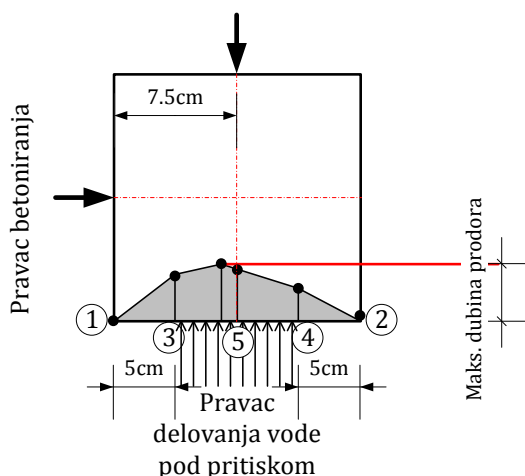


Tabela 106 - Dispozicija ispitivanja prodora vode pod pritiskom

#### A. Beton sa rečnim agregatom

##### A.1. Upijanje vode betona NPC1

Tabela 107 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton NPC1

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
NPC1/1	7,749	7,757	0	0	21	4	21	21
NPC1/2	7,720	7,731	0	0	6	4	5	6
NPC1/3	7,713	7,727	0	0	15	14	17	17

##### A.2. Upijanje vode betona NPC2

Tabela 108 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton NPC2

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
NPC2/1	7,880	7,885	0	0	5	6	7	7
NPC2/2	7,965	7,966	0	0	8	2	5	8
NPC2/3	7,966	7,969	0	0	15	8	6	15

##### A.3. Upijanje vode betona NMC1

Tabela 109 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton NMC1

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
NMC1/1	7,682	7,684	0	0	6	9	20	20
NMC1/2	7,649	7,654	0	0	8	12	14	14
NMC1/3	7,798	7,801	0	0	3	12	16	16

#### A.4. Upijanje vode betona NMC2

Tabela 110 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton NMC2

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
NMC2/1	7,882	7,892	0	0	6	5	12	12
NMC2/2	7,880	7,882	0	0	11	9	3	11
NMC2/3	7,937	7,940	0	0	19	13	16	19

#### B. Beton sa recikliranim agregatom

##### B.1. Upijanje vode betona RPC1

Tabela 111 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton RPC1

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
RPC1/1	7,413	7,422	0	0	13	10	13	12
RPC1/2	7,503	7,510	0	0	8	10	8	9
RPC1/3	7,485	7,491	0	0	5	15	9	15

##### B.2. Upijanje vode betona RPC2

Tabela 112 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton RPC2

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
RPC2/1	7,750	7,755	0	0	12	5	7	12
RPC2/2	7,756	7,764	0	0	10	5	8	10
RPC2/3	7,718	7,724	0	0	7	8	10	10

##### B.3. Upijanje vode betona RMC1

Tabela 113 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton RMC1

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
RMC1/1	7,512	7,519	0	0	10	5	10	10
RMC1/2	7,478	7,485	0	0	16	14	24	24
RMC1/3	7,516	7,523	0	0	9	8	14	14

##### B.4. Upijanje vode betona RMC2

Tabela 114 - Određivanje dubine prodora vode pod pritiskom za beton RMC2

Oznaka uzorka	Masa pre ispitivanja [kg]	Masa posle ispitivanja [kg]	Pojedinačne dubine prodora vode [mm]					Najveća dubina prodora [mm]
			T1	T2	T3	T4	T5	
RMC2/1	7,692	7,697	0	0	14	10	15	15
RMC2/2	7,692	7,696	0	0	7	10	9	10
RMC2/3	7,650	7,659	0	0	5	15	9	15

## PRILOG 11

### Određivanje kapilarnog upijanja vode (SRPS U.M8.300)

#### A. Određivanje kapilarnog upijanja vode na betonu sa rečnim agregatom

##### A.1. Beton NPC1

##### A.1.1. Pre potapanja u rastvore

*Tabela 115 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja betona - pre potapanja u rastvore*

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NPC1	NPC1/1	150,01	149,98	149,89	149,92
	NPC1/2	149,95	149,89	149,72	149,69
	NPC1/3	149,89	149,93	149,85	149,95

*Tabela 116 – Kapilarno upijanje betona NPC1 – pre potapanja u rastvore*

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NPC1/1	NPC1/2	NPC1/3	NPC1/1	NPC1/2	NPC1/3
suv uzorak	3700,3	3417,2	3752,4	0	0	0
1'	3701,7	3418,5	3753,5	1,4	1,3	1,1
5'	3703,0	3419,6	3754,2	2,7	2,4	1,8
15'	3704,3	3420,7	3755,3	4,0	3,5	2,9
30'	3705,4	3421,7	3756,3	5,1	4,5	3,9
1h	3706,3	3423,0	3757,8	6,0	5,8	5,4
4h	3708,7	3425,7	3759,5	8,4	8,5	7,1
9h	3710,4	3427,7	3761,1	10,1	10,5	8,7
25h	3712,9	3430,2	3763,7	12,6	13,0	11,3
49h	3714,5	3432,2	3765,2	14,2	15,0	12,8
73h	3717,6	3433,9	3766,9	17,3	16,7	14,5
97h	3717,4	3434,6	3767,1	17,1	17,4	14,7

##### A.1.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

*Tabela 117 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ENPC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru*

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ENPC1	ENPC1/1	150,22	149,98	149,93	149,96
	ENPC1/2	150,04	149,98	150,07	150,06
	ENPC1/3	149,79	149,83	149,73	149,99

Tabela 118 – Kapilarno upijanje betona ENPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	ENPC1/1	ENPC1/2	ENPC1/3	ENPC1/1	ENPC1/2	ENPC1/3
suv uzorak	3734,8	3450,1	3784,7	0	0	0
1'	3735,4	3450,7	3785,5	0,6	0,6	0,8
5'	3735,4	3450,8	3785,4	0,6	0,7	0,7
15'	3735,5	3451,1	3785,5	0,7	1,0	0,8
30'	3735,6	3451,2	3785,6	0,8	1,1	0,9
1h	3735,8	3451,5	3786,2	1,0	1,4	1,5
4h	3736,9	3452,4	3787,1	2,1	2,4	2,4
9h	3737,1	3453,2	3787,0	2,3	3,1	2,3
25h	3787,0	3453,9	3787,0	3,0	3,8	2,3
49h	3737,3	3454,2	3787,3	2,8	4,1	2,6
73h	3737,1	3453,9	3787,1	2,3	3,8	2,4
97h	3737,0	3453,9	3787,1	2,2	3,8	2,4

Tabela 119 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka NNPC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
NNPC1	NNPC1/1	149,80	150,00	149,93	149,97
	NNPC1/2	149,75	149,99	149,74	149,95
	NNPC1/3	150,33	150,06	149,55	150,19

Tabela 120 – Kapilarno upijanje betona NNPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru  $Na_2SO_4$

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	NNPC1/1	NNPC1/2	NNPC1/3	NNPC1/1	NNPC1/2	NNPC1/3
suv uzorak	3502,0	3834,7	3831,1	0	0	0
1'	3502,8	3835,2	3838,5	0,8	0,5	0,4
5'	3502,9	3835,2	3838,7	0,9	0,5	0,6
15'	3503,1	3835,4	3838,7	1,1	0,7	0,6
30'	3503,1	3835,5	3838,9	1,1	0,8	0,8
1h	3503,4	3835,5	3839,0	1,4	0,8	0,9
4h	3503,4	3835,8	3839,2	1,4	1,1	1,1
9h	3505,0	3836,2	3839,9	3,0	1,5	1,8
25h	3505,4	3836,4	3840,1	3,4	1,7	2,0
49h	3506,4	3836,4	3840,6	4,4	1,7	2,5
73h	3506,4	3836,2	3840,7	4,4	1,5	2,6
97h	3506,4	3836,2	3840,7	4,4	1,5	2,6

Tabela 121 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka MNPC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
MNPC1	MNPC1/1	150,04	150,15	150,00	150,05
	MNPC1/2	149,94	150,11	150,26	150,55
	MNPC1/3	150,05	150,13	150,12	150,37

Tabela 122 – Kapilarno upijanje betona MNPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MNPC1/1	MNPC1/2	MNPC1/3	MNPC1/1	MNPC1/2	MNPC1/3
suv uzorak	4167,6	4209,4	4861,3	0	0	0
1'	4168,2	4209,4	4861,9	0,6	0,8	0,6
5'	4168,4	4210,2	4862,0	0,8	0,7	0,7
15'	4168,3	4210,1	4861,9	0,7	0,9	0,6
30'	4168,6	4210,3	4862,1	1,0	1,0	0,8
1h	4168,7	4210,4	4862,3	1,1	1,0	1,0
4h	4169,1	4210,9	4862,8	1,5	1,5	1,5
9h	4169,7	4211,0	4862,9	2,1	1,6	1,6
25h	4169,8	4211,3	4863,3	2,2	1,9	2,0
49h	4170,2	4211,5	4863,8	2,6	2,1	2,5
73h	4170,2	4211,5	4863,7	2,6	2,1	2,4
97h	4170,2	4211,5	4863,7	2,6	2,1	2,4

### A.1.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 123 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka ENPC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ENPC1	ENPC1/1	150,22	149,98	149,93	149,96
	ENPC1/2	150,04	149,98	150,07	150,06
	ENPC1/3	149,79	149,83	149,73	149,99

Tabela 124 – Kapilarno upijanje betona ENPC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ENPC1/1	ENPC1/2	ENPC1/3	ENPC1/1	ENPC1/2	ENPC1/3
suv uzorak	3743,0	3456,8	3790,9	0	0	0
1'	3743,6	3457,3	3791,4	0,6	0,5	0,5
5'	3743,6	3457,5	3791,6	0,6	0,7	0,7
15'	3743,6	3457,5	3792,1	0,6	0,7	1,2
30'	3743,7	3457,7	3792,1	0,7	0,9	1,2
1h	3743,6	3457,6	3792,2	0,6	0,8	1,2
4h	3743,7	3457,8	3792,0	0,7	1,0	1,1
9h	3743,5	3457,6	3791,9	0,5	0,8	1,0
25h	3743,5	3457,6	3792,3	0,5	0,8	1,4
49h	3743,5	3457,8	3792,3	0,5	1,0	1,4
73h	3743,5	3457,8	3792,2	0,5	1,0	1,3
97h	3743,4	3457,8	3792,2	0,4	1,0	1,3

Tabela 125 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka NNPC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NNPC1	NNPC1/1	149,80	150,00	149,93	149,97
	NNPC1/2	149,75	149,99	149,74	149,95
	NNPC1/3	150,33	150,06	149,55	150,19

Tabela 126 – Kapilarno upijanje betona NNPC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NNPC1/1	NNPC1/2	NNPC1/3	NNPC1/1	NNPC1/2	NNPC1/3
suv uzorak	3512,5	3843,6	3849,2	0	0	0
1'	3513,0	3844,3	3849,7	0,5	0,7	0,5
5'	3513,4	3844,5	3849,7	0,9	0,9	0,5
15'	3513,4	3844,4	3849,8	0,9	0,8	0,6
30'	3513,9	3844,5	3849,7	1,4	0,9	0,5
1h	3513,6	3844,5	3849,7	1,1	0,9	0,5
4h	3514,1	3844,6	3850,1	1,6	1,0	0,9
9h	3514,2	3844,7	3850,1	1,7	1,1	0,9
25h	3515,6	3845,7	3850,5	3,1	2,1	1,3
49h	3516,5	3846,0	3851,1	4,0	2,4	1,9
73h	3516,4	3846,0	3851,0	3,9	2,4	1,8
97h	3516,4	3846,0	3861,0	3,9	2,4	1,8

Tabela 127 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka MNPC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MNPC1	MNPC1/1	150,04	150,15	150,00	150,05
	MNPC1/2	149,94	150,11	150,26	150,55
	MNPC1/3	150,05	150,13	150,12	150,37

Tabela 128 – Kapilarno upijanje betona MNPC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MNPC1/1	MNPC1/2	MNPC1/3	MNPC1/1	MNPC1/2	MNPC1/3
suv uzorak	4177,4	4216,9	4869,6	0	0	0
1'	4178,9	4218,4	4870,6	1,5	1,5	1,0
5'	4178,3	4218,4	4870,4	0,9	1,5	0,8
15'	4178,5	4218,4	4870,4	1,1	1,5	0,8
30'	4178,5	4218,2	4870,4	1,1	1,3	0,8
1h	4178,3	4218,0	4870,5	0,9	1,1	0,9
4h	4178,5	4218,3	4871,1	1,1	1,4	1,5
9h	4178,6	4218,2	4871,2	1,2	1,3	1,6
25h	4179,0	4218,7	4871,5	1,6	1,8	1,9
49h	4179,3	4219,1	4872,2	1,9	2,2	2,6
73h	4179,3	4219,1	4872,2	1,9	2,2	2,6
97h	4179,3	4219,1	4872,2	1,9	2,2	2,6

## A.2. Beton NPC2

### A.2.1. Pre potapanja u rastvore

Tabela 129 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja betona NPC2 - pre potapanja u rastvore

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NPC2	NPC2/1	149,47	149,50	149,57	149,96
	NPC2/2	149,30	149,20	149,83	149,56
	NPC2/3	150,00	150,28	149,84	149,66

Tabela 130 – Kapilarno upijanje betona NPC2 – pre potapanja u rastvore

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	NPC2/1	NPC2/2	NPC2/3	NPC2/1	NPC2/2	NPC2/3
suv uzorak	3800,9	4128,6	4297,6	0	0	0
1'	3801,2	4129,2	4298,5	0,3	0,6	0,9
5'	3801,7	4129,5	4299,1	0,8	0,9	1,5
15'	3801,9	4129,8	4299,6	1,0	1,2	2,0
30'	3802,1	4130,3	4300,0	1,2	1,7	2,4
1h	3802,5	4130,7	4300,4	1,6	2,1	2,8
4h	3803,1	4131,4	4301,4	2,2	2,8	3,7
9h	3803,6	4131,9	4301,9	2,7	3,3	4,3
25h	3804,0	4132,7	4302,6	3,1	4,1	5,0
49h	3804,3	4132,8	4302,7	3,4	4,2	5,1
73h	3804,3	4132,9	4302,8	3,4	4,3	5,2
97h	3804,4	4132,9	4302,8	3,5	4,3	5,2

### A.2.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Tabela 131 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ENPC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
ENPC2	ENPC2/1	149,47	149,50	149,57	149,96
	ENPC2/2	149,30	149,20	149,83	149,56
	ENPC2/3	150,00	150,28	149,84	149,66

Tabela 132 – Kapilarno upijanje betona ENPC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	ENPC2/1	ENPC2/2	ENPC2/3	ENPC2/1	ENPC2/2	ENPC2/3
suv uzorak	3818,2	4147,9	4320,3	0	0	0
1'	3818,9	4148,6	4320,6	0,7	0,7	0,3
5'	3818,9	4148,6	4320,7	0,7	0,7	0,4
15'	3818,9	4148,7	4320,8	0,7	0,8	0,5
30'	3819,1	4148,7	4320,9	0,9	0,8	0,6
1h	3819,4	4148,8	4320,9	1,2	0,9	0,6
4h	3819,4	4148,9	4321,0	1,2	1,0	0,7
9h	3819,4	4148,9	4321,1	1,2	1,0	0,8
25h	3819,5	4149,2	4321,2	1,3	1,3	0,9
49h	3819,8	4149,8	4321,4	1,6	1,9	1,1
73h	3819,9	4149,9	4321,7	1,7	2,0	1,4
97h	3819,9	4149,9	4321,7	1,7	2,0	1,4

Tabela 133 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NNPC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
NNPC2	NNPC2/1	149,73	149,99	149,67	149,55
	NNPC2/2	149,81	149,78	149,83	149,82
	NNPC2/3	149,45	149,49	149,86	149,72

Tabela 134 – Kapilarno upijanje betona NNPC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru  $Na_2SO_4$

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	NNPC2/1	NNPC2/2	NNPC2/3	NNPC2/1	NNPC2/2	NNPC2/3
suv uzorak	4192,1	3897,1	4055,1	0	0	0
1'	4192,4	3897,4	4055,5	0,3	0,3	0,4
5'	4192,6	3897,5	4055,7	0,5	0,4	0,6
15'	4192,6	3897,5	4055,7	0,5	0,4	0,6
30'	4192,7	3897,5	4055,5	0,6	0,4	0,4
1h	4192,7	3897,4	4055,7	0,6	0,3	0,6
4h	4192,8	3897,7	4055,7	0,7	0,6	0,6
9h	4192,9	3897,9	4056,1	0,8	0,8	1,0
25h	4193,2	3898,2	4056,2	1,1	1,1	1,1
49h	4193,5	3898,2	4056,4	1,4	1,0	1,3
73h	4193,8	3898,4	4056,6	1,7	1,3	1,5
97h	4193,8	3898,4	4056,6	1,7	1,3	1,5

Tabela 135 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka MNPC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
MNPC2	MNPC2/1	150,04	150,15	150,00	150,05
	MNPC2/2	149,94	150,11	150,26	150,55
	MNPC2/3	150,05	150,13	150,12	150,37

Tabela 136 – Kapilarno upijanje betona MNPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru  $MgSO_4$

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	MNPC2/1	MNPC2/2	MNPC2/3	MNPC2/1	MNPC2/2	MNPC2/3
suv uzorak	4167,6	4209,4	4861,3	0	0	0
1'	4168,2	4209,4	4861,9	0,6	0,8	0,6
5'	4168,4	4210,2	4862,0	0,8	0,7	0,7
15'	4168,3	4210,1	4861,9	0,7	0,9	0,6
30'	4168,6	4210,3	4862,1	1,0	1,0	0,8
1h	4168,7	4210,4	4862,3	1,1	1,0	1,0
4h	4169,1	4210,9	4862,8	1,5	1,5	1,5
9h	4169,7	4211,0	4862,9	2,1	1,6	1,6
25h	4169,8	4211,3	4863,3	2,2	1,9	2,0
49h	4170,2	4211,5	4863,8	2,6	2,1	2,5
73h	4170,2	4211,5	4863,7	2,6	2,1	2,4
97h	4170,2	4211,5	4863,7	2,6	2,1	2,4

### A.2.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 137 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka ENPC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
ENPC2	ENPC2/1	149,47	149,50	149,57	149,96
	ENPC2/2	149,30	149,20	149,83	149,56
	ENPC2/3	150,00	150,28	149,84	149,66



Tabela 138 – Kapilarno upijanje betona ENPC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	ENPC2/1	ENPC2/2	ENPC2/3	ENPC2/1	ENPC2/2	ENPC2/3
suv uzorak	3821,9	4152,1	4323,5	0	0	0
1'	3822,5	4152,1	4324,0	0,6	0,0	0,5
5'	3822,5	4152,9	4324,1	0,6	0,8	0,6
15'	3822,6	4152,8	4324,2	0,7	0,7	0,7
30'	3822,5	4152,8	4323,1	0,6	0,7	0,6
1h	3822,6	4152,8	4324,2	0,7	0,7	0,7
4h	3822,1	4153,2	4324,3	0,2	1,1	0,8
9h	3822,8	4153,2	4324,1	0,9	1,1	0,6
25h	3822,9	4152,8	4324,0	1,0	0,7	0,4
49h	3822,7	4152,8	4324,0	0,8	0,7	0,5
73h	3822,6	4152,8	4323,9	0,7	0,7	0,4
97h	3822,6	4152,8	4323,9	0,7	0,7	0,4

Tabela 139 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka NNPC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
NNPC2	NNPC2/1	149,73	149,99	149,67	149,55
	NNPC2/2	149,81	149,78	149,83	149,82
	NNPC2/3	149,45	149,49	149,86	149,72

Tabela 140 – Kapilarno upijanje betona NNPC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru  $Na_2SO_4$

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	NNPC2/1	NNPC2/2	NNPC2/3	NNPC2/1	NNPC2/2	NNPC2/3
suv uzorak	4198,7	3903,4	4062,3	0	0	0
1'	4199,4	3904,0	4063,0	0,7	0,6	0,7
5'	4199,4	3904,3	4063,1	0,7	0,9	0,8
15'	4199,5	3904,3	4063,2	0,8	0,9	0,9
30'	4199,8	3904,1	4063,1	1,1	0,7	0,8
1h	4199,6	3904,2	4063,1	0,9	0,8	0,8
4h	4199,8	3904,4	4063,2	1,1	1,0	0,9
9h	4199,7	3904,3	4063,2	1,0	0,9	0,9
25h	4199,7	3904,2	4063,2	1,0	0,8	0,9
49h	4199,6	3904,2	4063,1	0,9	0,8	0,8
73h	4199,6	3904,1	4063,1	0,9	0,7	0,8
97h	4199,6	3904,1	4063,1	0,9	0,7	0,8

Tabela 141 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka MNPC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
MNPC2	MNPC2/1	149,49	149,60	149,79	149,79
	MNPC2/2	149,77	149,72	149,90	149,90
	MNPC2/3	149,66	149,73	150,01	150,06

Tabela 142 – Kapilarno upijanje betona MNPC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MNPC2/1	MNPC2/2	MNPC2/3	MNPC2/1	MNPC2/2	MNPC2/3
suv uzorak	4354,8	4220,3	4093,8	0	0	0
1'	4356,2	4221,6	4095,0	1,4	1,3	1,2
5'	4356,3	4221,8	4095,0	1,5	1,5	1,2
15'	4356,4	4221,7	4095,1	1,6	1,4	1,3
30'	4356,3	4221,7	4095,0	1,5	1,4	1,2
1h	4356,2	4221,9	4095,3	14,	1,6	1,5
4h	4356,6	4222,2	4095,3	1,8	1,9	1,5
9h	4356,4	4222,1	4095,3	106	1,8	1,5
25h	4356,3	4222,0	4095,3	1,5	1,7	1,5
49h	4356,3	4222,1	4095,2	1,5	1,8	1,4
73h	4356,2	4222,1	4095,2	1,4	1,8	1,4
97h	4356,2	4222,1	4095,2	1,4	1,8	1,4

### A.3. Beton NMC1

#### A.3.1. Pre potapanja u rastvore

Tabela 143 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja betona NMC1 - pre potapanja u rastvore

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NMC1	NMC1/1	150,32	150,10	150,07	149,67
	NMC1/2	150,23	150,01	149,71	149,90
	NMC1/3	149,95	149,91	149,99	149,79

Tabela 144 – Kapilarno betona NMC1 – pre potapanja u rastvore

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NMC1/1	NMC1/2	NMC1/3	NMC1/1	NMC1/2	NMC1/3
suv uzorak	4620,1	4442,3	4431,0	0	0	0
1'	4622,6	4444,9	4432,7	2,5	2,6	1,7
5'	4625,0	4446,7	4434,4	4,9	4,4	3,4
15'	4626,9	4448,1	4436,6	6,8	5,8	5,6
30'	4628,2	4449,1	4437,7	8,1	6,8	6,7
1h	4629,4	4450,2	4439,0	9,3	7,9	8,0
4h	4632,1	4454,4	4441,1	12,0	12,1	10,1
9h	4633,9	4454,4	4442,8	13,8	12,1	11,8
25h	4635,9	4456,0	4444,4	15,8	13,7	13,4
49h	4636,8	4456,9	4444,8	16,7	14,5	13,8
73h	4637,0	4456,9	4444,9	16,9	14,6	13,9
97h	4637,2	4456,9	4444,9	17,1	14,6	13,9

### A.3.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Tabela 145 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ENMC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ENMC1	ENMC1/1	150,32	150,10	150,07	149,67
	ENMC1/2	150,23	150,01	149,71	149,90
	ENMC1/3	149,95	149,91	149,99	149,79

Tabela 146 – Kapilarno upijanje betona ENMC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ENMC1/1	ENMC1/2	ENMC1/3	ENMC1/1	ENMC1/2	ENMC1/3
suv uzorak	4660,9	4484,0	4469,4	0	0	0
1'	4662,0	4484,9	4470,1	1,1	0,9	0,7
5'	4662,2	4484,9	4470,3	1,3	0,9	0,9
15'	4662,4	4485,1	4470,6	1,5	1,1	1,2
30'	4662,9	4485,6	4471,1	2,0	1,6	1,7
1h	4663,4	4486,0	4471,1	2,5	2,0	1,7
4h	4663,9	4486,9	4471,9	3,0	2,9	2,5
9h	4664,6	4487,4	4472,2	3,7	3,4	2,8
25h	4665,3	4488,0	4472,6	4,4	4,0	3,2
49h	4665,7	4488,3	4473,0	4,8	4,3	3,6
73h	4665,7	4488,2	4473,0	4,8	4,2	3,6
97h	4665,7	4488,2	4473,0	4,8	4,2	3,6

Tabela 147 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NNMC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NNMC1	NNMC1/1	150,16	149,95	149,75	149,60
	NNMC1/2	149,80	149,77	149,69	149,70
	NNMC1/3	149,62	149,51	149,89	149,84

Tabela 148 – Kapilarno upijanje betona NNMC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NNMC1/1	NNMC1/2	NNMC1/3	NNMC1/1	NNMC1/2	NNMC1/3
suv uzorak	4180,5	4104,5	4208,0	0	0	0
1'	4181,7	4105,6	4209,2	1,2	1,1	1,2
5'	4182,0	4105,7	4209,3	1,5	1,2	1,6
15'	4182,2	4106,1	4209,5	1,7	1,6	1,5
30'	4182,8	4106,7	4210,1	2,3	2,2	2,1
1h	4182,9	4107,1	4210,6	2,4	2,6	2,6
4h	4183,9	4107,9	4211,0	3,4	3,4	3,0
9h	4184,4	4108,5	4211,7	3,9	4,0	3,7
25h	4185,1	4109,3	4212,6	4,6	4,8	4,6
49h	4185,6	4109,8	4213,0	5,1	5,3	5,0
73h	4185,6	4109,9	4213,0	5,1	5,4	5,0
97h	4185,6	4109,9	4213,0	5,1	5,4	5,0

Tabela 149 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MNMC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MNMC1	MNMC1/1	149,69	149,58	149,77	149,67
	MNMC1/2	149,79	149,87	149,71	149,63
	MNMC1/3	149,66	149,56	149,87	149,65

Tabela 150 – Kapilarno upijanje betona MNMC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MNMC1/1	MNMC1/2	MNMC1/3	MNMC1/1	MNMC1/2	MNMC1/3
suv uzorak	4222,2	4538,9	3946,1	0	0	0
1'	4222,9	4539,5	3946,8	0,7	0,6	0,7
5'	4222,9	4539,7	3947,0	0,7	0,8	0,9
15'	4223,2	4539,8	3947,8	1,0	0,9	1,7
30'	4223,5	4539,9	3947,7	1,3	1,0	1,6
1h	4223,4	4540,1	3947,7	1,2	1,2	1,6
4h	4224,0	4540,6	3948,6	1,8	1,7	2,5
9h	4224,4	4541,0	3949,3	2,2	2,1	3,2
25h	4224,9	4541,7	3950,6	2,7	2,8	4,5
49h	4225,2	4541,7	3951,4	3,0	2,8	5,3
73h	4225,2	4542,0	3951,4	3,0	3,1	5,3
97h	4225,2	4542,0	3951,4	3,0	3,1	5,3

### A.3.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 151 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ENMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ENMC1	ENMC1/1	150,2	150,10	150,07	149,67
	ENMC1/2	150,23	150,01	149,71	149,90
	ENMC1/3	149,95	149,91	149,99	149,79

Tabela 152 – Kapilarno upijanje betona ENMC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ENMC1/1	ENMC1/2	ENMC1/3	ENMC1/1	ENMC1/2	ENMC1/3
suv uzorak	4663,0	4483,3	4468,5	0	0	0
1'	4663,9	4484,0	4469,3	0,9	0,7	0,8
5'	4664,1	4484,3	4469,7	1,1	1,0	1,2
15'	4664,5	4484,5	4469,7	1,5	1,2	1,2
30'	4664,6	4484,8	4470,0	1,6	1,5	1,5
1h	4665,1	4485,0	4470,0	2,1	1,7	1,5
4h	4665,7	4486,0	4470,7	2,7	2,7	2,2
9h	4665,8	4486,3	4471,1	2,8	3,0	2,6
25h	4666,3	4486,8	4471,6	3,3	3,5	3,1
49h	4666,1	4486,8	4471,8	3,1	3,5	3,3
73h	4666,1	4486,8	4471,8	3,1	3,5	3,3
97h	4666,1	4486,8	4471,8	3,1	3,5	3,3

Tabela 153 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NNMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NNMC1	NNMC1/1	150,16	149,95	149,75	149,60
	NNMC1/2	149,80	149,77	149,69	149,70
	NNMC1/3	149,62	149,51	149,89	149,84

Tabela 154 – Kapilarno upijanje betona NNMC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NNMC1/1	NNMC1/2	NNMC1/3	NNMC1/1	NNMC1/2	NNMC1/3
suv uzorak	4189,1	4111,6	4214,7	0	0	0
1'	4189,9	4112,4	4215,4	0,8	0,8	0,7
5'	4190,1	4112,6	4215,8	1,0	1,0	1,1
15'	4190,3	4112,8	4215,8	1,2	1,2	1,1
30'	4190,3	4112,8	4216,1	1,2	1,2	1,4
1h	4190,6	4113,1	4216,2	1,5	1,5	1,5
4h	4191,1	4113,7	4217,0	2,0	2,1	2,3
9h	4191,4	4114,0	4217,4	2,3	2,4	2,7
25h	4191,9	4114,5	4218,0	2,8	2,9	3,3
49h	4192,0	4114,6	4217,9	2,9	3,0	3,2
73h	4192,0	4114,6	4217,9	2,9	3,0	3,2
97h	4192,0	4114,6	4217,9	2,9	3,0	3,2

Tabela 155 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MNMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MNMC1	MNMC1/1	149,69	149,58	149,778	149,67
	MNMC1/2	149,79	149,87	149,71	149,63
	MNMC1/3	149,66	149,56	149,87	149,65

Tabela 156 – Kapilarno upijanje betona MNMC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MNMC1/1	MNMC1/2	MNMC1/3	MNMC1/1	MNMC1/2	MNMC1/3
suv uzorak	4228,8	4542,6	3956,0	0	0	0
1'	4229,7	4543,5	3956,9	0,9	0,9	0,9
5'	4229,7	4543,5	3956,9	0,9	0,9	0,9
15'	4229,9	4543,7	3957,1	1,1	1,1	1,1
30'	4229,9	4543,7	3957,1	1,1	1,1	1,1
1h	4229,9	4543,7	3957,2	1,1	1,1	1,2
4h	4230,0	4543,7	3957,2	1,2	1,1	1,2
9h	4230,0	4543,7	3957,3	1,2	1,1	1,3
25h	4229,7	4543,9	3957,7	0,9	1,3	1,7
49h	4230,2	4544,0	3957,7	1,4	1,4	1,6
73h	4230,2	4544,0	3957,7	1,4	1,4	1,7
97h	4230,2	4539,9	3957,7	1,4	1,4	1,7

