



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U NOVOM
SADU



Tiana Milović

**UTICAJ PRIMENE PRIRODNOG ZEOLITA NA
TRAJNOST REPARATURNIH CEMENTNIH
MALTERA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2021.

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Тиана Миловић
Менторка (титула, име, презиме, звање, институција)	Проф. др Мирјана Малешев, редовни професор, Департман за грађевинарство и геодезију, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Менторка (титула, име, презиме, звање, институција)	Проф. др Мирослава Радека, редовни професор, Департман за грађевинарство и геодезију, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Утицај примене природног зеолита на трајност репаратурних цементних малтера
Језик публикације (писмо):	Српски (латиница)
Физички опис рада:	Унети број: Страница <u>409</u> Поглавља <u>10</u> Референци <u>191</u> Табела <u>189</u> Слика <u>139</u> Графикона <u>0</u> Прилога <u>15</u>
Научна област:	Грађевинско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Теорија и технологија бетона
Кључне речи / предметна одредница:	Природни зеолит, електрофилтерски пепео, репаратурни малтер, чврстоћа при притиску, атхезија, XRD, FTIR, излуживање, трајност
Резиме на језику рада:	У дисертацији су приказани резултати сопственог експерименталног истраживања могућности примене природног зеолита из Србије, за замену дела цемента у цементним малтерима, и могућност примене датих малтера као репаратурних неконструкцијских и/или конструкцијских материјала. Како би се прецизније одредили продукти пуцоланске реакције, урађено је испитивање фазног састава очврслих паста. На очврслим малтерима испитани су: чврстоћа при притиску, капиларно упијање воде, излуживање, приањање за бетонску подлогу, као и својства трајности. Постављени циљеви су испуњени, а резултати испитивања су показали да малтери који садрже до 20% природног зеолита као минералног додатка, испуњавају услове за конструкцијски репаратурни малтер према ЕН 1504-3.

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истоветности штапане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штапаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	12.07.2018.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: др Властимир Радоњанин, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Биљана Илић, научни сарадник, Институт ИМС, Београд Члан: др Данијел Кукарас, ванредни проф., Грађевински факултет у Суботици, Универзитет у Новом Саду Члан: др Иван Лукић, ванредни проф., Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Менторка: др Мирјана Малешев, редовни проф, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Менторка: др Мирослава Радека, редовни проф, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Напомена:	

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OR CENTER**

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Tiana Milović
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	dr Mirjana Malešev, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	dr Miroslava Radeka, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	The effect of natural zeolite application on the durability of the repair cement mortars
Language of text (script):	Serbian language (latin)
Physical description:	Number of: Pages <u>409</u> Chapters <u>10</u> References <u>191</u> Tables <u>189</u> Illustrations <u>139</u> Graphs <u>0</u> Appendices <u>15</u>
Scientific field:	Civil Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Theory and technology of concrete
Subject, Key words:	Natural zeolite, fly ash, repair mortar, compressive strength, bond strength, XRD, FTIR, leaching, durability
Abstract in English language:	The dissertation presents the results of own experimental research of the possibility of using natural zeolite from Serbia, for a partial replacement of the cement in cement mortars, and the possibility of using these mortars as non-structural and/or structural repair materials. The phase composition of hardened cement pastes was examined for a more precise determination of pozzolanic reaction products. The following properties of hardened mortars were tested and analyzed: compressive strength, capillary water absorption, leaching, bond strength, as well as durability. The set goals were met, and the test results showed that mortars containing up to 20% of natural zeolite as a mineral additive meet the requirements for structural repair mortar according to EN 1504-3.
Accepted on Scientific Board on:	12.07.2018.

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

56 – Statement on the authority,

5b – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

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

Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: dr Vlastimir Radonjanin, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member: dr Biljana Ilić, research associate, IMS Institute, Belgrade Member: dr Danijel Kukaras, associate professor, Faculty of Civil Engineering Subotica, University of Novi Sad Member: dr Ivan Lukić, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member, Mentor: dr Mirjana Malešev, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad Member, Mentor: dr Miroslava Radeka, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note:	

Porodici

REZIME

Imajući u vidu da je cementna industrija odgovorna za 7% ukupne emisije CO₂, kao i da je usled višedecenijskog neadekvatnog održavanja objekata sve veći broj oštećenih i dotrajalih kako stambenih tako i industrijskih objekata i mostova, sve se intenzivnije traga za alternativnim izvorima komponentnih materijala koji bi se koristili u poboljšanim betonima i malterima za izgradnju novih, trajnijih konstrukcija, ali i za sanaciju oštećenih objekata. S obzirom na velike prirodne resurse zeolita kojima raspolaže Srbija i njegovu nedovoljnu istraženost kao mineralnog dodatka sa jedne strane i velike količine elektrofilterskog pepela koje se još uvek svakodnevno odlažu na pepelišta u Srbiji, javlja se ne samo potreba za paralelnim ispitivanjem ova dva pucolanska materijala u cementnim kompozitima, već i za ispitivanjem njihove kombinacije, kao i njihovog uticaja na životnu sredinu preko izluživanja elemenata u tragovima. Ispitivanja su namenski urađena na malterima i pastama ne samo da bi se izbegao uticaj krupnog agregata na trajnost i čvrstoće pri pritisku, već da bi se što preciznije odredili produkti pucolanske reakcije. U radu je istraživana mogućnost primene prirodnog zeolita iz ležišta „Igroš-Vidojevići“ kao mineralnog dodatka u cementnim malterima, sa aspekta fizičko-mehaničkih svojstava, trajnosti i uticaja na životnu sredinu preko izluživanja elemenata u tragovima, u cilju dobijanja konstrukcijskog ili nekonstrukcijskog reparaturnog maltera. Opisano istraživanje je organizovano u tri faze. U prvoj fazi su ispitani paste i malteri. Varirani parametri su nivo zamene cementa prirodnim zeolitom, odnosno elektrofilterskim pepelom, i vodovezivni faktor. Ukupno je ispitano 7 pasta i 14 maltera. Na pastama je određen fazni sastav primenom XRD analize i FTIR spektroskopije. Na očvrslim malterima ispitana je čvrstoća pri pritisku i kapilarno upijanje vode. U okviru druge faze, ispitane su 3 vrste cementnih maltera u kojima je 20% cementa zamenjeno mešavinom (i) prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela, (ii) prirodnog zeolita i kalcijum karbonata, i (iii) elektrofilterskog pepela i kalcijum karbonata. Na odabranim malterima ispitano je izluživanja potencijalno toksičnih elemenata, čvrstoća pri pritisku i kapilarno upijanje vode. U okviru treće faze, ispitano je 10 maltera koji su odabrani iz prve faze. Na ovim malterima ispitani su: skupljanje usled sušenja, otpornost na prodor hlorida, otpornost na dejstvo sulfata, athezija, ograničeno skupljanje i toplotna kompatibilnost preko ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje. Analiza dobijenih rezultata i odgovarajući zaključci su izvedeni za svaku fazu ispitivanja posebno, a na kraju je urađena komparativna analiza svih dobijenih rezultata i izvedeni su generalni zaključci. Na osnovu rezultata ispitivanja glavni zaključak je da cementni malteri koji sadrže do 20% prirodnog zeolita ili elektrofilterskog pepela, mogu da se koriste kao konstrukcijski reparaturni materijali u skladu sa EN 1504-3.

Ključne reči: Prirodni zeolit, elektrofilterski pepeo, reparaturni malter, čvrstoća pri pritisku, athezija, XRD, FTIR, izluživanje, trajnost

ABSTRACT

Considering that the cement industry is responsible for 7% of total CO₂ emissions, and that due to decades of inadequate maintenance of buildings, there is an increasing number of damaged and dilapidated residential and industrial buildings and bridges, there is an increasing search for alternative sources of component materials to be used in improved concretes and mortars for the construction of new, more durable structures, but also for the repair of damaged ones. Given the large natural resources of zeolite available to Serbia and its insufficient exploration as a mineral additive on the one hand, and the large amount of fly ash that is still daily disposed of in ash dumps in Serbia, there is not only a need for parallel testing of these two pozzolanic materials in cement composites, but also for examining their combination, as well as their impact on the environment through the leaching of trace elements. The tests were purposely performed on mortars and pastes, not only in order to avoid the influence of the large aggregate on the durability and compressive strength, but also in order to determine the products of the pozzolanic reaction as precisely as possible. The paper analyzes the possibility of using natural zeolite from the deposit "Igroš-Vidojevići" as a mineral additive in cement mortars, in terms of physical and mechanical properties, durability and environmental impact through leaching of trace elements, in order to obtain structural or non-structural repair mortar. The described research was organized in three phases. In the first phase, pastes and mortars were tested. The varied parameters are the level of cement replacement with natural zeolite, ie fly ash, and the water binding factor. A total of 7 pastes and 14 mortars were tested. Phase composition was determined on the pastes using XRD analysis and FTIR spectroscopy. Compressive strength and capillary water absorption were tested on hardened mortars. In the second phase, 3 types of cement mortars were tested in which 20% of cement was replaced by a mixture of (i) natural zeolite and fly ash, (ii) natural zeolite and calcium carbonate, and (iii) fly ash and calcium carbonate. Leaching of potentially toxic elements, compressive strength and capillary water absorption were tested on selected mortars. Within the third phase, 10 mortars, selected from the first phase, were examined. These mortars were tested for: drying shrinkage, resistance to chloride ion penetration, sulphate attack resistance, bond strength, restrained shrinkage and thermal compatibility over the freeze-thaw cycling with de-icing salt immersion. The analysis of the obtained results and the corresponding conclusions were performed for each phase of the examination separately, and at the end a comparative analysis of all obtained results was performed and general conclusions were made. Based on the test results, the main conclusion is that cement mortars containing up to 20% natural zeolite or fly ash, can be used as structural repair materials in accordance with EN 1504-3.

Key words: Natural zeolite, fly ash, repair mortar, compressive strength, bond strength, XRD, FTIR, leaching, durability

SADRŽAJ:

I UVODNA RAZMATRANJA	1
1. Uvod	3
2. Potreba za istraživanjem	3
3. Predmet, cilj i metodologija istraživanja	4
II SVOJSTVA PRIRODNOG ZEOLITA I ELEKTROFILTERSKOG PEPELA KAO PUCOLANSKIH MATERIJALA	9
1. Dopunski cementni materijali - SCM	11
2. Prirodni zeoliti	12
3. Elektrofilterski pepeo	17
4. Produkti hidratacije Portland cementa čiji je deo supstituisan sa SCM	26
4.1. Pucolanska reakcija prirodnog zeolita kao SCM	27
4.2. Pucolanska reakcija elektrofilterskog pepela kao SCM	27
III IMOBILIZACIJA TEŠKIH METALA	29
1. Uvod	31
2. Elektrofilterski pepeo dobijen sagorevanjem sprasenog uglja kao izvor potencijalno toksičnih elemenata	34
3. Imobilizacija teških metala	35
3.1. Imobilizacija teških metala unutar strukture prirodnog zeolita	35
3.2. Imobilizacija teških metala unutar produkata hidratacije	35
3.2.1. Struktura etringita i imobilizacija potencijalno toksičnih elemenata unutar nje	36
3.2.2. Struktura C-S-H gela i imobilizacija potencijalno toksičnih elemenata unutar nje	38
3.2.3. Cementni kompoziti koji sadrže mešavinu NZ i FA kao SCM	42
IV REPARATURNI MALTERI	47
1. Osnovna svojstva, tehnički zahtevi i klasifikacija reparaturnih maltera	49
2. Reparturni malteri u skladu sa EN 1504	58
3. Zahtevi za reparaturne maltere prema EN 1504-3	64

V PREGLED RELEVANTNE LITERATURE IZ OBLASTI ISTRAŽIVANJA 71

1. Pregled stanja u oblasti istraživanja cementnih pasta, maltera i betona koji sadrže prirodni zeolit ili elektrofilterski pepeo	72
1.1. Čvrstoća pri pritisku	76
1.2. Upijanje vode	79
1.2.1. Kapilarno upijanje vode	79
1.2.2. Upijanje vode pri atmosferskom pritisku	80
1.3. Skupljanje usled sušenja	81
1.4. Otpornost na dejstvo mraza	81
1.5. Otpornost na prodor hlorida	83
1.6. Otpornost na dejstvo sulfata	85
1.7. Izluživanje elemenata u tragovima	86
2. Pregled stanja u oblasti istraživanja reparaturnih maltera na bazi cementa	91
3. Zaključci	110

VI EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE 113

1. Uvod	115
2. Program eksperimentalnog istraživanja	117
3. Podaci o komponentnim materijalima	124
3.1. Cement	124
3.2. Dopunski cementni materijali - SCM	126
3.2.1. Karakterizacija prirodnog zeolita	127
3.2.2. Karakterizacija elektrofilterskog pepela	129
3.3. Filer	131
3.4. Agregat	132
3.5. Hemijski dodaci	132
3.5.1. Voda	132
4. Referentni beton za izradu podloga prema EN 1766	133
5. Sastav malterskih mešavina i pasta	136
6. Izrada malterskih mešavina i pasta	138
7. Nega i kondicioniranje uzoraka	141
8. Priprema uzoraka za ispitivanje	143
9. Ispitivana svojstva	146
9.1. Svojstva očvrstlog maltera	146
9.1.1. Čvrstoća pri pritisku	146
9.1.2. Kapilarno upijanje vode	146
9.1.3. Skupljanje usled sušenja	147

9.1.4.	Otpornost na prodor hlorida	148
9.1.5.	Otpornost na dejstvo sulfata	150
9.1.6.	Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda	153
9.1.7.	Ograničeno skupljanje	153
9.1.8.	Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje	153
9.1.9.	Izluživanje elemenata u tragovima	154
9.2.	Određivanje faznog sastava očvrsljih pasta	155
9.2.1.	Određivanje mineraloškog sastava metodom rendgenske difrakcije (XRD)	155
9.2.2.	Određivanje strukturnih promena metodom infracrvene spektroskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR)	155
10.	Rezultati ispitivanja	156
10.1.	Svojstva očvrslg maltera	156
10.1.1.	Čvrstoća pri pritisku	156
10.1.2.	Kapilarno upijanje vode	158
10.1.3.	Izluživanje elemenata u tragovima	163
10.1.4.	Skupljanje usled sušenja	164
10.1.5.	Otpornost na prodor hlorida	164
10.1.6.	Otpornost na dejstvo sulfata	167
10.1.7.	Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda	171
10.1.8.	Ograničeno skupljanje	173
10.1.9.	Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje	175
10.2.	Određivanje faznog sastava očvrsljih pasta	178
10.2.1.	Mineraloški sastav – XRD analiza	178
10.2.2.	Strukturne promene – FTIR spektroskopija	178
VII	ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA	179
1.	I faza istraživanja	181
1.1.	Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera i pasta spravljenih sa 0%, 10%, 15% i 20% NZ kao SCM – I faza	181
1.1.1.	Čvrstoća pri pritisku maltera NZa i NZb	181
1.1.2.	Kapilarno upijanje vode maltera NZa i NZb	183
1.1.3.	Mineraloški sastav pasta P-NZa određen metodom rendgenske difrakcije (XRD)	184
1.1.4.	Strukturne promene pasta P-NZa određene metodom infracrvene spektriskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR)	187
1.2.	Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera i pasta spravljenih sa 0%, 10%, 15% i 20% FA kao SCM – I faza	191
1.2.1.	Čvrstoća pri pritisku maltera FAa i FAb	191
1.2.2.	Kapilarno upijanje vode maltera FAa i FAb	194
1.2.3.	Mineraloški sastav pasta P-FAa određen metodom rendgenske difrakcije (XRD)	195
1.2.4.	Strukturne promene pasta P-FAa određene metodom infracrvene spektriskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR)	198
1.3.	Komparativna analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera i pasta spravljenih sa NZ i sa FA kao SCM – I faza	203
1.3.1.	Čvrstoća pri pritisku– Komparativna analiza (I faza istraživanja)	203

1.3.2.	Kapilarno upijanje vode – Komparativna analiza (I faza istraživanja)	204
1.3.3.	Mineraloški sastav pasta određen metodom rendgenske-difrakcije (XRD) – Komparativna analiza	210
1.3.4.	Strukturne promene pasta određene metodom infracrvene spektriskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR) – Komparativna analiza	211
1.4.	Zaključci I faze istraživanja	213
2.	II faza istraživanja	219
2.1.	Analiza rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku cementnih maltera kod kojih je 20% PC supstituisano sa mešavinom NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil – II faza	219
2.2.	Komparativna analiza rezultata čvrstoće pri pritisku maltera iz II faze ispitivanja i odgovarajućih maltera iz I faze ispitivanja	221
2.3.	Analiza rezultata ispitivanja kapilarnog upijanja vode cementnih maltera kod kojih je 20% PC supstituisano sa mešavinom NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil – II faza	222
2.4.	Komparativna analiza rezultata kapilarnog upijanja vode maltera iz II faze ispitivanja i odgovarajućih maltera iz I faze ispitivanja	224
2.5.	Analiza rezultata izluživanja elemenata u tragovima iz cementnih maltera kod kojih je 20% PC supstituisano sa mešavinom NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil	227
2.6.	Zaključci II faze istraživanja	233
3.	III faza istraživanja	236
3.1.	Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera spravljenih sa 0%, 10% i 20% NZ kao SCM – III faza	236
3.1.1.	Skupljanje usled sušenja	236
3.1.2.	Otpornost na prodor hlorida	238
3.1.3.	Otpornost na dejstvo sulfata	239
3.1.4.	Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda	240
3.1.5.	Ograničeno skupljanje maltera	241
3.1.6.	Toplotna kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje	242
3.2.	Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera spravljenih sa 0%, 10% i 20% FA kao SCM – III faza	244
3.2.1.	Skupljanje usled sušenja	244
3.2.2.	Otpornost na prodor hlorida	246
3.2.3.	Otpornost na dejstvo sulfata	247
3.2.4.	Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda	247
3.2.5.	Ograničeno skupljanje maltera	248
3.2.6.	Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje	249
3.3.	Komparativna analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera spravljenih sa NZ i sa FA kao SCM po svojstvima – III faza	250
3.3.1.	Skupljanje usled sušenja	250
3.3.2.	Otpornost na prodor hlorida	253
3.3.3.	Otpornost na dejstvo sulfata	254
3.3.4.	Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda	256
3.3.5.	Ograničeno skupljanje maltera	257
3.3.6.	Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje	258

4. Zaključci III faze istraživanja	263
VIII ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA	267
1. Indeks svojstava	269
2. Zaljučna razmatranja	276
3. Naučni doprinos	289
4. Pravci daljih istraživanja	290
IX LITERATURA	291
X PRILOZI	305

LISTA SLIKA:

Slika II-1. Prvi akvadukt na teritoriji Los Anđelesa

Slika II-2. Klinoptilolit

Slika II-3. Filipsit

Slika II-4. Hojlandit

Slika II-5. Model strukture zeolita (klinoptilolita)

Slika II-6. Kop „Opčište“ na Fruškoj gori, površinski kop zeolitskog tufa koji sadrži klinoptilolit

Slika II-7. Nalazište Igroš kod Brusa, rudno polje „Igroš-Vidojevići“, površinski kop zeolitskog tufa koji sadrži klinoptilolit

Slika II-8. Ležišta i pojave zeolita u Srbiji

Slika II-9. Izgled loptastih čestica elektrofilterskog pepela (sfera)

Slika II-10. Izgled elektrofilterskog pepela u obliku plerosfere (sfere u sferi)

Slika II-11. Čestica elektrofilterskog pepela uglastog oblika

Slika II-12. *Brana Hungry Horse, SAD*

Slika II-13. Satelitski prikaz pepelišta: a) TENT A, b) TENT B [Google Earth]

Slika III-1. Prikaz različitih mogućnosti interakcije štetnih supstanci sa cementom

Slika III-2. Struktura etringita gde "C" označava strukturu kolone, a "S" strukturu kanala gde su smešteni sulfatni oksianjonski tetraedri

Slika III-3. Struktura etringita: a) Projekcija ilustruje centralnu kolonu koja se sastoji od CaO_8 i AlO_6 poliedara; b) Projekcija koja predstavlja preko vodonika povezanu mrežu između Al-Ca kolona i sulfatnih tetraedara smeštenih u međuprostoru. Ca dodekaedar je obeležen svetlo plavom bojom, Al oktaedar plavom, sulfatni tetraedar žutom, kiseonikov atom crvenom i vodonikov atom tamno crvenom bojom.

Slika III-4. Simplifikovana struktura C-S-H gela

Slika III-5. Kristalna struktura 1,4 nm tobermorita: a) „Dreierkette“ struktura (primer je uokviren zelenom bojom) sastoji se od para tetraedara i jednog veznog (bridging) tetraedra (primer je uokviren žutom bojom); b) Projekcija duž ravni koja je normalna na silikatni lanac i koja pokazuje način povezivanja silikatnih lanaca, deljenja kiseonikovih atoma u paru i veznom tetraedru sa Ca-O slojem. Ca jon u oktaedru je označen svetlo plavom bojom, Si u tetraedru sa tamno plavom bojom, atom kiseonika crvenom, molekuli vode crnom, a hidroksilni joni narandžastom bojom .

Slika III-6. Kristalna struktura jenita: a) „Dreierkette“ struktura (primer je uokviren zelenom bojom) sastoji od para tetraedara i jednog veznog tetraedra (primer je uokviren žutom bojom); b) Prijekcija na ravan normalnu na silikatni lanac. Oktaedarski sloj formira talasastu strukturu u kojoj su smešteni silikatni tetraedri.

Samo polovina kiseonikovih atoma je povezana sa silikatnim lancem dok ostatak formira hidroksilne grupe. Ca jon u oktaedarsko sloju je označen svetlo plavom bojom, Si u tetraedru sa tamno plavom bojom, atom kiseonika crvenom, molekuli vode crnom, a hidroksilni joni narandžastom bojom .