## A.4. Beton NMC2

### A.4.1. Pre potapanja u rastvore

Tabela 157 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja betona NMC2 - pre potapanja u rastvore

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NMC2	NMC2/1	149,60	149,70	150,71	150,37
	NMC2/2	150,04	150,25	150,41	150,29
	NMC2/3	150,09	149,78	149,81	149,85

Tabela 158 – Kapilarno upijanje betona NMC2 – pre potapanja u rastvore

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NMC2/1	NMC2/2	NMC2/3	NMC2/1	NMC2/2	NMC2/3
suv uzorak	3535,0	3850,7	3954,6	0	0	0
1'	3536,3	3852,2	3955,9	1,3	1,5	1,3
5'	3536,9	3853,1	3956,6	1,9	2,4	2,0
15'	3537,8	3854,2	3957,5	2,8	3,5	2,9
30'	3538,3	3854,7	3958,1	3,3	4,0	3,5
1h	3538,9	3855,5	3958,9	3,9	4,8	4,3
4h	3540,3	3856,8	3960,0	5,3	6,1	5,4
9h	3541,3	3857,8	3961,0	6,3	7,1	6,4
25h	3542,4	3858,6	3961,9	7,4	7,9	7,3
49h	3542,9	3859,1	3962,7	7,9	8,4	8,1
73h	3543,1	3859,2	3962,8	8,1	8,5	8,2
97h	3543,1	3859,2	3962,8	8,1	8,5	8,2

### A.4.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Tabela 159 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ENMC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ENMC2	ENMC2/1	149,60	149,70	150,71	150,37
	ENMC2/2	150,04	150,25	150,41	150,29
	ENMC2/3	150,09	149,78	149,81	149,85

Tabela 160 – Kapilarno upijanje betona ENMC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ENMC2/1	ENMC2/2	ENMC2/3	ENMC2/1	ENMC2/2	ENMC2/3
suv uzorak	3557,0	3875,5	3978,9	0	0	0
1'	3558,1	3876,7	3979,4	1,1	1,2	0,5
5'	3557,6	3876,5	3979,6	0,6	1,0	0,7
15'	3557,5	3876,3	3979,8	0,5	0,8	0,9
30'	3557,5	3876,7	3980,0	0,5	1,2	1,1
1h	3557,9	3877,0	3980,0	0,9	1,5	1,1
4h	3557,9	3876,7	3980,1	0,9	1,2	1,2
9h	3558,2	3877,2	3980,1	1,2	1,7	1,2
25h	3558,4	3877,3	3980,1	1,4	1,8	1,2
49h	3558,3	3877,2	3980,2	1,3	1,7	1,3
73h	3558,3	3877,2	3980,2	1,3	1,7	1,3
97h	3558,3	3877,2	3980,2	1,3	1,7	1,3

Tabela 161 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NNMC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NNMC2	NNMC2/1	149,60	149,84	149,73	149,73
	NNMC2/2	149,84	149,73	149,62	149,49
	NNMC2/3	149,60	149,53	149,72	149,87

Tabela 162 – Kapilarno upijanje betona NNMC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NNMC2/1	NNMC2/2	NNMC2/3	NNMC2/1	NNMC2/2	NNMC2/3
suv uzorak	3511,8	3974,7	3339,3	0	0	0
1'	3512,3	3975,1	3339,9	0,5	0,4	0,6
5'	3512,5	3978,3	3340,0	0,7	0,6	0,7
15'	3512,6	3975,5	3340,1	0,8	0,8	0,8
30'	3512,8	3975,7	3340,3	1,0	1,0	1,0
1h	3513,1	3976,0	3340,5	1,3	1,3	1,2
4h	3513,3	3976,1	3340,7	1,5	1,4	1,4
9h	3513,7	3976,5	3341,0	1,9	1,8	1,7
25h	3514,0	3976,9	3341,4	2,2	2,2	2,1
49h	3514,4	3977,2	3341,9	2,6	2,5	2,6
73h	3514,4	3977,4	3341,9	2,6	2,7	2,6
97h	3514,4	3977,4	3341,9	2,6	2,7	2,6

Tabela 163 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MNMC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MNMC2	MNMC2/1	149,73	149,79	149,81	149,99
	MNMC2/2	150,05	149,72	149,72	149,80
	MNMC2/3	149,75	149,68	149,83	149,88

Tabela 164 – Kapilarno upijanje betona MNMC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MNMC2/1	MNMC2/2	MNMC2/3	MNMC2/1	MNMC2/2	MNMC2/3
suv uzorak	4085,3	3914,5	3948,9	0	0	0
1'	4086,3	3915,7	3950,0	1,0	1,2	1,1
5'	4086,5	3915,7	3949,9	1,2	1,2	1,0
15'	4086,5	3915,4	3950,2	1,2	0,9	1,3
30'	4086,7	3915,8	3950,5	1,4	1,3	1,6
1h	4086,7	3915,6	3950,4	1,4	1,1	1,5
4h	4087,0	3916,0	3950,5	1,7	1,5	1,6
9h	4087,2	3916,2	3950,9	1,9	1,7	2,0
25h	4087,3	3916,2	3951,1	2,0	1,7	2,2
49h	4087,7	3916,5	3951,3	2,4	2,0	2,4
73h	4087,6	3916,6	3951,4	2,3	2,1	2,5
97h	4087,6	3916,6	3951,4	2,3	2,1	2,5

### A.4.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 165 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ENMC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ENMC2	ENMC2/1	149,60	149,70	150,71	150,37
	ENMC2/2	150,04	150,25	150,41	150,29
	ENMC2/3	150,09	149,78	149,81	149,85

Tabela 166 – Kapilarno upijanje betona ENMC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ENMC2/1	ENMC2/2	ENMC2/3	ENMC2/1	ENMC2/2	ENMC2/3
suv uzorak	3556,0	3874,8	3977,5	0	0	0
1'	3556,8	3875,6	3978,1	0,8	0,9	0,6
5'	3556,8	3875,7	3978,2	0,8	0,9	0,7
15'	3556,9	3875,7	3978,2	0,9	0,9	0,7
30'	3557,0	3875,8	3978,4	1,0	1,0	0,9
1h	3557,1	3875,9	3978,3	1,1	1,1	0,8
4h	3557,4	3876,2	3978,6	1,4	1,4	1,1
9h	3557,8	3876,7	3979,1	1,8	1,9	1,6
25h	3557,9	3876,7	3979,0	1,9	1,9	1,5
49h	3558,1	3876,8	3979,2	2,1	2,0	1,7
73h	3558,3	3876,7	3979,2	2,3	1,9	1,7
97h	3558,3	3876,7	3979,2	2,3	1,9	1,7

Tabela 167 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NNMC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NNMC2	NNMC2/1	149,60	149,84	149,73	149,73
	NNMC2/2	149,84	149,73	149,62	149,49
	NNMC2/3	149,60	149,53	149,72	149,87

Tabela 168 – Kapilarno upijanje betona NNMC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NNMC2/1	NNMC2/2	NNMC2/3	NNMC2/1	NNMC2/2	NNMC2/3
suv uzorak	3513,3	3976,6	3341,1	0	0	0
1'	3513,9	3977,3	3341,7	0,6	0,7	0,6
5'	3514,2	3977,5	3341,9	0,9	0,9	0,8
15'	3514,3	3977,6	3342,0	1,0	1,0	0,9
30'	3514,3	3977,7	3342,1	1,0	1,1	1,0
1h	3514,4	3977,8	3342,3	1,1	1,2	1,2
4h	3514,7	3978,2	3342,6	1,4	1,6	1,5
9h	3515,0	3978,7	3343,2	1,7	2,1	2,1
25h	3515,1	3978,8	3343,3	1,8	2,2	2,2
49h	3515,5	3979,0	3343,5	2,2	2,4	2,4
73h	3515,4	3979,0	3343,6	2,1	2,4	2,5
97h	3515,4	3979,0	3343,6	2,1	2,4	2,5



Tabela 169 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MNMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MNMC2	MNMC2/1	149,73	149,79	149,81	149,99
	MNMC2/2	150,05	149,72	149,72	149,80
	MNMC2/3	149,75	149,68	149,83	149,88

Tabela 170 – Kapilarno upijanje betona MNMC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MNMC2/1	MNMC2/2	MNMC2/3	MNMC2/1	MNMC2/2	MNMC2/3
suv uzorak	4086,4	3915,9	3950,3	0	0	0
1'	4087,8	3917,5	3951,9	1,4	1,6	1,6
5'	4087,8	3917,7	3952,0	1,4	1,8	1,7
15'	4087,9	3917,6	3952,1	1,5	1,7	1,8
30'	4087,8	3917,6	3952,0	1,4	1,7	1,7
1h	4087,9	3917,7	3951,9	1,5	1,8	1,6
4h	4088,1	3917,7	3952,4	1,7	1,8	2,1
9h	4088,4	3918,0	3952,5	2,0	2,1	2,2
25h	4088,5	3918,2	3952,5	2,1	2,3	2,2
49h	4088,7	3918,2	3952,7	2,3	2,3	2,4
73h	4088,7	3918,2	3952,7	2,3	2,3	2,4
97h	4088,7	3918,2	3952,7	2,3	2,3	2,4

## B. Određivanje kapilarnog upijanja vode na betonu sa recikliranim agregatom

### B.1. Beton RPC1

#### B.1.1. Pre potapanja u rastvore

Tabela 171 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja betona RPC1 - pre potapanja u rastvore

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
RPC1	RPC1/1	149,74	150,10	149,97	150,18
	RPC1/2	149,85	149,86	149,98	150,30
	RPC1/3	149,87	150,10	149,76	150,03

Tabela 172 – Kapilarno upijanje betona RPC1 – pre potapanja u rastvore

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	RPC1/1	RPC1/2	RPC1/3	RPC1/1	RPC1/2	RPC1/3
suv uzorak	3253,9	3200,9	3311,3	0	0	0
1'	3555,7	3202,9	3313,4	1,8	2,0	2,1
5'	3256,9	3204,5	3314,5	3,0	3,6	3,2
15'	3257,8	3205,8	3315,6	3,9	4,9	4,3
30'	3258,9	3206,8	3316,5	5,0	5,9	5,2
1h	3259,8	3207,9	3317,6	5,9	7,0	6,3
4h	3262,7	3210,7	3320,4	8,8	9,8	9,1

Tabela 173 – Kapilarno upijanje betona RPC1 – pre potapanja u rastvore-nastavak tabele

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	RPC1/1	RPC1/2	RPC1/3	RPC1/1	RPC1/2	RPC1/3
9h	3264,2	3213,0	3321,9	10,3	12,1	10,6
25h	3266,6	3215,2	3324,6	12,7	14,3	13,3
49h	3267,9	3216,3	3325,9	14,0	15,4	14,6
73h	3268,2	3216,6	3326,3	14,3	15,7	15,0
97h	3268,3	3216,6	3326,3	14,4	15,7	15,0

### B.1.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Tabela 174 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka ERPC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERPC1	ERPC1/1	149,74	150,10	149,97	150,18
	ERPC1/2	149,85	149,86	149,98	150,30
	ERPC1/3	149,87	150,10	149,76	150,03

Tabela 175 – Kapilarno upijanje betona ERPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ERPC1/1	ERPC1/2	ERPC1/3	ERPC1/1	ERPC1/2	ERPC1/3
suv uzorak	3289,1	3236,1	3349,1	0	0	0
1'	3289,8	3236,6	3349,5	0,7	0,5	0,4
5'	3289,7	3236,7	3349,6	0,6	0,6	0,5
15'	3289,7	3236,5	3349,6	0,6	0,4	0,5
30'	3290,2	3237,0	3349,9	1,1	0,9	0,8
1h	3290,2	3237,0	3349,9	1,1	0,9	0,8
4h	3290,3	3237,2	3350,3	1,2	1,1	1,2
9h	3290,5	3237,5	3350,4	1,4	1,4	1,3
25h	3291,2	3237,9	3350,7	2,1	1,8	1,6
49h	3291,4	3238,1	3350,7	2,3	2,0	1,6
73h	3291,4	3238,1	3350,7	2,3	2,0	1,6
97h	3291,4	3238,1	3350,7	2,3	2,0	1,6

Tabela 176 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka NRPC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NRPC1	NRPC1/1	150,01	150,06	149,84	149,71
	NRPC1/2	149,79	149,81	150,05	149,88
	NRPC1/3	149,78	149,87	149,87	149,89

Tabela 177 – Kapilarno upijanje betona NRPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NRPC1/1	NRPC1/2	NRPC1/3	NRPC1/1	NRPC1/2	NRPC1/3
suv uzorak	3929,6	3986,2	4126,6	0	0	0
1'	3930,9	3987,4	4127,6	1,3	1,2	1,0
5'	3931,0	3987,6	4127,7	1,4	1,4	1,1
15'	3931,2	3987,9	4127,8	1,6	1,7	1,2
30'	3931,5	3988,3	4128,2	1,9	2,1	1,6
1h	3931,7	3988,2	4128,2	2,1	2,0	1,6
4h	3932,8	3989,0	4128,8	3,2	2,8	2,2
9h	3932,8	3989,1	4129,0	3,2	2,9	2,4
25h	3933,8	3990,0	4129,9	4,2	3,8	3,3
49h	3934,0	3990,4	4129,8	4,4	4,2	3,2
73h	3934,4	3990,8	4129,9	4,8	4,6	3,3
97h	3934,4	3990,8	4129,9	4,8	4,6	3,3

Tabela 178 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MRPC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MRPC1	MRPC1/1	149,69	149,80	149,88	149,92
	MRPC1/2	149,65	149,63	150,06	150,11
	MRPC1/3	149,86	149,83	149,84	149,83

Tabela 179 – Kapilarno upijanje betona MRPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRPC1/1	MRPC1/2	MRPC1/3	MRPC1/1	MRPC1/2	MRPC1/3
suv uzorak	3899,1	3924,4	3919,3	0	0	0
1'	3899,6	3925,2	3919,9	0,5	0,8	0,6
5'	3899,7	3925,3	3920,1	0,6	0,9	0,8
15'	3900,0	3925,4	3920,3	0,9	1,0	1,0
30'	3900,0	3925,4	3920,3	0,9	1,0	1,0
1h	3899,9	3925,5	3920,4	0,8	1,1	1,1
4h	3900,2	3925,6	3920,6	1,1	1,2	1,3
9h	3900,3	3925,8	3921,1	1,2	1,4	1,8
25h	390,10	3926,3	3921,8	1,9	1,9	2,5
49h	3901,3	3926,3	3921,8	2,2	1,9	2,5
73h	3901,7	3926,6	3922,2	2,6	2,2	2,9
97h	3901,7	3926,6	3922,2	2,6	2,2	2,9

### B.1.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 180 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ERPC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERPC1	ERPC1/1	149,74	150,10	149,97	150,18
	ERPC1/2	149,85	149,86	149,98	150,30
	ERPC1/3	149,87	150,10	149,76	150,03

Tabela 181 – Kapilarno upijanje betona ERPC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	ERPC1/1	ERPC1/2	ERPC1/3	ERPC1/1	ERPC1/2	ERPC1/3
suv uzorak	3288,5	3229,9	3349,7	0	0	0
1'	3288,8	3230,4	3350,2	0,3	0,5	0,5
5'	3288,8	3230,5	3350,3	0,3	0,6	0,6
15'	3288,9	3230,6	3350,3	0,4	0,7	0,6
30'	3289,4	3230,8	3350,4	0,9	0,9	0,7
1h	3289,7	3231,0	3350,5	0,8	1,1	0,8
4h	3289,7	3231,5	3350,5	1,2	1,6	0,8
9h	3290,1	3231,8	3350,4	1,6	1,9	0,7
25h	3290,4	3232,3	3350,2	1,9	2,4	0,5
49h	3290,5	3232,6	3350,2	2,0	2,7	0,5
73h	3290,5	3232,9	3350,2	2,0	3,0	0,5
97h	3290,5	3232,9	3350,2	2,0	3,0	0,5

Tabela 182 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka NRPC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
NRPC1	NRPC1/1	150,01	150,06	149,84	149,71
	NRPC1/2	149,79	149,81	150,05	149,88
	NRPC1/3	149,78	149,87	149,87	149,89

Tabela 183 – Kapilarno upijanje betona NRPC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru  $Na_2SO_4$

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode $m_{v,k}$ [g]		
	NRPC1/1	NRPC1/2	NRPC1/3	NRPC1/1	NRPC1/2	NRPC1/3
suv uzorak	3938,2	3988,3	4133,3	0	0	0
1'	3940,3	3990,7	4135,2	2,1	2,4	1,9
5'	3940,9	3991,1	4135,9	2,7	2,8	2,6
15'	3941,9	3991,7	4136,4	3,7	3,4	3,1
30'	3942,1	3992,1	4136,8	3,9	3,8	3,5
1h	3942,7	3992,9	4137,3	4,5	4,6	4,0
4h	3944,2	3994,4	4139,2	6,0	6,1	5,9
9h	3945,0	3996,4	4140,5	6,8	8,1	7,2
25h	3945,2	3997,8	4141,6	7,0	9,5	8,3
49h	3945,5	3998,5	4142,6	7,3	10,2	9,3
73h	3946,0	3999,7	4142,7	7,8	11,4	9,4
97h	3946,0	3999,7	4142,7	7,8	11,4	9,4

Tabela 184 – Dimenzije uzorka za određivanje kapilarnog upijanja uzorka MRPC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		$a_1$ [mm]	$a_2$ [mm]	$b_1$ [mm]	$b_2$ [mm]
MRPC1	MRPC1/1	149,69	149,80	149,88	149,92
	MRPC1/2	149,65	149,63	150,06	150,11
	MRPC1/3	149,86	149,83	149,84	149,83

Tabela 185 – Kapilarno upijanje betona MRPC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRPC1/1	MRPC1/2	MRPC1/3	MRPC1/1	MRPC1/2	MRPC1/3
suv uzorak	3894,7	3916,9	3919,4	0	0	0
1'	3895,5	3918,1	3920,5	0,8	1,2	1,1
5'	3895,6	3918,3	3920,6	0,9	1,4	1,2
15'	3895,9	3918,5	3920,6	1,2	1,6	1,2
30'	3896,0	3918,5	3920,7	1,3	1,6	1,3
1h	3896,3	3918,8	3921,1	1,6	1,9	1,7
4h	3897,1	3919,4	3921,4	2,4	2,5	2,0
9h	3898,4	3920,3	3923,2	3,7	3,4	3,8
25h	3899,6	3921,3	3924,6	4,9	4,4	5,2
49h	3900,0	3922,3	3925,6	6,0	5,4	6,2
73h	3901,7	3923,1	3926,5	7,0	6,2	7,1
97h	3901,7	3923,1	3926,5	7,0	6,2	7,1

## B.2. Beton RPC2

### B.2.1. Pre potapanja u rastvore

Tabela 186 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja betona RPC2 - pre potapanja u rastvore

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
RPC2	RPC2/1	149,87	150,10	150,00	150,00
	RPC2/2	149,66	149,87	150,11	150,55
	RPC2/3	149,97	150,01	150,06	149,92

Tabela 187 – Kapilarno upijanje betona RPC2 – pre potapanja u rastvore

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	RPC2/1	RPC2/2	RPC2/3	RPC2/1	RPC2/2	RPC2/3
suv uzorak	3804,7	4272,1	4127,2	0	0	0
1'	3806,2	4273,6	4128,6	1,5	1,5	1,4
5'	3807,2	4274,7	4129,3	2,5	2,6	2,1
15'	3808,0	4275,4	4130,1	3,3	3,3	2,9
30'	3808,7	4276,2	4130,9	4,0	4,1	3,7
1h	3809,2	4277,0	4131,7	4,5	4,9	4,5
4h	3810,9	4278,6	4133,2	6,2	6,5	6,0
9h	3812,0	4279,5	4133,9	7,03	7,4	6,7
25h	3813,0	4280,8	4135,7	8,3	8,7	8,5
49h	3813,6	4281,2	4136,0	8,9	9,1	8,8
73h	3813,9	4281,4	4136,2	9,2	9,3	9,0
97h	3814,0	4281,6	4136,4	9,3	9,5	9,2

## B.2.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Tabela 188 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ERPC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERPC2	ERPC2/1	149,87	150,10	150,00	150,00
	ERPC2/2	149,66	149,87	150,11	150,55
	ERPC2/3	149,97	150,01	150,06	149,92

Tabela 189 – Kapilarno upijanje betona ERPC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ERPC2/1	ERPC2/2	ERPC2/3	ENPC2/1	ENPC2/2	ENPC2/3
suv uzorak	3832,1	4301,3	4155,5	0	0	0
1'	3832,6	4301,9	4155,9	0,5	0,6	0,4
5'	3832,7	4301,9	4156,2	0,6	0,6	0,7
15'	3832,8	4302,1	4156,2	0,7	0,8	0,7
30'	3833,3	4302,4	4156,5	1,2	1,1	1,0
1h	3833,1	4302,7	4156,9	1,0	1,4	1,4
4h	3833,6	4302,6	4156,9	1,5	1,3	1,4
9h	3834,1	4303,1	4157,1	2,0	1,8	1,6
25h	3834,1	4303,1	4157,0	2,0	1,8	1,5
49h	3833,8	4302,7	4157,3	1,7	1,4	1,3
73h	3834,2	4303,1	4157,3	2,1	1,8	1,8
97h	3834,2	4303,1	4157,3	2,1	1,8	1,8

Tabela 190 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NRPC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NRPC2	NRPC2/1	149,89	149,83	149,76	149,96
	NRPC2/2	150,09	150,11	149,84	149,81
	NRPC2/3	150,21	150,26	150,01	150,05

Tabela 191 – Kapilarno upijanje betona NRPC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NRPC2/1	NRPC2/2	NRPC2/3	NRPC2/1	NRPC2/2	NRPC2/3
suv uzorak	3723,1	3531,8	3960,9	0	0	0
1'	3723,8	3532,4	3961,6	0,7	0,6	0,7
5'	3723,8	3532,4	3961,6	0,7	0,6	0,7
15'	3723,8	3532,5	3961,6	0,7	0,7	0,7
30'	3724,1	3532,7	3961,8	1,0	0,9	0,9
1h	3724,3	3533,0	3962,2	1,2	1,2	1,3
4h	3724,3	3533,1	3962,2	1,2	1,3	1,3
9h	3724,7	3533,3	3962,5	1,6	1,5	1,6
25h	3724,6	3533,4	3962,4	1,5	1,6	1,5
49h	3724,6	3533,1	3962,3	1,5	1,3	1,4
73h	3724,8	3533,4	3962,6	1,7	1,6	1,7
97h	3724,8	3533,4	3962,6	1,7	1,6	1,7

Tabela 192 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MRPC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MRPC2	MRPC2/1	149,63	149,54	149,94	150,00
	MRPC2/2	149,95	149,95	150,09	150,14
	MRPC2/3	150,1	149,95	149,94	149,98

Tabela 193 – Kapilarno upijanje betona MRPC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRPC2/1	MRPC2/2	MRPC2/3	MRPC2/1	MRPC2/2	MRPC2/3
suv uzorak	4441,7	4594,0	3891,1	0	0	0
1'	4442,1	4594,5	3891,4	0,4	0,5	0,3
5'	4442,2	4594,6	3891,5	0,5	0,6	0,4
15'	4442,3	4594,8	3891,8	0,6	0,8	0,7
30'	4442,3	4594,9	3891,8	0,6	0,9	0,7
1h	4442,7	4595,4	3892,0	1,0	1,4	0,9
4h	4442,8	4595,2	3892,2	1,1	1,2	1,1
9h	4442,8	4595,4	3892,1	1,1	1,4	1,0
25h	4442,7	4595,7	3892,0	1,0	1,7	0,9
49h	4442,4	4595,3	3891,8	0,7	1,3	0,7
73h	4442,4	4595,3	3891,9	0,7	1,3	0,8
97h	4442,4	4595,3	3891,9	0,7	1,3	0,8

### B.2.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 194 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ERPC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERPC2	ERPC2/1	149,87	150,10	150,00	150,00
	ERPC2/2	149,66	149,87	150,11	150,55
	ERPC2/3	149,97	150,01	150,06	149,92

Tabela 195 – Kapilarno upijanje betona ERPC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ERPC2/1	ERPC2/2	ERPC2/3	ERPC2/1	ERPC2/2	ERPC2/3
suv uzorak	3831,1	4302,9	4157,1	0	0	0
1'	3832,7	4303,6	4157,8	0,6	0,7	0,7
5'	3832,7	4303,5	4157,8	0,6	0,6	0,7
15'	3832,8	4303,4	4157,8	0,7	0,5	0,7
30'	3832,9	4303,6	4157,9	0,8	0,7	0,8
1h	3833,1	4303,7	4158,1	1,0	0,8	1,0
4h	3833,5	4304,0	4158,5	1,4	1,1	1,4
9h	3833,7	4304,2	4158,5	1,6	1,3	1,4
25h	3834,1	4304,1	4158,8	2,0	1,2	1,7
49h	3834,1	4304,1	4158,8	2,0	1,2	1,7
73h	3834,2	4304,2	4158,8	2,1	1,3	1,7
97h	3834,2	4304,2	4158,8	2,1	1,3	1,7

Tabela 196 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NRPC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NRPC2	NRPC2/1	149,89	149,83	149,76	149,96
	NRPC2/2	150,09	150,11	149,84	149,81
	NRPC2/3	150,21	150,26	150,01	150,05

Tabela 197 – Kapilarno upijanje betona NRPC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NRPC2/1	NRPC2/2	NRPC2/3	NRPC2/1	NRPC2/2	NRPC2/3
suv uzorak	3724,9	3531,2	3961,3	0	0	0
1'	3726,0	3532,3	3962,6	1,1	1,1	1,3
5'	3726,6	3532,3	3962,6	1,7	1,1	1,3
15'	3726,9	3532,8	3962,5	2,0	1,6	1,2
30'	3726,9	3533,1	3963,5	2,0	1,9	2,2
1h	3727,6	3533,6	3963,5	2,7	2,4	2,2
4h	3728,4	3534,7	3964,9	3,5	3,5	3,6
9h	3728,8	3535,5	3965,5	3,9	4,3	4,2
25h	3729,0	3535,5	3965,9	4,1	4,3	4,6
49h	3729,4	3535,6	3966,1	4,5	4,4	4,8
73h	3729,6	3536,0	3966,1	4,7	4,8	4,8
97h	3729,6	3536,0	3966,1	4,7	4,8	4,8

Tabela 198 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MRPC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MRPC2	MRPC2/1	149,63	149,54	149,94	150,00
	MRPC2/2	149,95	149,95	150,09	150,14
	MRPC2/3	150,1	149,95	149,94	149,98

Tabela 199 – Kapilarno upijanje betona MRPC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRPC2/1	MRPC2/2	MRPC2/3	MRPC2/1	MRPC2/2	MRPC2/3
suv uzorak	4438,8	4591,1	3887,7	0	0	0
1'	4439,6	4592,3	3888,6	0,8	1,2	0,9
5'	4439,6	4592,4	3888,8	0,8	1,3	1,1
15'	4439,7	4592,5	3888,9	0,9	1,4	1,2
30'	4439,9	4592,8	3889,0	1,1	1,7	1,3
1h	4440,0	4593,0	3889,2	1,2	1,9	1,5
4h	4440,4	4593,7	3889,5	1,6	2,6	1,8
9h	4441,1	4593,5	3890,2	2,3	2,4	2,5
25h	4441,1	4594,1	3890,1	2,3	3,0	2,4
49h	4441,2	4594,0	3890,1	2,4	2,9	2,4
73h	4441,2	4594,2	3890,3	2,4	3,1	2,6
97h	4441,2	4594,2	3890,3	2,4	3,1	2,6



### B.3. Beton RMC1

#### B.3.1. Pre potapanja u rastvore

Tabela 200 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja betona RMC1 - pre potapanja u rastvore

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
RMC1	RMC1/1	149,91	149,61	149,59	149,60
	RMC1/2	149,72	149,57	149,80	149,67
	RMC1/3	149,63	149,72	149,68	149,56

Tabela 201 – Kapilarno upijanje betona RMC1 – pre potapanja u rastvore

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	RMC1/1	RMC1/2	RMC1/3	RMC1/1	RMC1/2	RMC1/3
suv uzorak	3616,3	3795,8	3468,5	0	0	0
1'	3620,6	3799,3	3472,1	4,3	3,4	3,6
5'	3623,6	3802,0	3474,3	7,3	6,1	5,8
15'	3626,6	3804,2	3476,8	10,3	8,3	8,3
30'	3628,7	3805,9	3478,5	12,4	10,0	10,0
1h	3631,1	3808,0	3480,3	14,8	12,1	11,8
4h	3636,5	3812,0	3484,6	20,2	16,1	16,1
9h	3638,9	3813,9	3486,7	22,6	18,0	18,2
25h	3641,8	3816,6	3489,5	25,5	20,7	21,0
49h	3642,6	3817,4	3490,4	26,3	21,5	21,9
73h	3642,6	3817,4	3490,4	26,3	21,5	21,9
97h	3642,6	3817,4	3490,4	26,3	21,5	21,9

#### B.3.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Tabela 202 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ERMCI - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERMCI	ERMCI/1	149,91	149,61	149,59	149,60
	ERMCI/2	149,72	149,57	149,80	149,67
	ERMCI/3	149,63	149,72	149,68	149,56

Tabela 203 – Kapilarno upijanje betona ERMCI – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ERMCI/1	ERMCI/2	ERMCI/3	ERMCI/1	ERMCI/2	ERMCI/3
suv uzorak	3665,5	3845,3	3515,0	0	0	0
1'	3666,7	3846,1	3516,0	1,2	0,8	1,0
5'	3667,2	3846,6	3516,4	1,7	1,3	1,4
15'	3667,8	3846,9	3516,8	2,3	1,6	1,8
30'	3668,2	3847,2	3517,1	2,7	1,9	2,1
1h	3668,9	3847,7	3517,5	3,4	2,4	2,5
4h	3670,7	3848,6	3518,7	5,2	3,3	3,7
9h	3671,9	3849,6	3519,8	6,4	4,3	4,8
25h	3673,6	3850,7	3521,0	8,1	5,4	6,0
49h	3674,5	3851,6	3521,8	9,0	6,3	6,8
73h	3674,8	3851,6	3522,0	9,3	6,3	7,0
97h	3674,8	3851,6	3522,0	9,3	6,3	7,0