Slika III-7. Simplifikovana struktura C-A-S-H gela

Slika III-8. Trend rastvorljivosti odabranih elemenata u zavisnosti od pH vrednosti

Slika IV-1. Oštećenja koja zahtevaju: a) Nekonstrukcijsku sanaciju, b) Konstrukcijsku sanaciju

Slika IV-2. Lepljene pečata: a) Shema, b) Primer iz prakse

Slika IV-3. Ograničeno skupljanje usled sušenja reparaturnog materijala a) Pojava napona zatezanja po kontaknoj površini između reparaturnog materijala i betonske podloge, b) Pojava prslina u reparaturnom malteru usled ograničenog skupljanja

Slika IV-4. Mehanizmi oštećenja koji mogu da se jave u saniranom sistemu (uzorku)

Slika IV-5. Ispitivanje skupljanja usled sušenja reparaturnog maltera: a) Oprema, b) Ispitivanje uzorka

Slika IV-6. Ispitivanje sekantnog modula maltera

Slika IV-7. Metode za grubo uklanjanje oštećenja: a) Udarna metoda – primena pneumatskog čekića, b) Voda pod pritiskom

Slika IV-8. Metode za finu pripremu površine betona za sanaciju: a) Brušenje, b) Peskarenje

Slika IV-9. Metode nanošenja reparaturnog materijala: a) Ručno nanošenje maltera mistrijom, b) Prskanje betonom i c) Ulivanje betona

Slika V-1. Čvrstoće pri pritisku uzoraka cementno- klinoptilolitnih betona

Slika V-2. Promene deformacija skupljanja usled sušenja maltera u toku vremena

Slika V-3. Brzo određivanje otpornosti uzoraka cementno - klinoptilolitnih betona na prodor hlorida

Slika V-4. Ekspanzija uzoraka maltera izloženih dejstvu 1 M Na₂SO₄ rastvora

Slika V-5. Metode ispitivanja izluživanja: a) Tank leaching test, i b) Shaken extraction test

Slika V-6. Sanirani uzorak: a) Shema, b) Betonska „podloga“ u čiju je sredinu ugrađen reparaturni malter do određene visine

Slika V-7. Sanirani uzorci: levo – prizme dimenzija 40 mm×40 mm×160 mm, desno - prizme dimenzija 40 mm×40 mm×140 mm

Slika V-8. Betonske podloge: a) Pre nanosenja reparaturniog materijala, b) Sanirane betonske podloge – sanirani uzorak

Slika V-9. Ispitivanje uticaja ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja na sanirani uzorak: a) Metodom udaranja čekićem, b) Modifikovanom metodom povlačenja lanca i c) Metodom rezonantne frekvencije

Slika V-10. Spravljanje kompozitnog uzorka: a) Postavljanje malterske podloge u kalup, b) Ugradnja reparaturnog maltera

Slika V-11. Nega saniranih uzoraka u vrućim klimatskim uslovima

Slika V-12. Uzorci betonske podloge

Slika V-13. Ispitivanje saniranog uzorka na koso smicanje

Slika V-14. Vrste ispitivanja čvrstoće prijanjanja (adhezije) reparaturnog materijala za podlogu: a) Pull-off metoda, b) Metoda cepanjem, c) Metoda direktnog smicanja duž dve površine, d) Metoda kosog smicanja

Slika V-15. Saniran uzorak: a) Shema, b) Stvaran uzorak

Slika V-16. Sheme ispitivanja saniranih uzoraka: a) Čvrstoća na zatezanje savijanjem, b) Čvrstoća na koso smicanje, i c) Čvrstoća na savijanje sanirane grede u četiri tačke

Slika V-17. Shematski prikaz makroćelijskog korozionog testa

Slika V-18. Situ metoda „*Friction-Transfer*“: a) Pričvršćivanje metalnog elementa za površinu uzorka;, b) Ispitivanje smičuće čvrstoće prijanjanja

Slika V-19. Metoda namernog prskanja vodom: a) Prskanje je u toku, b) Završetak prskanja

Slika V-20. Različiti tipovi loma (kada je betonskapodloga tretirana vodom pod pritiskom): a) Podloga spravljena od betona sa max zrnem agregata od 16 mm, b) Podloga spravljena od betona sa max zrnem drobljenog krečnjaka od 20 mm

Slika V-21. Proces formiranja saniranog uzorka: a) Ošalovani stub sa postavljenom armaturom, b) „Oštećen“ stub koji treba da se sanira, c) Kvašenje dela stuba koji će se sanirati u slučaju kada se direktno nanose reparaturni malteri, d) Nanošenje vezivnog sredstva, e) Nanošenje reparaturnog maltera u dva sloja i f) Zaglađivanje površine saniranog dela stuba

Slika V-22. Postavljanje opreme za merenje relativnog pomeranja na sanirani stub: a) Sanirana strana stuba, b) Naspramna strana stuba

Slika VI-1. Rendgenski difraktogram uzorka PC (A – alit, B – belit, Ce – celit, Fe – ferit, g - gips)

Slika VI-2. FTIR spektar PC

Slika VI-3. Prirodni zeolit – klinoptilolit

Slika VI-4. Elektrofilterski pepeo

Slika VI-5. Rendgenski difraktogram uzorka zeolitnog tufa (NZ) iz ležišta „Igroš-Vidojevići“ (Clp – klinoptilolit, L – liskuni, F – feldspat)

Slika VI-6. FTIR spektar NZ

Slika VI-7. Rendgenski difraktogram uzorka FA sa pepelišta termoelektrane „Nikola Tesla B“ u Obrenovcu (Q – kvarc, M – mulit, F – feldspat, Mh – melilit, Mg – magnetit, Mn – magnetit, An - ankerit)

Slika VI-8. FTIR spektar FA

Slika VI-9. Kalcijum-karbonat

Slika VI-10. CEN standardni pesak

Slika VI-11. Izrada betonskih podloga i kocki: a) Beton ugrađen u kapule, b) Podloge nakon vađenja iz kalupa

Slika VI-12. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku kocki od referentnog betona starosti 28 dana: a) Merenje mase kocke b) Uzorak nakon ispitivanja

Slika VI-13. Ispitivanje čvrstoće na zatezanje neposredno pre nanošenja reparaturnog maltera na betonsku podlogu

Slika VI-14. Primer spravljanja malterskih prizmi: a) Komponentni materijali, b) Dodavanje veziva u tečnu fazu, i c) Miksiranje

Slika VI-15. Primer ugrađivanja maltera u kalup 40×40×160 mm: a) Ugrađivanje na vibro-stolu i b) Ugrađeni malteri

Slika VI-16. Uzorci maltera naneti na betonske podloge za potrebe ispitivanja termičke kompatibilnosti: a) etaloni b) test-uzorci

Slika VI-17. Primeri ugrađenih pasta u kalupe dimenzija 10×10×60 mm

Slika VI-18. Izabrani uzorci maltera: a) Epruveta 40×40×160 mm, b) Epruveta 25×25×285 mm, c) Disk Ø 100 mm, h=25 mm i d) Cilindar Ø 100 mm, h=50 mm

Slika VI-19. Primeri ugrađenih pasta u kalupe dimenzija 10×10×60 mm

Slika VI-20. Mašina za finu pripremu uzoraka brušenjem

Slika VI-21. Priprema površine maltera (sanirani uzorci) za lepljenje pečata: a) Tretiranje test-površine žičanom četkom, i b) Označavanje položaja za lepljenje pečata

Slika VI-22. Dvokomponentni lepak za lepljenje pečata

Slika VI-23. Priprema maltera za ispitivanje izluživanja elemenata u tragovima: a) Usitnjen i prosejan malter, i b) Tri spakovana uzorka materijala koji se šalju na ispitivanje

Slika VI-24. Usitnjavanje pasta u avanu

Slika VI-25. Zaustavljanje procesa hidratacije primenom izopropanola

Slika VI-26. Vakumiranje adekvatno pripremljenih uzoraka pasta

Slika VI-27. Određivanje čvrstoće pri pritisku maltera

Slika VI-28. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode

Slika VI-29. Ispitivanje skupljanja maltera usled sušenja: a) Etalon, b) Uzorak koji sadrži NZ, i c) Uzorak koji sadrži FA

Slika VI-30. Nega uzoraka maltera u toku ispitivanja skupljanja usled sušenja u klimakomori: a) Unutrašnjost komore sa uzorcima, i b) Kontrolna tabla

Slika VI-31. Spravljanje: a) Anolitnog rastvora (0,3 N NaOH) b) Katolitnog rastvora (10% (w) NaCl)

Slika VI-32. Shema izlaganje uzorka dejstvu hlorida

Slika VI-33. Izlaganje malterskih epruveta dejstvu sulfatnog rastvora: a) Spravljanje sulfatnog rastvora b) Uzorci u sulfatnom rastvoru

Slika VI-34. Merenje promene dužine malterskih epruveta usled dejstva sulfatnog rastvora

Slika VI-35. Ciklusi: a) zamrzavanja sa „potapanjem“ izložene površine zasićenom rastvoru soli za odmrzavanje; b) i odmrzavanja

Slika VII-36. I faza – Čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-37. I faza – Relativna čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-38. I faza – Kinetika kapilarnog upijanja vode maltera iz I faze ispitivanja: a) Malteri sa NZ starosti 28 dana, $w/cm=0,5$ b) Malteri sa NZ starosti 28 dana, $w/cm=0,4$ c) Malteri sa NZ starosti 90 dana, $w/cm=0,5$ d) Malteri sa NZ starosti 90 dana, $w/cm=0,4$

Slika VII-39. XRD podaci referentne paste i pasta koje sadrže NZ kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana (P - portlandit, Et - etringit, C-S-H - kalcijum-siliko-hidrat, C-A-S-H - kalcijum-aluminijum-siliko-hidrat, Clp - klinoptilolit, Q - kvarc, C - kalcit, B - belit, V - vaterit, Mc - kalcijum monokarbonat, Hc - kalcijum hemikarbonat)

Slika VII-40. FTIR spektri referentne paste i pasta koje sadrže NZ kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana

Slika VII-41. I faza – Čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-42. I faza – Relativna čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-43. I faza – Kinetika kapilarnog upijanja vode maltera iz I faze ispitivanja: a) Malteri sa FA starosti 28 dana, $w/cm=0,5$ b) Malteri sa FA starosti 28 dana, $w/cm=0,4$ c) Malteri sa FA starosti 90 dana, $w/cm=0,5$ d) Malteri sa FA starosti 90 dana, $w/cm=0,4$

Slika VII-44. XRD podaci referentne paste i pasta koje sadrže FA kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana (P - portlandit, Et - etringit, C-S-H - kalcijum-siliko-hidrat, C-A-S-H - kalcijum-aluminijum-siliko-hidrat, M - mulit iz FA, Q - kvarc, C - kalcit, B - belit, V - vaterit, Mc - kalcijum monokarbonat, Hc - kalcijum hemikarbonat)

Slika VII-45. FTIR spektri referentne paste i pasta koje sadrže FA kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana

Slika VII-46. I faza – Čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-47. I faza – Relativna čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-48. I faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 24h za svaku vrstu maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Slika VII-49. I faza – Relativno kapilarno upijanje vode maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$ b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

Slika VII-50. I faza – Koeficijenti kapilarnog upijanja vode maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$ b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

Slika VII-51. I faza – Srednja visina dizanja kapilarno upijene vode po omotaču uzoraka maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Slika VII-52. II faza – Čvrstoće pri pritisku referentnog maltera PCa i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a

Slika VII-53. II faza – Relativna čvrstoća pri pritisku referentnog maltera PCa i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a

Slika VII-54. Čvrstoća pri pritisku referentnog maltera PCa, referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a, i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a

Slika VII-55. Relativna čvrstoća pri pritisku referentnog maltera PCa, referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a, i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a

Slika VII-56. II faza – Kinetika kapilarnog upijanja vode referentnog maltera PCa i maltera iz II faze ispitivanja: a) Starosti 28 dana b) Starosti 90 dana

Slika VII-57. Kinetika kapilarnog upijanja vode maltera iz II faze ispitivanja, referentnog maltera PCa i odgovarajućih maltera iz I faze ispitivanja: a) Starosti 28 dana b) Starosti 90 dana

Slika VII-58. Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 24h za svaku vrstu maltera iz II faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Slika VII-59. Relativno kapilarno upijanje vode maltera iz II faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Slika VII-60. Srednja visina dizanja kapilarno upijene vode po omotaču uzoraka maltera iz II faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Slika VII-61. III faza – Skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-62. III faza – Relativno skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-63. III faza – Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida i vodovezivnog faktora u slučaju maltera koji sadrže NZ kao SCM (Otpornost na prodor hlorida: 1- smanjena, 2- umerena, 3- povišena, 4- veoma visoka)

Slika VII-64. III faza – Promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-65. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera koji sadrže NZ kao SCM

Slika VII-66. III faza – Ograničeno skupljanje – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera koji sadrže NZ kao SCM

Slika VII-67. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M) koji sadrže NZ kao SCM i njihovih etalona (ME)

Slika VII-68. III faza – Skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-69. III faza – Relativno skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-70. III faza – Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida i vodovezivnog faktora u slučaju maltera koji sadrže FA kao SCM (Otpornost na prodor hlorida: 1- smanjena, 2- umerena, 3- povišena, 4- veoma visoka, 5- izuzetno visoka)

Slika VII-71. III faza – Promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-72. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera koji sadrže FA kao SCM

Slika VII-73. III faza – Ograničeno skupljanje – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera koji sadrže FA kao SCM

Slika VII-74. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M) koji sadrže FA kao SCM i njihovih etalona (ME)

Slika VII-75. III faza – Skupljanje usled sušenja maltera iz III faze ispitivanja, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-76. III faza – Relativno skupljanje usled sušenja maltera iz III faze ispitivanja, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-77. III faza – Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida i vodovezivnog faktora u slučaju maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa:

a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$; (Otpornost na prodor hlorida: 1- smanjena, 2- umerena, 3- povišena, 4- veoma visoka, 5- izuzetno visoka)

Slika VII-78. III faza – Promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Slika VII-79. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja

Slika VII-80. III faza – Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$; b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

Slika VII-81. III faza – Ograničeno skupljanje – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja

Slika VII-82. III faza – Ograničeno skupljanje – Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$; b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

Slika VII-83. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M) i etalona (ME) spravljenih od maltera iz III faze ispitivanja

Slika VII-84. III faza – Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M)

Slika VIII-1. Dijagram indeksa svojstava reparaturnih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5

Slika VIII-2. Dijagram indeksa svojstava reparaturnih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4

Slika VIII-3. Dijagram indeksa svojstava reparaturnih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 i 0,4

LISTA TABELA:

Tabela II-1. Osnovni parametri ležišta zeolita u Srbiji

Tabela II-2. Hemijski sastav uzoraka zeolitskih tufova iz Srbije

Tabela II-3. Sadržaj izmenjivih katjona u zeolitskim tufovima iz Srbije

Tabela II-4. Standardni hemijski sastav elektrofilterskog pepela koji nastaje sagorevanjem različitih tipova uglja

Tabela II-5. Uslovi kvaliteta za primenu FA kao dodatka cementu u skladu sa standardom EN 197-1

Tabela II-6. Uslovi kvaliteta silikatnog FA sa aspekta hemijskih svojstava u skladu sa standardom EN 450-1

Tabela II-7. Uslovi kvaliteta silikatnog FA sa aspekta fizičkih svojstava u skladu sa standardom EN 450-1

Tabela II-8. Klasifikacija FA sa aspekta hemijskog sastava u skladu sa standardom ASTM C 618

Tabela II-9. Klasifikacija FA sa aspekta fizičkih svojstava u skladu sa standardom ASTM C 618

Tabela II-10. Klasifikacija FA sa aspekta opcionih fizičkih svojstava u skladu sa standardom ASTM C 618

Tabela II-11. Hemijski sastav uzorka elektrofilterskog pepela iz termoelektrana sa teritorije Srbije

Tabela II-12. Sadržaj amorfne i kristalnih faza u elektrofilterskim pepelima iz termoelektrana sa teritorije Srbije

Tabela III-1. Procene ekološkog značaja elemenata u tragovima u uglju

Tabela III-2. Moguće supstitucije u etringitu

Tabela III-3. Elementi i joni koji mogu da se vežu za strukturu C-S-H gela

Tabela IV-1. Tehnički zahtevi za reparaturne materijale

Tabela IV-2. Principi i metode koji se odnose na sanaciju oštećenja betona

Tabela IV-3. Principi i metode koji se odnose na oštećenja izazvanih korozijom armature

Tabela IV-4. Zahtevana svojstva konstrukcijskih i nekonstrukcijskih reparaturnih materijala za sve i određene namene

Tabela IV-5. Identifikacioni zahtevi prema

Tabela IV-6. Zahtevi za konstrukcijske i nekonstrukcijske reparaturne proizvode/maltere sa aspekta svojstava

Tabela V-1. Relevantni radovi i osnovni podaci i smernice u vezi sa primenjenim materijalima i urađenim ispitivanjima od strane citiranih autora

Tabela V-2. Čvrstoće pri pritisku i procentualno učešće vode kod cementno-zeolitnih pasta kao i kod cementnih pasta koje sadrže mešavinu NZ+FA

Tabela V-3. Čvrstoće pri pritisku maltera koji su spravljani sa Portland-kompozitnim cementima koji sadrže različite količine i kombinacije NZ, FA i GBFS

Tabela V-4. Test za brzo određivanje prodora hlorida u uzorake cementno - klinoptilolitnih betona

Tabela V-5. Test za brzo određivanje prodora hlorida u uzorake cementno - klinoptilolitnih betona

Tabela V-6. Relevantni radovi i osnovni podaci u vezi sa primenjenim reparaturnim cementnim i SCM materijalima i urađenim ispitivanjima od strane citiranih autora

Tabela V-7. Karakteristike komercijalnih reparaturnih maltera klase R3 i R4 pri starosti od 28 dana

Tabela V-8. Karakteristike komercijalnog vezivnog sredstva pri starosti od 28 dana

Tabela VI-1. Pregled odabranih malterskih mešavina

Tabela VI-2. Pregled odabranih mešavina pasta

Tabela VI-3. Specifikacija uzoraka za malterske mešavine

Tabela VI-4. Specifikacija uzoraka za mešavine pasta

Tabela VI-5. Hemijski sastav PC dobijen primenom XRF analize

Tabela VI-6. Hemijski sastav NZ dobijen primenom XRF analize

Tabela VI-7. Hemijski sastav FA dobijen primenom XRF analize

Tabela VI-8. Osnovni podaci o primenjenom superplastifikatoru

Tabela VI-9. Sastav malterskih mešavina korišćenih u okviru I faze i III faze ispitivanja

Tabela VI-10. Sastav malterskih mešavina korišćenih u okviru II faze ispitivanja

Tabela VI-11. Sastav pasta korišćenih u okviru I faze ispitivanja

Tabela VI-12. Osnovni podaci o primenjenim režimima nege uzoraka

Tabela VI-13. Klasifikacije betona/maltera u odnosu na otpornost na prodor hlorida

Tabela VI-14. Srednje vrednosti i najveće dozvoljene pojedinačne vrednosti koeficijenta migracije u zavisnost od klase izloženosti

Tabela VI-15. Klase izloženosti maltera izloženih dejstvu sulfata

Tabela VI-16. Direktiva – granične vrednosti

Tabela VI-17. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljanih sa NZ kao SCM, $w/cm=0,5$

Tabela VI-18. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljenih sa NZ kao SCM, w/cm=0,4

Tabela VI-19. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljenih sa FA kao SCM, w/cm=0,5

Tabela VI-20. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljenih sa FA kao SCM, w/cm=0,4

Tabela VI-21. II faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljenih sa NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil kao SCM, w/cm=0,5

Tabela VI-22. I faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (*I*) maltera starih 28 dana

Tabela VI-23. I faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (*I*) maltera starih 90 dana

Tabela VI-24. I faza - Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana

Tabela VI-25. I faza – Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 90 dana

Tabela VI-26. I faza – Srednje vrednosti visine dizanja vode po omotaču uzoraka maltera nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela VI-27. II faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (*I*) maltera starih 28 dana

Tabela VI-28. II faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (*I*) maltera starih 90 dana

Tabela VI-29. II faza - Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana

Tabela VI-30. II faza - Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 90 dana

Tabela VI-31. II faza – Srednje vrednosti visine dizanja vode po omotaču uzoraka maltera nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela VI-32. II faza – Koncentracija elemenata u tragovima u procednoj tečnosti - eluatu (L/S= 10 l/1 kg suve materije) za maltere NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, pri starosti od 28 dana

Tabela VI-33. II faza – Koncentracija elemenata u tragovima u procednoj tečnosti - eluatu (L/S= 10 l/1 kg suve materije) za maltere NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, pri starosti od 180 dana

Tabela VI-34. III faza – Srednje vrednosti skupljanja maltera usled sušenja

Tabela VI-35. III faza – Prosečna dubina prodora hlorida x_d (mm) i nestacionarni koeficijent migracije hlorida $D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m²/s) za maltere spravljene sa $w/cm=0,5$, kao i klase izloženosti hloridima

Tabela VI-36. III faza – Prosečna dubina prodora hlorida x_d (mm) i nestacionarni koeficijent migracije hlorida $D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m²/s) za maltere spravljene sa $w/cm=0,4$, kao i klase izloženosti hloridima

Tabela VI-37. III faza – Dostizanje čvrstoće pri pritisku maltera od 21 MPa kako bi otpočelo izlaganje epruveta sulfatnom rastvoru

Tabela VI-38. III faza – Srednje vrednosti ekspanzije maltera usled dejstva sulfata

Tabela VI-39. III faza – Stanje epruveta ($w/cm=0,5$) nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfata

Tabela VI-40. III faza – Stanje epruveta ($w/cm=0,4$) nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfata

Tabela VI-41. III faza – „Pull-off“ metoda – Srednja vrednost čvrstoće pri zatezanju maltera za dominantni lom

Tabela VI-42. III faza – Ograničeno skupljanje – Srednja vrednost čvrstoće pri zatezanju maltera za dominantni lom

Tabela VI-43. III faza – Etalonski uzorci – Srednja vrednost čvrstoće pri zatezanju maltera za dominantni lom

Tabela VI-44. III faza – Test - uzorci – Srednja vrednost čvrstoće pri zatezanju maltera za određen dominantni lom

Tabela VII-45. I faza – Pomeranje apsorpcione trake na 971 cm⁻¹ koja se dovodi u vezu sa C-S-H gelom u referentnoj i pastama sa NZ tokom vremena

Tabela VII-46. I faza – Pomeranje apsorpcione trake na 971 cm⁻¹ koja se dovodi u vezu sa C-S-H gelom u referentnoj i pastama sa FA tokom vremena

Tabela VII-47. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera NZ10a FA10a, NZFil20a i FAFil20a

Tabela VII-48. Klasifikacija maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a sa aspekta izluživanje teških metala pri starosti od 28 i 180 dana

Tabela VII-49. III faza – Izgled test-površine uzoraka spravljениh sa $w/cm=0,5$ pre i nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela VII-50. III faza – Izgled test-površine uzoraka spravljениh sa $w/cm=0,4$ pre i nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela VIII-1. Pojedinačne vrednosti i sume indeksa svojstava za reparaturne maltere spravljene sa vodovezivnim faktorom od 0,5

Tabela VIII-2. Pojedinačne vrednosti i sume indeksa svojstava za reparaturne maltere spravljene sa vodovezivnim faktorom od 0,4

Tabela VIII-3. Pojedinačne vrednosti i sume indeksa svojstva za reparaturne maltere spravljene sa vodovezivnim faktorom od 0,5 i 0,4

Tabela VIII-4. Ispunjenost kriterijuma za reparaturne maltere

Tabela P1-1. Fizička svojstva PC

Tabela P1-2. Mehanička svojstva PC

Tabela P3-1. Klasa pucolanske aktivnosti NZ i FA

Tabela P4-1. Indeksi aktivnosti NZ i FA pri starosti od 28 dana

Tabela P4-2. Indeksi aktivnosti NZ i FA pri starosti od 90 dana

Tabela P5-1. Čvrstoća pri pritisku referentnog betona (kocke ivice 150 mm)

Tabela P5-2. Rezultati merenja čvrstoće na zatezanje betonske podloge „pull-off“ metodom

Tabela P6-1. Zapreminska masa očvrsljih, vodom zasićenih maltera, $w/cm=0,5$

Tabela P6-2. Zapreminska masa očvrsljih, vodom zasićenih maltera, $w/cm=0,4$

Tabela P6-3. Zapreminska masa očvrsljih, vodom zasićenih maltera koji sadrže NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil kao SCM, $w/cm=0,5$

Tabela P7-1. Čvrstoća pri pritisku maltera Pca

Tabela P7-2. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ10a

Tabela P7-3. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ15a

Tabela P7-4. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ20a

Tabela P7-5. Čvrstoća pri pritisku maltera FA10a

Tabela P7-6. Čvrstoća pri pritisku maltera FA15a

Tabela P7-7. Čvrstoća pri pritisku maltera FA20a

Tabela P7-8. Čvrstoća pri pritisku maltera PCb

Tabela P7-9. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ10b

Tabela P7-10. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ15b

Tabela P7-11. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ20b

Tabela P7-12. Čvrstoća pri pritisku maltera FA10b

Tabela P7-13. Čvrstoća pri pritisku maltera FA15b

Tabela P7-14. Čvrstoća pri pritisku maltera FA20b

Tabela P7-15. Čvrstoća pri pritisku maltera NZFA20a

Tabela P7-16. Čvrstoća pri pritisku maltera NZFil20a

Tabela P7-17. Čvrstoća pri pritisku maltera FAFil20a

Tabela P8-1. Dimenzije uzoraka PCa, NZ10a, NZ15a, NZ20a, FA10a, FA15a i FA20a starih 28 dana za određivanje kapilarnog upijanja vode i njihova kontaktna površina

Tabela P8-2. Dimenzije uzoraka PCb, NZ10b, NZ15b, NZ20b, FA10b, FA15b i FA20b starih 28 dana za određivanje kapilarnog upijanja vode i njihova kontaktna površina

Tabela P8-3. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka PCa, NZ10a, NZ15a, NZ20a, FA10a, FA15a i FA20a starih 28 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela P8-4. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCa starog 28 dana

Tabela P8-5. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10a, NZ15a i NZ20a starih 28 dana

Tabela P8-6. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10a, FA15a i FA20a starih 28 dana

Tabela P8-7. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka PCb, NZ10b, NZ15b, NZ20b, FA10b, FA15b i FA20b starih 28 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela P8-8. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCb starog 28 dana

Tabela P8-9. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10b, NZ15b i NZ20b starih 28 dana

Tabela P8-10. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10b, FA15b i FA20b starih 28 dana

Tabela P8-11. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka PCa, NZ10a, NZ15a, NZ20a, FA10a, FA15a i FA20a starih 90 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela P8-12. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCa starog 90 dana

Tabela P8-13. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10a, NZ15a i NZ20a starih 90 dana

Tabela P8-14. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10a, FA15a i FA20a starih 90 dana

Tabela P8-15. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka PCb, NZ10b, NZ15b, NZ20b, FA10b, FA15b i FA20b starih 90 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela P8-16. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCb starog 90 dana

Tabela P8-17. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10b, NZ15b i NZ20b starih 90 dana

Tabela P8-18. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10b, FA15b i FA20b starih 90 dana

Tabela P8-19. Dimenzije uzoraka NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a za određivanje kapilarnog upijanja vode i njihova kontaktna površina

Tabela P8-20. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 28 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela P8-21. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 28 dana

Tabela P8-22. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 90 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Tabela P8-23. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 90 dana

Tabela P9-1. Rezultati ispitivanja izluživanja elemenata u tragovima iz maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a pri starosti od 28 i 180 dana kao i kriterijumi za ocenu opasnosti po životnu sredinu

Tabela P9-2. Rezultati ispitivanja prisustva mikroelemenata i elemenata u tragovima u PC, NZ, FA i CaCO_3

Tabela P10-1. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera Pca

Tabela P10-2. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ10a

Tabela P10-3. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ20a

Tabela P10-4. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA10a

Tabela P10-5. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA20a

Tabela P10-6. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera PCb

Tabela P10-7. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ10b

Tabela P10-8. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ20b

Tabela P10-9. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA10b

Tabela P10-10. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA20b

Tabela P11-1. Pojedinačne vrednosti prečnika i visine uzorka, prosečna vrednost visine uzoraka po mešavini maltera (L), temperatura anolitnog rastvora na početku (T_1) i po isteku 24h od početka eksperimenta (T_2) za svaki ispitani uzorak, kao i srednja vrednost temperature anolitnog rastvora (T) po malterskoj mešavini

Tabela P11-2. Dubina prodora hlorida, pojedinačne vrednosti (x_{d1-7}) i srednja vrednost po uzorku ($x_{d,sr}$)

Tabela P12-1. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera PCa, NZ10a i NZ20a usled dejstva sulfata

Tabela P12-2. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera FA10a i FA20a usled dejstva sulfata

Tabela P12-3. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera PCb, NZ10b i NZ20b usled dejstva sulfata

Tabela P12-4. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera FA10b i FA20b usled dejstva sulfata

Tabela P13-1. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCaPO i PCbPO „pull-off“ metodom

Tabela P13-2. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10aPO i NZ10bPO „pull-off“ metodom

Tabela P13-3. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20aPO i NZ20bPO „pull-off“ metodom

Tabela P13-4. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10aPO i FA10bPO „pull-off“ metodom

Tabela P13-5. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20aPO i FA20bPO „pull-off“ metodom

Tabela P14-1. Izgled test-površine uzoraka spravljenih sa $w/cm=0,5$, nakon nege u vodi iz vodovoda i nakon dodatnih 56 dana skladištenja

Tabela P14-2. Izgled test-površine uzoraka spravljenih sa $w/cm=0,4$, nakon nege u vodi iz vodovoda i nakon dodatnih 56 dana skladištenja

Tabela P14-3. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCa „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-4. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCb „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-5. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-6. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-7. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-8. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-9. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-10. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-11. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P14-12. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Tabela P15-1. Izgled površine uzoraka pre početka ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela P15-2. Izgled površine uzoraka nakon 10 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela P15-3. Izgled površine uzoraka nakon 20 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela P15-4. Izgled površine uzoraka nakon 30 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela P15-5. Izgled površine uzoraka nakon 40 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela P15-6. Izgled površine uzoraka nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Tabela P15-7. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka PCaME i PCbME

Tabela P15-8. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka NZ10aME i NZ10bME

Tabela P15-9. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka NZ20aME i NZ20bME

Tabela P15-10. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka FA10aME i FA10bME

Tabela P15-11. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka FA20aME i FA20bME

Tabela P15-12. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCaM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-13. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCbM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-14. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-15. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-16. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-17. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-18. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-19. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-20. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Tabela P15-21. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

SKRAĆENICE:

A – kohezivni lom u referentnoj betonskoj podlozi ($\geq 70\%$)

a – vodovezivni faktor od 0,5

A/B – athezivni lom po kontaktu betonske podloge i maltera ($\geq 70\%$)

Am - amfibol

An – analcim (kod prirodnog zeolita)

An – ankerit (kod elektrofilterskog pepela)

B – belit

B – kohezivni lom u malteru ($\geq 60\%$)

b – vodovezivni faktor od 0,4

B* – kohezivni lom u malteru, ali prvenstveno u njegovom površinskom sloju odnosno skrami ($\geq 60\%$), spada u lom tipa B

B/Y – athezivni lom po kontaktu maltera i lepka ($\geq 70\%$)

B/Y* – athezivni lom po kontaktu maltera i lepka $\geq 5\%$ i $< 70\%$, stim da je lom po malteru+skrami $< 70\%$, spada u lom tipa B/Y

B/Y*(B) – athezivni lom po kontaktu maltera i lepka $\geq 5\%$, stim da je lom po malteru+skrami $\geq 70\%$, spada u lom tipa B/Y

C - kalcit

C – karbonatni elektrofilterski pepeo (ASTM C 618)

C-A-S-H – kalcijum-aluminijum-siliko-hidrat

CEC - jonoizmenjivački kapacitet (*cation exchange capacity*)

CH –kalcijum hidroksid

Clp – klinoptilolit

C-S-H – kalcijum-siliko-hidrat

Et – etringit

F – feldspat

F – silikatni elektrofilterski pepeo (ASTM C 618)

FA – elektrofilterski pepeo

Fe - ferit

Fil – filer

FTIR - Infracrvena spektroskopija s Furierovom transformacijom

GBFS, GGBS – mlevena granulirana zgura iz visoke peći

H – voda

Hc – kalcijum hemikarbonat

HEU – hojlanditski tip

HPC – beton visokih performansi (*high performance concrete*)

HRWRA+SRA – *High-Range Water-Reducing Admixture + Set-Retarding Agent* –
Hemijski dodatak visokog stepena redukcije vode + usporivač vezivanja (retarder)

L.O.I. – gubitak žarenjem (*loss on ignition*)

M – mulit

M – test-uzorci (EN 13687-1)

Mc – kalcijum monokarbonat

ME – etaloni (EN 13687-1)

Mg – magnefit

Mh – melilit

MicE – mikroelementi

Mn – magnetit

NZ – prirodni zeolit

OPC – Portland cement (*Ordinary Portland cement*)

P – portlandit

PC – Portland cement

Q – kvarc

R4 – klasa 4 reparaturnog konstrukcijskog maltera (EN 1504-3)

RC – armirani beton (*reinforced concrete*)

SCM – zamenski cementni materijali

Sm – smektit

T – Si ili Al

TCLP – vrsta metode za ispitivanje izluživanja toksičnih elemenata (*Toxicity characteristic leaching procedure*)

TE – elementi u tragovima (*trace elements*)

TENT – Termoelektrana „Nikola Tesla“

TQ – *Turbo Quant* metoda

V – silikatni elektrofilterski pepeo (EN 197-1)

V – vaterit

W – karbonatni elektrofilterski pepeo (EN 197-1)

w/cm – vodovezivni faktor

XRD – Rendgenska difrakciona analiza

XRF – Rendgenska fluorescentna analiza

Y – kohezivni lom u lepku ($\geq 70\%$)

Y/Z – athezivni lom po kontaktu lepka i pečata ($\geq 70\%$)

Y/Z* – athezivni lom po kontaktu lepka i pečata $\geq 5\%$ i $< 70\%$, spada u lom tipa Y/Z

SIMBOLI:

\varnothing – prečnik uzorka (mm)

Å – angstrom (10^{-10} m)

A – površina ploča ili pomoćnih ploča (mm^2) (EN 12190)

A_c – površina poprečnog preseka uzorka na koju deluje sila pritiska (mm^2) (EN 12390-3)

d_k – dubina karbonatizacije (mm)

D_{nssm} – nestacionarni koeficijent migracije hlorida ($\times 10^{-12}$ m^2/s) (NT BUILD 492)

F – sila pri lomu (N) (EN 12390-3)

f_c – čvrstoća pri pritisku (MPa) (EN 12390-3)

F_c – sila loma (N)

f_h – čvrstoća prijanjanja pri zatezanju -*Pull-off* metoda (*tensile bond strength*) (EN 1542) (MPa)

f_m – čvrstoća pri pritisku (MPa) (ASTM C 109/C 109M)

f_p – čvrstoća pri pritisku (MPa)

f_{zs} – čvrstoća na zatezanje pri savijanju (MPa)

h – visina dizanja vode po omotaču uzorka (mm) (EN 13057)

h – vreme proteklo od početka kapilarnog upijanja vode do trenutka merenja mase uzorka (EN 13057)

I – masa kapilarno upijene vode u datom vremenskom trenutku po jedinici površine baze uzorka (kg/m^2) (EN 13057)

k – koeficijent korekcije

L – visina uzorka (mm); (NT BUILD 492)

L_g – dužina prizme (epruvete) umanjenja za dužinu repera unutar nje (mm)

m – broj molekula vode u kristalografskoj jediničnoj ćelije zeolita

m – masa (kg) ili (g)

M – valenca katjona

$m_{0/4}$ – količina frakcije 0/4 (kg)

$m_{4/8}$ – količina frakcije 4/8 (kg)

m_a – masa agregata (kg)

m_c – masa cementa (kg)
 $m_{m,ws}$ – masa vodom zasićenog očvrsllog maltera (kg)
 m_{spk} – masa superplastifikatora (kg)
 m_v – masa vode (kg)
 $m_{v,stv}$ – stvarna masa vode (kg)
 P_p – sila pri lomu (kN)
 P_s – masa pri lomu (kg)
 R^2 – faktor korelacije (EN 13057)
 R_c – čvrstoća pri pritisku (MPa) (EN 12190)
 $R_{c,i}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od i dana (28, 60, 90 ili 180 dana) (EN 12190)
 S – koeficijent kapilarnog upijanja (sorpcije) vode, $kg/(m^2h^{0.5})$ (EN 13057)
 sr – srednja vrednost (*mean*)
 T – srednja vrednost početne i krajnje temperature anolitnog rastvora ($^{\circ}C$) (NT BUILD 492)
 t – vreme trajanja testa (h). (NT BUILD 492)
 T_1 – početna temperatura anolitnog rastvora ($^{\circ}C$) (NT BUILD 492)
 T_2 – krajnja temperatura anolitnog rastvora ($^{\circ}C$) (NT BUILD 492)
 U – apsolutna vrednost napona (V) (NT BUILD 492)
 V_m – zapremina uzorka (m^3)
 X – visina uzorka (mm) (EN 13057)
 $X_{0/4}$ – učešće frakcije 0/4 (%)
 $X_{4/8}$ – učešće frakcije 4/8 (%)
 x_d – prosečna vrednost dubine prodora hlorida (mm) (NT BUILD 492)
 x_{di} – vrednost dubine prodora hlorida na i (od 1-7) mernom mestu (mm)
 $\gamma_{b,sv}$ – zapreminska masa svežeg betona (kg/m^3)
 $\gamma_{m,ws}$ – zapreminska masa vodom zasićenog maltera (kg/m^3)
 γ_{sp} – specifična masa superplastifikatora (kg/m^3)
 $\Delta m_{v,spk}$ – masa vode u superplastifikatoru (kg)
 Δp – količina upućenog vazduha (%)

I UVODNA RAZMATRANJA

1. UVOD

Beton je najviše korišćen građevinski materijal današnjice zbog svoje niske cene, odgovarajućih mehaničkih karakteristika, kao i lakoće sa kojom se od njega formiraju elementi različitih oblika i veličina. Upravo su navedene prednosti razlog zbog kojeg je dolazilo do zanemarenja enormnog indirektnog uticaja betona na životnu sredinu. Osim na čvrstoće, akcenat se sve intenzivnije stavlja i na trajnost kako betonskih tako i ostalih vrsta konstrukcija [127],[40]. Samo u toku 2006.-te godine na teritoriji SAD-a potrošeno je između 18-21 milijarde dolara na njihovu sanaciju, rehabilitaciju i zaštitu [40]. U navedene svrhe se koriste reparaturni malteri koji predstavljaju kompozitne materijale sa različitim vezivima, hemijskim i mineralnim dodacima kao i filerima [138].

Cement predstavlja jednu od glavnih komponenti betona i maltera, a ujedno je i građevinski materijal koji se najviše proizvodi i koristi u svetu, u količini od 4,18 milijardi tona godišnje [76].

Tokom poslednje dve decenije u svetu su se intenzivirala istraživanja primene kako novih materijala tako i otpadnih, i nus-proizvoda raznih industrija, kao delimične zamene cementa u malterima i betonima ili kao zamena dela cementnog klinkera pri proizvodnji cementa. Sa aspekta održivosti, od izuzetnog značaja je primena dopunskih cementnih materijala - *SCM (supplementary cementitious material)*, koji su prilagođeni lokalno raspoloživi materijalima, zarad smanjenja udela cementa i emisije CO₂, kao i poboljšanja trajnosti dobijenih kompozitnih materijala. Objavljen je izvestan broj istraživanja koja se bave primenom prirodnog zeolita (NZ) u prethodno navedene svrhe kao i veliki broj istraživanja koja se bave primenom letećeg pepela (u daljem tekstu elektrofilterski pepeo – FA) u iste svrhe. U pogledu sanacija postojećih armiranobetonskih konstrukcija, objavljen je veliki broj istraživanja koja se bave svojstvima različitih vrsta reparaturnih maltera, među kojima je izvestan broj onih u kojima je korišćen elektrofilterski pepeo za spravljenja reparaturnih maltera na bazi cementa, dok autor nije pronašao radove u kojima su objavljeni rezultati ispitivanja reparaturnih cementnih maltera u kojima je deo Portland cementa supstituisan sa prirodnim zeolitom.

2. POTREBA ZA ISTRAŽIVANJEM

Imajući u vidu da je građevinska industrija odgovorna za 7% ukupne emisije CO₂ [14] kao i za najveću potrošnju prirodnih resursa, usled podizanja svesti o zaštiti životne sredine sve se intenzivnije traga za alternativnim izvorima komponentnih materijala. Sa druge strane, usled višedecenijskog neadekvatnog održavanja objekata sve je veći broj oštećenih i dotrajalih kako stambenih tako i industrijskih objekata i mostova

[138]. Korišćenjem prirodnih i/ili veštačkih pucolana poboljšavaju se fizičko-mehaničke karakteristike betona i maltera, ali im se ujedno produžava i trajnost. Kada je u pitanju sanacija postojećih oštećenih objekata, primenjuju se reparaturni malteri koji mogu da sadrže mineralne dodatke. Jedna od prednosti primene elektrofilterskog pepela kao veštačkog/otpadnog pucolanskog materijala, u prethodno navedene svrhe, je svakako održivi razvoj, laka dostupnost (200 miliona tona pepela je deponovano na pepelištima u Republici Srbiji [41]), postojanje harmonizovanih evropskih standarda za njegovu primenu (EN 450-1 [26], EN 450-2 [55], EN 451-1[56], EN 451-2 [27]), dok se prirodni zeolit, kao mikrokristalni prirodni pucolan, koristi zbog svojih posebnih svojstava (ima veliku unutrašnju i spoljašnju specifičnu površinu, jonoizmenjivački kapacitet, sposobnost adsorpcije itd.).

S obzirom na velike prirodne resurse zeolita kojima raspolaže Srbija i njihovu nedovoljnu istraženost kao SCM sa jedne strane i velike količine FA koji se svakodnevno odlaže na pepelišta u Srbiji, a koji se koristi kao zamena za cementni klinker ili kao mineralni dodatak u betonima, javlja se ne samo potreba za paralelnim ispitivanjem ova dva pucolanska materijala kao SCM, veći i za ispitivanjem njihove kombinacije, kao i njihovog uticaja na životnu sredinu preko izluživanja elemenata u tragovima - TE (*trace elements*). Ispitivanja se namenski rade na malterima i pastama ne samo da bi se izbegao uticaj krupnog agregata na trajnost i čvrstoće pri pritisku, već da bi se što preciznije odredio mehanizam pucolanske reakcije, njeni produkti kao i njihov doprinos mehaničkim svojstvima i trajnosti maltera, i da bi se dobio gotov proizvod, odnosno konstrukcijski ili nekonstrukcijski reparaturni malter.