Tabela 204 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NRMCI - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NRMCI	NRMCI/1	149,91	149,81	149,83	149,70
	NRMCI/2	149,68	149,77	149,84	149,68
	NRMCI/3	149,83	149,60	149,89	149,70

Tabela 205 – Kapilarno upijanje betona NRMCI – nakon 3 meseca držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NRMCI/1	NRMCI/2	NRMCI/3	NRMCI/1	NRMCI/2	NRMCI/3
suv uzorak	3827,0	3593,8	3793,8	0	0	0
1'	3828,9	3595,4	3795,3	1,9	1,6	1,5
5'	3829,6	3595,9	3795,9	2,6	2,1	2,1
15'	3830,3	3596,2	3796,2	3,3	2,4	2,4
30'	3830,6	3596,9	3796,7	3,6	3,1	2,9
1h	3831,1	3597,3	3797,0	4,1	3,5	3,2
4h	3832,5	3598,3	3798,4	5,5	4,5	4,6
9h	3834,1	3599,6	3799,8	7,1	5,8	6,0
25h	3936,2	3601,1	3801,3	9,2	7,3	7,5
49h	3837,1	3602,1	3801,3	10,1	8,3	7,5
73h	3837,6	3602,1	3801,6	10,6	8,3	7,8
97h	3837,6	3602,1	3801,6	10,6	8,3	7,8

Tabela 206 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MRMC1 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MRMC1	MRMC1/1	149,77	149,79	149,76	149,81
	MRMC1/2	149,71	149,38	149,96	150,14
	MRMC1/3	149,72	149,78	149,75	149,98

Tabela 207 – Kapilarno upijanje betona MRMC1 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRMC1/1	MRMC1/2	MRMC1/3	MRMC1/1	MRMC1/2	MRMC1/3
suv uzorak	4314,0	3771,0	3786,2	0	0	0
1'	4315,2	3772,1	3787,2	1,2	1,1	1,0
5'	4315,5	3772,4	3788,0	1,5	1,4	1,8
15'	4315,8	3772,8	3788,1	1,8	1,8	1,9
30'	4316,1	3773,0	3788,2	2,1	2,0	2,0
1h	4316,5	3773,5	3788,5	2,5	2,5	2,3
4h	4317,5	3774,7	3789,3	3,5	3,7	3,1
9h	4318,6	3775,8	3790,4	4,6	4,8	4,2
25h	4319,6	3776,8	3791,4	5,6	5,8	5,2
49h	4320,0	3777,4	3791,7	6,0	6,4	5,5
73h	4320,3	3777,6	3791,8	6,3	6,6	5,6
97h	4320,3	3777,6	3791,8	6,3	6,6	5,6

### B.3.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 208 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ERMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERMC1	ERMC1/1	149,91	149,61	149,59	149,60
	ERMC1/2	149,72	149,57	149,80	149,67
	ERMC1/3	149,63	149,72	149,38	149,56

Tabela 209 – Kapilarno upijanje betona ERMC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ERMC1/1	ERMC1/2	ERMC1/3	ERMC1/1	ERMC1/2	ERMC1/3
suv uzorak	3660,5	3838,6	3508,8	0	0	0
1'	3662,0	3839,7	3510,0	1,5	1,1	1,2
5'	3662,5	3840,1	3510,6	2,0	1,5	1,8
15'	3663,0	3840,7	3511,1	2,5	2,1	2,3
30'	3663,6	3841,2	3511,4	3,1	2,6	2,6
1h	3664,3	3841,7	3512,2	3,8	3,1	3,4
4h	3666,8	3843,6	3513,9	6,3	5,0	5,1
9h	3668,3	3844,8	3515,1	7,8	6,2	6,3
25h	3670,2	3846,7	3516,7	9,7	8,1	7,9
49h	3670,7	3847,3	3517,3	10,2	8,7	8,5
73h	3671,0	3847,7	3517,5	10,5	9,1	8,7
97h	3671,0	3847,7	3517,5	10,5	9,1	8,7

Tabela 210 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NRMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NRMC1	NRMC1/1	149,91	149,81	149,83	149,70
	NRMC1/2	149,68	149,77	149,84	149,68
	NRMC1/3	149,83	149,60	149,89	149,70

Tabela 211 – Kapilarno upijanje betona NRMC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NRMC1/1	NRMC1/2	NRMC1/3	NRMC1/1	NRMC1/2	NRMC1/3
suv uzorak	3825,6	3591,4	3791,6	0	0	0
1'	3827,0	3592,6	3792,9	1,4	1,2	1,3
5'	3827,1	3593,2	3793,4	1,5	1,8	1,8
15'	3827,8	3593,7	3793,7	2,2	2,3	2,1
30'	3828,3	3593,9	3794,0	2,7	2,5	2,4
1h	3828,5	3594,3	3794,7	2,9	2,9	3,1
4h	3829,7	3595,7	3795,7	4,1	4,3	4,1
9h	3831,1	3596,7	3796,7	5,5	5,3	5,1
25h	3832,0	3597,4	3797,5	6,4	6,0	5,9
49h	3832,3	3597,9	3797,9	6,7	6,5	6,3
73h	3832,4	3598,1	3798,0	6,8	6,7	6,4
97h	3832,4	3598,1	3798,0	6,8	6,7	6,4

Tabela 212 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MRMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MRMC1	MRMC1/1	149,77	149,79	149,76	149,81
	MRMC1/2	149,71	149,38	149,96	150,14
	MRMC1/3	149,72	149,78	149,75	149,98

Tabela 213 – Kapilarno upijanje betona MRMC1 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRMC1/1	MRMC1/2	MRMC1/3	MRMC1/1	MRMC1/2	MRMC1/3
suv uzorak	4311,7	3768,4	3782,7	0	0	0
1'	4313,0	3770,2	3784,3	1,3	1,8	1,6
5'	4313,3	3770,5	3784,7	1,6	2,1	2,0
15'	4313,6	3770,8	3784,9	1,9	2,4	2,2
30'	4313,9	3771,0	3784,9	2,2	2,6	2,2
1h	4314,1	3771,3	3785,3	2,4	2,9	2,6
4h	4315,7	3772,8	3787,0	4,0	4,4	4,3
9h	4316,2	3773,1	3787,1	4,5	4,7	4,4
25h	4317,2	3774,0	3788,3	5,5	5,6	5,6
49h	4317,7	3774,5	3789,0	6,0	6,1	6,3
73h	4318,0	3774,7	3789,2	6,3	6,3	6,5
97h	4318,0	3774,7	3789,2	6,3	6,3	6,5

## B.4. Beton RMC2

### B.4.1. Pre potapanja u rastvore

Tabela 214 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja betona RMC2 - pre potapanja u rastvore

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
RMC2	RMC2/1	149,94	150,13	150,01	150,18
	RMC2/2	150,26	149,96	150,15	149,97
	RMC2/3	150,17	149,78	150,18	150,24

Tabela 215 – Kapilarno upijanje betona RMC2 – pre potapanja u rastvore

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	RMC2/1	RMC2/2	RMC2/3	RMC2/1	RMC2/2	RMC2/3
suv uzorak	3856,4	3796,8	3740,6	0	0	0
1'	3858,0	3798,5	3742,3	1,6	1,7	1,7
5'	3859,3	3799,8	3743,4	2,9	3,0	2,8
15'	3860,3	3800,9	3744,7	3,9	4,1	4,1
30'	3861,2	3802,0	3745,7	4,8	5,2	5,1
1h	3862,0	3802,6	3746,2	5,6	5,8	5,6
4h	3863,8	3804,5	3748,0	7,4	7,7	7,4
9h	3864,9	3805,7	3749,1	8,5	8,9	8,5
25h	3866,1	3806,8	3750,3	9,7	10,0	9,7
49h	3866,9	3807,5	3751,0	10,5	10,7	10,4
73h	3866,9	3807,5	3751,0	10,5	10,7	10,4
97h	3866,9	3807,5	3751,0	10,5	10,7	10,4

#### B.4.2. Nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Tabela 216 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ERM C2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERM C2	ERM C2/1	150,02	149,96	149,98	149,85
	ERM C2/2	149,96	150,00	150,03	150,00
	ERM C2/3	149,89	150,03	149,92	149,98

Tabela 217 – Kapilarno upijanje betona ERM C2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ERM C2/1	ERM C2/2	ERM C2/3	ERM C2/1	ERM C2/2	ERM C2/3
suv uzorak	3886,3	3827,1	3770,9	0	0	0
1'	3886,7	3827,5	3771,6	0,4	0,4	0,7
5'	3886,8	3827,6	3771,6	0,5	0,5	0,7
15'	3887,0	3827,7	3771,8	0,7	0,6	0,9
30'	3887,2	3827,9	3771,9	0,9	0,8	1,0
1h	3887,5	3828,4	3772,3	1,2	1,3	1,4
4h	3888,1	3828,9	3773,0	1,8	1,8	2,1
9h	3888,5	3829,4	3773,3	2,2	2,3	2,4
25h	3888,8	3829,9	3773,9	2,5	2,8	3,0
49h	3888,8	3930,3	3774,3	2,5	3,2	3,4
73h	3889,1	3930,3	3774,3	2,8	3,2	3,4
97h	3889,1	3830,3	3774,3	2,8	3,2	3,4

Tabela 218 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NRM C2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NRM C2	NRM C2/1	150,01	150,00	149,92	150,05
	NRM C2/2	149,96	149,91	150,02	149,91
	NRM C2/3	149,89	149,98	150,02	149,96

Tabela 219 – Kapilarno upijanje betona NRM C2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NRM C2/1	NRM C2/2	NRM C2/3	NRM C2/1	NRM C2/2	NRM C2/3
suv uzorak	3494,7	3772,4	3745,1	0	0	0
1'	3495,2	3772,9	3745,6	0,5	0,5	0,5
5'	3495,2	3772,9	3745,6	0,5	0,5	0,5
15'	3495,3	3773,1	3745,8	0,6	0,7	0,7
30'	3495,4	3773,1	3745,8	0,7	0,7	0,7
1h	3495,6	3773,5	3746,1	0,9	1,1	1,0
4h	3496,2	3774,1	3746,7	1,5	1,7	1,6
9h	3496,5	3774,5	3747,2	1,8	2,1	2,1
25h	3496,9	3775,0	3747,6	2,2	2,6	2,5
49h	3497,4	3775,6	3748,4	2,7	3,2	3,3
73h	3497,7	3775,7	3748,4	3,0	3,3	3,3
97h	3497,7	3775,7	3784,4	3,0	3,3	3,3

Tabela 220 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MRMC2 - nakon 3 meseca držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MRMC2	MRMC2/1	150,05	150,02	149,96	149,89
	MRMC2/2	149,90	149,98	149,92	150,02
	MRMC2/3	150,06	150,01	149,98	150,00

Tabela 221 – Kapilarno upijanje betona MRMC2 – nakon 3 meseca držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRMC2/1	MRMC2/2	MRMC2/3	MRMC2/1	MRMC2/2	MRMC2/3
suv uzorak	4118,8	3831,1	3776,9	0	0	0
1'	4119,3	3831,5	3777,3	0,5	0,4	0,4
5'	4119,2	3831,5	3777,3	0,4	0,4	0,4
15'	4119,3	3831,6	3777,4	0,5	0,5	0,5
30'	4119,2	3831,6	3777,6	0,4	0,5	0,7
1h	4119,5	3831,9	3777,7	0,7	0,8	0,8
4h	4119,9	3832,3	3778,2	1,1	1,2	1,3
9h	4120,3	3832,9	3778,1	1,5	1,4	1,2
25h	4120,4	3833,3	3778,4	1,6	1,8	1,5
49h	4120,8	3833,3	3779,0	2,0	2,2	2,1
73h	4120,8	3833,3	3779,1	2,0	2,2	2,2
97h	4120,8	3833,3	3779,1	2,0	2,2	2,2

#### B.4.3. Nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Tabela 222 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka ERMC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
ERMC2	ERMC2/1	150,02	149,96	149,98	149,85
	ERMC2/2	149,96	150,00	150,03	150,00
	ERMC2/3	149,89	150,03	149,92	149,98

Tabela 223 – Kapilarno upijanje betona ERMC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	ERMC2/1	ERMC2/2	ERMC2/3	ERMC2/1	ERMC2/2	ERMC2/3
suv uzorak	3883,9	3825,3	3769,1	0	0	0
1'	3884,5	3825,9	3769,6	0,6	0,6	0,5
5'	3884,6	3825,9	3769,8	0,7	0,6	0,7
15'	3884,7	3826,2	3770,0	0,8	0,9	0,9
30'	3884,9	3826,4	3770,0	1,0	1,1	0,9
1h	3885,1	3826,4	3770,1	1,2	1,1	1,0
4h	3885,3	3826,9	3770,5	1,4	1,6	1,4
9h	3885,5	3827,2	3770,7	1,6	1,9	1,6
25h	3886,2	3827,8	3771,2	2,3	2,5	2,1
49h	3886,5	3828,3	3771,6	2,6	3,0	2,5
73h	3886,7	3828,4	3771,8	2,8	3,1	2,7
97h	3886,7	3828,4	3771,8	2,8	3,1	2,7

Tabela 224 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka NRMC2 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
NRMC2	NRMC2/1	150,01	150,00	149,92	150,05
	NRMC2/2	149,96	149,91	150,02	149,91
	NRMC2/3	149,89	149,98	150,02	149,96

Tabela 225 – Kapilarno upijanje betona NRMC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	NRMC2/1	NRMC2/2	NRMC2/3	NRMC2/1	NRMC2/2	NRMC2/3
suv uzorak	3488,7	3766,1	3739,6	0	0	0
1'	3489,7	3767,2	3740,5	0,6	0,8	0,7
5'	3490,0	3767,4	3740,8	0,8	1,1	0,8
15'	3490,2	3767,8	3741,0	1,2	1,2	0,9
30'	3490,3	3767,8	3741,2	1,3	1,3	1,0
1h	3490,7	3768,3	3741,4	1,5	1,7	1,3
4h	3491,4	3769,2	3742,2	2,0	2,2	1,8
9h	3491,9	3769,6	3742,6	2,3	2,5	2,1
25h	3492,5	3770,6	3743,3	2,9	3,1	2,7
49h	3493,2	3771,3	3744,3	3,4	3,5	3,2
73h	3493,7	3771,5	3744,5	3,7	3,7	3,5
97h	3493,7	3771,5	3744,5	3,7	3,7	3,5

Tabela 226 – Dimenzije uzoraka za određivanje kapilarnog upijanja uzoraka MRMC1 - nakon 6 meseci držanja u rastvoru

Vrsta betona	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			
		a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]
MRMC2	MRMC2/1	150,05	150,02	149,96	149,89
	MRMC2/2	149,90	149,98	149,92	150,02
	MRMC2/3	150,06	150,01	149,98	150,00

Tabela 227 – Kapilarno upijanje betona MRMC2 – nakon 6 meseci držanja u rastvoru MgSO<sub>4</sub>

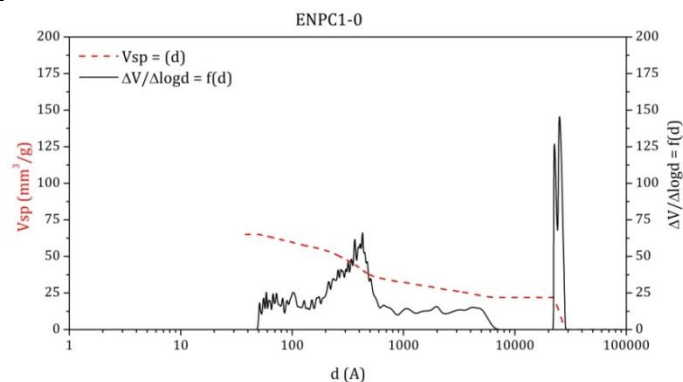
Vreme, t	Masa uzorka [g]			Masa upijene vode m <sub>v,k</sub> [g]		
	MRMC2/1	MRMC2/2	MRMC2/3	MRMC2/1	MRMC2/2	MRMC2/3
suv uzorak	4116,1	3828,0	3773,2	0	0	0
1'	4117,0	3829,2	3774,7	0,9	1,2	1,5
5'	4117,3	3829,6	3774,8	1,2	1,6	1,6
15'	4117,5	3829,7	3774,9	1,4	1,7	1,7
30'	4117,6	3829,7	3774,9	1,5	1,7	1,7
1h	4117,6	3829,8	3775,1	1,5	1,8	1,9
4h	4118,1	3830,3	3775,5	2,0	2,3	2,3
9h	4118,4	3830,7	3775,8	2,3	2,7	2,6
25h	4118,6	3830,9	3776,2	2,5	2,9	3,0
49h	4119,0	3831,3	3776,6	2,9	3,3	3,4
73h	4119,1	3831,6	3776,8	3,0	3,6	3,6
97h	4119,1	3831,6	3776,8	3,0	3,6	3,6

## PRILOG 12

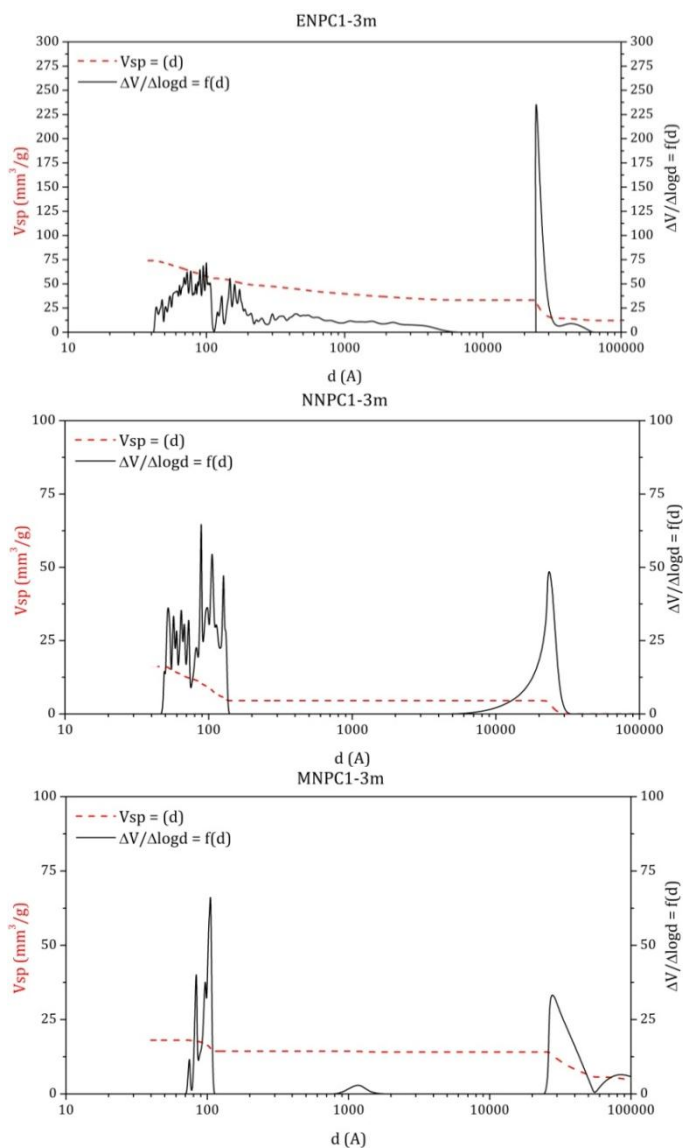
### Živina porozimetrija-dijagrami kumulativne krive utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini

#### A. Beton sa rečnim agregatom

##### A.1. Beton NPC1

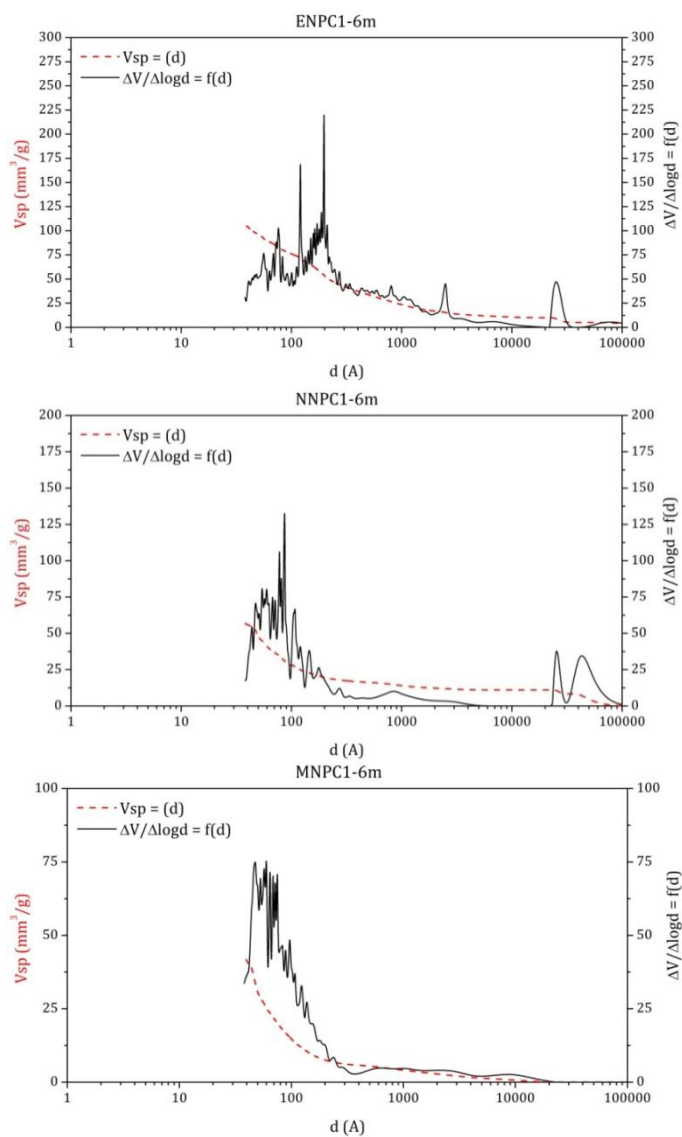


Slika 228 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ENPC1-0 (pre potapanja u sulfatne rastvove)



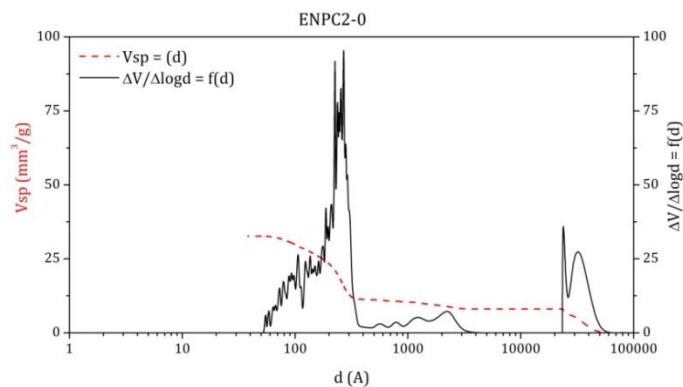
Slika 229 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENPC1-3m, NNPC1-3m i MNPC1-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)



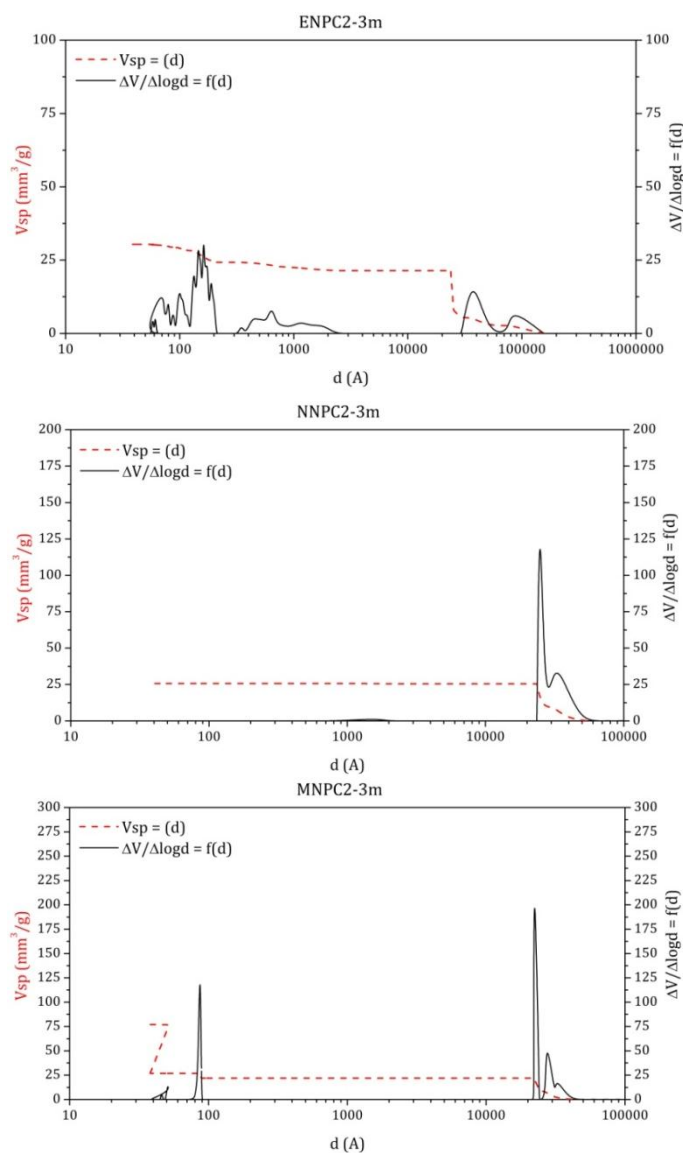


Slika 230 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENPC1-6m, NNPC1-6m i MNPC1-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

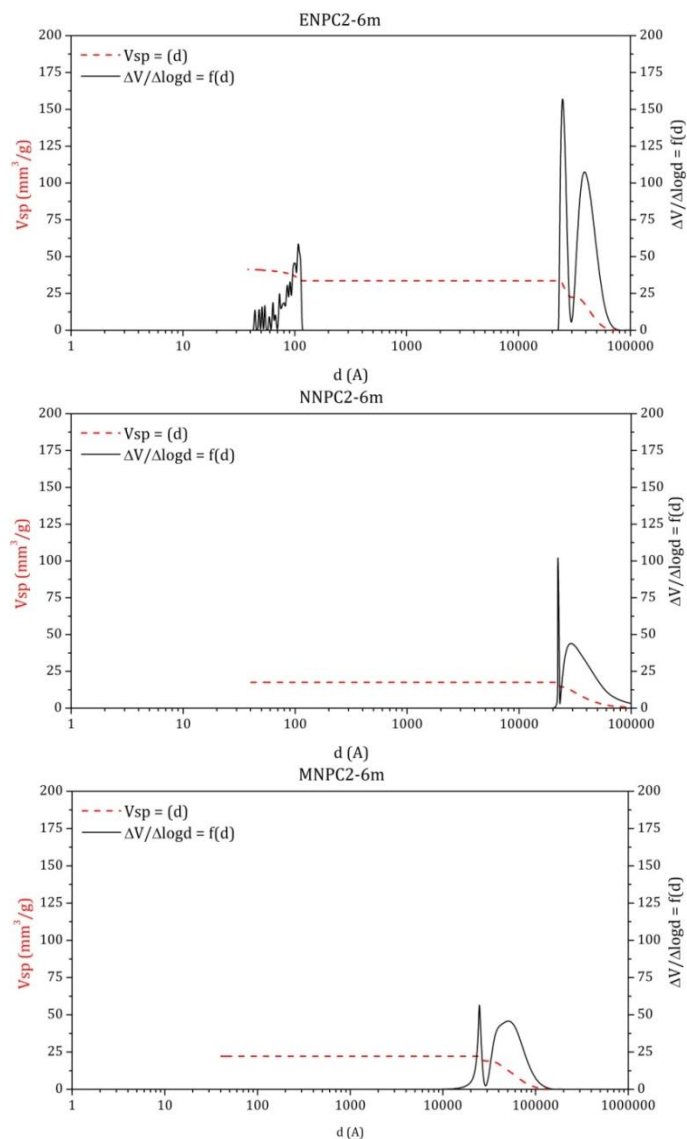
## A.2. Beton NPC2



Slika 231 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ENPC2-0 (pre potapanja u sulfatne rastvore)

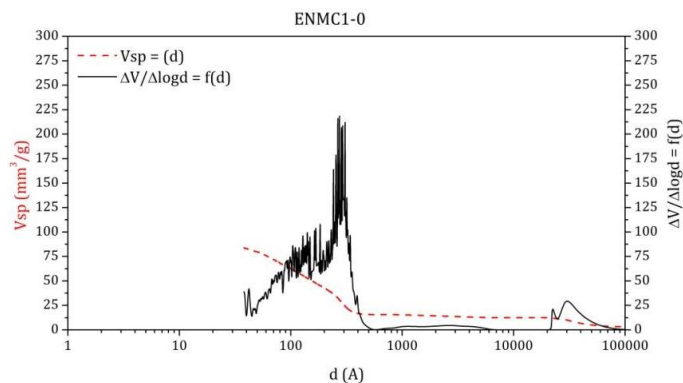


Slika 232 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENPC2-3m, NNPC2-3m i MNPC2-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)