3. PREDMET, CILJ I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Predmet ovog istraživanja su cementni malteri i cementne paste u kojima je deo cementa zamenjen prirodnim i/ili veštačkim pucolanima. Od prirodnih pucolana korišćen je prirodni zeolit sa nalazišta "Igroš-Vidojevići" (Srbija), a od veštačkih elektrofilterski pepeo sa pepelišta Termoelektrane "Nikola Tesla B" u Obrenovcu.

Sa aspekta mogućnosti primene cementnih maltera (koji sadrže NZ kao SCM i čiji rezultati se porede sa rezultatima dobijenim ispitivanjem referentnih cementnih maltera, kao i referentnih SCM maltera –maltera koji u istoj količini sadrže FA kao SCM) kao reparaturnog materijala, na očvrslim malterima su urađena sledeća ispitivanja:

- Ispitivanje osnovnih fizičkih (skupljanje usled sušenja, kapilarno upijanje vode) i mehaničkih svojstava (čvrstoća pri pritisku, prionljivosti maltera primenom „pull-off“ metode);

- Ispitivanje svojstava trajnosti (otpornosti na prodor hlorida, otpornost na dejstvo sulfata, ograničeno skupljanje i određivanje toplotne kompatibilnosti- ciklusi smrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje);
- Ekološkog uticaja preko ispitivanja izluživanja elemenata u tragovima iz maltera kod kojih je deo Portland cementa zamenjen mešavinom prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela, u odnosu na izluživanje kod maltera koji pri istom nivou supstitucije i u istom odnosu sadrže prirodni zeolit i filer, odnosno elektrofilterski pepeo i filer.

Pre ispitivanja svojstava očvrsllog maltera i očvrsljih pasta urađena je karakterizacija NZ, FA i PC (određivanje mineraloškog i hemijskog sastava, finoća mliva, specifična površina, specifična masa itd.).

Za izradu malterskih mešavina i pasta korišćeni su sledeći komponentni materijali:

- Portland cement CEM I 42.5 R ("Lafarge", Beočinska fabrika cementa);
- Prirodni zeolit sa nalazišta „Igroš – Vidojevići“ (opština Brus) sa veličinom čestica manjom od 125 μm ;
- Elektrofilterski pepeo sa pepelišta Termoelektrane "Nikola Tesla B" u Obrenovcu;
- CEN standardni pesak;
- Dejonizovana voda;
- Superplastifikator (SikaViscoCrete 3070).

Takođe su ispitana sledeća svojstva očvrsljih maltera:

- Čvrstoća pri pritisku;
- Kapilarno upijanje vode;
- Otpornost na sulfatnu koroziju;
- Otpornost na prodor hlorida;
- Skupljanje usled sušenja;
- Prionljivost maltera ("*pull-off*" metoda);
- Ograničeno skupljanje (*restrained shrinkage*);
- Toplotna kompatibilnost- ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje;
- Izluživanje elemenata u tragovima.

Na očvrslim pastama su ispitane:

- Promene faznog sastava (pomoću XRD analize);
- Promene funkcionalnih grupa (pomoću FTIR spektroskopije).

Ispitivanja su sprovedena na uzorcima maltera i pasta u kojima je variran:

- Udeo NZ kao SCM (10%, 15% i 20%);

- Udeo FA kao SCM (10%, 15% i 20%);
- Vodo-vezivni faktor:
 - 0,5 - za maltere i za paste;
 - 0,4 - samo za maltere.

Udeo mešavine NZ i FA (maseni odnos 1:1) kao SCM je određen na osnovu rezultata ispitivanja koja su urađena u okviru I faze istraživanja. U istom masenom odnosu i procentu zamene PC, napravljene su i ispitane i mešavine sa NZ i filerom, kao i sa FA i filerom.

Osnovni cilj istraživanja u okviru doktorske disertacije je određivanje uticaja parcijalne zamene Portland cementa prirodnim zeolitom na fizičko-mehanička svojstva cementnih maltera i trajnost cementnih maltera radi provere mogućnosti njihove primene kao nekonstrukcijskih i/ili konstrukcijskih reparaturnih maltera, kao i upoređenje dobijenih rezultata sa onima kod kojih je korišćen elektrofilterski pepeo.

Osim toga, cilj istraživanja je i (i) određivanje ekološkog uticaja sa aspekta izluživanja elemenata u tragovima iz maltera koji sadrže mešavinu prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela kao SCM, (ii) tumačenje promena u strukturi i mineraloškom sastavu pasta u funkciji vrste SCM u toku vremena koristeći XRD i FTIR metode, i (iii) uspostavljanje korelacije između strukture i mineraloškog sastava pasta sa izluživanjem elemenata u tragovima u cilju razumevanja složenog mehanizma imobilizacije teških metala.

Na osnovu rezultata istraživanja i izvedenih zaključaka definisane su preporuke za upotrebu prirodnog zeolita kao i mešavine prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela u reparaturnim cementnim malterima. Takođe, na osnovu dobijenih rezultata određeni su pravci daljih istraživanja.

Na osnovu postavljenog cilja istraživanja postavljene su i polazne hipoteze:

Hipoteza 1: Da se može odrediti optimalna količina prirodnog zeolita kojom može da se zameni deo Portland cementa, a da se, pri tom, ispune kriterijumi za fizička, mehanička svojstva i svojstva trajnosti reparaturnih maltera.

Hipoteza 2: Da se supstitucijom dela cementa prirodnim zeolitom, u reparaturnim malterima, mogu poboljšati neka svojstva trajnosti, kao što su otpornost na prodor hlorida i sulfatna korozija.

Hipoteza 3: Da se supstitucijom dela cementa mešavinom prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela u reparaturnim malterima može smanjiti ili održati na

niskom nivou izluživanje prvenstveno nekih katjona teških metala iz elektrofilterskog pepela.

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

- 1) Sistematizacija dostupnih podataka o osnovnim fizičko-mehaničkim svojstvima kao i otpornosti na dejstvo mraza, sulfatnu koroziju i prodor hlorida kod maltera i betona kod kojih je deo Portland cementa zamjenjem prirodnim zeolitom odnosno elektrofilterskim pepelom. Urađena je i sistematizacija podataka o izluživanju odabranih elemenata u tragovima iz cementnih kompozita. Takođe je urađena sistematizacija dostupnih podataka o ispitanim svojstvima i raspoloživim standardnim i internim metodama ispitivanja reparaturnih maltera na bazi mineralnih veziva.
- 2) Eksperimentalno ispitivanje odabranih fizičko-mehaničkih svojstava maltera, otpornosti na dejstvo sulfata, otpornosti na, prodor hlorida, izluživanja elemenata u tragovima, kao i prionljivosti maltera, ograničenog skupljanja i toplotne kompatibilnosti usled ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje, ali i praćenje promene faznog sastava i funkcionalnih grupa kod pasta u toku vremena.
- 3) Donošenje opštih zaključaka o međusobnoj zavisnosti funkcionalnih grupa kod pasta koje sadrže prirodni zeolit ili elektrofilterski pepeo kao SCM u toku vremena, odabranih fizičko-mehaničkih svojstava, otpornosti na dejstvo sulfata, prodor hlorida i izluživanju elemenata u tragovima kod maltera koji sadrže prirodni zeolit ili elektrofilterski pepeo kao SCM, kao i mogućnosti njihove primene u svojstvu reparaturnih cementnih maltera.

U skladu sa predmetom i ciljem istraživanja, kao i sa postavljenim hipotezama, odabrane su metode naučno-istraživačkog rada. Sintezom i kritičkom analizom dostupnih rezultata istraživanja drugih autora vezanih za primenu prirodnog zeolita kao i elektrofilterskog pepela kao parcijalne zamene Portland cementa u betonima, malterima i pastama, kao i za ispitivanje reparaturnih maltera u skladu sa standardom EN 1504-3 [23], formirana je baza podataka kao osnova za sopstveno eksperimentalno istraživanje. U analizi rezultata korišćene su statistička metoda i metoda korelacija, dok je izvođenje zaključaka sopstvenog istraživanja bazirano na primeni različitih komparativnih metoda.

II
SVOJSTVA PRIRODNOG ZEOLITA
I ELEKTROFILTERSKOG PEPELA
KAO PUCOLANSKIH MATERIJALA

1. DOPUNSKI CEMENTNI MATERIJALI - SCM

Grupu dopunskih cementnih materijala (SCM) čine materijali koji imaju bilo hidrauličko svojstvo i/ili pucolansku reaktivnost [151]. SCM su rastvorljivi silikatni, alumosilikatni ili kalcijum alumosilikatni praškasti materijali koji se koriste kao delimična zamena klinkera u cementima ili kao delimična zamena Portland cementa u betonskim i malterskim mešavinama [93]. Pucolani su praktično inertni materijali, ali kada su fino usitnjeni u prisustvu vlage hemijski reaguju sa kalcijum-hidroksidom (kreč) na uobičajenoj temperaturi i formiraju jedinjenja nalik onima koja nastaju pri hidrataciji cementa [117]. Sa druge strane, hidraulična veziva predstavljaju materijale koji pomešani sa vodom mogu da vezuju i očvrstu, i pod vodom, formirajući produkte hidratacije [151].

U okviru standarda EN 206 [162] definisan je termin mineralnog dodatka pod kojim se podrazumeva fino usitnjen neorganiski sastojak koji se dodaje betonu radi poboljšanja određenih svojstava ili dobijanja specijalnih svojstava.

Mineralni dodaci, uključujući mineralne praškaste pucolane i pigmente, se prema navedenom standardu [162] dele na:

- Mineralne dodatke tipa I (*type I addition*) – skoro inertni mineralni dodaci;
- Mineralne dodatke tipa II (*type II addition*) – pucolanski ili latentno hidraulični mineralni dodaci.

Opšta pogodnost mineralnih dodataka tipa I je ustanovljena za:

- Praškaste agregate u skladu sa standardom EN 12620 [133] ili sa EN 13055 [44];
- Pigmente u skladu sa standardom EN 12878 [156] (za armirani beton samo pigmenti B kategorije)

Opšta pogodnost mineralnih dodataka tipa II je ustanovljena za:

- Elektrofilterski pepeo u skladu sa standardom EN 450-1 [26];
- Silikatnu prašinu u skladu sa standardom EN 13263-1 [46];
- Mlevenu granulisanu zguru iz visokih peći u skladu sa standardom EN 15167-1 [53].

S obzirom da u grupu SCM spada veliki broj materijala koji se međusobno razlikuju po poreklu, hemijskom i mineraloškom sastavu, kao i po tipičnim karakteristikama čestica, njihova klasifikacija može da se uradi po više osnova. Opšteprihvaćena je klasifikacija zasnovana na poreklu SCM [116].

Osnovna podela SCM sa aspekta porekla je na prirodne i veštačke.

Prirodni SCM mogu biti [151]:

- Vulkanskog porekla: nepromenjeni piroklastični materijal (staklasti plovuće i pepeli) i izmenjeni piroklastični materijal (zeolitizovani tufovi);
- Sedimentnog porekla: (bio)hemijski sedimenti (diatomska zemlja u koju spadaju hidrotermalni silicijski sinteri), materijali mešovitog porekla i detritalni sedimenti (prirodno spaljene gline).

U veštačke SCM spadaju [151]: granulirana zguza iz visokih peći (može da ima i hidraulično svojstvo), elektrofilterski pepeo (može da ima i hidraulično svojstvo), silikatna prašina, sagoreli ostaci organske materije, spaljene gline/škriljci (koji mogu da spadaju i u prirodne SCM sedimentnog porekla, odnosno u detritalne sedimente), zguza iz procesa proizvodnje čelika i obojenih metala, šljaka (*bottom ash*), pepeo od komunalnog čvrstog otpada, otpadno staklo i ostaci katalitičkog krekovanja fluida.

2. PRIRODNI ZEOLITI

Prirodni zeoliti predstavljaju mikroporozne, kristalne, hidratizane aluminosilikatne minerale "sačaste" strukture [145]. Mikrokristalni prirodni zeoliti spadaju u grupu prirodnih pucolana zbog svoje velike unutrašnje i spoljašnje specifične površine koja predstavlja osnovu njihove velike reaktivnosti.

Upotreba prirodnog zeolita, kao pucolanskog materijala, datira još iz antičkog grčkog i rimskog perioda [88]. Od davnina se koristi za spravljanje betona i maltera, a početkom 20-og veka počinje da se upotrebljava i prilikom proizvodnje cementa. Prirodni zeolit je korišćen npr. za izgradnju prvog akvadukta, dugog 240 milja, na teritoriji Los Anđelesa 1912. godine (slika II-1). 25% cementa je bilo zamenjeno sa zeolitskim tufom, što je dovelo do ekonomske uštede [113].



Slika II-1. Prvi akvadukt na teritoriji Los Anđelesa [67]

Poslednjih godina učestala je upotreba prirodnih pucolana u mnogim zemljama, kao što su Kina, Bugarska, Kuba, Nemačka, Grčka, Italija, Jordan, Rusija, Turska, SAD i Srbija [31]. U toku poslednje tri decenije, najveća upotreba zeolita u cementnoj

industriji i industriji betona zabeležena je u Kini, gde je samo u toku 2005. godine potrošeno oko 30 miliona tona u te svrhe [113].

Naziv „zeolit“ potiče od grčkih reči ζειν λιθος odnosno „zein“ i „lithos“ što znači „kamen koji ključa“ [88]. Poznato je preko 50 vrsta prirodnog zeolita, kao što su npr. analcim, šabazit, klinoptilolit (Slika II-2), modernit, filipsit (Slika II-3) i hojlandit (Slika II-4) dok je preko 150 vrsta, do sada, sintetizovano u laboratorijama [3].



Slika II-2. Klinoptilolit [65]

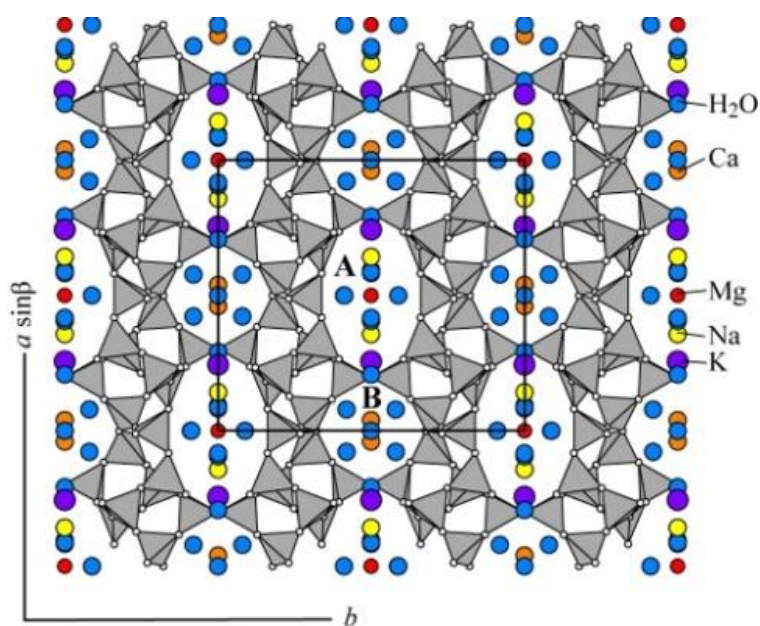


Slika II-3. Filipsit [68]



Slika II-4. Hojlandit [66]

Strukturu zeolita čine tri glavne komponente: aluminosilikatna rešetka koja je ujedno i najstabilnija komponenta i koja određuje vrstu zeolita, izmenjivi katjoni koji se nalaze u kanalima, i zeolitna voda [88], [125]. Kristalna rešetka zeolita se sastoji od otvorene, trodimenzionalne mreže tetraedara silicijum-oksida $[\text{SiO}_4]^{4-}$ i aluminijum-oksida $[\text{AlO}_4]^{5-}$ koji su međusobno povezani preko zajedničkih atoma kiseonika, a njeno negativno naelektrisanje teže da uravnoteže izmenjivi katjoni, koji su smešteni zajedno sa zeolitnom vodom unutar kanala (slika II-5) [125], [69]. Aluminosilikatna rešetka, u slučaju zeolita iz grupe hojlandita kojoj pripada i klinoptilolit, sadrži tri tipa kanala. Dva kanala su međusobno paralelna: A kanali su formirani od snažno kompresovanih desetočanih prstenova (dimenzije otvora $3,0 \times 7,6 \text{ \AA}$), a B kanali su zatvoreni osmočlanim prstenovima (dimenzije otvora $3,3 \times 4,6 \text{ \AA}$). A i B kanali su međusobno povezani C kanalima koji su formirani od osmočanih prstenova (dimenzije otvora $2,6 \times 4,7 \text{ \AA}$) [70].



Slika II-5. Model strukture zeolita (klinoptilolita) [70]

Formula kristalografske jedinične ćelije zeolita je sledeća:



gde je M monovalentni ili divalentni katjon (npr. Na^+ , K^+ ili Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , respektivno) dok je sa m označen broj molekula vode po jediničnoj ćeliji, sa n je označena valenca katjona M koji uravnotežuje negativno naelektrisanje aluminosilikatne rešetke. Odnos x/y ukazuje na odnos Si/Al i njihova vrednost se uobičajeno kreće od 1 do 5 (klinoptilolit, hojlandit, modernit), ili 10-100 u slučaju zeolita sa visokim sadržajem SiO_2 [125][69][126].

Mnogi parametri utiču na trajnost i razvoj čvrstoća maltera i betona u kojima je NZ korišćen kao dopunski cementni materijal (SCM), kao što su vodo-vezivni faktor, procentualni udeo NZ, mineraloški i hemijski sastav NZ, njegov nivo čistoće, finoća mliva, pucolanska reaktivnost, itd. [3][120][136][169]. Generalno, pucolani ne doprinose prirastu ranih čvrstoća. U kojoj meri će doći do prirasta kasnijih čvrstoća maltera i betona koji sadrže NZ kao SCM zavisi od prethodno navedenih faktora i potrebno je uraditi dodatna ispitivanja s obzirom na kontradiktornost publikovanih rezultata različitih autora [120]. Prednost primene NZ je svakako poboljšanje trajnosti betona i maltera, odnosno dolazi do povećanja otpornosti na prodor hlorida [127][145][88][3][179], dejstvo sulfata [127][88][149][89], dejstvo mraza [14], smanjuje se skupljanje usled sušenja [127][149], smanjenjuje se ili potpuno eliminiše ekspanzija uzrokovana alkalno-silikatnom reakcijom [88][149], itd.

Zeolitski tufovi predstavljaju mineralna ležišta prirodnih zeolita, a od najvećeg ekonomskog interesa su tufovi HEU – tipa (mineral hojlandit sa atomskim odnosom $Si/Al < 4$ i klinoptilolit sa atomskim odnosom $Si/Al > 4$) [97].

Ekspolatacija zeolitskih tufova je najveća u Kini (60% svetske proizvodnje), a potom slede Severna Koreja, Japan, Jordan, Turska i SAD [97]. Sva ležišta prirodnog zeolita u Srbiji, koja su interesantna sa ekonomske tačke gledišta, su visokog kvaliteta, piroklastičnog porekla (zeoliti su rasprostranjeni u miocenskim sedimentima) i sadrže preko 70% zeolita (Beočin (slika II-6), Igroš (slika II-7), Jablanica 1, Toponica i Zlatokop) [150].

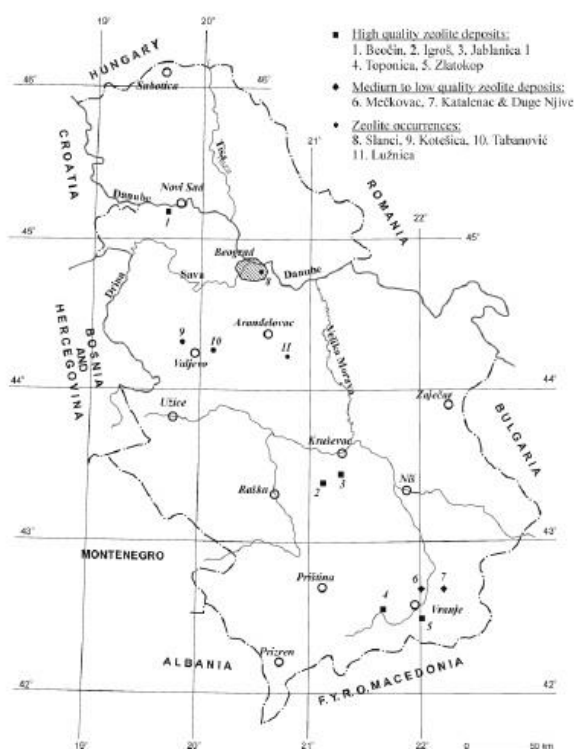


Slika II-6. Kop „Opčište“ na Fruškoj gori, površinski kop zeolitskog tufa koji sadrži klinoptilolit [73]



Slika II-7. Nalazište Igroš kod Brusa, rudno polje „Igroš-Vidojevići“, površinski kop zeolitskog tufa koji sadrži klinoptilolit [84]

Pored ležišta zeolita visokoh kvaliteta, u Srbiji postoje i ležišta zeolita srednjeg do niskog kvaliteta (Mečkovac, Katalenac i Duge Njive), kao i pojave zeolita (Slanci, Kotešica, Tabanović i Lužnica) [150]. Na slici II-8 prikazane su lokacije navedenih ležišta i pojava zeolita.



Slika II-8. Ležišta i pojave zeolita u Srbiji [150]

Od zeolitskih minerala, u Srbiji je najzastupljeniji klinoptilolit, dok se modernit javlja u nekoliko ležišta [150]. U tabeli II-1 su prikazani osnovni parametri ležišta zeolita u Srbiji.

Tabela II – 1. Osnovni parametri ležišta zeolita u Srbiji [150]

Ležište	Period	Dubina (m)	Debljina (m)	Resursi (Mt)	Rezerve (Mt)	Metoda eksploatacije
Beočin	miocen	2-28	14,2	2	0,26 0,15	površinska
Igroš	miocen	5-20	1,5	0,1	0,05	površinska
Jablanica 1	miocen	0-15	18,5	2,2	0,20	površinska
Toponica	miocen	2-25	2,4	0,5	0,50	podzemna
Zlatokop	miocen	20-30	2	1,3	0,67	podzemna
Katalenac	eocen	na površini	110	3,4		površinska
Duge Njive	eocen	na površini	> 50	1,1		površinska
Mečkovac	miocen	na površini	38	1,0		površinska

Hemijski sastav zeolitskih tufova prikazan je u tabeli II-2, dok je sadržaj izmenjivih katjona u zeolitskom tufovima prikazan u tabeli II-3.

Tabela II – 2. Hemijski sastav uzoraka zeolitskih tufova iz Srbije

Ležište/pojava	Hemijski sastav uzoraka zeolitskih tufova (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Beočin [97]	63,705	17,075	1,66	5,225	2,43	1,02	2,905
Igroš [97]	78,37	14,46	0,37	5,17	1,39	0,42	0,60
Jablanica 1 [182]							
Beli zeolitski tuf	61,34	12,27	3,55	3,32	2,18	1,08	2,13
Sivi zeolitski tuf	61,05	11,92	2,65	2,90	2,50	0,05	0,96
Toponica [97]	75,89	14,13	0,60	11,12	1,38	0,62	2,73
Zlatokop [97]	64,60	12,40	1,84	4,02	0,80	0,91	0,82
Slanci [97]	78,15	13,93	-	6,55	0,71	0,90	3,94

Na osnovu hemijskog sastava jasno se može uočiti da je ukupan sadržaj relevantnih oksida (SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃) navedenih uzoraka zeolitskih tufova veći od 70%, čime ispunjavaju „prvi uslov“ za primenu kao SCM u cementnim kompozitima.

Tabela II – 3. Sadržaj izmenjivih katjona u zeolitskim tufovima iz Srbije

Ležište/pojava	Izmenjivi katjoni (mmol/100g)				CEC (meq/100g)
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
Beočin [97]	11,4	7,0	9,6	35,4	166
Igroš [97]	90,0	4,0	15,6	13,0	122,6
Jablanica 1 [182]					
Beli zeolitski tuf	121	20,4	4,5	45,1	191
Sivi zeolitski tuf	86	16,1	4,0	40,0	146
Toponica [97]	95,0	11,2	18,2	15,7	140,1
Zlatokop [97]	94,0	10,7	20,9	16,4	142
Slanci [97]	103,0	7,0	3,0	16,0	129,0

Takođe je ustanovljeno da zeolitski tufovi, koji sadrže klinoptilolit kao glavni mineral, su reaktivniji ako imaju Na⁺ ili K⁺ kao izmenljive katjone u odnosu na one koji imaju Ca²⁺ [151].

3. ELEKTROFILTERSKI PEPEO

Elektrofilterski pepeo je pucolanski silikatni ili siliko-aluminatni materijal koji ima mala ili uopšte nema hidraulična svojstva, ali kada je fino samleven u prisustvu vode reaguje sa rastvorenim kalcijum-hidroksidom na uobičajenoj temperaturi stvarajući produkte nalik onima koji nastaju pri hidrataciji cementa [2]. Stoga, glavni sastojak

FA predstavlja SiO_2 , ali može da sadrži i značajnu količinu Al_2O_3 , dok je količina CaO ograničena u zavisnosti od porekla FA [112].

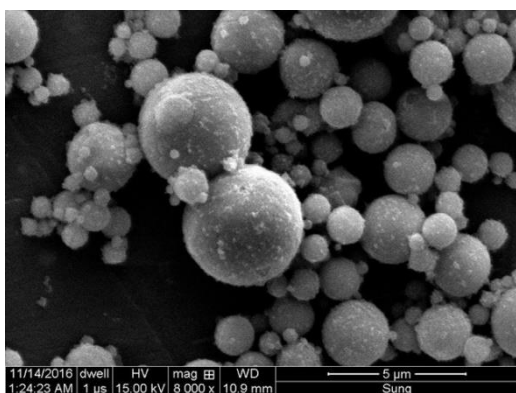
FA predstavlja nus-proizvod nastao u termoelektranama koje koriste ugalj samleven u prah kao energent. Prilikom sagorevanja samlevenog uglja, na temperaturi od 1250-1600 °C, nesagorivi neorganski minerali (kvarc, kalcit, gips, pirit, feldspati i minerali gline) se tope i međusobno spajaju u sitne kapljice, koje se iznose iz ložišta izduvnim ili dimnim gasovima. Po izlasku iz ložišta, kapljice se hlade i formiraju se loptaste staklaste čestice – elektrofilterski pepeo (*fly ash*) [115]. Pepeo se potom sakuplja pomoću elektrostatičkih taložnika, kontejnera za prikupljanje prašine ili uređaja za mehaničko prikupljanje (ciklona) [82]. Krupnije kaplice, zbog veće težine, padaju na dno ložišta i tu se hlade, pri čemu nastaje šljaka (*bottom ash*) čija zrna dostižu prečnik od 5 mm [115].

Za uklanjanje pepela iz kotlovskih postrojenja primenjuju se tri postupka [115], [82]:

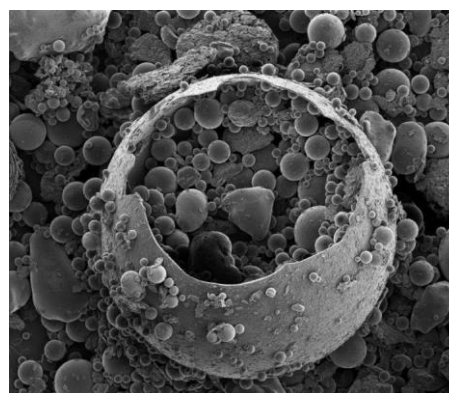
- suvi – najčešće se primenjuje u praksi, oko 80% ostatka sagorevanja napušta peć kao elektrofilterski pepeo sadržan u dimnom gasu;
- vlažni (ili u slučaju peći sa odvodom za šljaku) - oko 50% pepela se zadržava u pećima, a drugih 50% se izdvaja sa dimnim gasom;
- ciklonski - od 70% do 80% pepela se zadržava kao šljaka u kotlu i samo se 20% do 30% izdvaja iz peći kao suv pepeo u dimnom gasu).

Čestice elektrofilterskog pepela mogu da imaju oblik [115]:

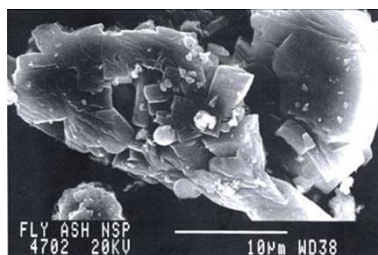
- punih ili šupljih loptica (sfera), slika II-9,
- plerosfera (sfera koje u sebi sadrži manje sfere), slika II-10;
- uglastih čestica, što je karakteristično za karbonatne elektrofilterske pepele, slika II-11.



Slika II-9. Izgled loptastih čestica elektrofilterskog pepela (sfera) [81]



Slika II-10. Izgled elektrofilterskog pepela u obliku plerosfere (sfere u sferi) [75]



Slika II-11. Čestica elektrofilterskog pepela uglastog oblika [115]

Veličina čestica elektrofilterskog pepela iznosi od 1-100 μm . Najčešće su prečnika cca 20 μm , dok između 10-30% čestica ima prečnik veći od 45 μm [115]. Čestice pepela veličine do 50 μm su uglavnom sfernog oblika, a krupnije su nepravilnog, uglastog oblika [115]. U pogledu hemijskog sastava elektrofilterskog pepela najviše su zastupljeni SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 i CaO . Sastav i karakteristike pepela zavise od više faktora, među kojima se posebno izdvajaju sastav uglja i model kotla za njegovo sagorevanje [82].

Ugalj se deli u četiri kategorije od kojih svaka varira u pogledu toplotne vrednosti, hemijskog sastava, sadržaja pepela i geološkog porekla. Tipovi uglja su sledeći [82]:

- lignit, odnosno smeđi ugalj – najniža klasa uglja;
- bitumenizirani ugalj – njegov pepeo ima promenljivo prisustvo ugljenika mereno gubitkom pri žarenju;
- delimično bitumenizirani ugalj - ima svojstva i lignita i bitumeniziranog uglja;
- antracit – najmanje se koristi.

U tabeli II-4 prikazan je standardni hemijski sastav elektrofilterskog pepela koji nastaje sagorevanjem različitih tipova uglja.

Tabela II – 4. Standardni hemijski sastav elektrofilterskog pepela koji nastaje sagorevanjem različitih tipova uglja [82]

Hemijski sastav	Bitumenizirani ugalj (%)	Delimično bitumenizirani ugalj (%)	Lignit (%)
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO_3	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

Zbog visokog sadržaja amorfnog (reaktivnog) SiO_2 elektrofilterski pepeli spadaju u pucolanske materijale. Pojedine vrste elektrofilterskog pepela, koje sadrže silikokarbonate ili karbonate, mogu pokazivati i izvesna hidraulična svojstva [115].

Prema standardu EN 197-1 [161], elektrofilterski pepeo, dobijen sagorevaljem uglja prethodno samlevenog u prah i sakupljen putem elektrostatičkog ili mehaničkog taloženja praškastih čestica iz dimnih gasova, može da bude:

- silikatni (V) – ima pucolanska svojstva. Sastoji se od reaktivnog SiO_2 i Al_2O_3 . Ostatak sadrži Fe_2O_3 i druga jedinjenja;
- karbonatni (W) – pored pucolanskih svojstava može da ima i hidraulična svojstva. Sastoji se od reaktivnog SiO_2 i Al_2O_3 . Ostatak sadrži Fe_2O_3 i druga jedinjenja.

U tabeli II-5 dati su uslovi kvaliteta za primenu navedenih FA kao dodatka cementu u skladu sa standardom EN 197-1 [161], kao i standardi u skladu sa kojim se ispituju.

Tabela II – 5. Uslovi kvaliteta za primenu FA kao dodatka cementu u skladu sa standardom EN 197-1 [31]

Zahtevi prema EN 197-1 [161]	Silikatni FA- V	Karbonatni FA - W	Standard
Reaktivni Cao	max 10%	min 10%	EN 196-2 [159]
	-	min 15%	
* Dodatno ispitivanje čvrstoće nakon 28 dana	-	min 10%	EN 196-1 [158]
Slobodni CaO	max 1,0%	-	EN 451-1 [56]
	max 2,5%	-	
** Stalnost zapremine	max 10 mm	-	EN 196-3 [54]
Reaktivni SiO_2	min 25%	-	EN 196-2 [159]
SO_3	kroz ispitivanje cementa		EN 196-2 [159]
LOI	max 5%	max 5%	EN 196-2 [159]
Stalnost zapremine	-	max 10 mm	EN 196-3 [54]

Standardom EN 450-1 [26] utvrđuju se zahtevi za hemijska i fizička svojstva, kao i postupci za kontrolu kvaliteta silikatnog FA koji se koristi u proizvodnji betona kao dodatak tipa II, posebno uključujući betone livene na licu mesta ili betone za montažne konstrukcije koji su usaglašeni sa EN 206-1 [162]. U skladu sa navedenim dokumentom, FA se takođe može koristiti u malterima i injekcionim smešama.

Kada se koristi FA koji je u skladu sa EN 450-1 [26], treba napomenuti da, osim što ima pucolanski efekt, FA može da utiče i na određena svojstva svežeg i očvrstlog

betona. Takvi efekti se moraju uzeti u obzir kod projektovanja betonske mešavine (propisano u EN 206-1[162]). Pre upotrebe, FA može biti podvrgnut i određenoj pripremi ili doradi kako bi se zadovoljile odredbe standarda EN 450-1 [26] (npr. prosejavanje, sušenje, mešanje, mlevenje, redukcija ugljenika, itd.). Ako FA ne ispunjava uslove kvaliteta iz navedenog dokumenta, njegova podobnost kao mineralnog dodatka tipa II može se utvrditi i na osnovu nacionalnih standarda ili evropskih tehničkih odobrenja, koja važe na mestu upotrebe betona [115].

U tabeli II-6 su navedeni uslovi kvaliteta silikatnog FA sa aspekta hemijskih svojstava, a u tabeli II-7 uslovi kvaliteta sa aspekta fizičkih svojstava, u skladu sa standardom EN 450-1 [26].

Tabela II – 6. Uslovi kvaliteta silikatnog FA sa aspekta hemijskih svojstava u skladu sa standardom EN 450-1 [26]

Zahtevi sa aspekta hemijskog sastava	Uslov	Standard
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	min 70%	
Slobodni CaO	max 1,5%	
Reaktivni CaO	max 10%	
Slobodni SiO_2	min 25%	EN 196-2 [159]
SO_3	max 3%	
Cl ⁻	max 0,10%	
MgO	max 4%	
Fosfati P_2O_5	max 5%	ISO 29581-2 [28]
Alkalije (ekvivalent Na_2O)	max 5%	
LOI		
Kategorija A	max 5%	EN 196-2 [159]
Kategorija B	max 7%	
Kategorija C	max 9%	

Prema standardu ASTM C 618 [9] razlikuju se dve klase elektrofilterskog pepela:

- klasa F - dobijaju se sagorevanjem bitumeniziranog uglja ili antracita. Suma oksida SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 mu je $\geq 70\%$, a sadržaj CaO uobičajeno manji od 10%. Ova klasa letećeg pepela ima pucolanska svojstva.
- klasa C - dobija se od delimično bitumeniziranog uglja ili lignita. Suma oksida SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 mu je $\geq 50\%$, ali je $\leq 70\%$. sadržaj CaO uobičajeno manji od 10%. Ova vrsta elektrofilterskog pepela ima visok sadržaj CaO, uglavnom $>10\%$ (uobičajena količina CaO je 15-30%). Takođe ima visok udeo čestica sitnijih od $10\mu\text{m}$ i sadržaj ugljenika $<2\%$ [115]. Pored pucolanskog svojstva, imaju i

izvesna hidraulična svojstva (zbog relativno visokog sadržaja CaO). Odlikuju se visokim ranim čvrstoćama. Mnogi pepeli klase C hidratiraju i vezuju u kontaktu sa vodom za manje od 45 minuta.

Tabela II – 7. Uslovi kvaliteta silikatnog FA sa aspekta fizičkih svojstava u skladu sa standardom EN 450-1 [26]

Zahtevi za fizička svojstva		Uslov	Standard
Ostatak na situ 45 µm	Kategorija N	max 40%	EN 933-10 [57]
	Kategorija S	max 12%	
Indeks aktivnosti nakon 28 dana		min 75%	EN196-1 [158]
Indeks aktivnosti nakon 90 dana		min 85%	EN196-1 [158]
Zahtev za vodom (samo za S pepele), veći u odnosu na PC		max 95%	EN196-3 [54]
Stalnost zapremine		max 10mm	EN196-3 [54]
Početak vezivanja, duži u odnosu na PC		max 2×duži	EN196-3 [54]
Zahtevi za ujednačenost (odstupanje pojedinih rezultata od prosečne vrednosti)			
Specifična masa		max 200 kg/m ³	

Klasifikacija elektrofilterskog pepela prema hemijskom sastavu prikazana je u tabeli II-8, prema fizičkim svojstvima u tabeli II-9, dok su dodatni zahtevi za klase dati u tabeli II-10, u skladu sa standardom ASTM C 618 [9].

Tabela II – 8. Klasifikacija FA sa aspekta hemijskog sastava u skladu sa standardom ASTM C 618 [9]

Zahtevi sa aspekta hemijskog sastava	Klasa F	Klasa C
min suma SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (%)	70	50
max sadržaj SO₃ (%)	5,0	5,0
max sadržaj vlage (%)	3,0	3,0
max sadržaj alkalija (%)	1,5	1,5
LOI (%)	6,0	6,0

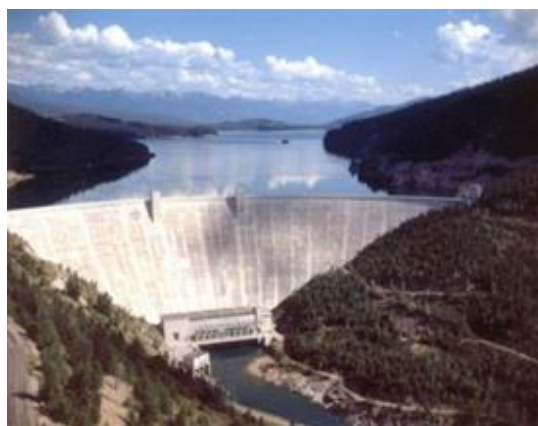
Tabela II – 9. Klasifikacija FA sa aspekta fizičkih svojstava u skladu sa standardom ASTM C 618 [9]

Zahtevi za fizička svojstva	Klasa F	Klasa C
max ostatak na situ 45 μm – mokro proejavanje (%)	34	34
min indeks aktivnosti nakon 7 dana (% u odnosu na referentni PC)	75	75
min indeks aktivnosti nakon 28 dana (% u odnosu na referentni PC)	75	75
max zahtev za vodom (% u odnosu na referentni PC)	105	105
Stalnost zapremine, max autoklavno skupljanje ili širenje (%)	0,8	0,8
Specifična masa, max odstupanje pojedinačnih rezultata od posečne vrednosti (%)	5	5
Ostatak na situ 45 μm (<i>fineness</i>), max odstupanje pojedinačnih rezultata od posečne vrednosti (%)	5	5

Tabela II – 10. Klasifikacija FA sa aspekta opcionih fizičkih svojstava u skladu sa standardom ASTM C 618 [9]

Opcioni zahtevi za fizička svojstva	Klasa F	Klasa C
max LOI \times <i>fineness</i> (%)	255	-
max skupljanje usled sušenja (%)	0,03	0,03
max širenje usled alkalno silikatne reakcije, nakon 14 dana (%)	100	100
max širenje usled dejstva sulfata (%), posle 6 meseci, umerena izloženost sulfatima	0,10	0,10
max širenje usled dejstva sulfata (%), posle 6 meseci, jaka izloženost sulfatima	0,05	0,05
max širenje usled dejstva sulfata (%), posle 6 meseci, u odnosu na kontrolni uzorak spravljen sa sulfatno otpornim cementom	100	100

Početak dvadesetog veka usled sve većeg broja izgrađenih termoelektrana na uglj javlja se značajna količina pepela kao otpadnog materijala. Upravo u tom periodu u SAD-u su otpočeta istraživanja upotrebe FA u Portland cementnim (PC) betonima. 1937. godine R.E. Davis je sa svojim saradnicima sa Univerziteta Kalifornija prvi objavio rezultate ispitivanja betona koji sadrži FA i time postavio temelje za specifikaciju, metode ispitivanja kao i upotrebu FA [2]. 1948. godine u SAD-u podignuta je brana Hungry Horse (Slika II-12) za čiju izgrađuju je prvi put upotrebljena značajnija količina FA (120000 tona) [167].



Slika II-12. Brana Hungry Horse, SAD [74]

Upotrebom FA kao SCM dolazi do povećanja kasnijih čvrstoća maltera i betona (u odnosu na čvrstoće kontrolnih uzoraka spravljenih sa čistim PC), povećava se otpornost na prodor hlorida [145], dejstvo sulfata [149], skupljanje usled sušenja [149][112][108], smanjuje se ekspanzija usled alkalno-silikatne reakcije [149][96], dok postoji rasipanje rezultata ispitivanja betona i maltera na dejstvo mraza kada se koristi FA kao SCM, ali u kombinaciji sa aerantima postižu se zadovoljavajući rezultati [178].

Godišnje se u termoelektranama u Srbiji sagori oko 40 miliona tona niskokaloričnog lignita (iz ugljnih basena Kolubare i Kostolca) pri čemu nastaje oko 6 miliona tona pepela i šljake koji se odlažu na deponije odnosno „pepelišta“ (Slika II-13) u neposrednoj blizini termoelektrana. Do sada je na deponijama, površine 1500 hektara, odloženo oko 200 miliona tona navedenog otpada [72][41]. U termoelektranama „Nikola Tesla“ A i B, „Kostolac“ B1 i B2 i u termoelektrani „Kolubara“ sagoreva se lignit, dok se u termoelektrani „Morava“ sagoreva otpadni ugalj iz okolnih rudnika (lignit, mrki i kameni ugalj) [115].



Slika II-13. Satelitski prikaz pepelišta: a) TENT A, b) TENT B [Google Earth]

U tabeli II-11 prikazan je hemijski sastav uzoraka elektrofilterskog pepela iz termoelektrana sa područja Srbije.

Tabela II – 11. Hemijski sastav uzorka elektrofilterskog pepela iz termoelektrana sa teritorije Srbije [10]

Hemijski sastav	Elektrofilterski pepeo iz navedenih termoelektrana					
	TENT A	TENT B	Kostolac B1	Kostolac B2	Kolubara	Morava
SiO ₂	48,71	54,26	46,85	45,56	62,13	55,23
Al ₂ O ₃	24,60	24,90	23,20	22,90	17,20	21,43
Fe ₂ O ₃	6,81	6,50	12,14	13,66	5,95	7,42
CaO	8,92	6,34	8,26	8,93	5,67	7,94
MgO	2,83	1,89	2,77	2,68	2,00	2,61
SO ₃	1,00	2,51	1,48	1,79	0,67	0,81
LOI na 1000°C	4,38	2,06	4,44	3,34	2,88	1,66

U tabeli II-12 je prikazan sadržaj amorfne i kristalnih faza u elektrofilterskim pepelima.