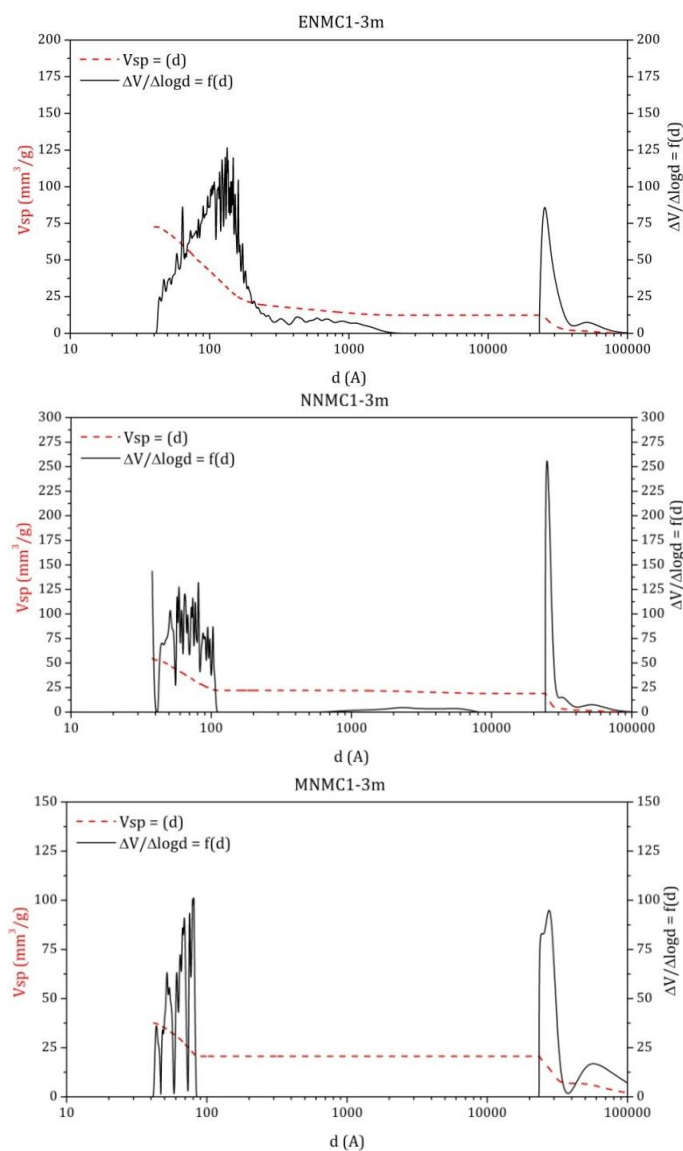


Slika 233 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENPC2-6m, NNPC2-6m i MNPC2-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

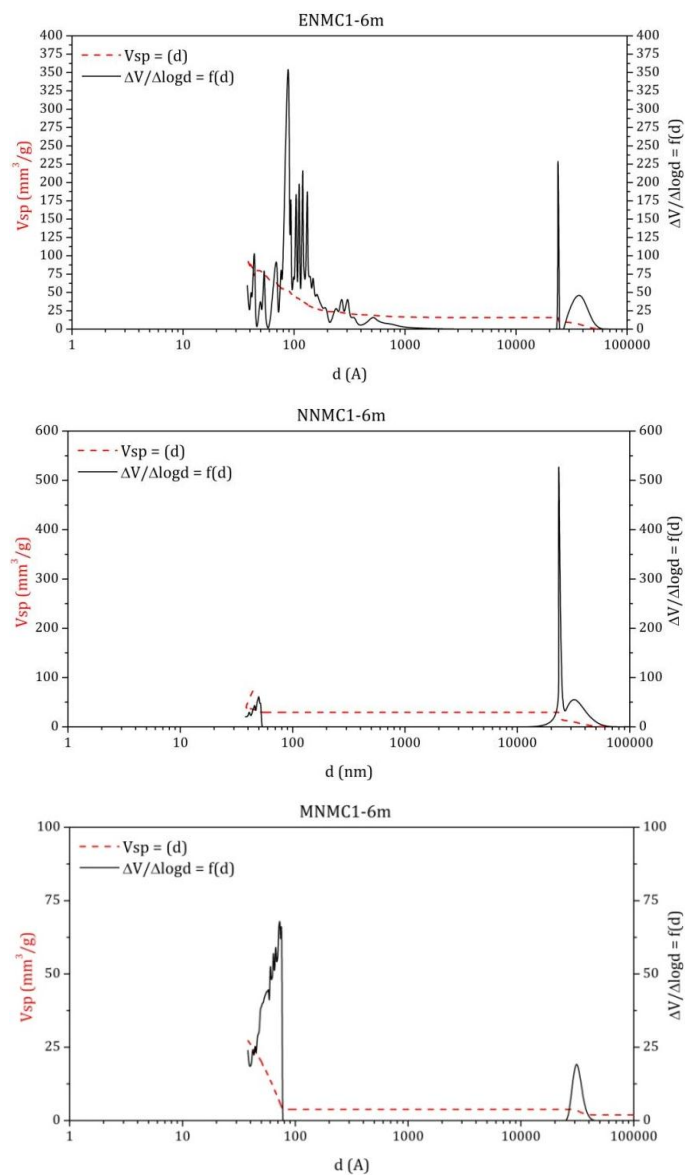
### A.3. Beton NMC1



Slika 234 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ENMC1-0 (pre potapanja u sulfatne rastvore)

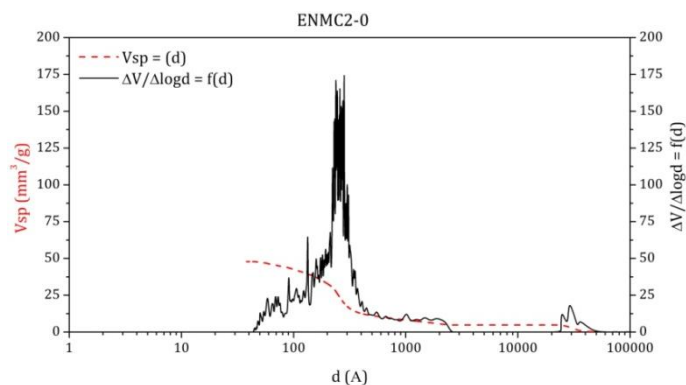


Slika 235 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENMC1-3m, NNMC1-3m i MNMC1-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)

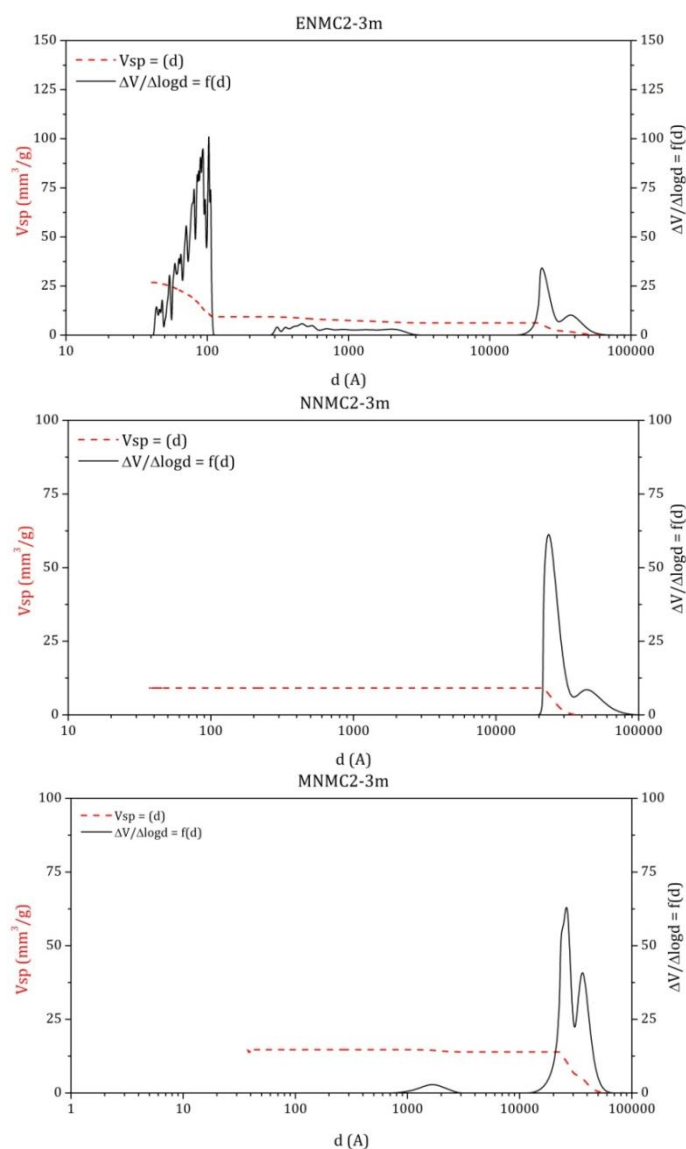


Slika 236 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENMC1-6m, NNMC1-6m i MNMC1-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

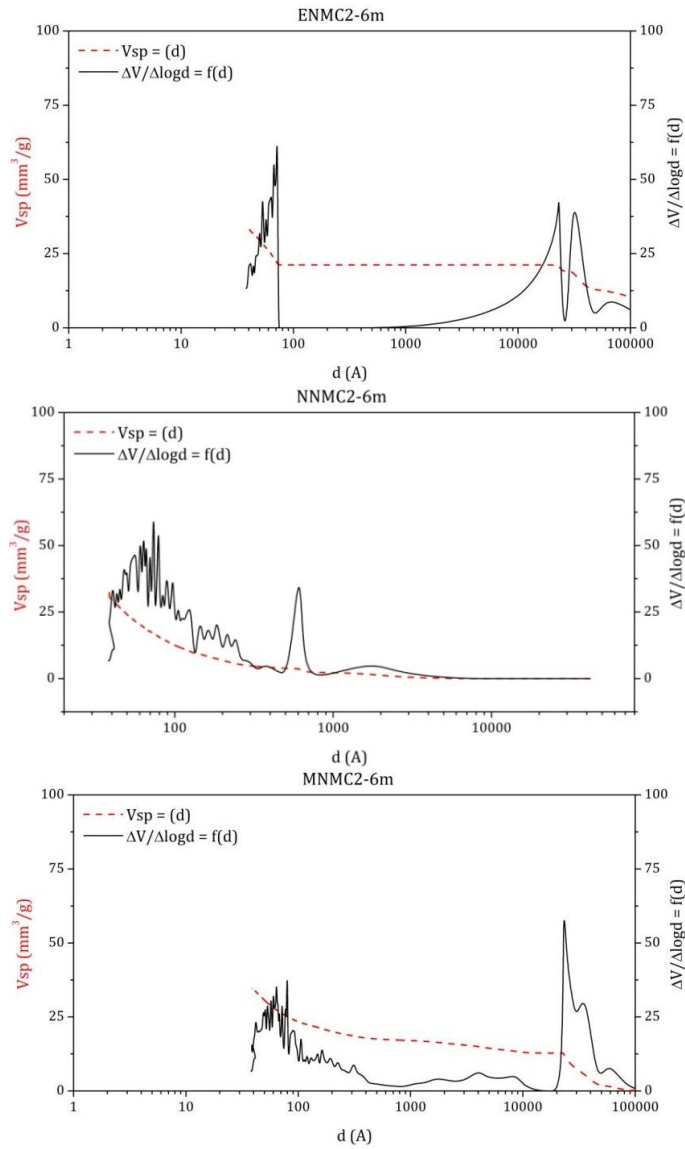
#### A.4. Beton NMC2



Slika 237 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ENMC2-0 (pre potapanja u sulfatne rastvore)



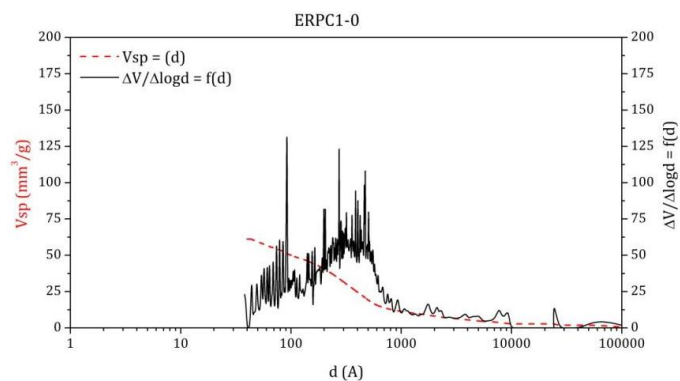
Slika 238 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENMC2-3m, NNMC2-3m i MNMC2-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)



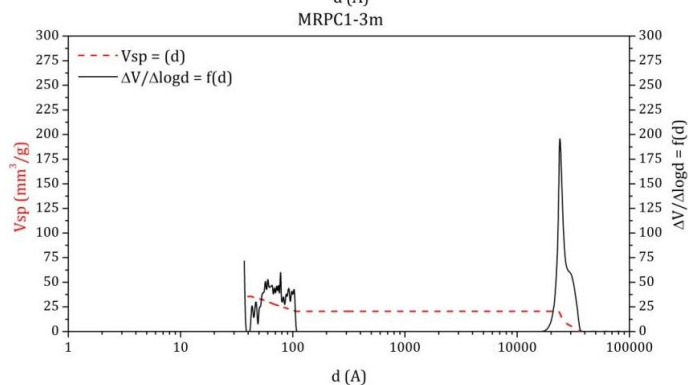
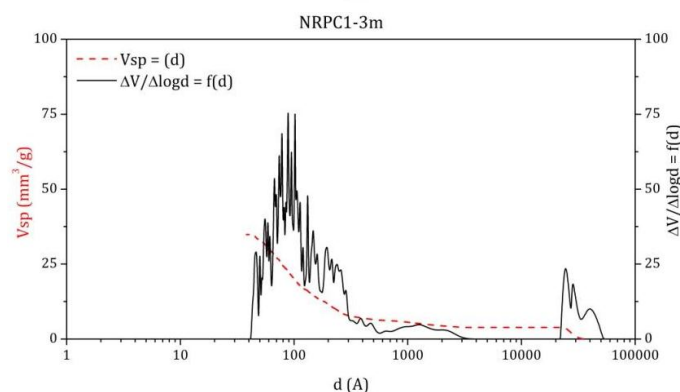
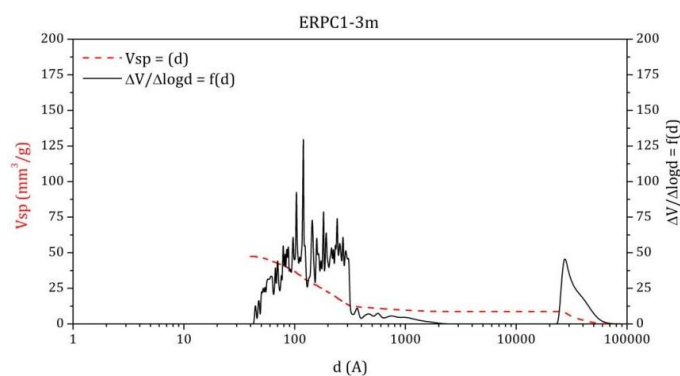
Slika 239 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ENMC2-6m, NNMC2-6m i MNMC2-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

## B. Beton sa recikliranim agregatom

### B.1. Beton RPC1

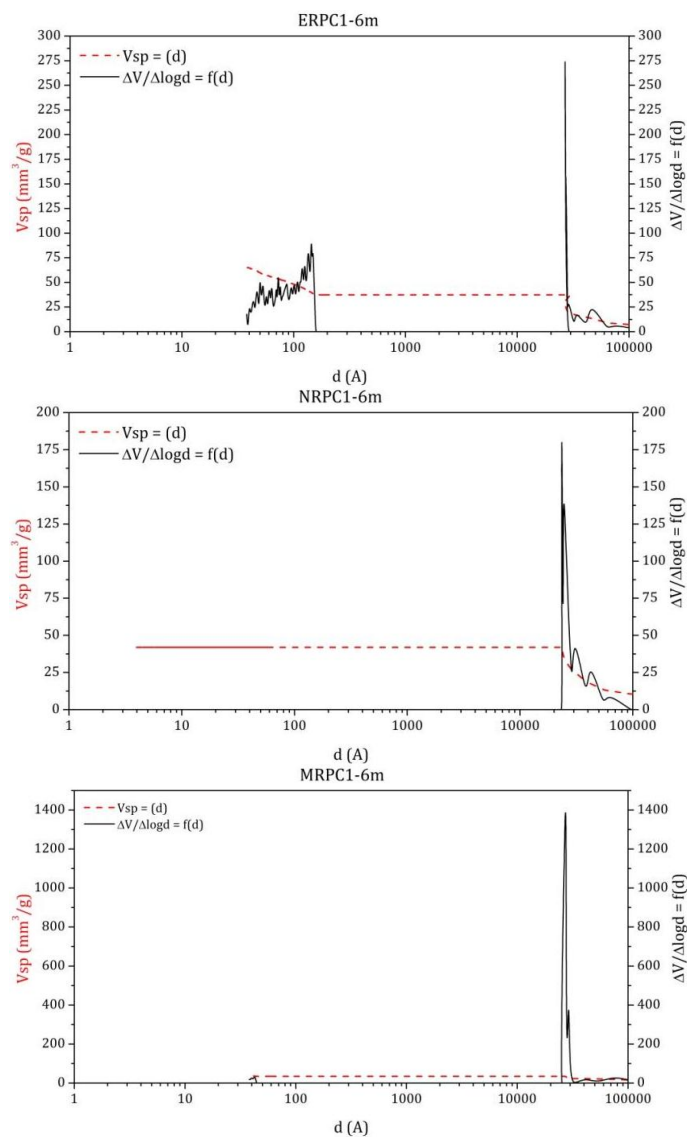


Slika 240 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ERPC1-0 (pre potapanja u sulfatne rastvore)



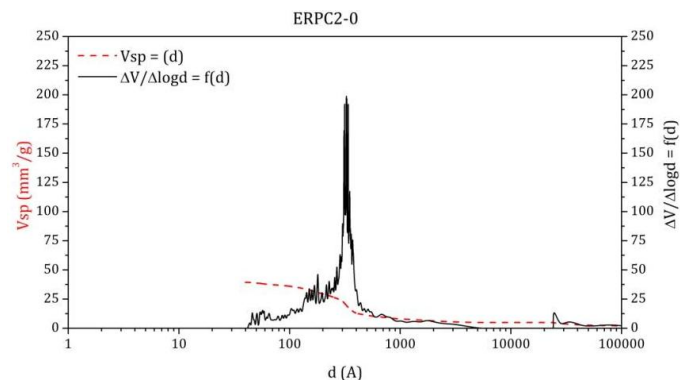
Slika 241 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERPC1-3m, NRPC1-3m i MRPC1-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)



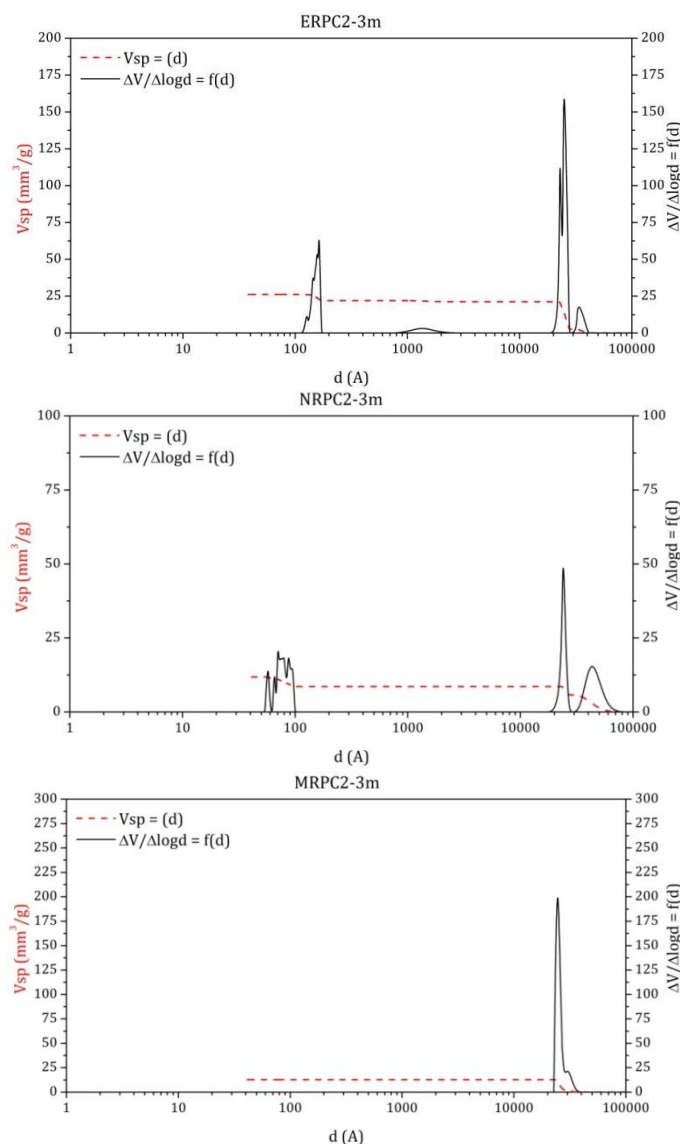


Slika 242 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERPC1-6m, NRPC1-6m i MRPC1-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

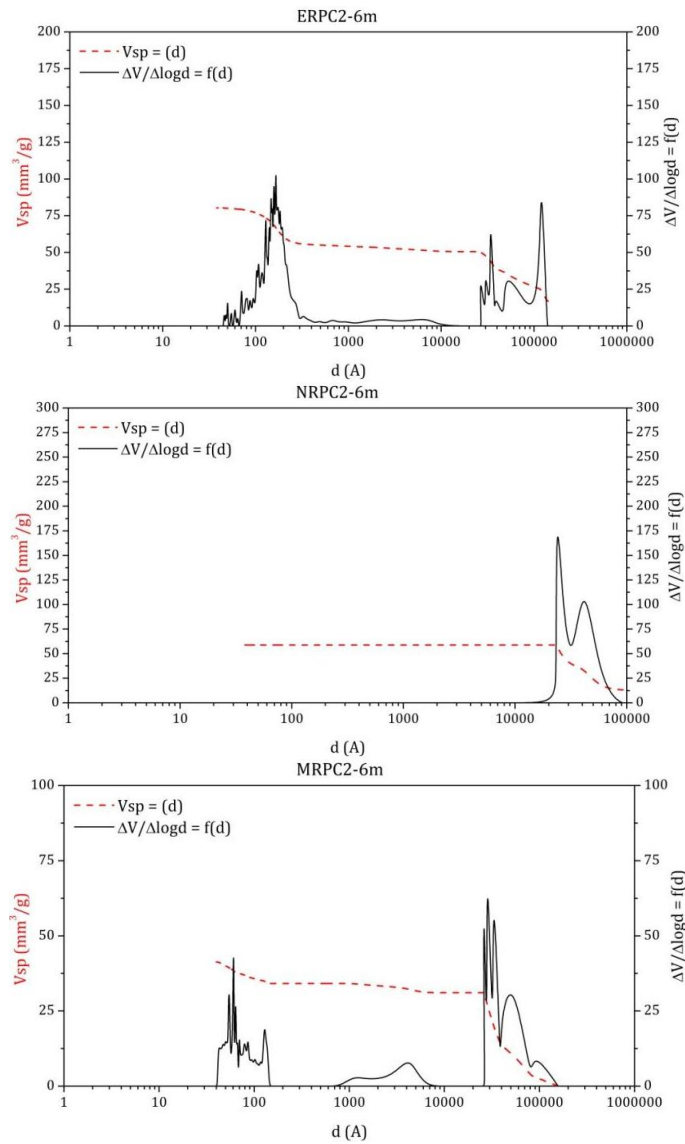
## B.2. Beton RPC2



Slika 243 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ERPC2-0 (pre potapanja u sulfatne rastvore)

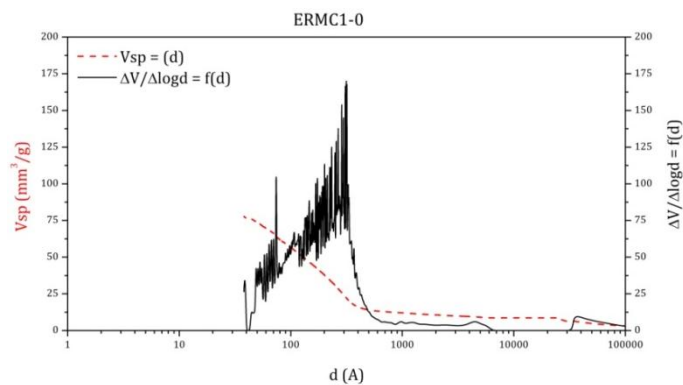


Slika 244 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERPC2-3m, NRPC2-3m i MRPC2-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)

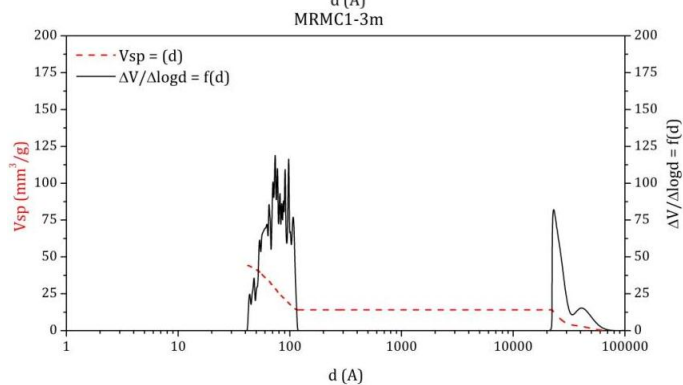
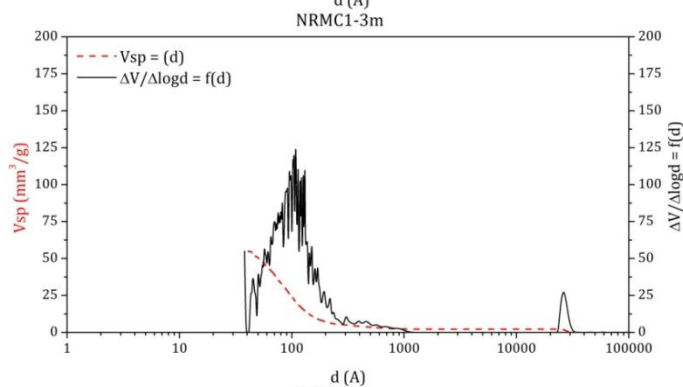
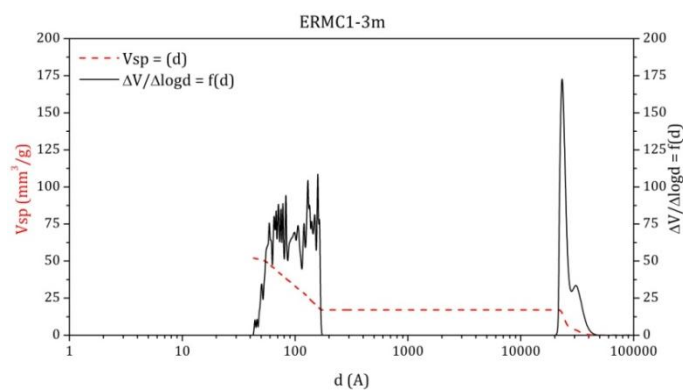


Slika 245 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERPC2-6m, NRPC2-6m i MRPC2-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

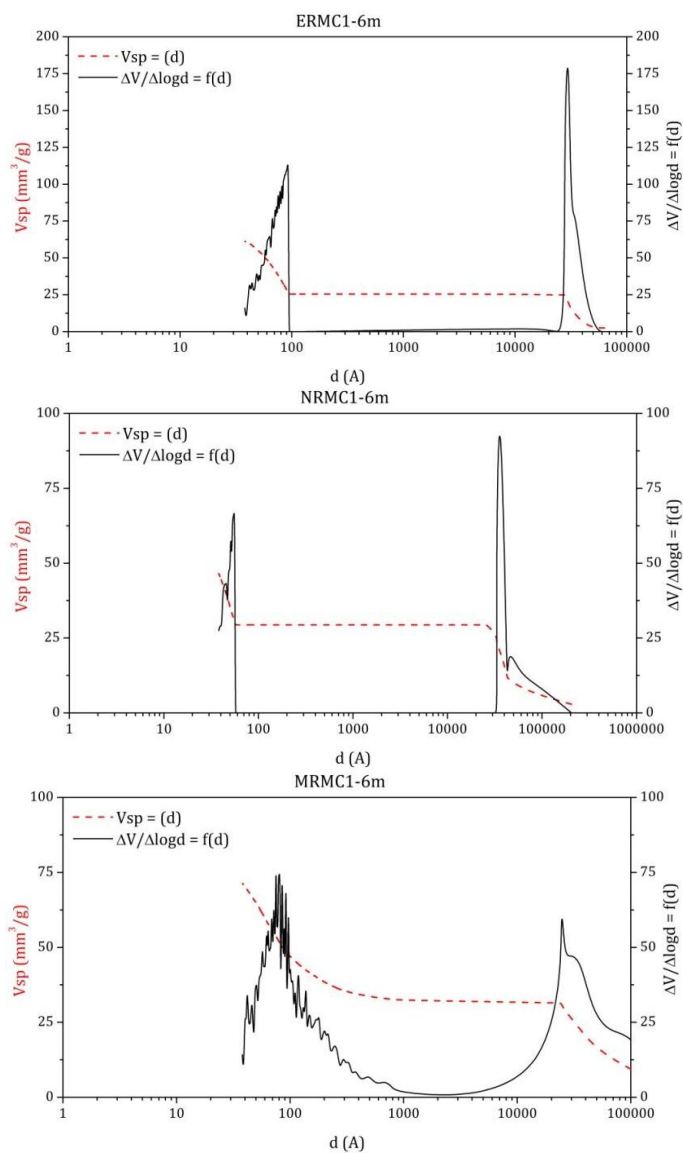
### B.3. Beton RMC1



Slika 246 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ERMCI-0 (pre potapanja u sulfatne rastvore)

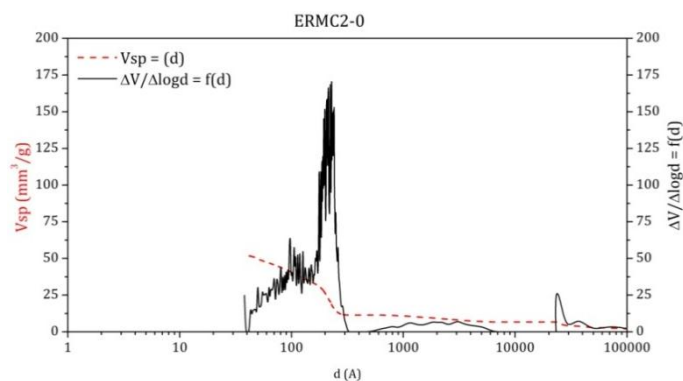


Slika 247 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERMCI-3m, NRMCI-3m i MRMC1-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)