Tabela II – 12. Sadržaj amorfne i kristalnih faza u elektrofilterskim pepelima iz termoelektrana sa teritorije Srbije [10]

FA iz navedene termoelektrane	Sadržaj amorfne faze	Sadržaj kristalnih faza
TENT A	značajan	Kvarc, anhidrit, vrlo malo feldspata, mulit u tragovima
TENT B	značajan	Kvarc, feldspat, anhidrit i mulit u malim količinama
Kostolac B1	značajan	Male količine hematita, anhidrita, kvarca, feldspata i vrlo malo mulita
Kostolac B2	značajan	Male količine hematita, anhidrita, feldspata, kvarca i vrlo malo mulita
Kolubara	manja količina	Najzastupljeniji kvarc, male količine feldspata i anhidrita
Morava	značajan	Najzastupljeniji kvarc, male količine feldspata, anhidrita, hematita i mulita

4. PRODUKTI HIDRATACIJE PORTLAND CEMENTA ČIJI JE DEO SUPSTITUISAN SA SCM

Kada se koristi SCM dolazi do formiranja produkata nalik onima koji nastaju pri hidrataciji PC. Nastali produkti popunjavaju velike kapilarne pore i na taj način ih ili eliminišu (prekidaju) ili im smanjuju veličinu (prečnik). S obzirom da kapilarne pore sa prečnikom u opsegu od 10 nm do 50 nm (mezopore) utiču na skupljanje usled sušenja i tečenje, a da makropore sa prečnikom većim od 50 nm utiču na čvrstoću i propustljivost, novoformirana mikroporozna struktura povećava čvrstoće i unapređuje trajnost betona/maltera/pasta [137][118].

Pucolanska reakcija SCM predstavlja kompleksan proces koji se odvija u prisustvu kalcijum-hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ili Ca^{2+} jona i vode. Pod uticajem hidroksilnih jona (OH^-) dolazi do razlaganja SCM od površine njihovih zrna, a pokretačku snagu čini razlika u Gibbs-ovoj energiji između reaktanata i produkata hidratacije [137]. Kada pri otpuštanju ili razlaganju prvenstveno silikata iz SCM dođe do zasićenja pornog rastvora, započinje proces heterogene nukleacije koji je praćen rastom C-S-H produkata na površini zrna SCM. Upravo formiranje navedenog C-S-H sloja utiče na dalju brzinu reakcije, odnosno povećanje gustine i debljine sloja može da spreči difuziju hidroksilnih jona ka neizreagovanoj fazi i dovede do smanjenja brzine reakcije.

U slučaju parcijalne zamene cementa sa SCM dolazi do preklapanja procesa hidratacije PC i pucolanske reakcija SCM, i pritom postoji mogućnost međusobnog uticaja PC i SCM na reaktivnost. Produkte hidratacije čistog PC po pravilu čine C-S-H, Aft, AFm faze, kalcijum-hidroksid (CH) itd., dok je C-(A)-S-H gel karakterističan za mešavinu PC i SCM. U zavisnosti od vrste, sastava i reaktivnosti SCM zavisi količina formiranog etringita, kao i količina i vrsta AFm faze (monosulfatna, monokarbonatna ili stratlingitna) [112]. C-S-H faza nastala u pastama/malterima/betonima na bazi SCM i PC je značajno drugačija od one na bazi PC. Odnos Ca/Si je manji usled smanjenja količine CH, kao i zbog veće raspoloživosti Si jona, koji potiču iz rastvorenih SCM. C-S-H faza sa nižim odnosom Ca/Si obično ima strukturu nalik tobermoritovom gelu [112]. Sa smanjenjem odnosa Ca/Si povećava se prosečna dužina lanaca, odnosno dolazi do povećanja polimerizacije C-S-H strukture. Međutim, u slučaju SCM sa značajnijim sadržajem Al_2O_3 , kao i u sličaju prisustva Ca^{2+} jona u SCM (npr. kad se koriste prirodni zeoliti koji imaju Ca^{2+} kao izmenljivi katjon) usled povećanja odnosa Ca/Si i Al/Si dolazi do depolimerizacije C-S-H gela [38], i postoji mogućnost ulaska Al u strukturu C-S-H i formiranja C-A-S-H gela.

Usled negativnog naelektrisanja strukture, koje se javlja kao posledica supstitucije Si^{4+} sa Al^{3+} i formiranja C-A-S-H faze koja dovodi do povećanog vezivanja alkalija, dolazi do smanjenja pH vrednosti pornog rastvora. Ukoliko pH vrednosti pornog rastvora

padne ispod 10 može značajno da se smanji brzina pucolanske reakcije što dalje može da dovede do destabilizacije AFm i AFt produkata reakcije. Sa smanjenjem odnosa Ca/Si menja se morfologija C-S-H faze, od vlaknastih čestica do listaste forme [137][144].

4.1. Pucolanska reakcija prirodnog zeolita kao SCM

Pucolanska reakcija prirodnog zeolita kao SCM je specifična iz sledećih razloga [137]:

- Struktura zeolita može da adsorbuje značajnu količinu vode (NZ je u stanju da adsorbuje i otpušta vodu u količini do 30% u odnosu na sopstvenu masu u suvom stanju [3]). Prilikom razgradnje kristalne strukture zeolita dolazi do oslobađanja ove vode, koja može da doprinese procesu hidratacije u slučaju kada je količina vode u sistemu pora kod pasta smanjena ili da smanji pH vrednost usled efekta razblaživanja [137];
- Negativno naelektrisane kristalne rešetke otežavaju difuziju negativno naelektrisanih hidroksilnih jona dublje u strukturu NZ. Ovaj proces najviše zavisi od koncentracije Si-O i Al-O grupe na površini, što dovodi do toga da proces rastvaranja zavisi od veličine specifične površine [137];
- Izmenjivi katjoni koji se nalaze u strukturi zeolita mogu da utiču na pucolansku reakciju, nivo polimerizacije i odnos Ca/Si u C-S-H fazi [137][119]. NZ sa Na⁺ kao izmenjivim katjonom ima povećanu rastvorljivost i veću pucolansku reaktivnost, dok NZ sa Ca²⁺ ima manju potrošnju portlandita, te neizreagovani portlandit može da iskristališe i formira ogromne kristale koji mogu da smanje mehanička svojstva pasta/maltera/betona [137][39].

Prethodno navedene činjenice ukazuju na kompleksnost mehanizma pucolanske reakcije NZ i potrebu da se ovaj proces ispita kako bi se razumeo i stavio pod kontrolu.

4.2. Pucolanska reakcija elektrofilterskog pepela kao SCM

Elektrofilterski pepeo je pucolan koji u prisustvu vode reaguje sa kalcijum-hidroksidom i formira produkte hidratacije slične onima koji nastaju pri hidrataciji PC (Form. 2) [118]. Staklasti, nekristalni oblici silicijuma-oksida i aluminijum-oksida koji su sadržani u FA su razlog njegove pucolanske reaktivnosti [2].

Pucolanska reakcija FA ima sledeći oblik (A=Al₂O₃, S=SiO₂, C=CaO, H=H₂O) [151]:



Kada se kao vezivo koristi mešavina PC i FA smanjuje se ukupna količina portlandita, povećava količina C-S-H sa nižim vrednostima odnosa Ca/Si. Sa druge strane, povećava se količina AFm faze s obzirom da FA može da sadrži visok procenat Al₂O₃

[112]. Stoga produkti hidratacije mešavine PC i FA imaju visoki nivo Al. Sam fenomen, kao i uslovi koji dovode do ulaska Al u strukturu C-S-H, odnosno formiranja C-A-S-H gela još uvek nisu u potpunosti istraženi [112].

III IMOBILIZACIJA TEŠKIH METALA

1. UVOD

Teški metali predstavljaju prirodne elemente oko čije definicije postoje oprečna mišljenja. Iako se obično javljaju u prilično niskim koncentracijama, nalaze se po celoj zemljinoj kori. Najčešće se pod teškim metalima podrazumevaju metali sa specifičnom masom od 5 g/cm³ ili većom, ali postoje i izuzeci kao što je npr. barijum, koji se sa specifičnom masom od 3,62 g/cm³ svrstava u teške metale [58]. Poslednjih decenija podigla se svest u vezi sa njihovim mogućim štetnim efektima po zdravlje ljudi i njihovim negativnim trajnim uticajima na biosisteme. Ljudi su izloženi teškim metalima na više načina, bilo udisanjem dima, putem ishrane (preko kontaminirane pijaće vode; ako su biljke koje se koriste u ishrani bioakumulirale teške metali, ili ako su životinje preko svoje ishrane bioakumulirale iste) itd.

U odnosu na vrednost koncentracije u kojoj se javljaju, odnosno izlužuju, razlikuju se sledeći elementi [33]:

- Makroelementi (*major elements*), čija je koncentracija veća od 1% (> 10000 µg/g ili mg/kg);
- Mikroelementi (*minor elements*), u koncentraciji od 0,1-1% (1000-10000 µg/g ili mg/kg);
- Elementi u tragovima (*trace elements*), čija je koncentracija manja od 0,1% (< 1000 µg/g ili mg/kg).

U okviru grupe elemenata u tragovima nalaze se i teški metali koji izazivaju najviše problema u pogledu zagađenja životne sredine. Pored njih velike probleme takođe izazivaju metaloidi kao što su arsen i bor. Iako je teško kvantifikovati uticaj svih elemenata u tragovima na zagađenje životne sredine i zdravlje čoveka, postoje elementi koji izazivaju veće probleme od drugih. Olovo, kadmijum, živa i arsen smatraju se kancerogenim materijama koje predstavljaju najveću pretnju po zdravlje ljudi [58]. Do sada nije potvrđeno da barijum izaziva rak kod ljudi, iako ima neke štetne efekte. Kratkotrajna izloženost barijumu može dovesti do povraćanja, dijareje, problema sa disanjem, promene krvnog pritiska i slabosti mišića. Dugotrajna izloženost ili izloženost velikoj količini barijuma može da dovede do promene srčanog ritma, paralize, pa čak i do smrtnog ishoda [58].

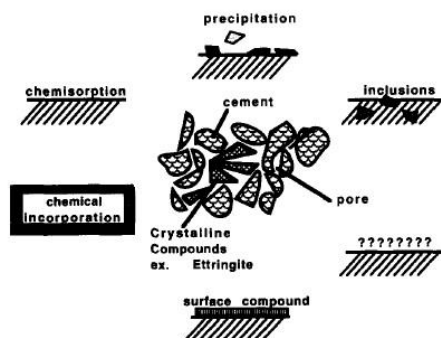
Postoji veliki broj različitih vrsta čvrstog otpada koji se kategorišu kao opasni zahvaljujući činjenici da sadrže teške metale koji se ispiraju. U navedene otpade spadaju elektrofilterski pepeo, zgura iz visokih peći i pepeo koji nastaje sagorevanjem gradskog otpada. Oni važe za najveći potencijalni izvor teških metala koji mogu da se transportuju u spoljašnju sredinu (npr. zemljište, podzemne vode itd.) Za razliku od organskih materijala teški metali nisu podložni razgradnji, već ostaju trajno prisutni u

životnoj sredini [4]. Ako se ovakva vrsta otpada ne odloži na siguran način može doći do sekundarnog zagađenja vazduha, zemlje i vode [186].

Postupci imobilizacije su efikasni načini da se migracija potencijalno opasnih materija redukuje uvođenjem fizičkih i hemijskih procesa. Jedan od način je solidifikacija/stabilizacija (S/S - *solidification/stabilization*) postupak koji se bazira na korišćenju materijala na bazi cementa gde u postupku očvršćavanja dolazi do stabilizacije teških metala (mogu da budu uneseni u mešavinu preko tečnih rastvora koji potiču iz industrijskih procesa, ili preko čvrste materije koja može da bude nus-produkt ili otpadni materijal) u strukturi novoformiranih materijala [175]. Ova tehnologija predstavlja kombinaciju fizičkih i hemijskih procesa i koristi se kako bi se smanjio negativan uticaj zagađujućih materija na životnu sredinu. Očvršćavanje je proces u kojem se opasne materije, iz tečnosti, mulja ili opasnih materijala, u obliku sitnih čestica prevode u monolitan materijal ili materijal u rastresitom stanju. Solidifikacija ne mora nužno da znači redukciju ispiranja opasnih materija. Ipak solidifikacijom se menja struktura i masa opasnih materija što utiče na redukciju njihove migracije. Stabilizacija se odnosi na uvođenje hemijskih reakcija koje imaju za cilj prevođenje opasnih materija u oblike koji su manje rastvorljivi u vodi. Tako se mehanizmi S/S mogu kategorizovati na sledeći način:

- Hemijska stabilizacija putem transformacije TE u manje rastvorne oblike ili u manje toksične forme;
- Fizička enkapsulizacija koja podrazumeva zatvaranje TE u materijalima sa malom permeabilnošću što će onemogućiti ispiranje istih.

Najčešće se oba mehanizma javljaju istovremeno. Glasser sa saradnicima [62] ukazuje da se hemijska imobilizacija odvija na atomskom nivou dok se fizička enkapsulizacija dešava na nivou mikrona. Imobilizacija ili interakcija štetnih materija sa cementom i vezivima na bazi cementa i SCM se odvija kroz procese taloženja, fizičke adsorpcije ili putem hemijskih reakcija kao što je stvaranje kompleksnih jona. Šematski su ti procesi prikazani na slici III-1.



Slika III-1. Prikaz različitih mogućnosti interakcije štetnih supstanci sa cementom [63]

Portland cement i kompozitni materijali na bazi PC mogu veoma uspešno da solidifikuju i stabilizuju elemente koji su sa stanovišta zaštite životne sredine opasni.

Generalno, proces očvršćavanja i stabilizacije je uspešan ukoliko su sledeći koraci uspešno primenjeni:

- (1) Kontrola pH vrednosti ukoliko se razvije veći stepen kiselosti;
- (2) Destrukcija metalnih kompleksa ako je potrebno;
- (3) Kontrola oksidacionog stanja gde je potrebno prevođenje iz toksičnog u netoksičan oblik. Primer za ovaj slučaj je Cr koji ima dva oksidaciona stanja Cr^{3+} i Cr^{6+} . Cr^{3+} formira nerastvoran hidroksid za razliku od Cr^{6+} , zbog čega se preporučuje njegova prethodna redukcija iz stanja $^{6+}$ u stanje $^{3+}$, nakon čega se obavlja solidifikacija sa cementom;
- (4) Konverzija u nerastvorne oblike (stabilizacija); prevođenjem metala u karbonate, hidrokside, silikate ili sulfide koji imaju manju rastvorljivost;
- (5) Prevođenje u čvrsto stanje putem solidifikacije.

S/S procesi podrazumevaju uvođenje vezivne komponente, tako da cement i materijali koji zamenjuju cement imaju veliki značaj sa ekonomskog aspekta i stanovišta zaštite životne sredine. Kod kompozitnih materijala na bazi cementa prisutni su koraci 1, 4 i 5. Postojanje manje kiselosti (tačka 1) se može neutralisati postojanjem kalcijumovog jona. U tom pogledu od posebnog značaja je npr. primena zeolita sa Ca^{2+} kao izmenljivim katjonom koji se dodatno oslobađa u procesu hidratacije veziva na bazi cementa i zeolita. Drugim rečima zeolit može da ima svojstvo pufera (kapacitet da održi pH vrednost). Mehanizmi delovanja veziva na imobilizaciju teških metala zavise od oblika u kojem se po prirodi nalazi konkretni teški metal (da li je u obliku katjona ili oksianjona). Pokazano je da se u procesu S/S kada se kao vezivo koristi cement teški metali (u obliku katjona) imobilizuju uglavnom putem adsorpcije ili inkluzije u produkte hidratacije, ili taloženjem slaborastvorljivih hidroksida. Za razliku od katjona, oksianjoni pokazuju manji stepen imobilizacije u uslovima visoke vrednosti pH, iako i kod njih postoji mogućnost imobilizacije putem inkluzije u produkte hidratacije. Produkti hidratacije cementa kao što su etringit i C-S-H gel imaju sposobnost imobilizacije katjona i oksidnih anjona.

Elektrofilterski pepeo kao (i) nus-produkt sagorevanja sparšenog uglja u termoelektranama, i potom kao (ii) otpadni materijal odložen na „pepelištima“ predstavlja izvor potencijalno opasnih elemenata po životnu sredinu. Ako se elektrofilterski pepeo koristi kao SCM deo potencijalno opasnih elemenata po životnu sredinu može da se u procesu pucolanske reakcije oslobodi u porni rastvor. Deo tih elementata potom može da se imobilizuje u okviru etringita, C-S-H gela i potencijalno i C-A-S-H gela. U koliko se kao SCM koristi mešavina elektrofilterskog pepela sa jedne strane i prirodnog zeolita kao adsorbenta, jonoizmenjivača, molekularnog sita sa

druge strane, postoje velika verovatnoća da će neizreagovani prirodni zeolit doprineti dodatnoj imobilizaciji opasnih elemenata koji potiču iz elektrofilterskog pepela, ukoliko nije prethodno već bio „prezasićen“ istim.

Proces imobilizacije u kompozitima na bazi cementa, a posebno u slučaju primene SCM, je izuzetno složen, jer teški metali i drugi opasni elementi mogu da utiču na proces hidratacije cementa.

2. ELEKTROFILTERSKI PEPEO DOBIJEN SAGOREVANJEM SPRAŠENOG UGLJA KAO IZVOR POTENCIJALNO TOKSIČNIH ELEMENATA

Ugalj, kao i drugi prirodni materijali koji nastaju u različitim uslovima tokom dužeg vremenskog perioda, sadrži većinu elemenata iz periodnog sistema. Iako postoje objavljeni podaci o elementima u tragovima koji se nalaze u pepelu dobijenom od uglja, trebalo bi napraviti odgovarajuća poređenja na nivou samog uglja. Takođe se mora uzeti u obzir i činjenica da pepeo nastaje sagorevanjem uglja na visokim temperaturama, i da nema identičan mineraloški/hemijski sastav kao ugalj od kojeg je dobijen. Vezu između relativnog značaja elemenata u tragovima koji se nalaze u uglju i njegove upotrebe nije lako uspostaviti, jer zavisi od nekoliko faktora (npr. koncentracije elemenata u tragovima u uglju, biološke dostupnosti itd.) [166]. U tabeli III-1 prikazana je jedna od procena ekološkog značaja elemenata u tragovima u uglju.

Tabela III – 1. Procene ekološkog značaja elemenata u tragovima u uglju [166]

Procena u skladu sa PECH [131]				
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
As	Cr	Ba	Po	Ag
B	Cu	Br	Ra	Be
Cd	F	Cl	Rn	Sn
Hg	Ni	Co	Th	TI
Mo	V	Ge	U	
Pb	Zn	Li		
Se		Mn		
		Sr		

Prema navedenoj proceni elementi u tragovima koji se javljaju u uglju mogu da se svrstaju u jednu od šest kategorija [131]: (a) elementi koji izazivaju najveću zabrinutost, (b) elementi koji izazivaju umerenu zabrinutost, (c) elementi koji izazivaju manju brigu, (d) radioaktivni elementi za koje se smatra da izazivaju manju

zabrinutost, (e) elementi koji izazivaju zabrinutost, ali se javljaju u malim koncentracijama u uglju i njegovim ostacima.

U elektrofilterskom pepelu se pored teških metala (Pb, Cu, Cd, Zn, Hg, Cr) mogu naći i oksianjoni na bazi sledećih elemenata Se, As, Sb, Mo, V, W [102][36][37].

3. IMOBILIZACIJA TEŠKIH METALA

Imobilizacija potencijalno toksičnih elemenata u tragovima unutar materijala moguća je ukoliko sam materijal ili neka od njegovih komponenti ima adsorptivno i/ili apsorptivno svojstvo [171]. Dati elementi bivaju delimično imobilizovani unutar produkata hidratacije ili su adsorbovani na njihovoj površini, ali primenom sorptivnih, jonoizmenjivačkih materijala kao što je zeolit fiksacioni mehanizmi se ubrzavaju [171].

3.1. Imobilizacija teških metala unutar strukture prirodnog zeolita

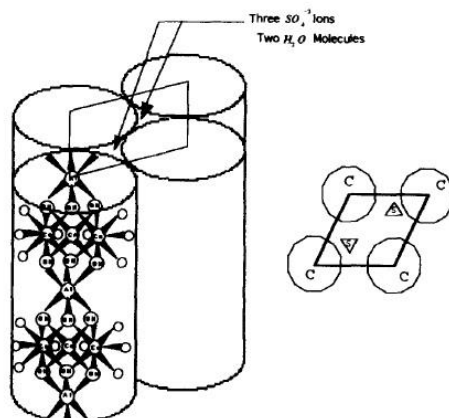
U poređenju sa cementom zeoliti imaju dodatnu predost u pogledu mogućnosti da efikasno imobilizuju štetne materije. Naime, prirodni zeoliti imaju veoma veliki kapacitet adsorpcije po čemu se razlikuju od drugih adsorbenata. U ovu grupu spadaju klinoptilolit, mordenit, šabazit, erionit i filipsit. Izdvajaju se u odnosu na druge adsorbente zbog svoje mikroporozne kristalne strukture koja im omogućava da adsorbuju čestice određene veličine. Naime, da bi se katjon teškog metala smestio u unutrašnjost mikropore sa ciljem da zamene izmenjivački katjon mora da prođe kroz kanal čiji prečnik je manji od prečnika mikropore. Izmenljivi katjoni K^+ , Na^+ , Ba^{2+} , Ca^{2+} koji se nalaze u strukturi zeolita i služe za neutralizaciju negativnog naelektrisanja kristalne rešetke, mogu se izmeniti sa drugim katjonima iz alkalnog rastvora (teški metali), a da pritom ne dođe do promena u kristalnoj rešetki zeolita (jonska izmena) [16]. Adsorpcioni kapacitet zeolita zavisi od više faktora kao što su: hidratacioni radijus (geometrijska selektivnost), entalpija hidratacije i rastvorljivost katjona. Hidratacioni radijusi katjona su $r_{H}Zn^{2+} = 4,30 \text{ \AA}$, $r_{H}Co^{2+} = 4,23 \text{ \AA}$, $r_{H}Cu^{2+} = 4,19 \text{ \AA}$, $r_{H}Ni^{2+} = 4,04 \text{ \AA}$ i $r_{H}Pb^{2+} = 4,01 \text{ \AA}$. Katjoni sa najmanjim hidratacionim radijusom se najbrže i najviše adsorbuju u poređenju sa većim katjonima, jer mogu lakše da prođu kroz sistem kanala unutar strukture zeolita. Prema veličini hidratacionog radijusa, odnosno prema mogućnosti veće adsorpcije, katjoni se mogu poređati na sledeći način: $Pb^{2+} > Ni^{2+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Zn^{2+}$ [190].

3.2. Imobilizacija teških metala unutar produkata hidratacije

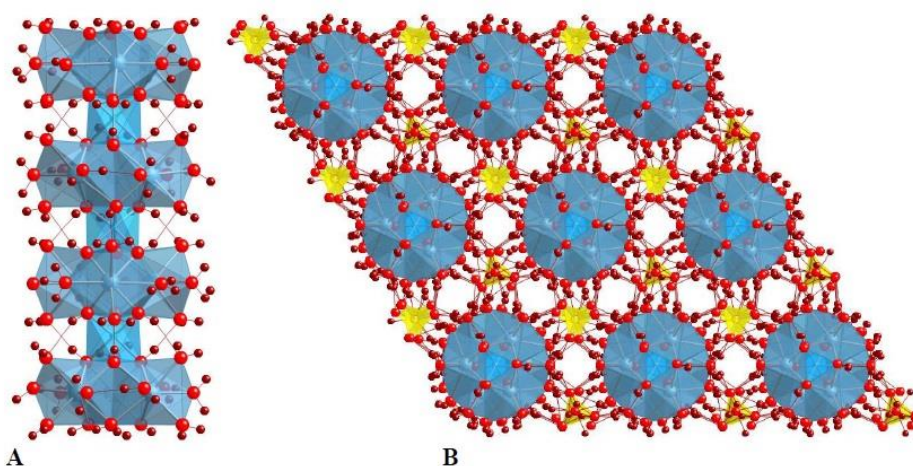
Produkti hidratacije cementa i SCM koji efikasno imobilizuju katjone i oksianjone su: etringit, AFm jedinjenja, C-S-H gel i C-A-S-H gel.

3.2.1. Struktura etringita i imobilizacija potencijalno toksičnih elemenata unutar nje

Struktura etringita sastoji se od heksagonalnih prizmi ili igličastih kristala, slike III-2 i III-3. Kristali se sastoje od dve strukturne komponente: kolona $\{\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}\}^{6+}$ i kanala $\{(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}\}^{6-}$ [63].



Slika III-2. Struktura etringita gde "C" označava strukturu kolone, a "S" strukturu kanala gde su smešteni sulfatni oksianjonski tetraedri [63]



Slika III-3. Struktura etringita: a) Projekcija ilustruje centralnu kolonu koja se sastoji od CaO_8 i AlO_6 poliedara; b) Projekcija koja predstavlja preko vodonika povezanu mrežu između Al-Ca kolona i sulfatnih tetraedara smeštenih u međuprostoru. Ca dodekaedar je obeležen svetlo plavom bojom, Al oktaedar plavom, sulfatni tetraedar žutom, kiseonikov atom crvenom i vodonikov atom tamno crvenom bojom [43].

Kolone se sastoje od $\text{Al}(\text{OH})_6$ oktaedara naizmenično povezanih sa CaO_8 poliedrima. Svi kiseonici iz CaO_8 poliedara potiču od koordinacije Ca^{2+} sa četiri OH^- grupe koje deli sa $\text{Al}(\text{OH})_6$ oktaedarima, i od koordinacije Ca^{2+} sa četiri molekula H_2O . Vodonikovi atomi iz H_2O formiraju cilindričnu površinu kolone. Kanali sadrže Ca, SO_4^{2-} jone i H_2O molekule. Struktura etringita je takva da može da podnese manja odstupanja u

sastavu, pri čemu neće doći do njene promene. Data odstupanja se javljaju na kristalno-hemijskom nivou, u vidu jonske supstitucije. Joni koji su podložni supstituciji u okviru strukture etringita su Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} i OH^- [63].

Imobilizacija TE u etringitu kreće od položaja aluminijuma i sulfata. Na položajima aluminijuma se mogu naći različiti trovalentni i četvorovalentni katjoni. Bonen i Sarkar [15] ukazuju na vezivanje Ni^{3+} i Co^{3+} kao i Ti^{3+} .

Kumarathasan je sa saradnicima [102] ukazao da sulfatni jon može da bude zamenjen oksianjonima AsO_4^{3-} , CrO_4^{2-} , ScO_4^{2-} i VO_4^{3-} . U ovom radu se takođe pominje da sulfatne jone mogu da supstituišu i sledeći oksianjoni: MnO_4^- , WO_4^{2-} , SeO_3^{2-} , TeO_4^{2-} , PO_4^{3-} , SbO_4^{3-} i BiO_4^{3-} .

Iako se smatra da na položaju kalcijuma u etringitu ne dolazi do supstitucije, Gougar sa saradnicima [63] ukazuju na veći broj dvovalentnih katjona (Sr^{2+} , Ba^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Hg^{2+} i Zn^{2+}) koji bi mogli da supstituišu Ca^{2+} . U tabeli III-2 su sumirane sve moguće supstitucije u strukturi etringita. Ograničavajući faktor pri supstituciji su dimenzije položaja pojedinih jona. Veličina položaja Ca^{2+} kreće se od 0.90-1.42 Å, položaja Al^{3+} od 0.42-0.76 Å, položaja SO_4^{2-} od 0.62-3.71 Å i položaja OH^- od 0.62-1.38 Å [63].

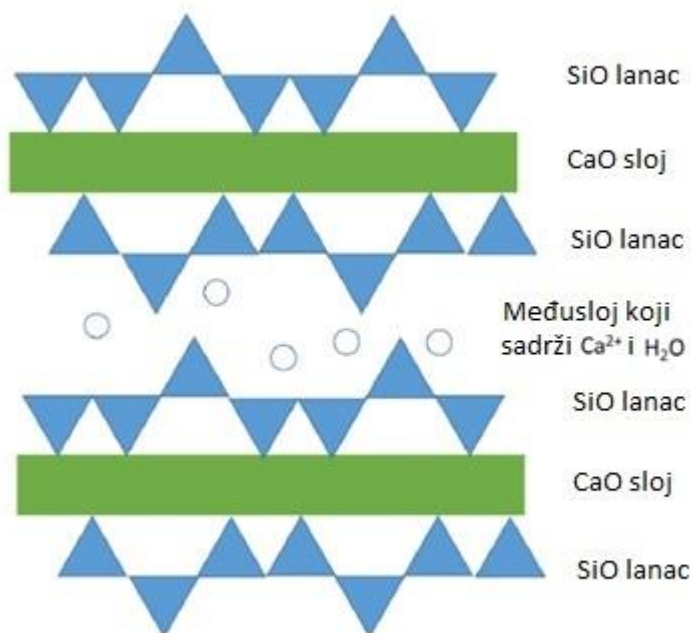
Tabela III – 2. Moguće supstitucije u etringitu [63]

Položaji koji se supstituišu jonima navedenim u kolonama			
$(\text{Ca}^{2+})^{\text{VIII}}$ položaj	$(\text{Al}^{3+})^{\text{VI}}$ položaj	(SO_4^{2-}) položaj	(OH^-) položaj
Sr^{2+}	Cr^{3+}	$\text{B}(\text{OH})_4^{1-}$	O^{2-}
Ba^{2+}	Si^{4+}	CO_3^{2-}	
Pb^{2+}	Fe^{3+}	Cl^{1-}	
Cd^{2+}	Mn^{3+}	OH^{1-}	
Co^{2+}	Ni^{3+}	CrO_4^{2-}	
Ni^{2+}	Co^{3+}	AsO_4^{3-}	
Zn^{2+}	Ti^{3+}	SeO_4^{2-}	
		VO_4^{3-}	
		BrO_3^{1-}	
		NO_3^{1-}	
		MoO_4^{2-}	
		ClO_3^{1-}	
		SO_3^{2-}	
		IO_3^{1-}	

Izvesno je da na položaj OH^- u strukturi etringita može da stane kiseonik [63].

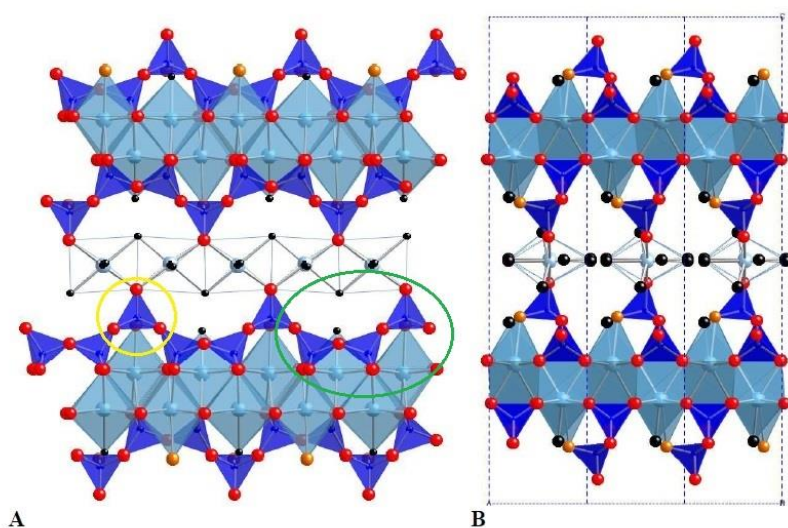
3.2.2. Struktura C-S-H gela i imobilizacija potencijalno toksičnih elemenata unutar nje

Glavni produkt hidratacije cementa je C-S-H gel koji određuje čvrstoću i trajnost kompozita na bazi cementa. Idealizovana struktura C-S-H gela je prikazana na slici III-4.

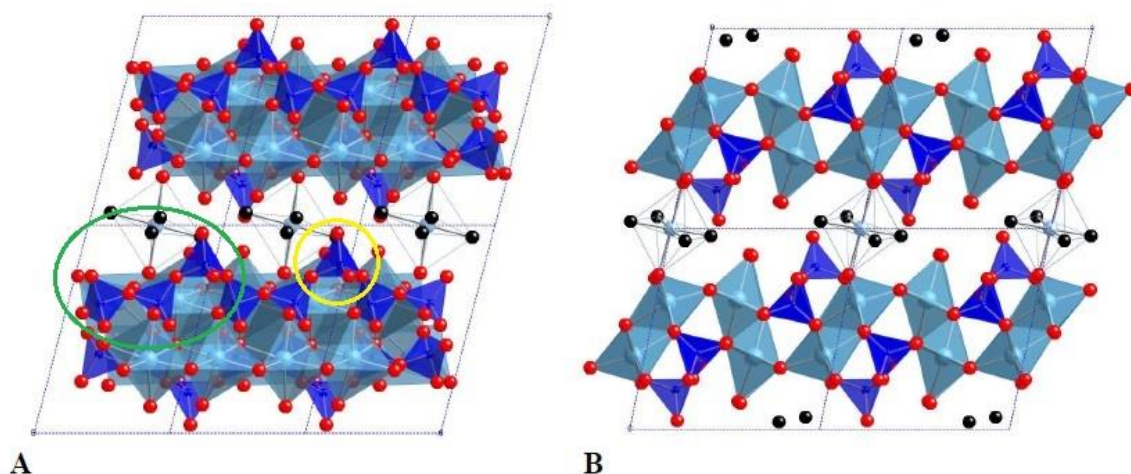


Slika III-4. Simplifikovana struktura C-S-H gela

Modeli strukture C-S-H gela se zasnivaju na strukturi tobermorita ($\text{Ca}/\text{Si} < 1,5$) i na strukturi jenita ($\text{Ca}/\text{Si} > 1,5$) [170]. Tobermorit i jenit imaju sličnu, slojevitou strukturu, slike III-5 i III-6.



Slika III-5. Kristalna struktura 1,4 nm tobermorita: a) „Dreierkette“ struktura (primer je uokviren zelenom bojom) sastoji se od para tetraedara i jednog veznog (bridging) tetraedra (primer je uokviren žutom bojom); b) Projekcija duž ravni koja je normalna na silikatni lanac i koja pokazuje način povezivanja silikatnih lanaca, deljenja kiseonikovih atoma u paru i veznom tetraedru sa Ca-O slojem. Ca jon u oktaedru je označen svetlo plavom bojom, Si u tetraedru sa tamno plavom bojom, atom kiseonika crvenom, molekuli vode crnom, a hidroksilni joni narandžastom bojom [43].



Slika III-6. Kristalna struktura jenita: a) „Dreierkette“ struktura (primer je uokviren zelenom bojom) sastoji od para tetraedara i jednog veznog tetraedra (primer je uokviren žutom bojom); b) Prijekcija na ravan normalnu na silikatni lanac. Oktaedarski sloj formira talasastu strukturu u kojoj su smešteni silikatni tetraedri. Samo polovina kiseonikovih atoma je povezana sa silikatnim lancem dok ostatak formira hidroksilne grupe. Ca jon u oktaedarsko sloju je označen svetlo plavom bojom, Si u tetraedru sa tamno plavom bojom, atom kiseonika crvenom, molekuli vode crnom, a hidroksilni joni narandžastom bojom [43].

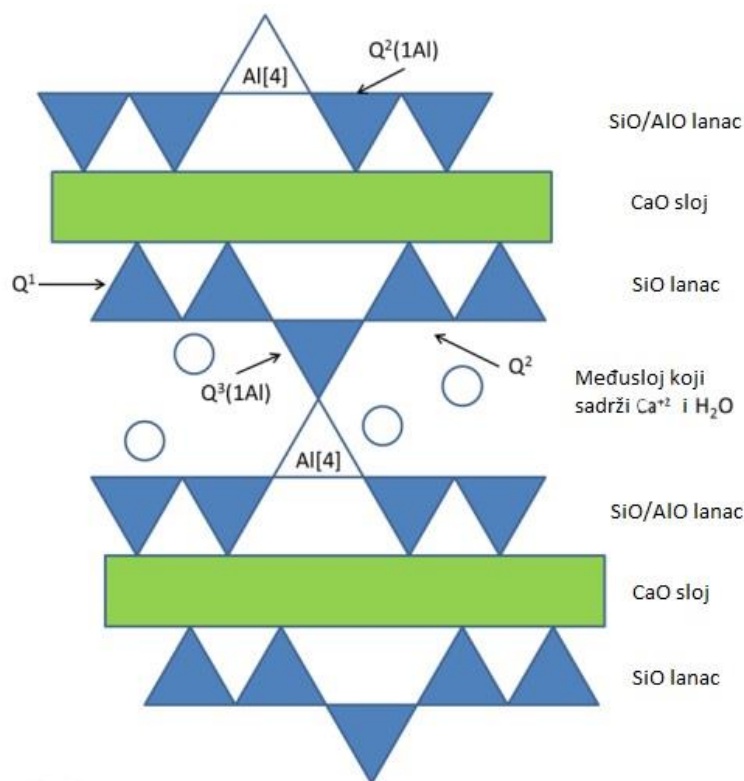
Glavni sloj kod tobermorita, slika III-5, sastoji se od Ca-O poliedara koji se sa obe strane graniče sa silikatnim trakama (lancima) načinjenim od tetraedara,

organizovanih u grupe od tri tetraedra "*dreierkette*" tipa. Dva od tri tetraedra dele po dva kiseonikova atoma sa oktaedarskim slojem (Ca-poliedri, odnosno Ca-oktaedri), a treći "*bridging*" tetraedar je okrenut ka međuprostoru (međusloj) između slojeva. U okviru ovog prostora se mogu naći dodatni joni Ca kao i molekuli vode koji nisu hemijski vezani za gore opisani sloj kojeg čine oktaedri i tetraedri. Sličnu strukturu ima i jenit, s tim što je kod njega samo polovina kiseonikovih atoma u oktaedarskom sloju povezana sa tetraedrima dok ostatak formira uglavnom OH⁻ grupe, slika III-6. Ova činjenica omogućava da znatno veći broj atoma Ca uđe u strukturu C-S-H gela. Promene u sastavu C-S-H gela u pogledu odnosa Ca/Si su posledica zamene postojećih "*bridging*" tetraedara sa Ca ili vodonikom, kao i izostavljanjem ovih tetraedara iz strukture. Osnovna razlika između strukture tobermorita i jenita je u građi osnovnog Ca-O sloja, koja dozvoljava da se u strukturu jenita ugradi više atoma Ca čime se povećava odnos Ca/Si [43].

Predložene strukture tobermorita i jenita su polazna tačka u objašnjenju svojstava C-S-H gela na osnovu strukture. Međutim, ipak postoje neka svojstava koja nisu mogla da se objasne, tako da je pretpostavljeno da je stvarni C-S-H gel kombinacija tobermorita i Ca(OH)₂ ili tobermorita i jenita. Ovaj poslednji model zasniva se na pretpostavci da je tobermoritna struktura izmešana sa jenitnom. Ovaj model strukture je veoma fleksibilan tako da dozvoljava zamenu Si⁴⁺ sa Al³⁺ u "*bridging*" tetradrima. Takođe ovaj model dozvoljava veći raspon Ca/Si. Međutim, uprkos značajnom napretku poslednjih godina, još uvek nije postignut konsenzus po pitanju postojanja jednog ili više različitih nanostrukturnih domena (tobermorita i/ili jenita) [43].

Uvođenjem pucolana, odnosno SCM, menja se struktura C-S-H gela. Ta promena se ogleda u smanjenju odnosa Ca/Si, te na sličan način dodavanje NZ ili FA takođe smanjuje odnos Ca/Si, bar na početku procesa hidratacije. Promene vrednosti odnosa Ca/Si i Al/Si dovode do promene strukture gela i svojstava cementnog kamena koji sadrži SCM (mehaničke osobine i trajnost). Ako SCM ima više SiO₂ vrednost odnosa Ca/Si će pasti u odnosu na vrednost kod čistog PC koja se kreće od 1,5-1,9. Vrednost odnosa Al/(Si+Al) u C-S-H gelu može da se kreće maksimalno do 0,23, a najčešće iznosi oko 0,21 [165]. Ulazak Al u strukturu C-S-H gela se pre svega odvija kroz substituciju Si sa Al [IV] (Al [IV] označava da je Al u centru tetraedra i da je okružen sa četiri atoma kiseonika, odnosno IV označava koordinaciju Al) u [SiO₄]⁴⁻ tetraedrima na poziciji Q² [165], slika III-7. Al [IV] najčešće ulazi u strukturu "*bridging*" tetraedra, jer ovaj tetraedar deli samo jedno teme sa Ca iz oktaedarskog sloja. „*Bridging*“ tetraedar je sposobniji da se prilagodi izmenjenoj dužini veze, jer je veza Al[IV]-O za oko 0,01 nm duža od Si-O veze.

Sa povećanjem vrednosti odnosa Ca/Si verovatnoća ulaska Al u strukturu tetraedara u C-S-H gelu se smanjuje.



Slika III-7. Simplifikovana struktura C-A-S-H gela

Dakle kada je odnos Ca/Si veći, relativni udeo Al[IV] se smanjuje u C-S-H gelu, a povećava udeo Al[VI]. Aluminijum ovog nivoa koordinacije je prisutan u obliku amornog aluminijum hidroksida ili kao kalcijum aluminijum hidrat na površini C-S-H gela (treći aluminijum hidrat) ili u međusloju C-S-H gela. Osim navedenih koordinacionih brojeva Al može imati i koordinacioni broj pet, Al[V], bez obzira na vrednost odnosa Ca/Si [104].

Kada Al sa koordinacionim brojem IV (položaj u centru tetraedra), slika III-7, uđe u strukturu C-S-H gela i formira C-A-S-H gel, parametri rešetke se ne menjaju, pa se ta transformacija ne može uočiti na XRD-u u pogledu pomeranja 2θ ugla. Međutim, ulaskom aluminijuma u strukturu C-S-H gela preko oktaedarskog sloja Al[VI] se odražava i na parametre rešetke C-S-H gela, te to može biti i jedan od kriterijuma za ocenu nastanka C-A-S-H gela i položaja aluminijuma u njemu. Aluminijum sa koordinacionim brojevima Al[V i VI] se mogu naći i u međusloju C-S-H gela. Tada utiče na formiranje međuslojnog prostora (*interlayer spacing*). Zbog toga vrednost "full with at half maximum" pika raste sa porastom sadržaja aluminijuma u sistemu, a smanjuje vrednosti 2θ koja odgovara međusloju ($2\theta: 7,34^\circ$) [94]. Ova promena je posledica povećanja međuslojnog rastojanja i potvrda je ulaska Al u ovaj sloj.

Istovremeno intenzitet pika se smanjuje. Ovo se dešava za sve vrednosti odnosa Ca/Si (1 i 1,7) za koje je rađen eksperiment čiji rezultati su prikazani u radu [94]. Širenje pika uz istovremeno smanjenje intenziteta ukazuje da stepen kristalizacije u okviru C-A-S-H gela opada u prisustvu aluminijuma.

Lothenbach sa saradnicima [112] je utvrdila da sa dodatkom pucolana nastaje C-S-H gel sa smanjenom vrednošću odnosa Ca/Si što olakšava uvođenje Al u strukturu C-S-H gela. Pošto FA ima povećanu količinu Al₂O₃ oksida postoji mogućnost stvaranja veće količine AFm faza, stratlingita i C-A-S-H gela.

Dobro je poznato da Al³⁺ zajedno sa H⁺ može da supstituiše Si⁴⁺ u tetraedarskom položaju. Takođe se pretpostavlja da u međusloj ulaze i alkalni joni. Pored navedenog registrovani su SO₄²⁻, OH⁻ i CO₃²⁻ anjoni vezani za gel, ali verovatno kao posledica mešanja sa drugim produktima hidratacije. Prema Taylor-u [170] ulazak drugih faza u C-S-H gel se može objasniti pojavom suprotnog naelektrisanja na površini slojeva u gelu.