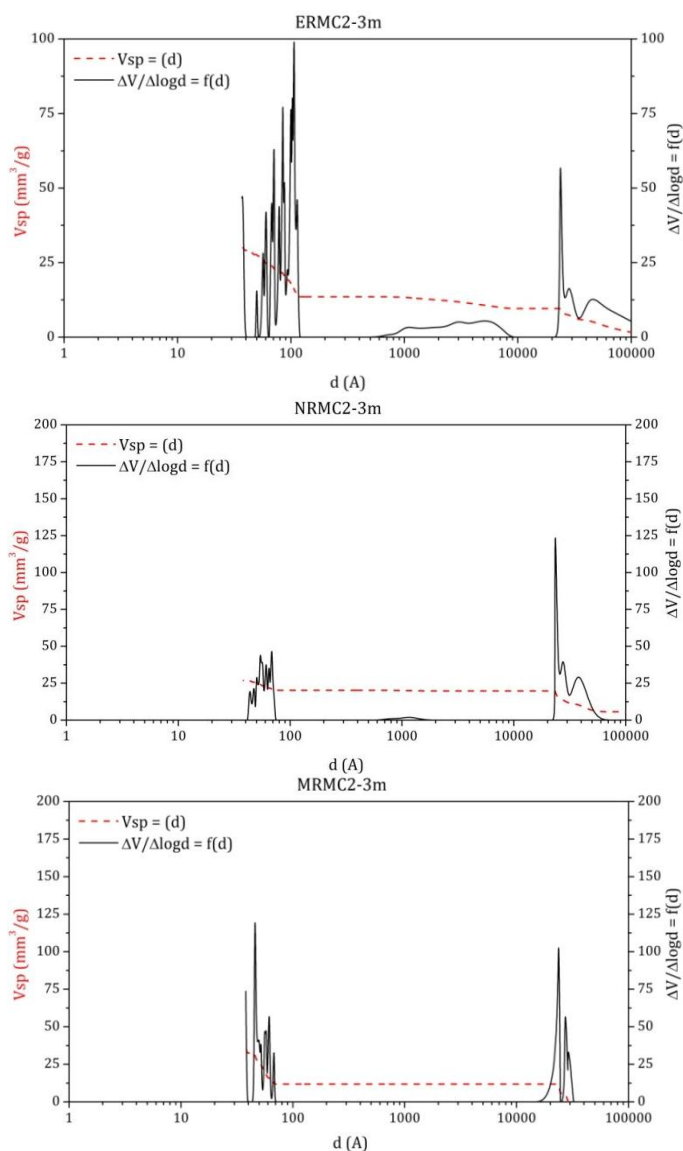


Slika 248 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERMC1-6m, NRMC1-6m i MRMC1-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

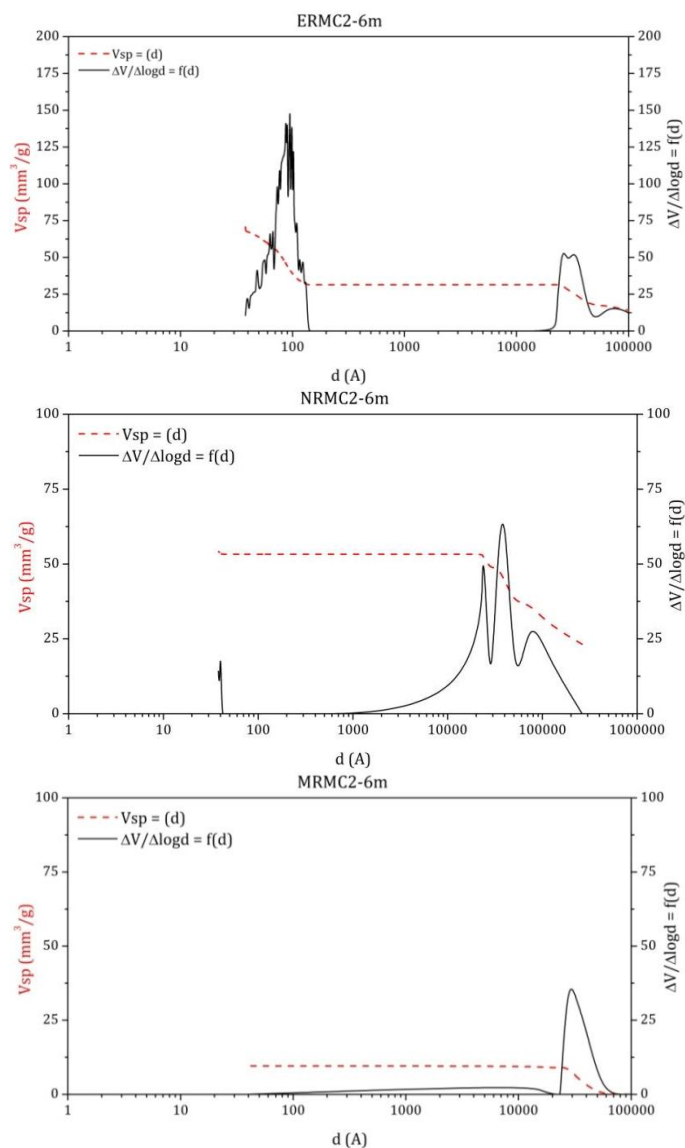
#### B.4. Beton RMC2



Slika 249 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorak ERMC2-0 (pre potapanja u sulfatne rastvore)



Slika 250 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERMC2-3m, NRMC2-3m i MRMC2-3m (nakon 3 meseca boravka u sulfatnim rastvorima)



Slika 251 – Kumulativna kriva utiskivanja i diferencijalni raspored pora po veličini za uzorke ERMC2-6m, NRMC2-6m i MRMC2-6m (nakon 6 meseci boravka u sulfatnim rastvorima)

## PRILOG 13

### Živina porozimetrija-vrednosti poroznosti i rasporeda učešća pora

Udeo pora u ukupnoj raspodeli je izračunat kao količnik zapremine pora koje pripadaju određenom intervalu pora i ukupne zapremine pora pomnoženo sa ukupnom poroznošću uzorka:

$$U_p = \frac{V_{\text{pora}}}{V_{\text{ukupno}}} \cdot P$$

#### A. Beton sa rečnim agregatom

##### A.1. Beton NPC1

##### A.1.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 252 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENPC1 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ENPC1	15,33	1,14	5,4	3,6	5,5	0

##### A.1.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 253 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENPC1, NNPC1, MNPC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ENPC1	13,07	3,1	3,1	2,2	4,3	0,4
NNPC1	3,44	1,4	1,1	0	1,0	0
MNPC1	8,27	0,6	1,1	0,14	5,2	1,3

##### A.1.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 254 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENPC1, NNPC1, MNPC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ENPC1	21,1	5,7	8,6	4,7	1,6	0,5
NNPC1	11,8	5,8	2,6	1,1	2,3	0
MNPC1	9,91	6,4	2,3	1,16	0,07	0



## A.2. Beton NPC2

### A.2.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 255 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENPC2 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ENPC2	7,51	0,6	4,4	0,7	1,8	0

### A.2.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 256 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENPC2, NNPC2, MNPC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ENPC2	6,35	0,6	1,2	0,06	4,5	0
NNPC2	5,68	0	0	0,05	5,6	0
MNPC2	5,95	1,1	0	0	4,9	0

### A.2.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 257 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENPC2, NNPC2, MNPC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ENPC2	9,74	0,9	0,9	0	7,9	0
NNPC2	4,30	0	0	0	4,3	0
MNPC2	5,48	0	0	0	5,5	0

## A.3. Beton NMC1

### A.3.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 258 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENMC1 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ENMC1	17,74	4,3	10,2	0,7	2,0	0,7

### A.3.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 259 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENMC1, NNMC1, MNMC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ENMC1	15,59	6,0	6,1	0,9	2,6	0
NNMC1	11,24	6,1	0,6	0,6	3,9	0
MNMC1	6,94	3,1	0	0	3,8	0

### A.3.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 260 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENMC1, NNMC1, MNMC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ENMC1	22,25	11,0	6,7	0,8	3,7	0
NNMC1	9,02	2,2	0	0	6,8	0
MNMC1	5,82	5,0	0	0	0,4	0,4

### A.4. Beton NMC2

#### A.4.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 261 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENMC2 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ENMC2	11,19	1,1	7,5	1,5	1,1	0

#### A.4.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 262 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENMC2, NNMC2, MNMC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ENMC2	5,73	3,0	0,9	0,5	1,3	0
NNMC2	1,95	0	0	0	1,95	0
MNMC2	3,36	0	0	0,2	3,2	0

#### A.4.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 263 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ENMC2, NNMC2, MNMC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ENMC2	8,01	3,1	0	0	3,0	2,0
NNMC2	7,45	4,3	2,2	0,9	0	0
MNMC2	8,07	2,6	1,4	1,0	3,0	0

## B. Beton sa recikliranim agregatom

### B.1. Beton RPC1

#### B.1.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 264 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERPC1 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERPC1	13,35	2,5	6,7	3,6	0,6	0

#### B.1.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 265 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERPC1, NRPC1, MRPC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERPC1	9,98	2,0	5,6	0,5	1,8	0
NRPC1	7,45	2,9	3,2	0,5	0,8	0
MRPC1	7,58	2,9	0,4	0	4,3	0

#### B.1.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 266 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERPC1, NRPC1, MRPC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERPC1	13,13	3,3	2,4	0	6,3	1,2
NRPC1	9,32	0	0	0	7,0	2,3
MRPC1	8,78	0,9	0	0	5,3	2,6

## B.2. Beton RPC2

### B.2.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 267 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERPC2 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERPC2	8,59	0,7	5,5	1,3	0,8	0,3

### B.2.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 268 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERPC2, NRPC2, MRPC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERPC2	5,61	0	0,9	0,2	4,5	0
NRPC2	2,44	0,6	0,04	0	1,8	0
MRPC2	2,83	0,4	0,1	0,2	2,1	0

### B.2.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 269 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERPC2, NRPC2, MRPC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ERPC2	15,18	0,6	4,2	0,6	4,8	4,8
NRPC2	12,87	0	0	0	9,6	3,2
MRPC2	9,71	0	0	0	9,7	0

### B.3. Beton RMC1

#### B.3.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 270 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERM1 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ERM1	16,48	4,3	9,3	1,1	1,4	0,5

#### B.3.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 271 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERM1, NRM1, MRMC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ERM1	10,41	3,5	3,5	0	3,4	0
NRM1	11,16	5,9	4,6	0,2	0,4	0
MRMC1	9,21	5,2	1,1	0	2,9	0

#### B.3.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 272 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERM1, NRM1, MRMC1 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [μm]	0,01-0,05 [μm]	0,05-1 [μm]	1-10 [μm]	>10 [μm]
ERM1	12,68	7,4	0	0	5,3	0
NRM1	10,11	3,7	0	0	5,8	0,6
MRMC1	15,07	4,9	3,1	0,4	4,7	1,9

## B.4. Beton RMC2

### B.4.1. Pre potapanja u sulfatne rastvore

Tabela 273 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERMC2 pre potapanja u sulfatne rastvore

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERMC2	11,14	2,3	6,5	1,0	1,1	0,3

### B.4.2. Nakon 3 meseca držanja u sulfatnim rastvorima

Tabela 274 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERMC2, NRMC2, MRMC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 3 meseca

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERMC2	6,44	2,4	1,2	0,8	2,0	0
NRMC2	5,62	1,4	0	0,1	2,9	1,2
MRMC2	4,27	2,9	0	0	1,4	0

### B.4.3. Nakon 6 meseci držanja u sulfatnim rastvorima

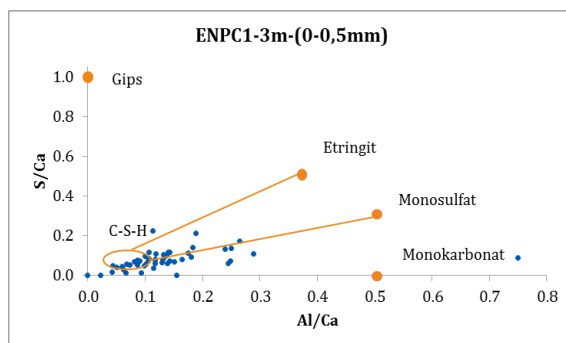
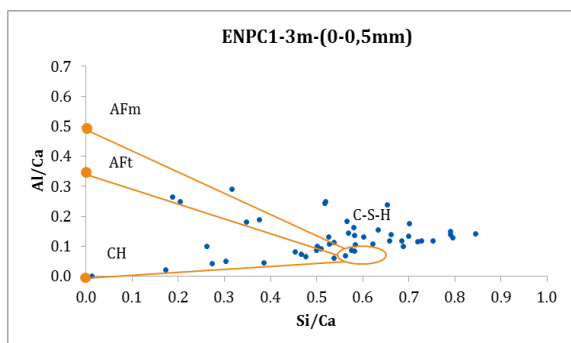
Tabela 275 – Ukupna poroznost uzoraka i udeo pora u ukupnoj raspodeli za uzorke ERMC2, NRMC2, MRMC2 nakon držanja u sulfatnim rastvorima 6 meseci

Oznaka uzorka	Ukupna poroznost [%]	Udeo pora (%)				
		<0,01 [µm]	0,01-0,05 [µm]	0,05-1 [µm]	1-10 [µm]	>10 [µm]
ERMC2	11,43	4,5	1,7	0	3,5	1,8
NRMC2	11,84	0	0	0	5,1	6,6
MRMC2	1,86	0	0	0	1,86	0

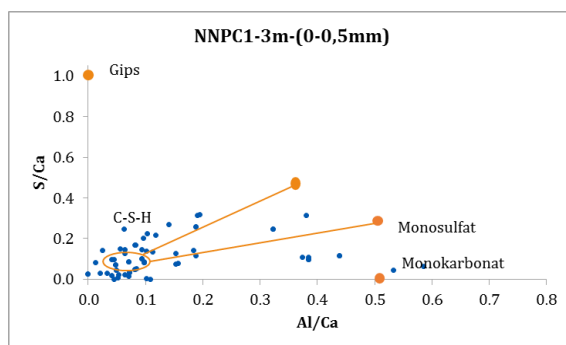
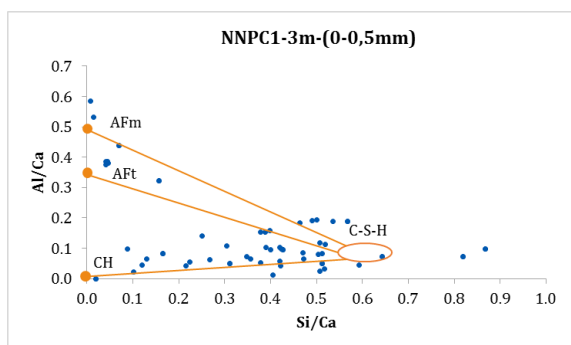
**PRILOG 14**  
**Rezultati ispitivanja uzoraka metodom BSE-EDS**

**A. Beton sa rečnim agregatom nakon 3 meseca**

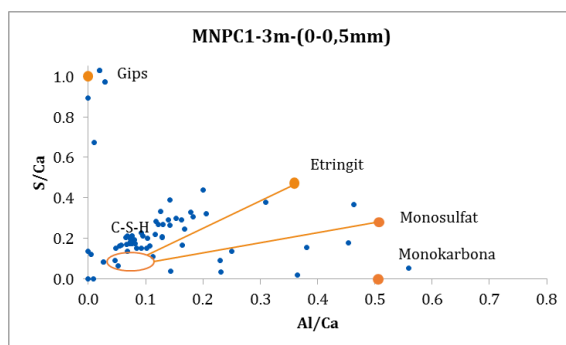
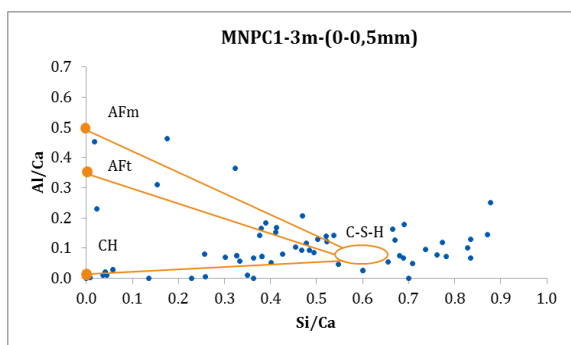
**A.1. Beton NPC1**



*Slika 1 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji odnosa S/Ca za ENPC1-3m*

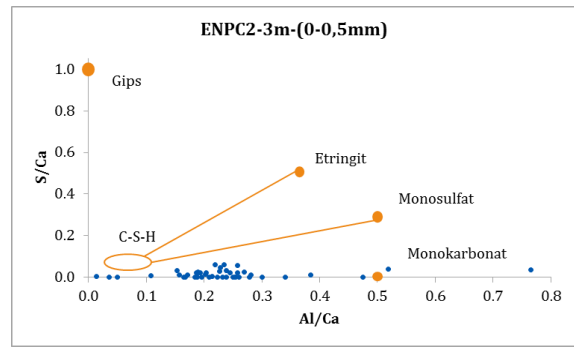
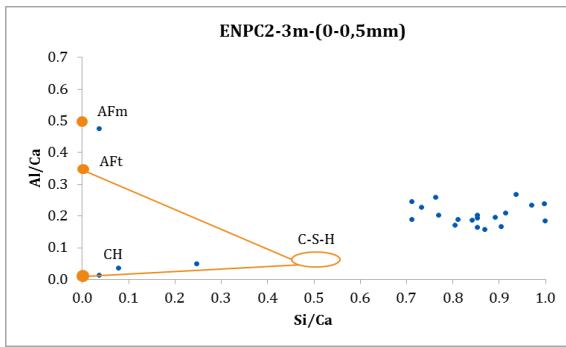


*Slika 2 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji odnosa S/Ca za NNPC1-3m*

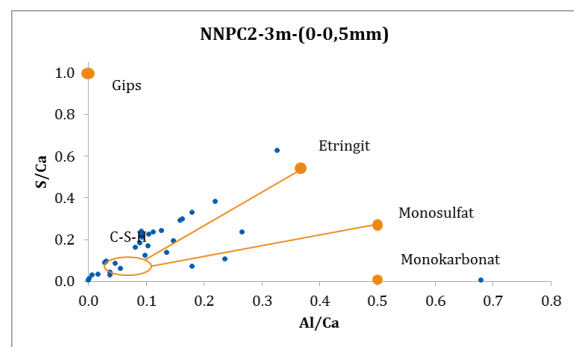
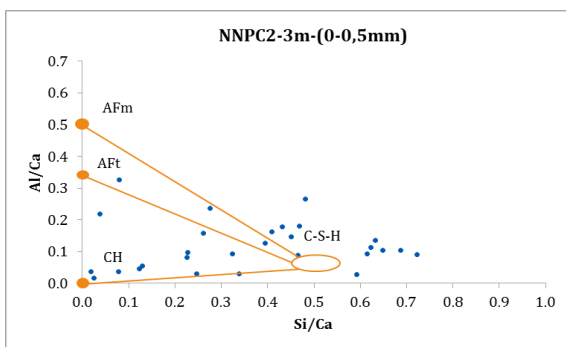


*Slika 3 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji odnosa S/Ca za MNPC1-3m*

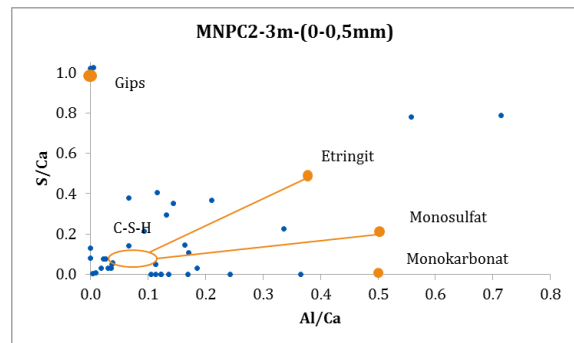
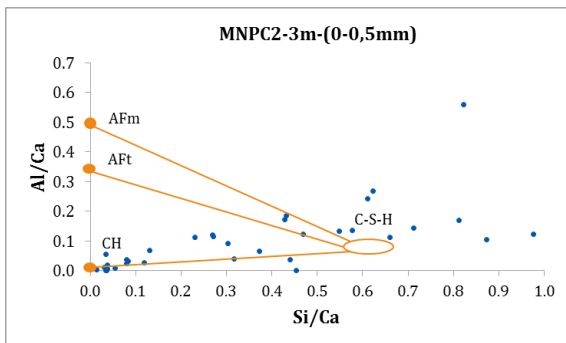
## A.2. Beton NPC2



Slika 4 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ENPC2-3m

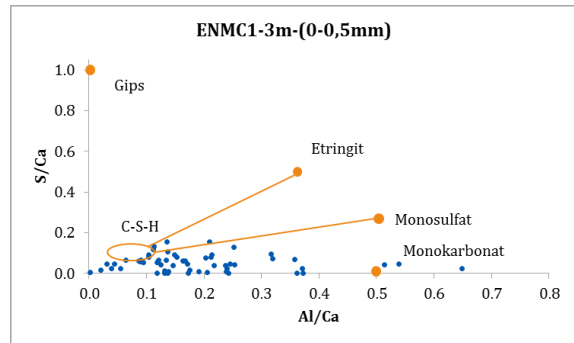
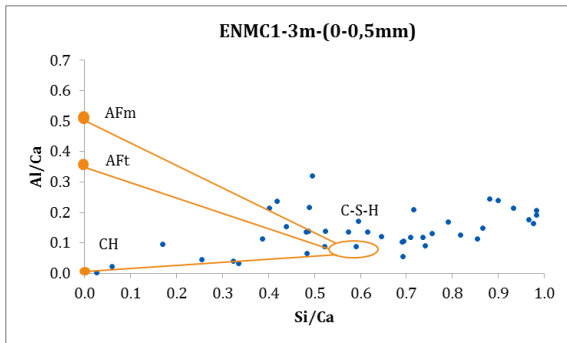


Slika 5 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NNPC2-3m

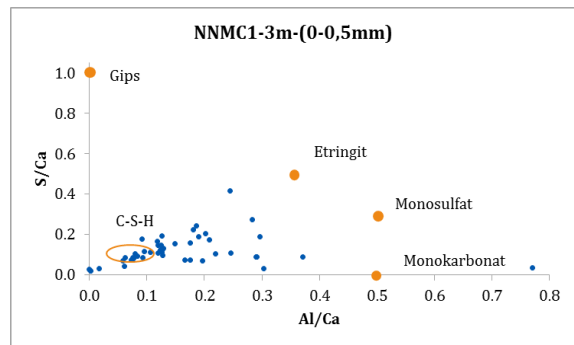
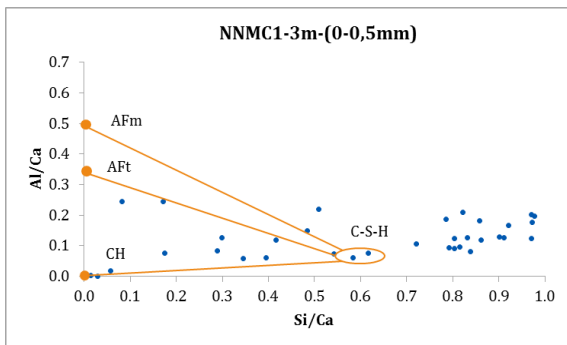


Slika 6 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MNPC2-3m

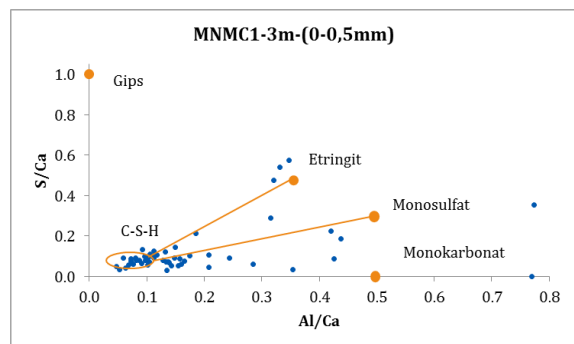
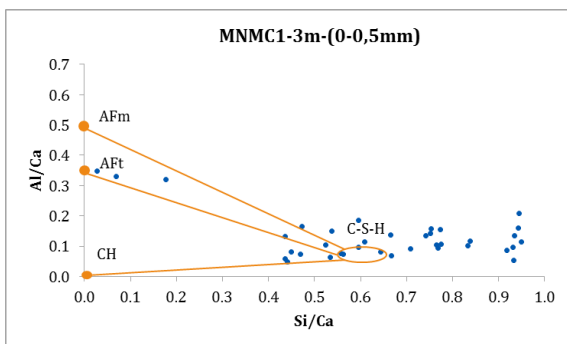
### A.3. Beton NMC1



Slika 7 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ENMC1-3m



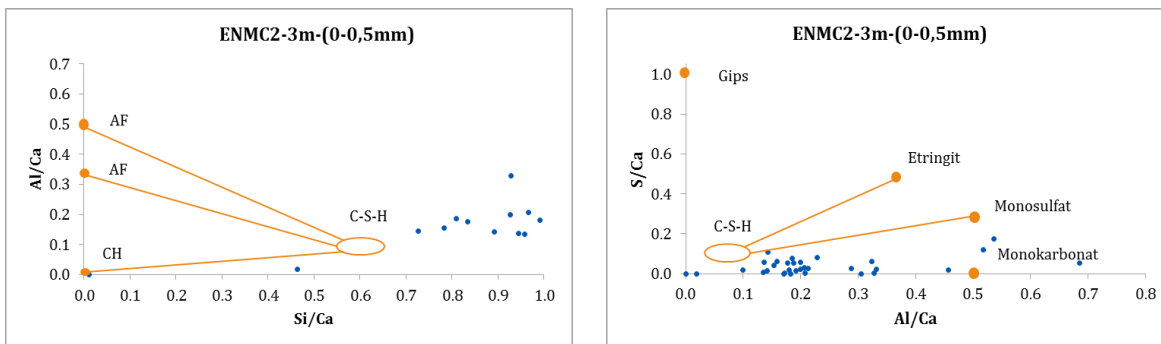
Slika 8 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NNMC1-3m



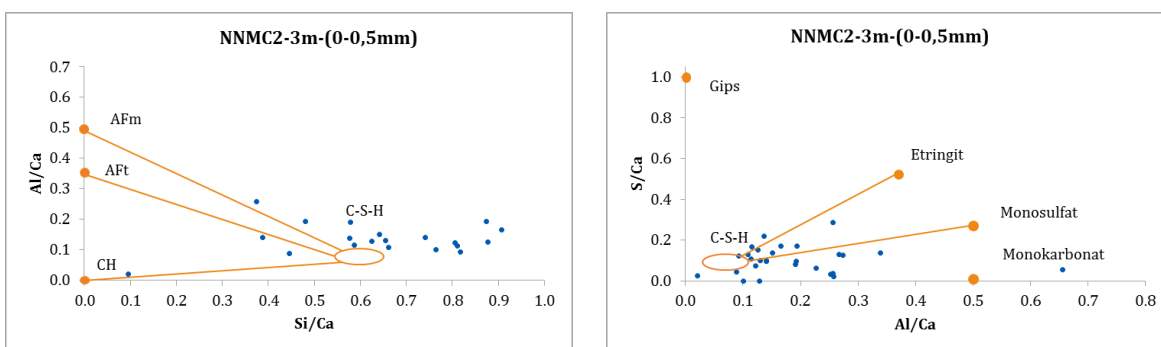
Slika 9 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MNMC1-3m



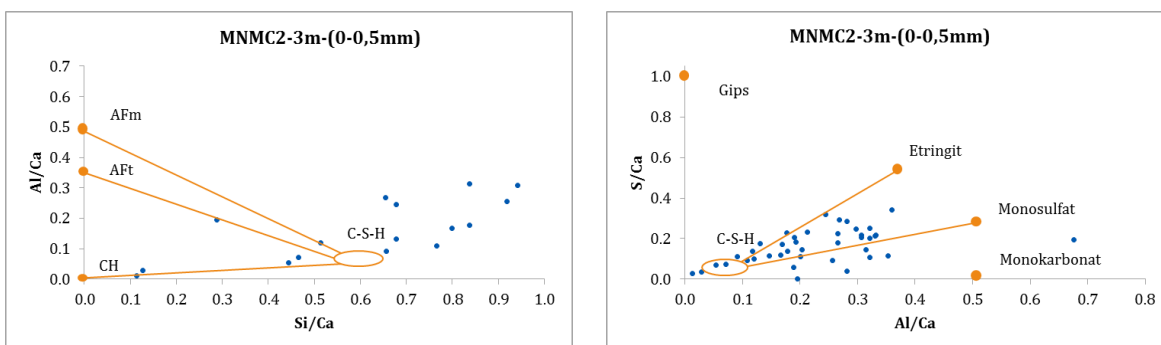
#### A.4. Beton NMC2



Slika 10 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ENMC2-3m



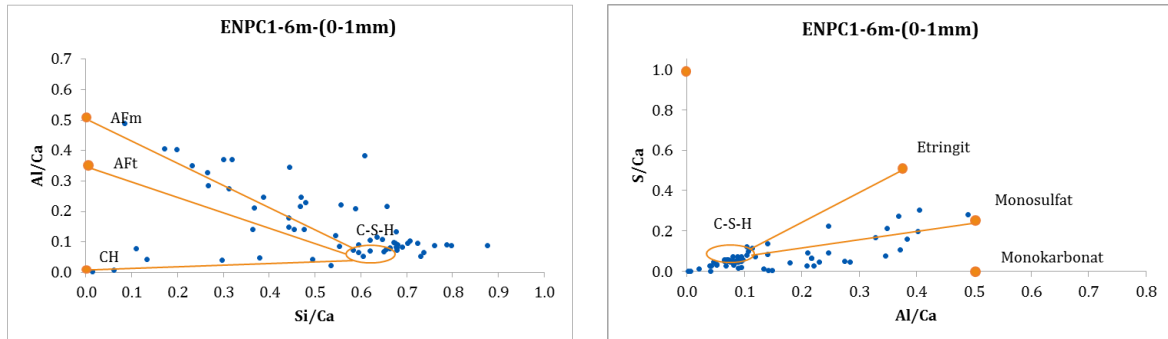
Slika 11 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NNMC2-3m



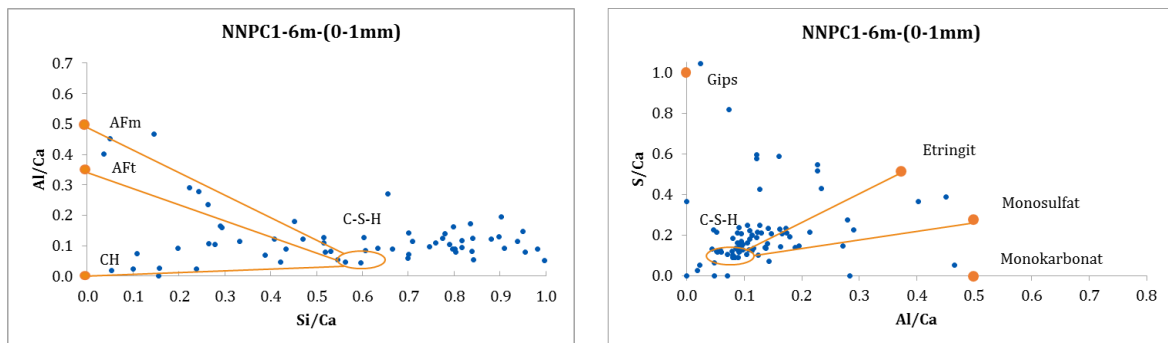
Slika 12 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MNMC2-3m

## B. Beton sa rečnim agregatom nakon 6 meseci

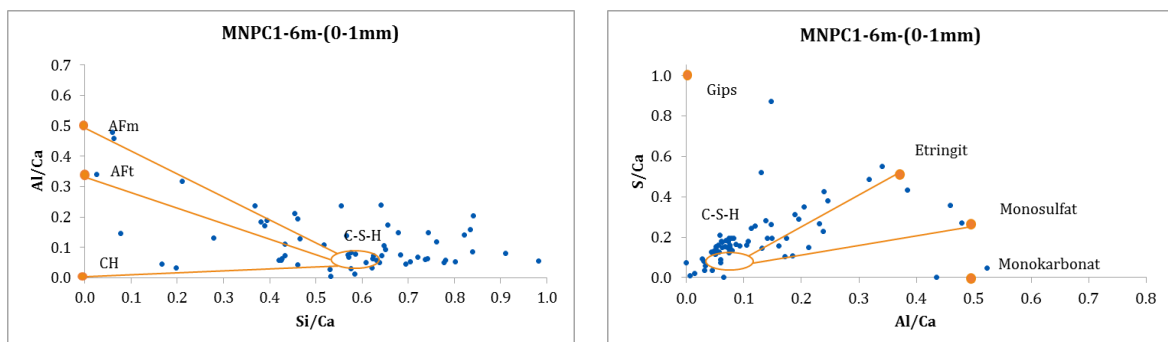
### B.1. Beton NPC1



Slika 13 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ENPC1-6m

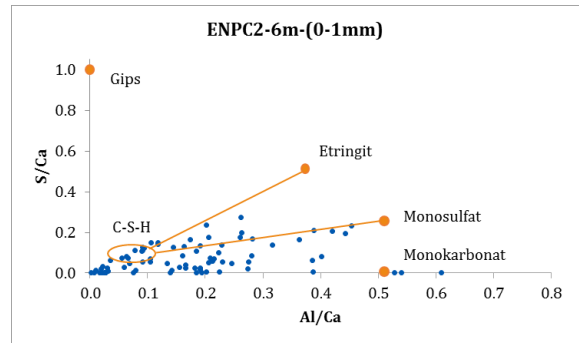
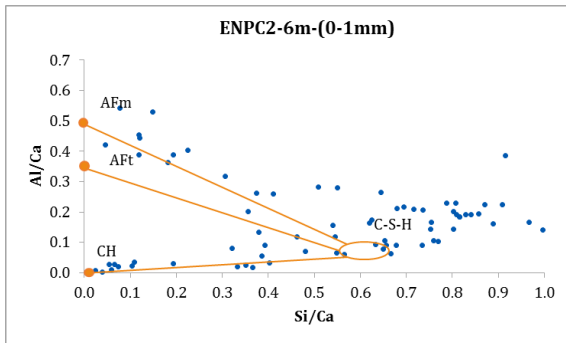


Slika 14 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NNPC1-6m

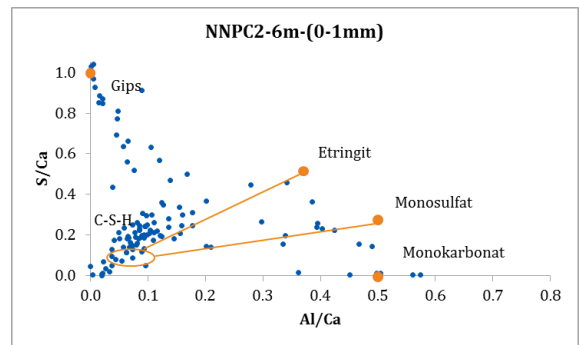
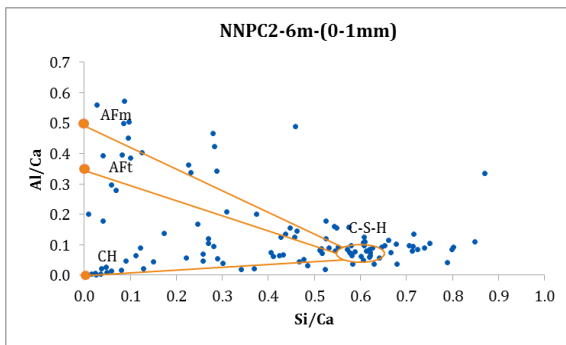


Slika 15 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MNPC1-6m

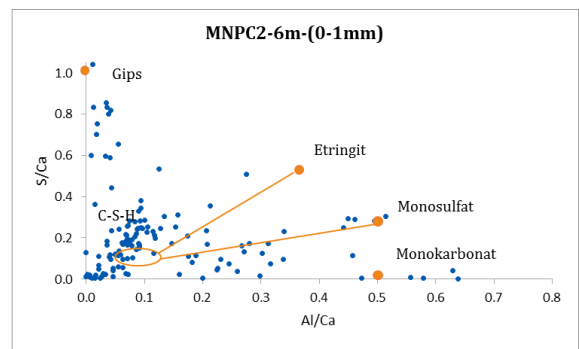
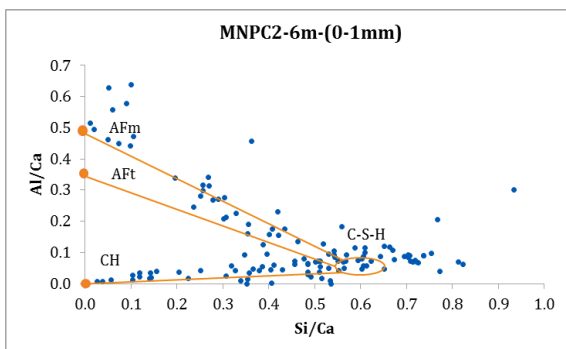
## B.2. Beton NPC2



Slika 16 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ENPC2-6m

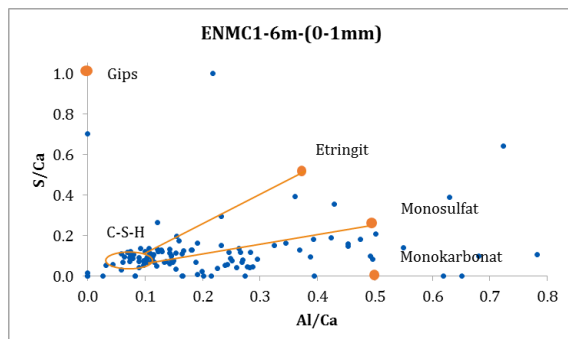
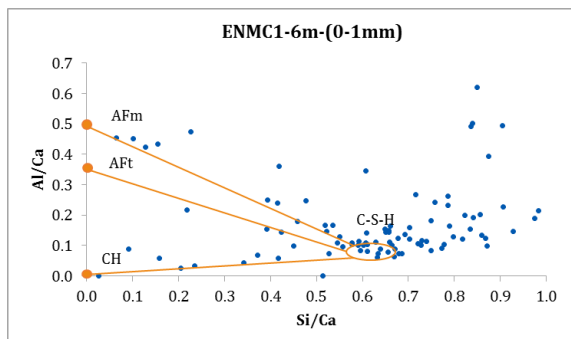


Slika 17 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NNPC2-6m

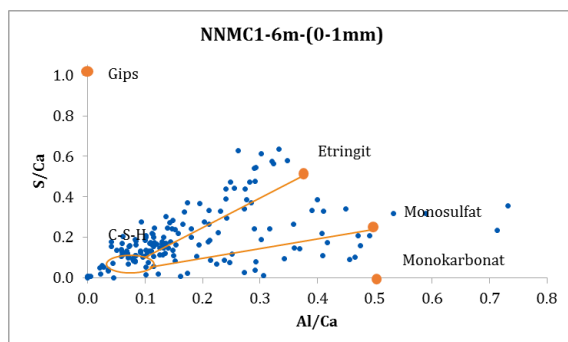
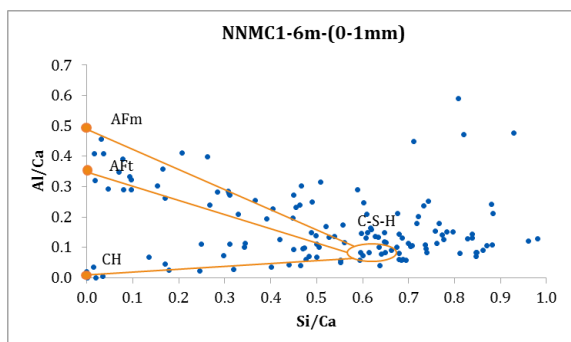


Slika 18 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MNPC2-6m

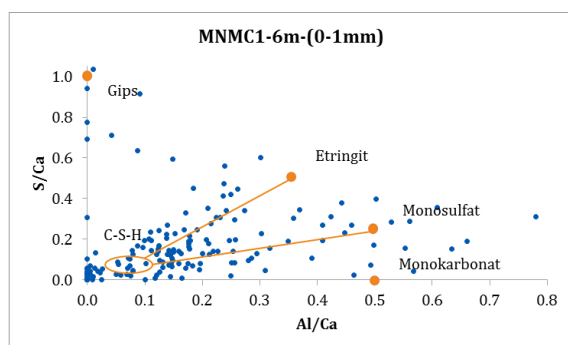
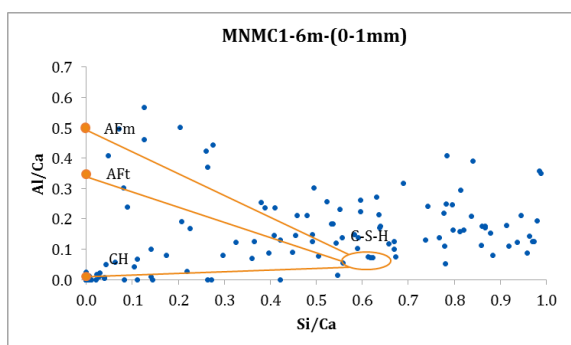
### B.3. Beton NMC1



Slika 19 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ENMC1-6m

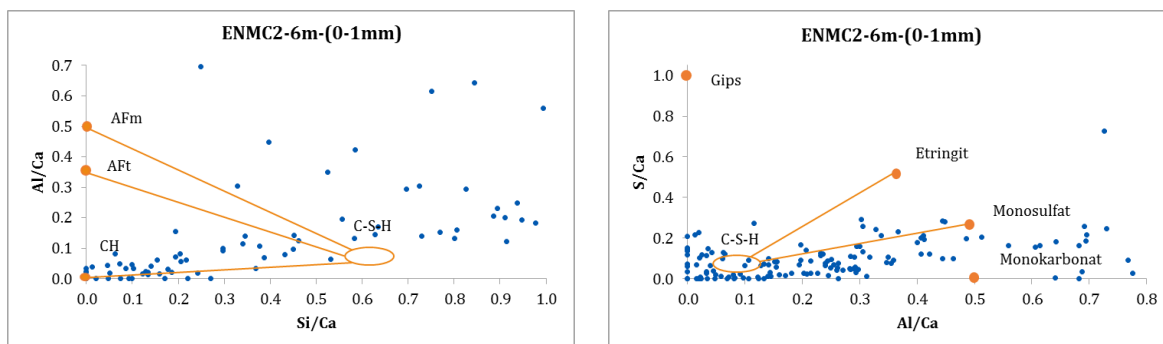


Slika 20 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NNCM1-6m

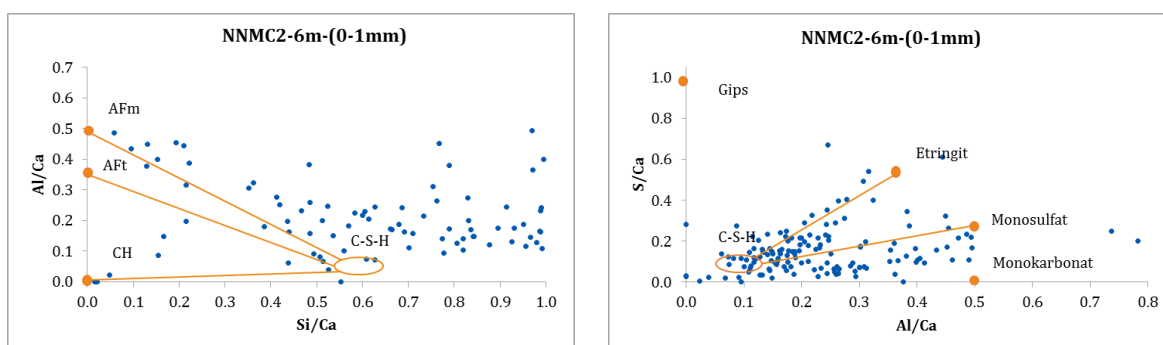


Slika 21 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MNMC1-6m

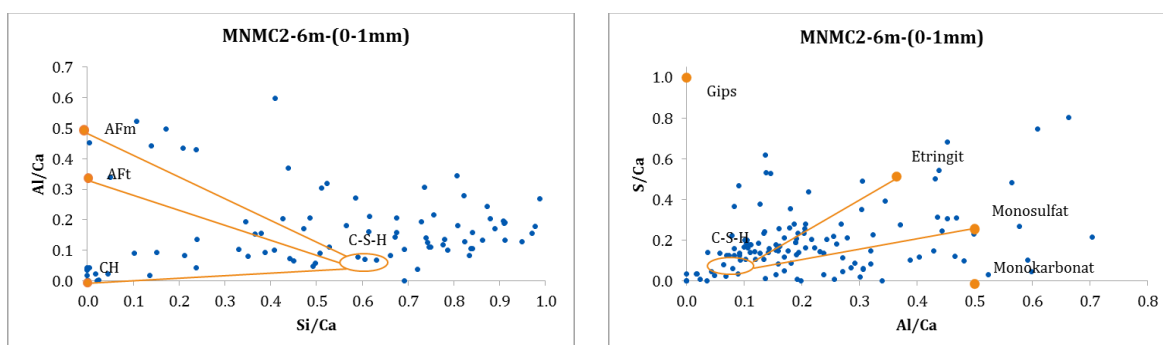
## B.4. Beton NMC2



Slika 22 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ENMC2-6m



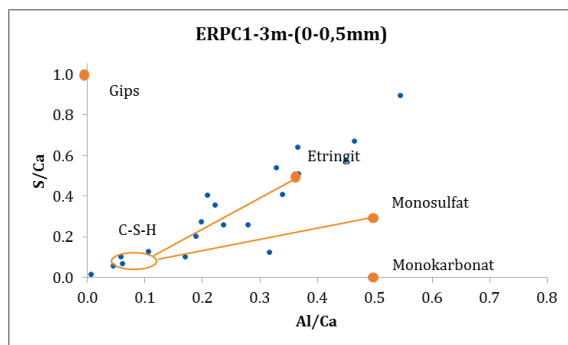
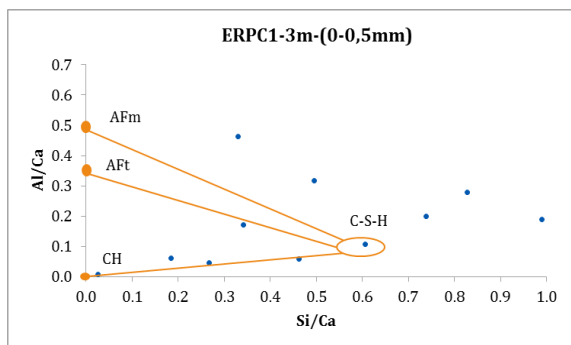
Slika 23 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NNCM2-6m



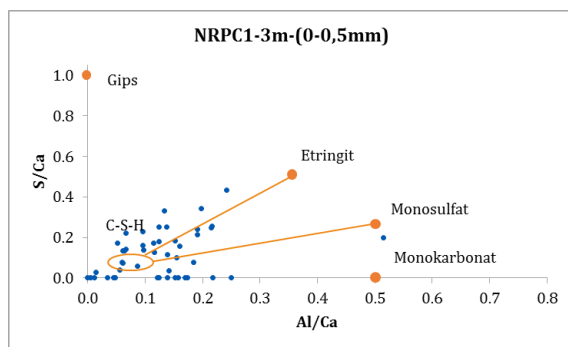
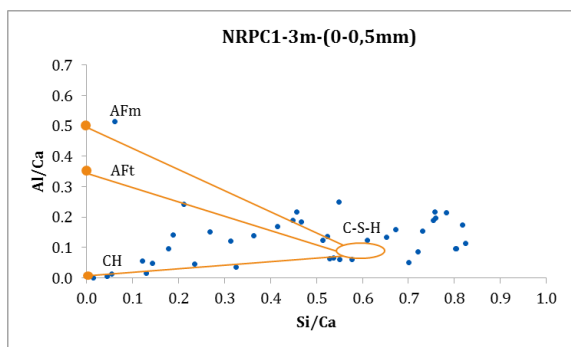
Slika 24 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MNCM2-6m

## C. Beton sa recikliranim agregatom nakon 3 meseca

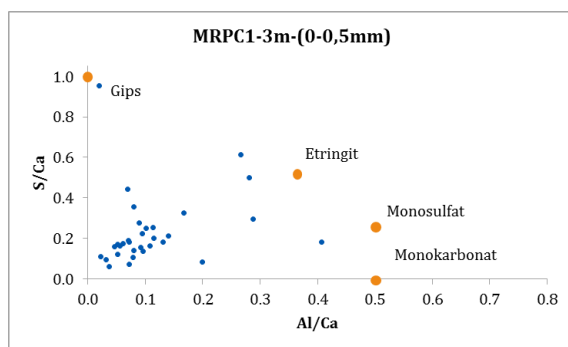
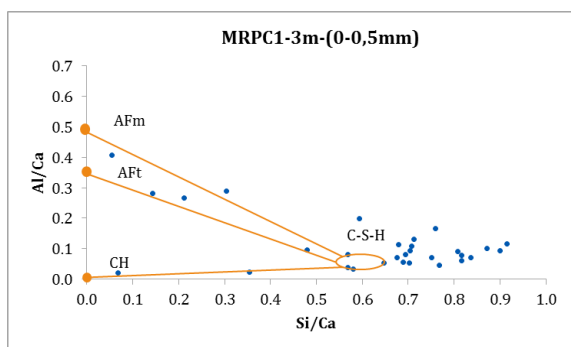
### C.1. Beton RPC1



Slika 25 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERPC1-3m

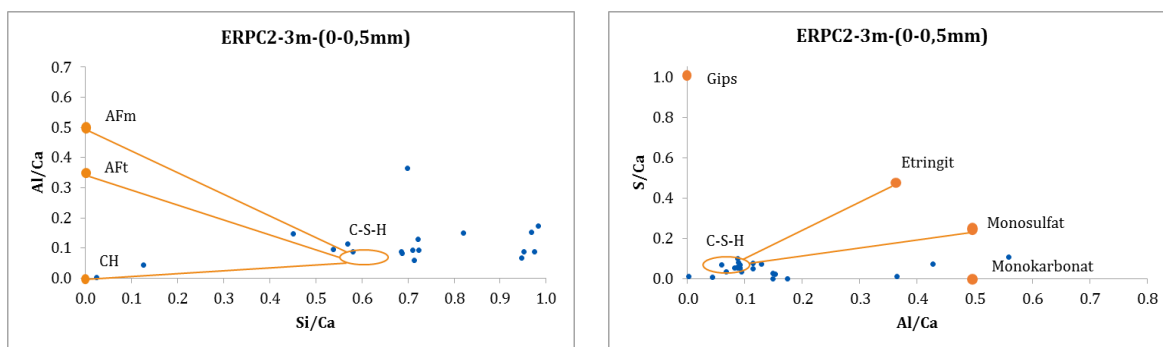


Slika 26 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRPC1-3m

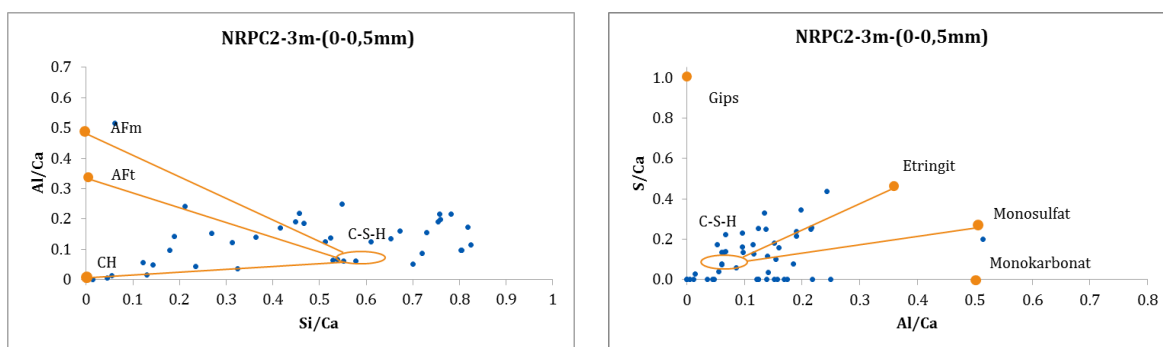


Slika 27 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRPC1-3m

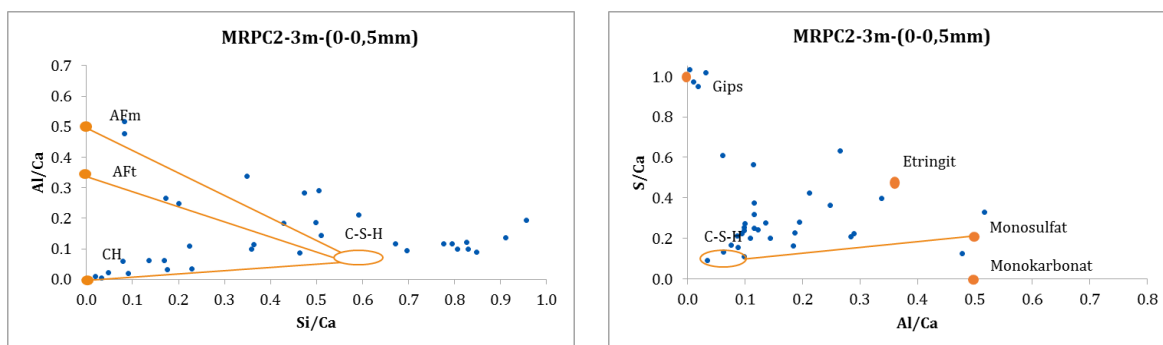
## C.2. Beton RPC2



Slika 28 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERPC2-3m

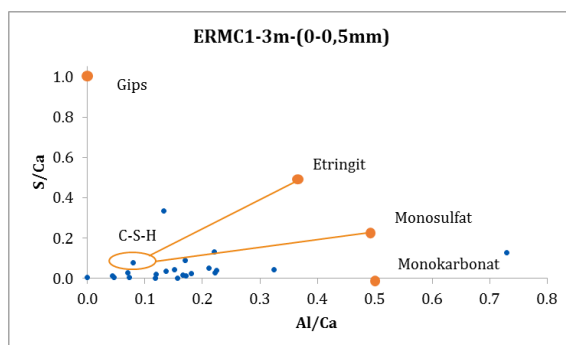
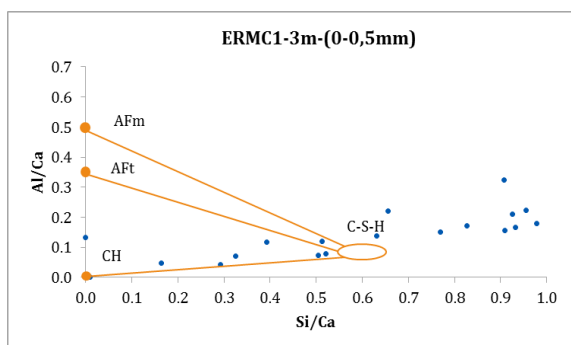


Slika 29 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRPC2-3m

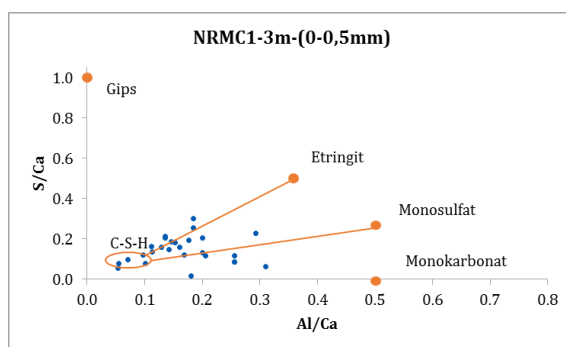
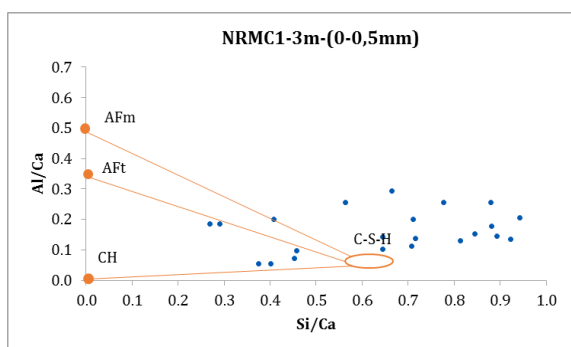


Slika 30 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRPC2-3m

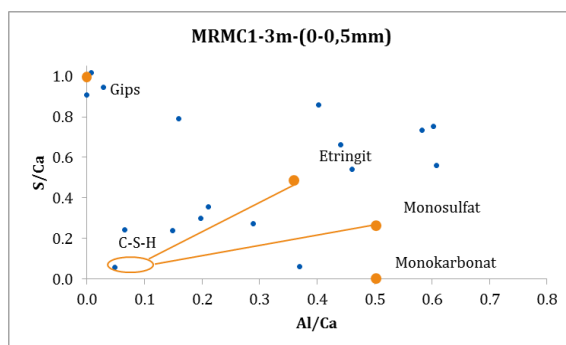
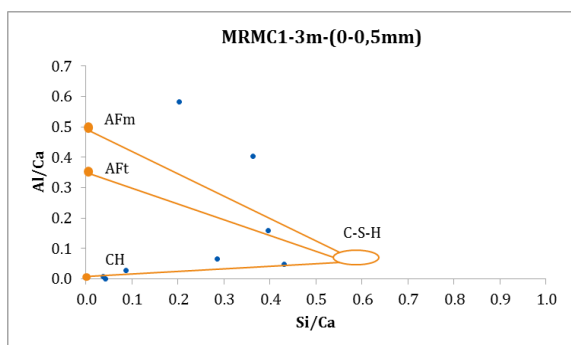
### C.3. Beton RMC1



Slika 31 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERMC1-3m



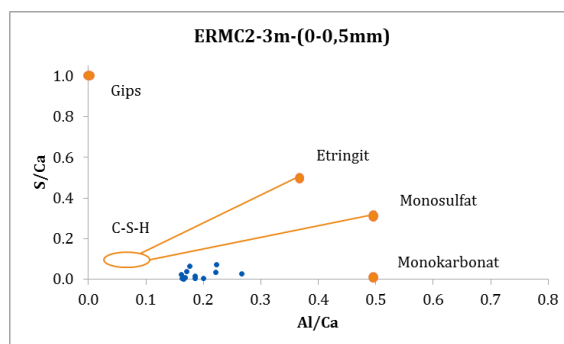
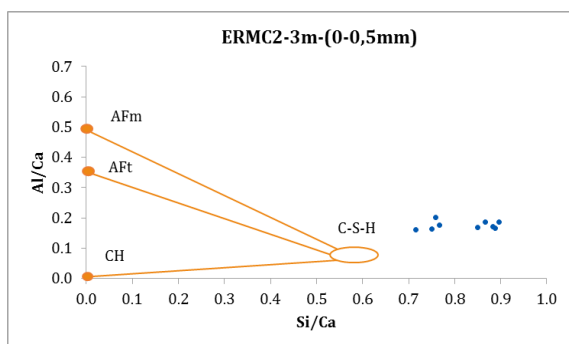
Slika 32 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRMCI-3m



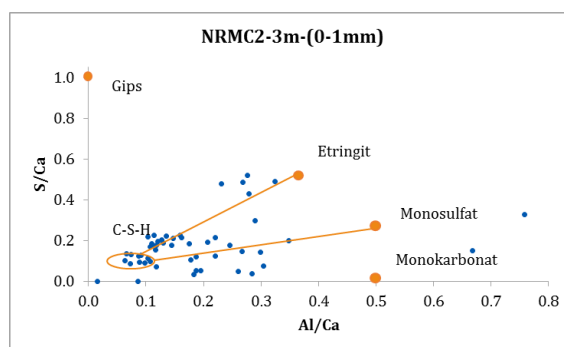
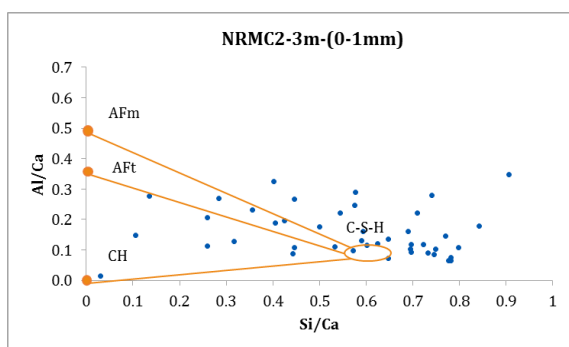
Slika 33 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRMC1-3m



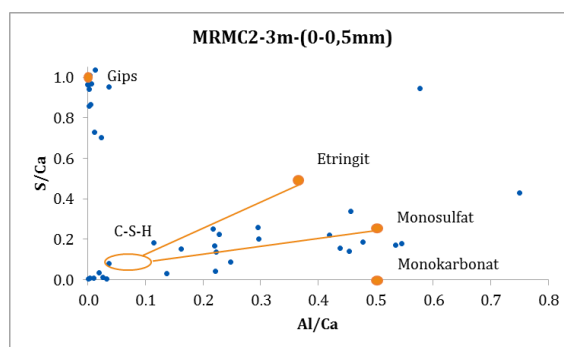
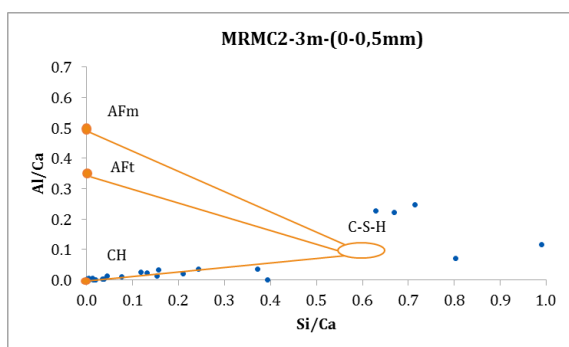
#### C.4. Beton RMC2



Slika 34 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERMC2-3m



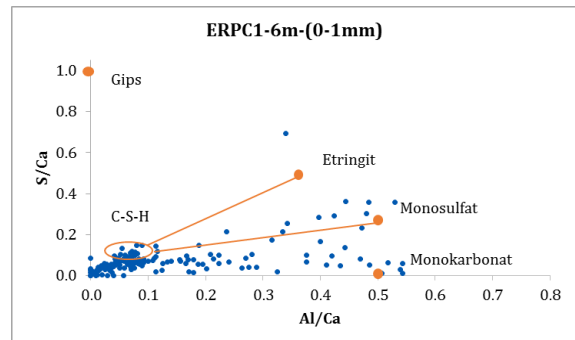
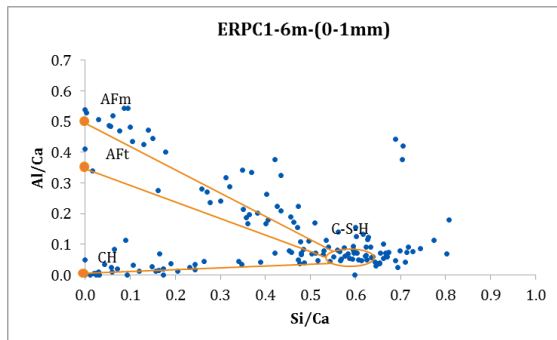
Slika 35 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRM2-3m



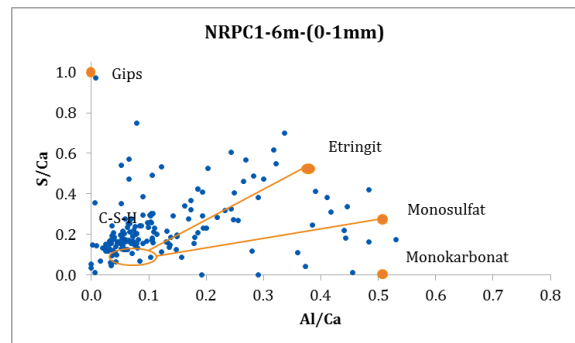
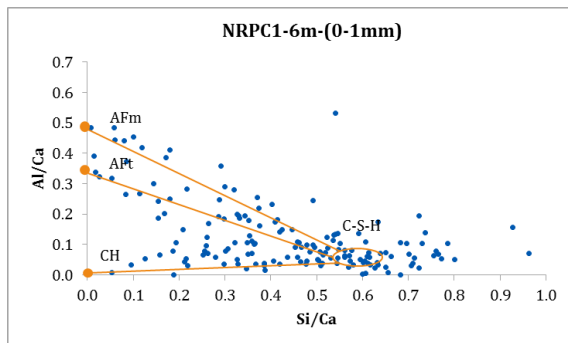
Slika 36 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRMC2-3m

## D. Beton sa recikliranim agregatom nakon 6 meseci

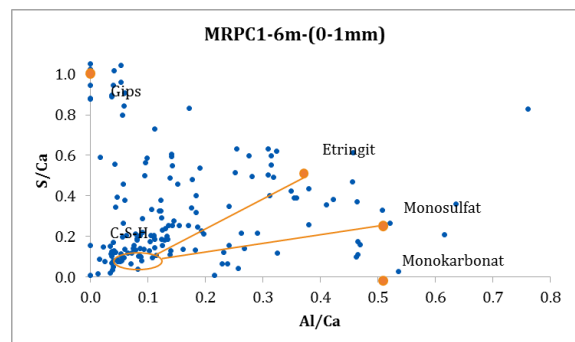
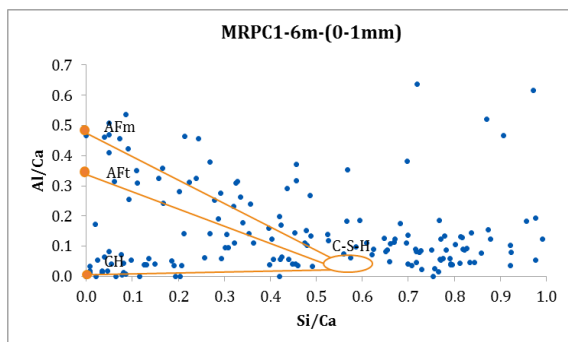
### D.1. Beton RPC1



Slika 37 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERPC1-6m

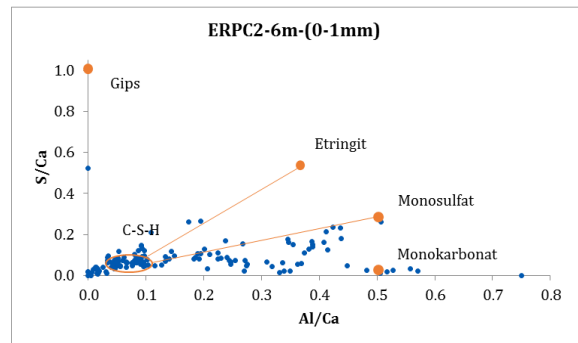
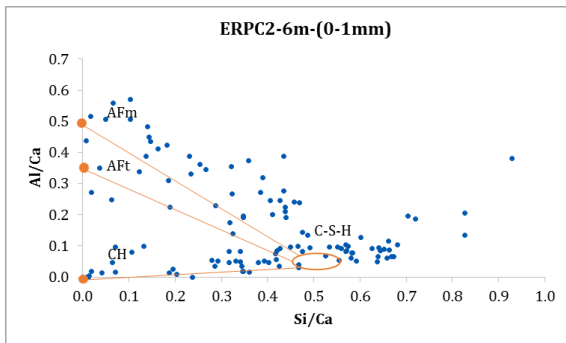


Slika 38 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRPC1-6m

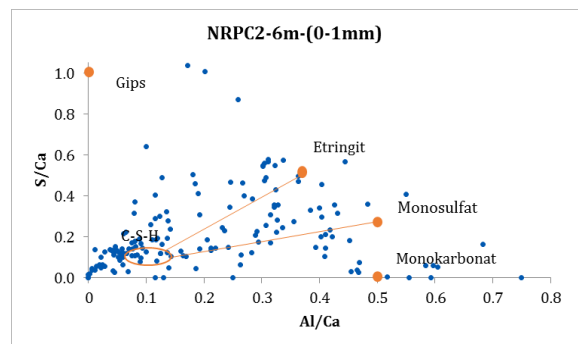
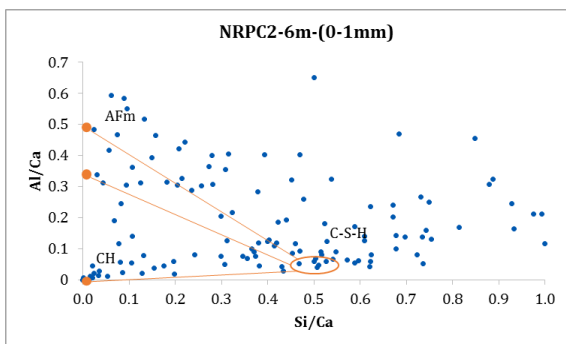


Slika 39 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRPC1-6m

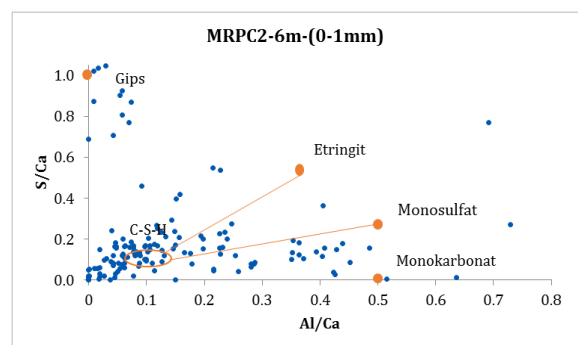
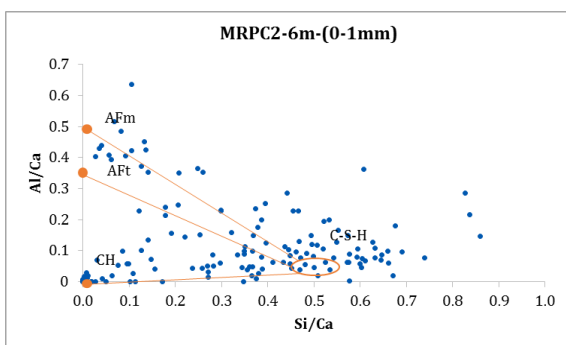
## D.2. Beton RPC2



Slika 40 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERPC2-6m

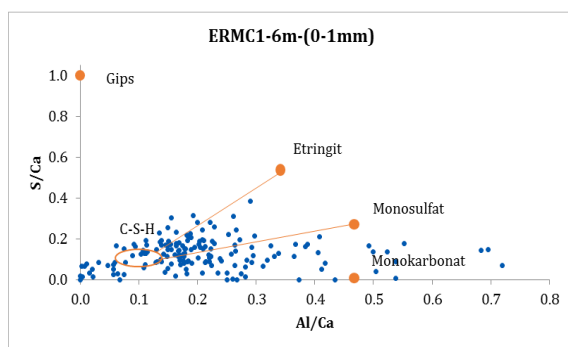
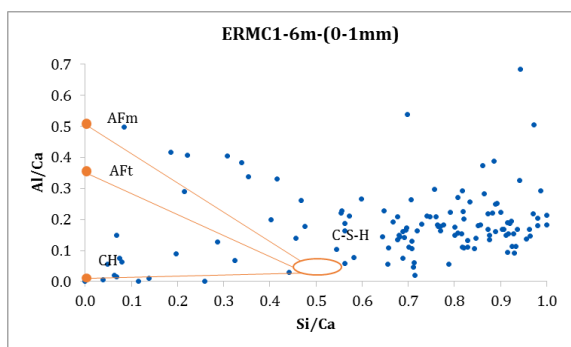


Slika 41 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRPC2-6m

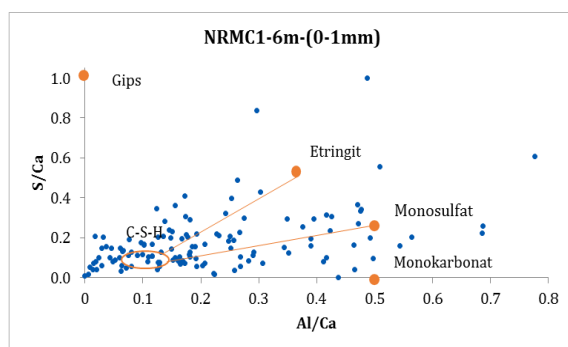
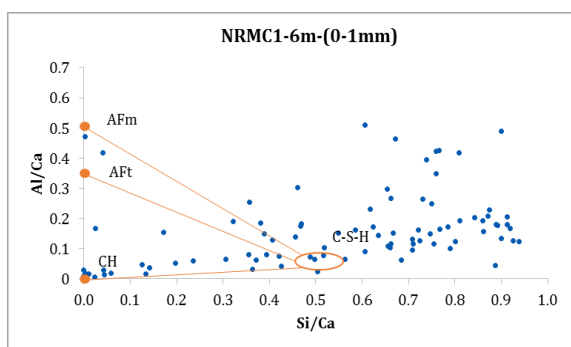


Slika 42 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRPC2-6m

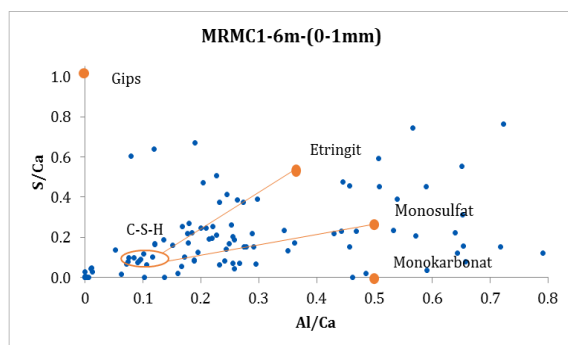
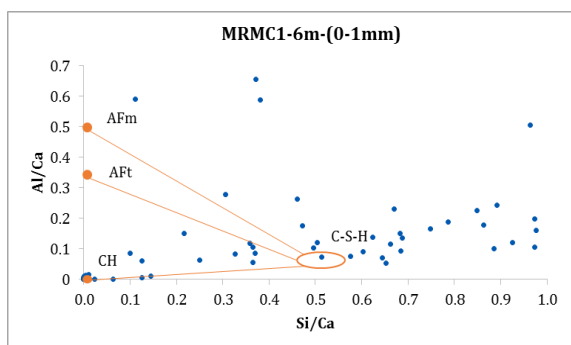
### D.3. Beton RMC1



Slika 43 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERMC1-6m

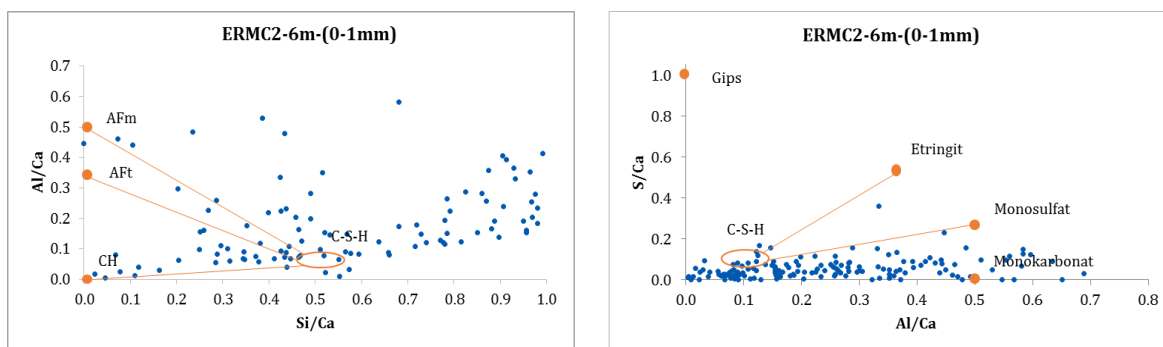


Slika 44 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRMCI-6m

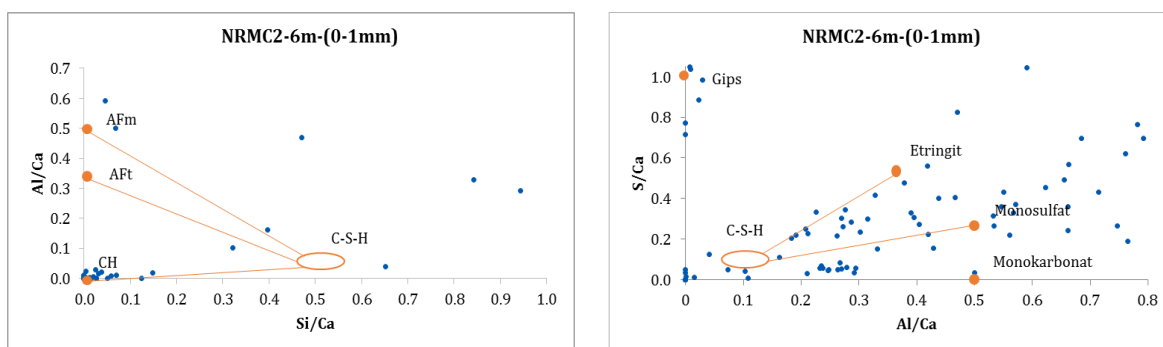


Slika 45 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRMC1-6m

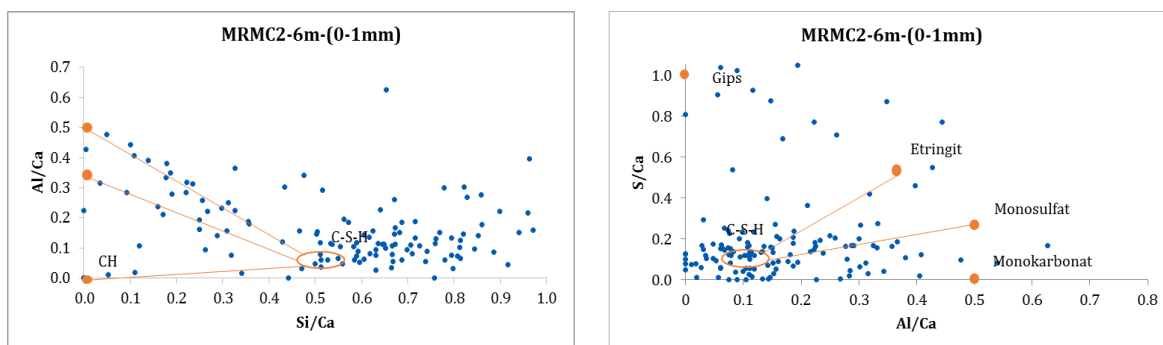
#### D.4. Beton RMC2



Slika 46 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za ERMC2-6m



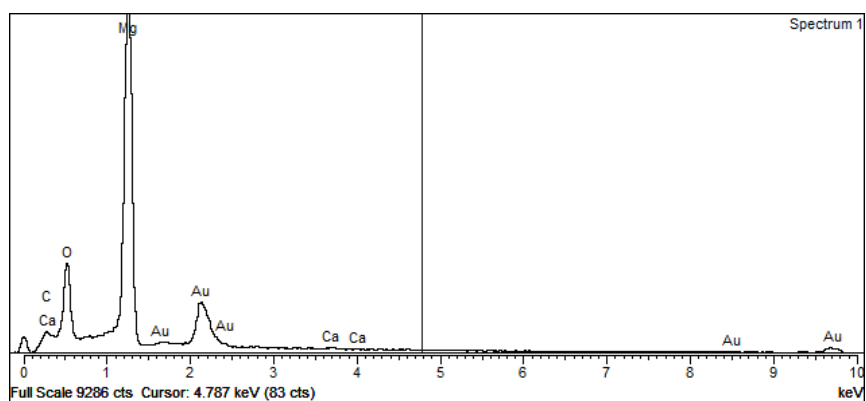
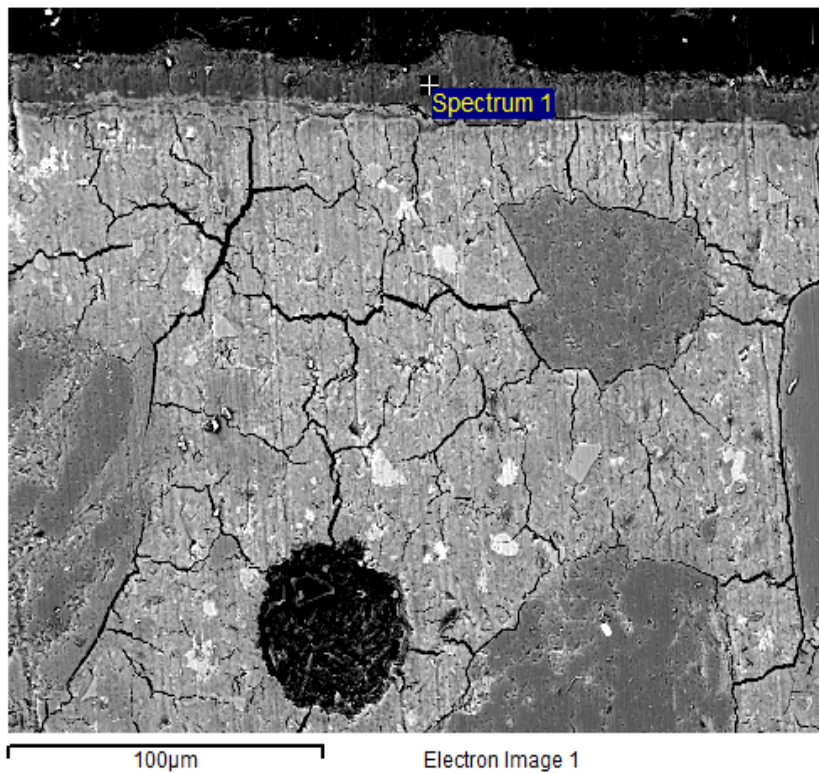
Slika 47 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za NRPC2-6m



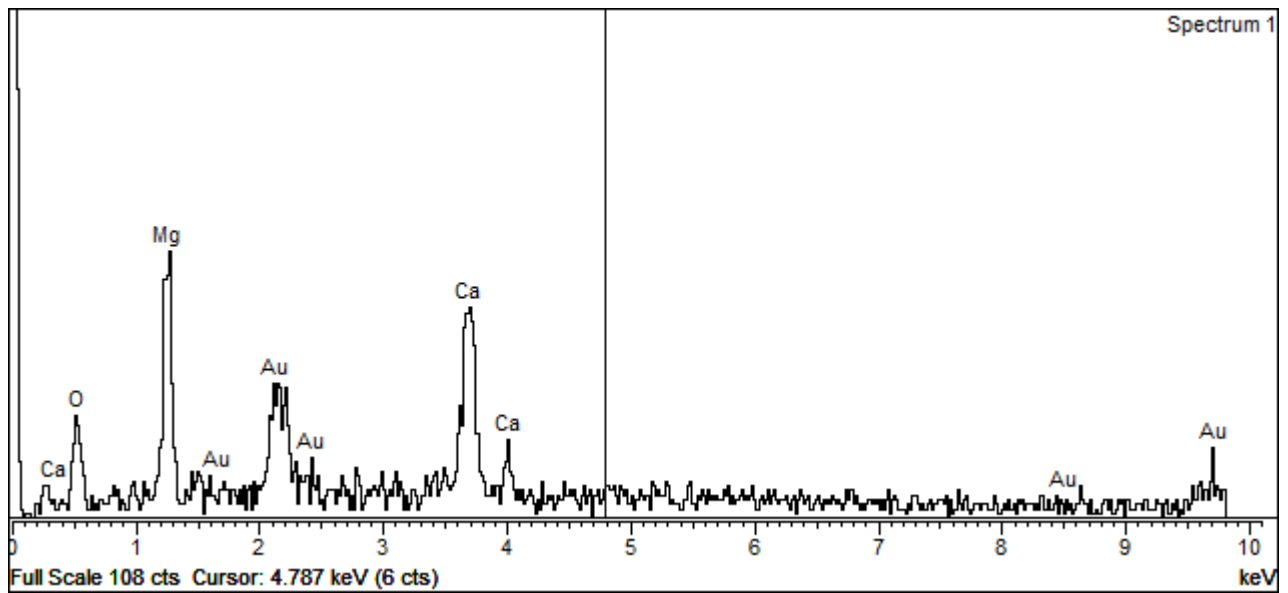
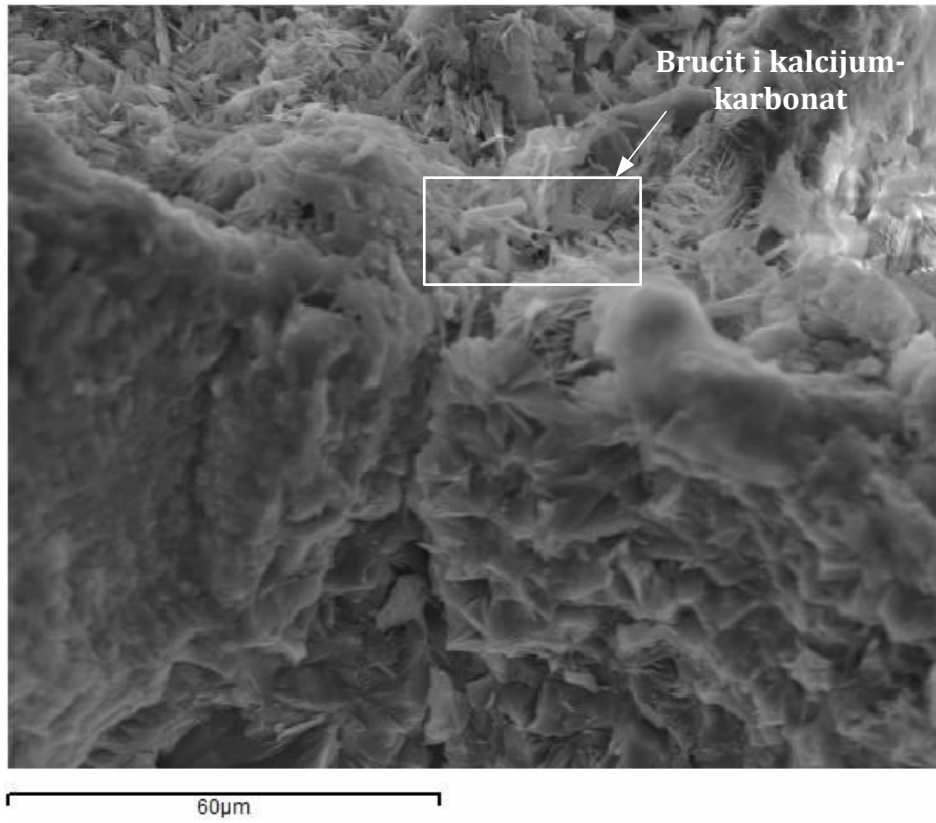
Slika 48 - Atomski odnosi Si/Ca u funkciji od odnosa Al/Ca i odnos Al/Ca u funkciji od odnosa S/Ca za MRMC2-6m

PRILOG 15  
Snimak uzorka sa brucitom u SEM-EDS i BSE-EDS

Snimak u BSE-EDS



## Snimak u SEM-EDS



**PRILOG 16**  
**Preporuke za dobijanje sulfatno-otpornih betona prema standardima i pravilnicima**

**Klase izloženosti betona prema EN 206-1**

- X0 - Bez rizika od korozije ili agresivnog delovanja
- XC - Korozija izazvana karbonatizacijom
- XD - Korozija izazvana uticajem hlorida koji ne potiču iz morske vode
- XS - Korozija izazvana hloridima iz morske vode
- XF - Agresija od procesa smrzavanja/odmrzavanja sa ili bez sredstava za odmrzavanje
- XA - Hemijska agresija

*Tabela 276 – Granične vrednosti za klase izloženosti na agresivno hemijsko delovanje iz prirodnog tla i podzemne vode*

	Naziv	XA1 (slabo agresivna sredina)	XA2 (umereno agresivna)	XA3 (izrazito agresivna)
<b>PODZEMNA VODA</b>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	≥200 i ≤600	>600 i ≤3000	>3000 i ≤6000
	pH vode	≤6,5 i ≥5,5	<5,5 i ≥4,5	<4,5 i ≥4,0
	CO <sub>2</sub> mg/l agresivni	≥15 i ≤40	>40 i ≤100	>100
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	≥15 i ≤30	>30 i ≤60	>60 i ≤100
	Mg <sup>2+</sup> mg/l	≥300 i ≤1000	>1000 i ≤3000	<3000
<b>TLO</b>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/KG	≥2000 i ≤3000	>3000 i ≤12000	>12000 i ≤24000
	Kiselost tla	>20° Baumann Gully		

**DIN EN 206 I DIN 1045-2 i**

*Tabela 277 - Preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona koja su izložena delovanju hemijske agresije (klasa izloženosti XA) prema DIN EN 206 i DIN 1045-2*

Klasa izloženosti	max w	min f <sub>c</sub> (MPa)	min m <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	min m <sub>c</sub> tip II sa dodacima (kg/m <sup>3</sup> )	Dozvoljeni tipovi cementa
XA1	0.60	C25/30	280	270	Za klase izloženosti iznad XA1 moraju se koristiti visoko sulfatno-otporni cementi (HS), a ukoliko je SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ≤1500mg/l (u vodi), umesto HS može se koristiti cement sa dodatkom letećeg pepela.
XA2	0.50	C35/45	320*	270	
XA3	0.45	C35/45	320	270	

\* Minimalna količina cementa za masivne konstrukcije (najmanja dimenzija min 0,8m) trebalo bi da bude 300kg/m<sup>3</sup>



## EN 206-1

Tabela 278 - Preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona koja su izložena delovanju hemijske agresije (klasa izloženosti XA) prema EN 206

Klasa izloženosti	max w	min f <sub>c</sub> (MPa)	min m <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Dozvoljeni tipovi cementa
XA1	0.55	C30/37	300	Za klasu izloženosti XA2 (i za klasu XA1 kada je to primenljivo) trebalo bi koristiti umereno i visoko sulfatno otporne cimente, a za klasu XA3 trebalo bi koristiti visoko sulfatno otporne cimente.
XA2	0.50	C30/37	320	
XA3	0.45	C35/45	360	

## SIST EN 206-1 I SIST 1026

Tabela 279 - Preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona koja su izložena delovanju hemijske agresije (klasa izloženosti XA) prema SIST EN 206-1 i SIST 1026

Klasa izloženosti	max w	min f <sub>c</sub> (MPa)	min m <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Zahtevana posebna svojstva betona	Dozvoljeni tipovi cementa
XA1	0.55	C30/37	320(300)	PV-I	Preporučuje se primena sulfatno otpornog cementa i CEM IV/A i CEM IV/B uz dokaz o mogućoj primeni
XA2	0.50	C30/37	340(320)	PV-II	
XA3	0.45	C35/45	360	PV-III	

## HRN EN 206-1

Tabela 280 - Preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona koja su izložena delovanju hemijske agresije (klasa izloženosti XA) prema HRN EN 206-1

Klasa izloženosti	max w	min f <sub>c</sub> (MPa)	min m <sub>c</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Dozvoljeni tipovi cementa
XA1	0.55	C30/37	300	Preporučuje se primena sulfatno otpornog cementa za klase izloženosti XA2 i XA3
XA2	0.50	C35/45	320	
XA3	0.45	C35/45	360	

## Klase izloženosti prema ACI 318 ("Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary")

Tabela 281 - Klase izloženosti betona prema dejstvu sulfata, prema ACI 318

Agresivnost sredine	Klasa	Uslovi	
		Sulfati (SO <sub>4</sub> ) rastvoreni u tlu, % po masi	Sulfati (SO <sub>4</sub> ) rastvoreni u vodi, mg/l
Nije primenljivo	S0	SO <sub>4</sub> < 0.10	SO <sub>4</sub> < 150
Umereno	S1	0.10 ≤ SO <sub>4</sub> < 0.20	150 ≤ SO <sub>4</sub> < 1500 morska voda
Agresivno	S2	0.20 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 2.00	1500 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 10000
Veoma agresivno	S3	SO <sub>4</sub> > 2.00	SO <sub>4</sub> > 10000

## ACI 318

Tabela 282 - Klase izloženostibetona prema dejstvu sulfata, prema ACI 318

Klasa izloženosti	max w	min fc (MPa)	Dodatni zahtevi
S0	-	17	-
S1	0.50	28	Vrsta cementa : ASTM II Nema ograničenja na dodatke sa kalcijum hloridom Maksimalna ekspanzija (ASTM C 1012) : 0.10% za 6 meseci
S2	0.45	31	Vrsta cementa : ASTM V Dodaci sa kalcijum hloridom nisu dozvoljeni Maksimalna ekspanzija (ASTM C1012) : 0.05% za 6 meseci ili 0.10% za 12 meseci
S3	0.45	31	Vrsta cementa : ASTM V + pucolan ili zgura Dodaci sa kalcijum hloridom nisu dozvoljeni Maksimalna ekspanzija (ASTM C1012) : 0.10% za 18 meseci

## PRILOG 17

### Ispitivanje rečnog agregata, Institut IMS Beograd



INSTITUT IMS AD  
BEOGRAD



Institut IMS a.d., Beograd, Bulevar vojvode Mišića 43, tel: +381 11 2650 322; fax: +381 11 3692 772, +381 11 3692 782  
e-mail: office@institutims.rs, www.institutims.rs

## SERTIFIKAT O USAGLAŠENOSTI

04-003-IMS-298/14

(redni broj sertifikata)

Na osnovu Naredbe o obaveznom atestiranju frakcionisanog kamenog agregata za beton i asfalt ("Službeni list SFRJ", br. 41/87), ustanovljeno je da je proizvod

**Frakcionisani prirodni agregat za izradu betona**

**Frakcije: 0/4 mm; 4/8 mm; 8/16 mm; 16/31.5 mm;**

proizveden od strane

**RTC LUKA "LEGET" a.d., Sremska Mitrovica**

na

**separaciji "SREMSKA MITROVICA"**

u periodu:

**24.03.2014. - 24.09.2014.**

uzorkovan, podvrgnut ispitivanju i preispitivanju u skladu sa Naredbom o obaveznom atestiranju frakcionisanog kamenog agregata za beton i asfalt ("Službeni list SFRJ", br. 41/87) od strane akreditovanog sertifikacionog tela Instituta IMS.

Ovaj Sertifikat potvrđuje da su zadovoljeni svi kriterijumi za ocenjivanje usaglašenosti definisani u Naredbi o obaveznom atestiranju frakcionisanog kamenog agregata za beton i asfalt ("Službeni list SFRJ", br. 41/87) i standardima

**SRPS B.B2.010:1986 i SRPS B.B3.100:1989**

i da proizvod ispunjava sve propisane zahteve.

Sertifikat važi od 24.09.2014. godine do 24.03.2015. godine.

Veza sa Izveštajem o ispitivanju: KIA 0269/14 KB.

Beograd, 25.09.2014. godine

Rukovodilac sertifikacionog tela,  
  
mr Biljana Ilić, dipl. hem.

Štampa: NBS-ZIN. Registar izdatih sertifikata: [www.institutims.rs/certifikacija/registar](http://www.institutims.rs/certifikacija/registar)

STZ 24



8308

**Institut za ispitivanje materijala a.d. Beograd**  
**Centralna laboratorija za ispitivanje materijala**  
**Laboratorija za kamen i agregat**  
Beograd, Bulevar vojvode Mišića 43  
tel: (011) 2650 322, 3690 765 fax: (011) 3692 772, 3692 782  
www.institutims.rs e-mail: ivana.delic@institutims.rs

РТЦ ЛУКА "ЛЕГЕТ"  
Акционарско друштво  
Број 076  
Датум 03.10.2014 год.  
Сремска Митровица

## IZVEŠTAJ O ISPITIVANJU

Br. KIA 0269/14 KB

**Predmet ispitivanja:** Frakcionisani kameni agregat za izradu betona - PRIRODNI  
Frakcije: 0/4 mm; 4/8 mm; 8/16 mm; 16/31,5 mm

**Naručilac sertifikacije:** RTC LUKA "LEGET" a.d. – SREMSKA MITROVICA

**Zahtev za sertifikaciju broj:** IMS: 7-312 od 20.01.2014.

**Sadržaj izveštaja:** Ukupno 11 strana

**Izveštaj odobrio:** Laboratorija za kamen i agregat  
Rukovodilac



*Ivana Delic-Nikolic*  
Ivana Delić-Nikolić, dipl. ing. geol.

Beograd, septembar 2014. godine

IZVEŠTAJ O ISPITIVANJU  
FRAKCIONISANOG KAMENOG AGREGATA ZA IZRADU BETONA

1.0. OPŠTI PODACI

- 1.1. Agregat potiče iz nalazišta: reka Drina  
- država Srbija
- 1.2. Proizvodjač agregata je: RTC LUKA "LEGET" a.d.  
sa sedištem u: Sremskoj Mitrovici
- 1.3. Agregat je proizveden na separaciji: "SREMSKA MITROVICA"
- 1.4. Vrsta agregata: Frakcionisani agregat - PRIRODNI
- 1.5. Period kontrole i ispitivanja: OD 24.03.2014. DO 24.09.2014.
- 1.6. Uzorci su odabrani od strane: predstavnika Instituta IMS a.d.  
u prisustvu: predstavnika naručioca ispitivanja
- 1.7. Mesto i datumi uzimanja uzoraka: Separacija, 03.09.2014., 01.07.2014.,  
27.05.2014.
- 1.8. Zapisnici o uzorkovanju u periodu kontrole broj: KIA 0269/14 KB, KIA 0269/14 K,  
KIA 0205/14 K, KIA 0163/14 K
- 1.9. Način uzorkovanja i količina uzoraka za ispitivanje po: SRPS B.B0.001
- 1.10. Agregat je namenjen za: izradu betona
- 1.11. Ispitivanje je počelo: 11.09.2014.  
Ispitivanje je završeno: 25.09.2014.
- 1.12. Datum izrade izveštaja: 25.09.2014.
- 1.13. Ispitivanja su izvršena po SRPS: B.B8.004, B.B8.029, B.B8.034,  
B.B8.036, B.B8.037, B.B8.038,  
B.B8.039, B.B8.042, B.B8.044,  
B.B8.045, B.B8.049,  
ISO 6782, ISO 6783, ISO 7033

#### 1.14. Oprema za ispitivanje

Uređaj	Inventarski broj
Vibrator za prosejavanje agregata "Institut IMS" Srbija	893 IMS
Aparat "Los Angeles" "Soiltest reuland" SAD	884 IMS
Binokularna lupa "Carl Zeiss" Nemačka	861 IMS
Sušnica "Instrumentaria" Hrvatska	902 IMS
Elektronska vaga sa opsegom merenja do 10 kg "Tuf Co." Srbija Merna nesigurnost $U=0.8165g+9.98E-04 \cdot X$ Nivo poverenja je od 95 %	3324 IMS
Elektronska vaga sa opsegom merenja do 8 kg "Controls" Italija Merna nesigurnost $U(W)=0.137g+1.39 \cdot 10^{-4}R$ Nivo poverenja je od 95 %	0387 IMS
Elektronska vaga sa opsegom merenja do 60 kg tip FKB 60K2A "Gottl. KERN & Sohn" Gmbh Merna nesigurnost $U=2.42212g+5.00E-04X$ Nivo poverenja od 95%	WC0706055
Elektronska vaga sa opsegom merenja do 6,2 kg tip EW 6200-2NM "Gottl. KERN & Sohn" Gmbh Merna nesigurnost $U=0.01633g+4.21E-05 \cdot X$ Nivo poverenja od 95%	087790049
Lonci za određivanje nasute zapreminske mase V 1000 ml, 3 000 ml, 10 000 ml	-
Set kvadratnih sita od bušene ploče za zrna > 4 mm; 33 cm x 33 cm "Institut IMS" Srbija	-
Set metalnih sita $\phi 200$ mm od pletene žice - "CONTROLS" - Italija	-

2.0. REZULTATI ISPITIVANJA AGREGATA

2.1. Petrografski sastav (SRPS B.B8.004) (Genetska klasifikacija)

2.1.1. Krupan agregat

NAZIV STENE ILI MINERALA	SADRŽAJ STENA I MINERALA U % MASENIM				
	63-125 mm	31.5-63 mm	16-31.5 mm	8-16 mm	4-8 mm
Magmatske stene:					
Granitoid			2.1	1.9	3.3
Andezit-bazalt			1.4	1.9	3.6
			3.5	3.8	6.9
Sedimentne stene:					
Peščar			23.1	18.8	13.5
Krečnjak			8.9	9.4	12.1
			32	28.2	25.6
Metamorfne stene:					
Kvarcit			59.7	65.5	62.2
Gnajs			2.3	1	2.5
Serpentinisani peridotit			2.5	1.5	2.8
			64.5	68	67.5
Minerali:					
UKUPNO:			100	100	100

2.1.2. Sitan agregat

NAZIV STENE ILI MINERALA	u masenim%	SADRŽAJ STENA I MINERALA U % KAO BROJ ZRNA								
		2-4 mm	1-2 mm	0.5-1 mm	0.25-0.5 mm	0.125-0.25 mm				
Magmatske stene:										
Granitoid	1.9	4.1	1	1	1	0	0	0	0	0
Andezit-bazalt	2.2		0		0					
Sedimentne stene:										
Peščar	13.1	17	5	7	3	4	1	2	0	0
Krečnjak	3.9		2		1		1		0	
Metamorfne stene:										
Kvarcit	65.2	68.8	59	61	40	40	21	21	12	12
Škriljac	1.4		1		0		0		0	
Serpentinisani peridotit	2.2		1		0		0		0	
Minerali:										
Kvarc	10.1	10.1	30	31	50	55	70	77	80	88
Feldspati	0		1		2		2		2	
Amfiboli-pirokseni	0		0		1		2		3	
Liskuni	0		0		1		1		1	
Kalcit	0		0		1		2		2	
UKUPNO:	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100



- 2.1.3. Sastojci koji mogu biti štetni - reaktivni  
2.1.3.1 Krupan agregat

NAZIV SASTOJAKA STENE ILI MINERALA	SADRŽAJ STENA I MINERALA U % MASENIM				
	63-125 mm	31.5-63 mm	16-31.5 mm	8-16 mm	4-8 mm
<b>Sastojci koji mogu biti štetni za fizičko-mehanička svojstva betona:</b>					
Trošna i slaba zrna					
Glinoviti peščari					
Laporac i laporoviti karbonati					
Argilošisti, mikašisti i filiti					
Zrna sa skramama limonita, gline i CaCO <sub>3</sub>					
Gips (sadra), anhidrit					
Glina i glinci					
Serpentin, liskuni i alevrolit					
Ugalj + ostaci ljuštura makrofaune					
<b>Sastojci koji mogu biti reaktivni u betonu:</b>					
Opal (amorfni SiO <sub>2</sub> )					
Tridimit, kristobalit, zeoliti					
Rožnaci (sa opalom) - kalcedon					
Kisela silikatna stakla					
Hidroliskuni (Chl)					
Dolomitizirani krečnjaci sa mineralima gline					
<b>Sastojci koji mogu da prouzrokuju koroziju armature u betonu:</b>					
Halit					
Silvin					
Pirit					
Markasit					
Pirotin					
Anhidrit					
Sadra					
<b>Sastojci koji sprečavaju hidrataciju cementa u betonu:</b>					
Saharati					
Masti					

2.1.3.2 Sitan agregat

NAZIV SASTOJAKA STENE ILI MINERALA	SADRŽAJ STENA I MINERALA				
	u masenim %	(u % broj zrna)			
	2-4 mm	1-2 mm	0.5-1 mm	0.25-0.5 mm	0.125-0.25 mm
<b>Sastojci koji mogu biti štetni za fizičko-mehanička svojstva betona:</b>					
Trošna i slaba zrna					
Glinoviti peščari					
Lapori i laporoviti karbonati					
Argilošisti, mikašisti i filiti					
Zrna sa skramama limonita gline i opala					
Gips (sadra), anhidrit					
Glina i glinci					
Serpentin, liskuni i alevrolit	0	0	1	1	1
Ugalj + ostaci ljuštura makrofaune					
<b>Sastojci koji mogu biti potencijalno reaktivni u betonu:</b>					
Opal (amorfni SiO <sub>2</sub> )					
Tridimit, kristobalit, zeoliti					
Rožnaci (sa opalom) - kalcedon					
Kisela silikatna stakla					
Hidroliskuni					
Dolomitizirani krečnjaci sa mineralima gline					
<b>Sastojci koji mogu da prouzrokuju koroziju armature u betonu:</b>					
Halit					
Silvin					
Pirit					
Markasit					
Pirotin					
Anhidrit					
Sadra					
<b>Sastojci koji sprečavaju hidrataciju cementa u betonu:</b>					
Saharati					
Masti					

## 2.2. Fizičke, mehaničke, hemijske i geometrijske osobine frakcionisanog agregata

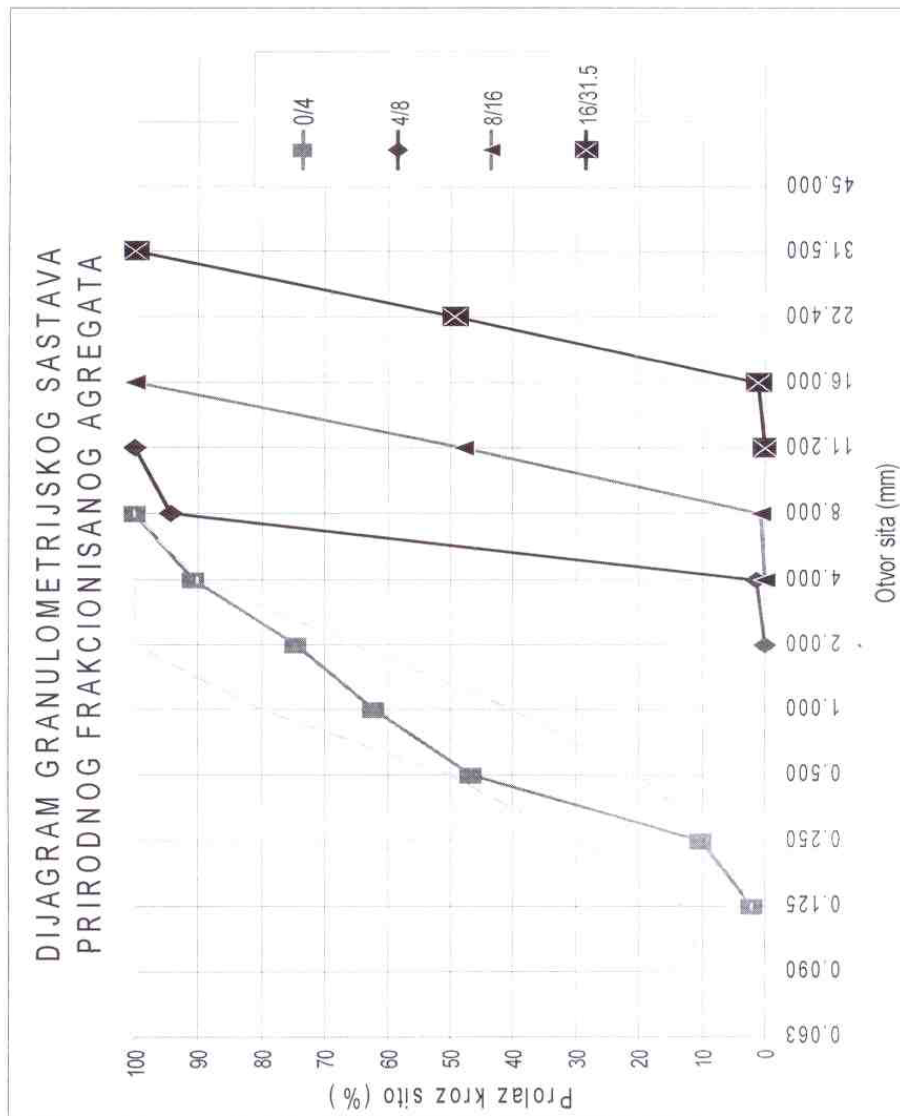
VRSTA ISPITIVANJA	METODA PREMA STANDARDU (SRPS)	JEDINICE MERE	FRAKCIJE (mm/mm)				USLOVI KVALITETA SRPS B.B2.010 SRPS B.B3.100 SRPS B.B2.009*
			16/31.5	8/16	4/8	0/4	
Postojanost na dejstvo mraza (5 ciklusa u Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	B.B8.044	% (m/m)	1.1	1.3	1.5	1.8	gubitak mase najviše Drobljeni – 5.0 Prirodni – 12.0
Sadržaj ukupnog sumpora izražen kao SO <sub>3</sub>	B.B8.042	% (m/m)	0.00				najviše 1.0
Sadržaj hlorida izražen kao Cl <sup>-</sup>	B.B8.042	% (m/m)	0.004				najviše 0.1
Određivanje stvarne zapreminske mase vodom zasićenog i površinski suvog uzorka zrna agregata	ISO 6783 ISO 7033	kg/m <sup>3</sup>	hidrostatička vaga			pikno- metar	u granicama 2000-3000
			2654	2646	2650	2653	
Nasuta zapreminska masa u rastresitom suvom stanju	ISO 6782	kg/m <sup>3</sup>	1506	1500	1522	1684	nije propisano
Nasuta zapreminska masa u zbijenom suvom stanju	ISO 6782	kg/m <sup>3</sup>	1610	1606	1629	1792	nije propisano
Određivanje upijanja vode	ISO 6783 ISO 7033	% (m/m)	0.5	0.6	0.6	1.0	*najviše 1.5
Sadržaj organskih materija (u 3% rastvoru NaOH)	B.B8.039	-	-		rastvor svetliji od standardne boje		rastvor ne sme biti tamniji od standardne boje
Oblik zrna	B.B8.049	-	0.24	0.23	0.22	-	najmanje Prirodni - 0.18 Drobljeni - 0.15
Sadržaj grudvi glina	B.B8.038	% (m/m)	0.0	0.0	0.0	0.0	najviše za < 4 mm max 0.5 za > 4 mm max 0.25
Sadržaj slabih zrna	B.B8.037	% (m/m)	0.0	0.0	0.0	-	najviše 3.0-4.0
Sadržaj lakih čestica	B.B8.034	% (m/m)	0.0	0.0	0.0	0.0	najviše 1.0-0.5
Obavijenost površine zrna agregata	B.B8.004	-	0.0	0.0	0.0	-	nije propisano
Otpornost na dinamičke udare (drobljenje) i habanje trenjem	B.B8.045	% (m/m)	25.3 gradacija "B"		23.8 gradacija "C"		koef. LA najviše 30.0

2.3. Granulometrijski sastav i sadržaj sitnih čestica separisanog agregata

VRSTA ISPITIVANJA	METODA PREMA SRPS	JEDI- NICE MERE	FRAKCIJE (mm/mm)				USLOVI KVALITETA SRPS B.B2.010 SRPS B.B3.100
			0/4	4/8	8/16	16/31.5	
Sadržaj sitnih čestica - sitnije od 0.063 mm  - sitnije od 0.09 mm	B.B8.036	% (m/m)	0.78	0.00	0.00	0.00	Za zrna < 4 mm Prirodni: max 5% Drobljeni: max 10%  Za zrna > 4 mm max 1%
		% (m/m)	1.08	0.00	0.00	0.00	
Granulometrijski sastav <i>otvori sita (mm)</i>	B.B8.029	% (m/m)	kumulativni prolaz kroz sita izražen u (% m/m)				Podmerna zrna najviše 15%  Nadmerna zrna najviše 10%
		0.125	2.10				
		0.250	10.14				
		0.500	46.66				
		1.0	62.18				
		2.0	74.66	0.00			
		4.0	90.85	1.46	0.00		
		8.0	100.00	94.46	0.77		
		11.2		100.00	48.07	0.00	
		16.0			100.00	1.14	
		22.4				49.33	
		31.5				100.00	
		45.0					
Modul zrnivosti sitnog agregata	B.B2.010		3.13			2.30-3.60	

2.3. Granulometrijski sastav i sadržaj sitnih čestica separisanog agregata

VRSTA ISPITIVANJA	METODA PREMA SRPS	JEDI- NICE MERE	FRAKCIJE (mm/mm)				USLOVI KVALITETA SRPS B.B2.010 SRPS B.B3.100	
			0/4	4/8	8/16	16/31.5		
Sadržaj sitnih čestica - sitnije od 0.063 mm  - sitnije od 0.09 mm	B.B8.036	% (m/m)	0.78	0.00	0.00	0.00	Za zrna < 4 mm Prirodni: max 5% Drobjeni: max 10%  Za zrna > 4 mm max 1%	
		% (m/m)	1.08	0.00	0.00	0.00		
Granulometrijski sastav <i>otvori sita (mm)</i>  0.125  0.250  0.500  1.0  2.0  4.0  8.0  11.2  16.0  22.4  31.5  45.0	B.B8.029	% (m/m)	kumulativni prolaz kroz sita izražen u (% m/m)				Podmerna zrna najviše 15%  Nadmerna zrna najviše 10%	
			2.10					
			10.14					
			46.66					
			62.18					
			74.66	0.00				
			90.85	1.46	0.00			
			100.00	94.46	0.77			
				100.00	48.07	0.00		
					100.00	1.14		
						49.33		
						100.00		
Modul zrnavosti sitnog agregata	B.B2.010		3.13			2.30-3.60		



**Institut za ispitivanje materijala a.d. Beograd**  
**Centralna laboratorija za ispitivanje materijala**  
**Laboratorija za kamen i agregat**

Beograd, Bulevar vojvode Mišića 43  
tel: (011) 2650 322, 3690 765 fax: (011) 3692 772, 3692 782  
www.institutims.rs e-mail: ivana.delic@institutims.rs

### 3.0. NALAZ

Na osnovu utvrđenih rezultata ispitivanja, konstatuje se da ispitani frakcionisani prirodni agregat iz reke Drine i sa separacije "SREMSKA MITROVICA", ima sledeća svojstva:

- Mineralno-petrografski sastav agregata je dobar. Sastoji se iz čvrstih i jedrih mineralnih zrna sve tri genetske grupe stena. U krupnoj frakciji preovlađuju kvarciti i peščari. Sa smanjivanjem veličine zrna povećava se udeo monomineralnih zrna, među kojima dominira kvarc.
- Postojan je na dejstvo mraza (ispitivanje dejstvom kristalizacije soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).
- Agregat ne sadrži hemijski štetne sastojke za beton ( $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$  i  $\text{Cl}^-$ ) ili ih sadrži u minimalnim i dozvoljenim količinama.
- Stvarna zapreminska masa vodom zasićenog i površinski suvog zrna agregata je u zahtevanim granicama za agregat normalne mase.
- Nasute zapreminske mase u rastresitom i zbijenom suvom stanju i upijanje vode prikazani su u tabeli na strani br. 8.
- Sadržaj organskih materija i grudvi gline u agregatu nije zapažen.
- Oblik zrna je povoljan.
- Sadržaj lakih čestica nije registrovan.
- Slabih zrna nema.
- Obavijenost površine zrna agregata glinovitom skramom nije registrovana.
- Otpornost agregata na dinamičke udare (drobljenje) i habanje trenjem (koeficijent "Los Angeles", gradacije B i C) je u okviru propisanih vrednosti za izradu betona.
- Granulometrijski sastav sitne frakcije odgovara propisanim vrednostima.
- Sadržaj podmernih i nadmernih zrna za krupne frakcije je unutar propisanih granica.
- Sadržaj sitnih čestica je unutar propisanih granica.
- Modul zrnavosti sitnog agregata je unutar propisanih granica.

*NAPOMENA: izloženi rezultati se odnose isključivo na ispitani uzorak. Ne preuzima se odgovornost u pogledu verodostojnosti uzorkovanja, osim u slučaju kada je ono obavljeno pod kontrolom predstavnika Instituta IMS. Izveštaj se ne sme umnožavati bez odobrenja i overe Centralne laboratorije za ispitivanje materijala. Kopija ovog izveštaja nije zvanični dokument. Izveštaj važi samo kao celina, sa originalom pečata.*

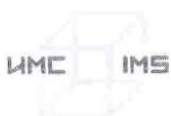
Analiza i izrada izveštaja

dr Lidja Kurešević, dipl. ing. geol.  
Samostalni diplomirani inženjer

Rukovodilac ispitivanja



Ivana Delić-Nikolić, dipl. ing. geol.  
Glavni diplomirani inženjer



INSTITUT IMS AD  
BEOGRAD

Institut IMS a. d.  
Beograd, Bulevar vojvode Mišića 43  
tel: (011) 2650 322  
fax: (011) 3692 772, 3692 782  
e-mail: office@institutims.rs  
www.institutims.rs

RTC LUKA "LEGET" a.d.

Ul.: Jarački put b.b.

22 000 Sremska Mitrovica

naš znak:

vaš znak:

datum: 25.09.2014.

Poštovani,

na osnovu izveštaja broj KIA 0269/14 KB iz septembra 2014. godine, Laboratorije za kamen i agregat donosi se:

## MIŠLJENJE O UPOTREBLJIVOSTI

Saglasno utvrđenom kvalitetu i odredbama važećih standarda, zaključuje se da ispitani prirodni frakcionisani agregat, iz reke Drine i sa separacije "SREMSKA MITROVICA" ima dobra petrografska, geometrijska i fizičko-mehanička svojstva i ispunjava tehničke uslove standarda SRPS: B.B3.100 i B.B2.010.

### Napomene:

1. Sastavni deo ovog Mišljenja o upotrebljivosti je Izveštaj o ispitivanju br. KIA 0269/14 KB Laboratorije za kamen i agregat iz septembra 2014. godine.
2. Mišljenje o upotrebljivosti se ne sme umnožavati bez odobrenja Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS.
3. Kopija ovog Mišljenja o upotrebljivosti nije zvaničan dokument.

Laboratorija za kamen i agregat  
Rukovodilac



Ivana Delić-Nikolić, dipl.inž.geol.

materijali  
metali i energetika  
putevi i geotehnika  
tehnologija građenja i konstrukcije





PRILOG 18

Испитивање рециклираног агрегата на дробљивост-метода Los Angeles,  
Грађевински факултет у Београду

ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ  
Булевар краља Александра 73  
11000 Београд

**ИСТ**  
ИНСТИТУТ ЗА  
САОБРАЋАЈНИШЕ  
И ГЕОТЕХНИКУ  
ЛАБОРАТОРИЈА ЗА  
КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

УЗОРАК  $\Delta$

ИСПИТИВАЊЕ КАМЕНОГ АГРЕГАТА  
ОТПОРНОСТ НА ДРОБЉЕЊЕ И ХАБАЊЕ ПРЕМА SRPS EN 1097-2:2013 ("LOS ANGELES")

Шифра узорка	16 · 0377 · MM · T · K · 01
Наручилац испитивања	"ФТН" Нова Сад
Објекат	
Врста и порекло минералног материјала	8/16 мм
Датум почетка испитивања	03.10.2016.
Датум завршетка испитивања	04.10.2016.

ПАРАМЕТРИ ОПИТА

Класификација опсега, mm	Градација која се испитује					
	4 до 6.3	4 до 8	6.3 до 10	8 до 11.2	10 до 14	11.2 до 16
Величина средњег сита (mm)	5	6.3	8	10	11.2	14
Процент који пролази кроз средње сито (%)	30 до 40	60 до 70	30 до 40	60 до 70	30 до 40	60 до 70
Маса узорка за испитивање (g)	5000±5					
Број кугли	Хабајуће пуњење					
	7	8	9	10	11	12
Маса кугли (g)	2930 -	3410 -	3840 -	4250 -	4690 -	5120 -
	3100	3540	3980	4420	4860	5300

ИСПИТИВАО  
*Јасмина М.*

4847.0

РЕЗУЛТАТИ ОПИТА

Маса узорка пре испитивања, $M_0$ (g)	5000,00
Маса узорка након испитивања, која остаје на сити 1.6 mm, $M_1$ (g)	3600,90
Коефицијент LA (%) $LA = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \cdot 100$	27,9

ОВЕРАВА  
*[Signature]*

ГФО 457 в2 (17.07.2013.)



ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ  
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ  
Булевар краља Александра 73  
11000 Београд

**ИСТ**

ИНСТИТУТ ЗА  
САОБРАЋАЈНИЦЕ  
И ГЕОТЕХНИКУ

ЛАБОРАТОРИЈА ЗА  
КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

УЗОРАК 2

**ОТПОРНОСТ НА ДРОБЉЕЊЕ И ХАБАЊЕ ПРЕМА SRPS EN 1097-2:2013 ("LOS ANGELES")**  
**ИСПИТИВАЊЕ КАМЕНОГ АГРЕГАТА**

Шифра узорка	16	03	77	MM	T	K	01
Наручилац испитивања	"ФТН" Нови Сад						
Објект							
Врста и порекло минералног материјала	8/16 мм						
Датум почетка испитивања	03.10.2016.						
Датум завршетка испитивања	04.10.2016.						

**ПАРАМЕТРИ ОПИТА**

Класификација опсега, mm	Градација која се испитује						
	4 до 6.3	4 до 8	6.3 до 10	8 до 11.2	10 до 14	11.2 до 16	
Величина средњег сита (mm)	5	6.3	8	10	11.2	14	
Процент који пролази кроз средње сито (%)	30 до 40	60 до 70	30 до 40	60 до 70	30 до 40	60 до 70	
Маса узорка за испитивање (g)	5000±5						
Број кугли	7	8	9	10	11	12	
Маса кугли (g)	2930 - 3100	3410 - 3540	3840 - 3980	4250 - 4420	4690 - 4860	5120 - 5300	
<p>ИСПИТИВАО: <i>Spentik V.</i></p> <p>ИСПИТИВАО: _____</p> <p>ХАБАЈУЋЕ ПУЊЕЊЕ: 4847,20</p>							

**РЕЗУЛТАТИ ОПИТА**

Маса узорка пре испитивања, M <sub>0</sub> (g)	5000,00
Маса узорка након испитивања, која остаје на сити 1.6 mm, M <sub>1</sub> (g)	3613,30
Коефицијент L <sub>A</sub> (%) $L_A = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \cdot 100$	27,7

ОБЕРАВА: \_\_\_\_\_

ГФ0 457 в2 (17.07.2013.)