U tabeli III-3 su dati elementi i joni koji se vezuju za strukturu C-S-H gela.

Tabela III – 3. Elementi i joni koji mogu da se vežu za strukturu C-S-H gela [63]

Li, Na, K, Rb, Cs
Mg, Ni, Co, Hg, Zn, Cd
Al, Fe, Cr
Pb, U
Cl, I
OH ¹⁻ , CO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻

Mogućnost da C-S-H gel, kao i etringit, imobilizuje elemente koji su prisutni u strukturi koja se formira u procesu hidratacije ukazuje na značaj koncentracije Ca²⁺ jona.

3.2.3. Cementni kompoziti koji sadrže mešavinu NZ i FA kao SCM

Postojanje razlika u načinu imobilizacije katjona i oksianjona teških metala ukazuju da postoji razlika u efikasnosti imobilizacije kada se koriste čisti prirodni zeoliti (kao sirovine) i kada se koriste kao SCM u cementnim kompozitima. Prirodni zeoliti imaju mogućnost efikasne imobilizacije nekih katjon, dok produkti hidratacije (prvenstveno etringit i C-S-H gel) imaju mogućnost imobilizacije i katjona i anjona. Međutim, treba imati u vidu da u kompozitima na bazi cementa etringit nastaje na početku procesa hidratacije, a potom prelazi u monosulfat. Osim toga stabilnost etringita i C-S-H gela

jako zavisi od pH vrednosti. Smatra se da je stabilnost etringita narušena pri pH vrednosti manjoj od 10,6, dok je stabilnost C-S-H gela narušena kada je pH vrednost manja od 10,4. Iz ovih podatak se može zaključiti da je veoma važno održavati pH vrednost pornog rastvora sa ciljem da se imobilizacija teških elemenata održi u dužem vremenskom periodu. U eksperimentalnom delu ove doktorske disertacije, FA kao SCM je posmatran kao izvor teških metala.

Kada je u pitanju cementni kompozit koji sadrži mešavinu NZ i FA, kao SCM, pretpostavlja se da NZ sa svojim adsorpcionim i jono-izmenjivačkim sposobnostima može dodatno da pomogne održanju alkalne sredine u sistemu pora kao i imobilizaciji potencijalno toksičnih elemenata iz FA. U navedenim kompozitnim materijalima da bi zeolit adsorbovao TE potrebno je da ga FA otpusti. Za otpuštanje ovih elemenata je važna pH vrednost pornog rastvora. Visoka pH vrednost je na strani smanjenja rastvorljivosti teških metala [106]. S obzirom da hidratizani cement i zeolit sa Ca^{2+} kao izmenjivačkim katjonom daju visoku pH vrednost pornog rastvora, uloga zeolita kao sredstva za imobilizaciju, u navedenim kompozitnim sistemima je u drugom planu.

U procesu formiranja FA na površinu čestica se kao rezultat procesa dekompozicije, isparavanja, topljenja aglomeracije i kondenzacije isparljivih materija javljaju sledeći elementi: As, Hg, Cr, Se i S. Navedeni elementi su relativno lako rastvorljivi, i nalaze se u sloju debljine od svega nekoliko mikrometara [86]. Pored navedenih elemenata, u sloju se nalaze i elementi Cd, Sb, i Zn, dok su elementi kao Ba, Cu, Co, Cr, Ni i Pb nasumično raspoređeni između površine i matrice. Prema Terzić sa saradnicima [172] u složenom tehnološkom postupku u kom nastaje FA formira se struktura koja je kombinacija staklaste faze i kristalnih faza. Najveću rastvorljivost imaju metali Hg, Ba i Se. Hg je u obliku koji daje dobru rastvorljivost u vodi, taloži se na površini čestica, odnosno nije imobilizovana u strukturi FA. Ba je takođe rastvorljiv u vodi ako nije u obliku sulfata ili karbonata, i ako nije čvrsto imobilizovan, kao i Se. Otuda se ovi elementi relativno lako izdvajaju iz strukture FA. Pored navedenih elemenata As takođe spada u elemente koji se talože na površini čestica, a Zn je veoma lako pokretljiv u strukturi FA te se takođe lako izdvaja. Pb i Cu su imobilizovani u strukturi staklaste faze FA i mogu se osloboditi u procesu hidratacije, jer upravo ta faza reaguje sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Za razumevanje mehanizma ispiranja elemenata, koji mogu da budu toksični čak i kada su prisutni samo u tragovima, potrebno je poznavati uslove koji dovode do njihovog izdvajanja iz strukture FA, a potom i razmotriti kako proces hidratacije utiče na ispiranje. Generalno, rastvorljivost veoma zavisi od vrste uglja od kojih je nastao FA, uslova sagorevanja, adsorpciono/desorpcionih procesa, redukcionih uslova, ali najviše od pH vrednosti sredine u kojoj se dešava ispiranje. Naime, pokretljivost

predmetnih elemenata najviše zavisi od pH vrednosti vode ili sistema u kom se dešava ispiranje.

Kada FA dođe u kontakt sa vodom pH vrednost koja se uspostavlja u velikoj meri zavisi od odnosa Ca/S [135] stoga se razlikuju:

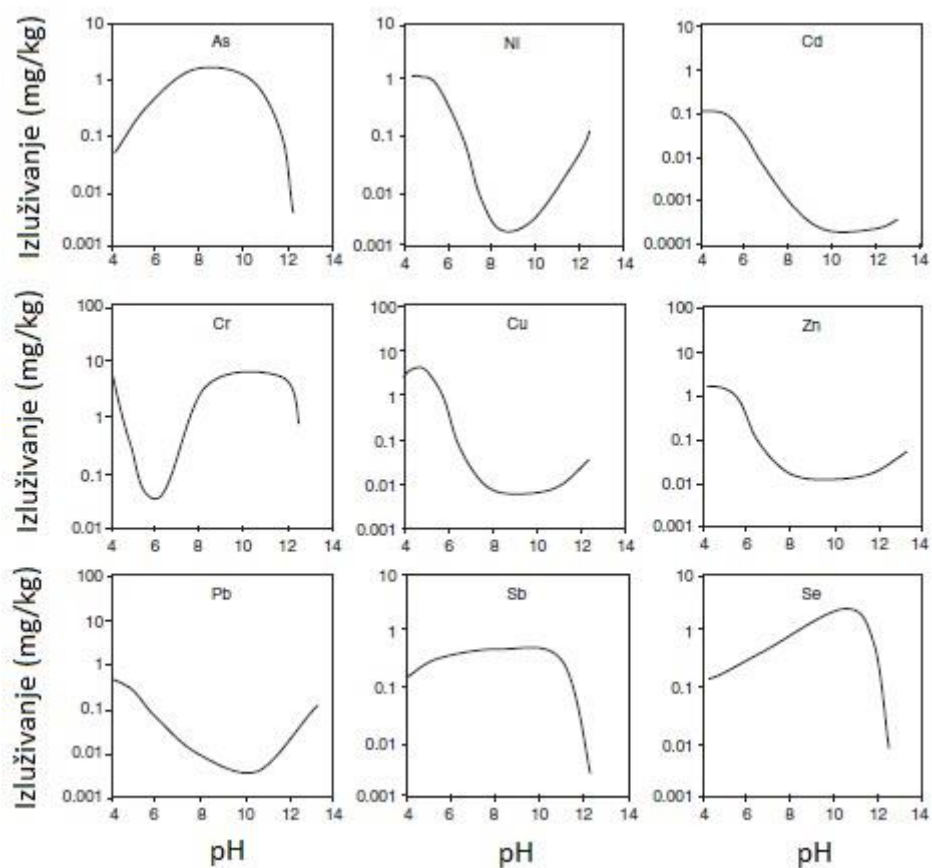
- Jako alkalni pepeli; odnosi Ca/S >> 1. Jako alkalni pepeli obezbeđuju pH vrednost rastvora 11-13;
- Umereno alkalni pepeli; odnos Ca/S je takav da daje pH vrednost između 8 i 9;
- Pepee koji daje pH vrednost koja odgovara kiseloj sredini.

Treba uzeti u obzir i da je pH vrednost menja u toku ispiranja.

Na slici III-8 je prikazana zavisnost izluživanja pojedinih elemenata od pH vrednosti, kao kompilacija podataka dobijenih iz različitih izvora [87]. U interpretaciji podataka treba uzeti u obzir da različiti faktori mogu da dovedu do promene rastvorljivosti elemenata (kao prisustvo Cl⁻).

U procesu hidratacije, kada nastaje C-S-H gel, etringit i drugi produkti, u kompozitima gde je upotrebljeno vezivo na bazi PC, FA i NZ procesi rastvaranja elemenata u tragovima kao i proces njihove imobilizacije u strukturama produkata hidratacije se odvijaju istovremeno.

Sa slike III-8 se vidi da većina elemenata ima smanjenu rastvorljivost za pH vrednost veću od 10, što znači da visoka pH vrednost, tj. alkalna sredina ne podstiče rastvorljivost elemenata u tragovima [106]. Na osnovu prethodno navedenog može da se zaključi da proces hidratacije, proizvodeći alkalnu sredinu u pornom rastvoru, sprečava intenzivno oslobađanje pomenutih elemenata pre svega iz strukture FA.



Slika III-8. Trend rastvorljivosti odabranih elemenata u zavisnosti od pH vrednosti [87]

IV
REPARATURNI MALTERI

1. OSNOVNA SVOJSTVA, TEHNIČKI ZAHTEVI I KLASIFIKACIJA REPARATURNIH MALTERA

Trajnost betonskih konstrukcija predstavlja njihovu sposobnost da pri očekivanom opterećenju i dejstvima iz okoline tokom planiranog eksploatacionog veka zadrže zahtevani nivo sigurnosti, upotrebljivosti i odgovarajući izgled bez povećanih troškova za održavanje i popravke. Ona prvenstveno zavisi od projektnog rešenja, od izbora i kvaliteta ugrađenih materijala, kao i od kvaliteta izvedenih radova. Ukoliko makar jedan od prethodnih uslova nije ispunjen, usled agresivnih uticaja spoljašnje sredine, ubrzo nakon izgradnje javljaju se oštećenja samog betona i/ili korozija armature. Sanacija objekata obuhvata kompleksan niz radnji koje za rezultat uvek imaju produženi eksploatacioni vek. Razlozi za sanaciju betonskih konstrukcija mogu biti i (i) oštećenja usled incidentnih dejstava, (ii) greške u projektovanju, izboru materijala i građenju, (iii) promena funkcije objekta, ali i (iv) deteracioni procesi, odnosno starenje materijala.

Generalno, razlikuju se dve vrste sanacija betonskih konstrukcija:

- Nekonstrukcijska sanacija (slika IV-1a) – primenjuje se u cilju produženja upotrebljivosti i trajnosti objekata. Obuhvata popravku, odnosno reparaciju oštećenih površina betona i armature, bez promene konstrukcijskog sistema i/ili dodavanja nove armature.
- Konstrukcijska sanacija (slika IV-1b) - najčešće se vezuje za pojam ojačavanja konstrukcije usled ugrožene nosivosti i stabilnosti, ili usled promene namena ili opterećenje objekta. Ovaj tip sanacije obuhvata i zamenu izrazito oštećenih elemenata ili delova konstrukcije, a čak i promenu statičkog sistema konstrukcije.



Slika IV-1. Oštećenja koja zahtevaju [42]: a) Nekonstrukcijsku sanaciju, b) Konstrukcijsku sanaciju

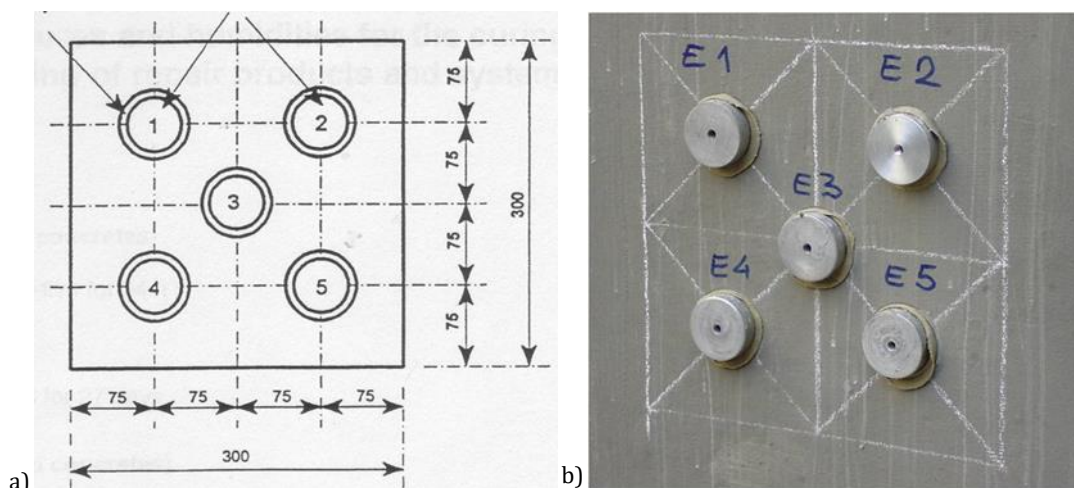
Za sanaciju betonskih konstrukcija koriste se reparaturni malteri i reparaturni sitnozrni betoni. Pod reparaturnim (malterskim) kompozitima podrazumevaju se materijali kojima se u postupku sanacije površinski ili lokalno nadoknađuju oštećeni delovi betonskih ili zidanih konstrukcija [147]. Ovi malteri pripadaju grupi specijalnih materijala i sistema, koji prvenstveno služe za produženje eksploatacionog veka navedenih konstrukcija, a mogu se koristiti i preventivno, u cilju zaštite istih.

Reparaturni materijali moraju da zadovolje niz vrlo strogih zahteva u pogledu (i) kvaliteta samog materijala, (ii) postupaka spravljanja, kao i (iii) ugrađivanja. Konačan izbor reparaturnog materijala ne sme se obaviti pre nego što se definišu zahtevana svojstva koja će zadovoljiti ciljeve celokupnog projekta sanacije. Generalno, sva zahtevana svojstva mogu se podeliti u dve grupe [147]:

- Osnovna (zajednička) svojstva, koja su potrebna kako bi se izvela fundamentalno kvalitetna sanacija. Sa datog aspekta reparaturni malteri moraju da obezbede dobru prionljivost za podlogu, zapreminsku stabilnost za vreme i posle očvršćavanja (da nemaju ili da imaju vrlo malo skupljanje), termičku kompatibilnost sa materijalom, odnosno podlogom koja se sanira, odgovarajuću vrednost modula elastičnosti, lako pripremanje, ugrađivanje i obradu, jednaka ili veća mehanička svojstva od materijala koji se sanira, visoku vrednost pH faktora i što manju otvorenu poroznost.
- Posebna svojstva koja podešavaju performanse materijala radi obezbeđenja zahtevanih aspekata trajnosti, kao što su vodonepropustljivost, otpornost na dejstvo mraza, otpornost na agresivne uticaje (neorganske kiseline, baze, rastvori soli, organska jedinjenja i dr.), otpornost na habanje, propustljivost pare i gasova, postojanost na UV zračenje, viskoznost i dr.

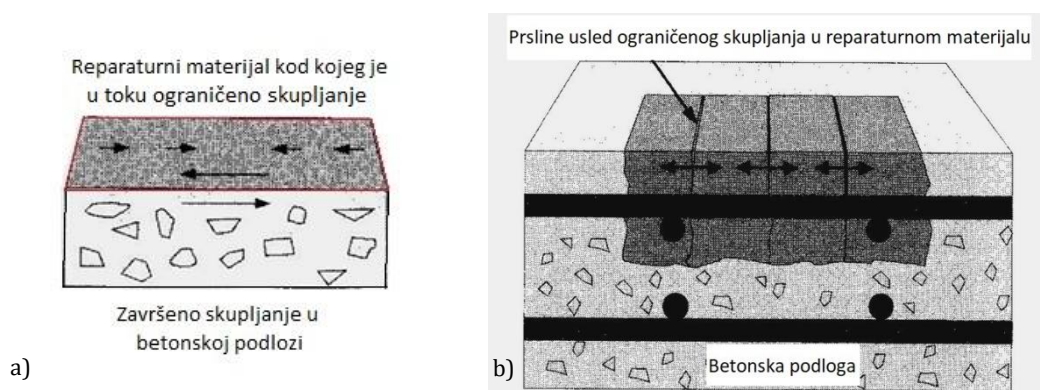
S obzirom da relativne dimenzione promene između reparaturnog materijala i podloge, koja je predmet sanacije, mogu da (i) naruše atheziju između reparaturnog materijala i betonske podloge, (ii) smanje nosivost saniranog elementa konstrukcije, (iii) ugroze trajnost konstrukcije, kao i da (iv) naruše izgled konstrukcije i objekta, neophodno je da reparaturni materijali imaju zadovoljavajuća sledeća osnovna svojstva:

- Adhezija – prionljivost za podlogu, predstavlja primarni uslov za dobru sanaciju i po metodi direktnog zatezanja (slika IV-2) ispituje se u skladu sa procedurom datom u standardu EN 1542 [157]. Sa aspekta sanacije, na atheziju najviše utiče kvalitet pripremljene podloge, termička kompatibilnost i skupljanje pri sušenju;



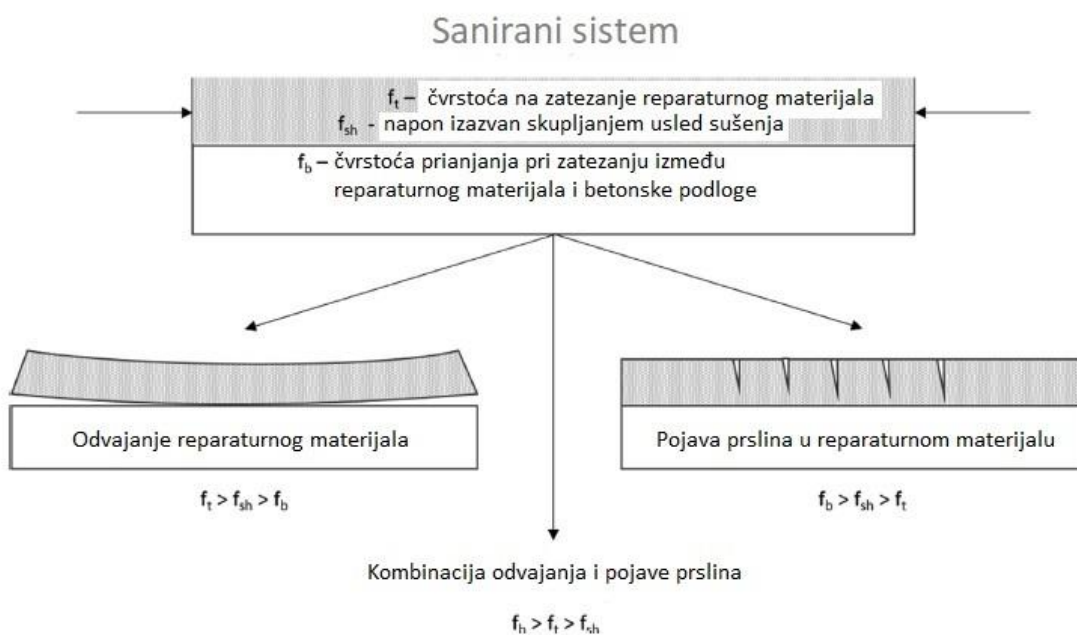
Slika IV-2. Lepljene pečata: a) Shema [157], b) Primer iz prakse [139]

- Skupljanje usled sušenja i ograničeno skupljanje –spada u vremenske deformacije betona/maltera. Za trajnost sanacije je od presudnog značaja izbor reparaturnog materijala sa minimalnim skupljanjem. Kada je proces skupljanja betonske podloge završen u prethodnom periodu, i kada se u novom sloju reparaturnog materijala javle deformacije skupljanja, dolazi do pojave napona zatezanja po kontaknoj površini između reparaturnog materijala i betonske podloge, slika IV-3a, odnosno dolazi do pojave ograničenog skupljanja. Da ne bi došlo do pojave prslina usled ograničenog skupljanja (slika IV-3b), pored izbora malterijala sa malim skupljanjem, potrebno je voditi računa o količini vode, kao i o adekvatnoj nezi reparaturnog materijala.



Slika IV-3. Ograničeno skupljanje usled sušenja reparaturnog materijala a) Pojava napona zatezanja po kontaknoj površini između reparaturnog materijala i betonske podloge [140], b) Pojava prslina u reparaturnom malteru usled ograničenog skupljanja [140]

U praksi je zabeležen veliki broj slučajeva nepovoljnog ponašanja saniranog sistema, odnosno saniranog uzorka, slika IV-4.



Slika IV-4. Mehanizmi oštećenja koji mogu da se jave u saniranom sistemu (uzorku) [109]

Analizom adhezije između betonske podloge i reparaturnog materijala, čvrstoće na zatezanje reparaturnog materijala i napona izazvanog skupljanjem usled sušenja reparaturnog maltera mogu se javiti sledeći slučajevi oštećenja saniranog sistema [109]:

- Odvajanje reparaturnog maltera od podloge, javlja se kada je čvrstoća na zatezanje reparaturnog materijala veća od napona skupljanja usled sušenja reparaturnog materijala, koji je veći od čvrstoće prijanjanja pri zatezanju reparaturnog maltera za betonsku podlogu;
- Pojava prslina u reparaturnom malteru, javlja se kada je čvrstoća prijanjanja pri zatezanju reparaturnog maltera za betonsku podlogu veća od napona skupljanja usled sušenja reparaturnog materijala, koji je veći od čvrstoće na zatezanje reparaturnog materijala;
- Kombinacija odvajanja i pojave prslina u reparaturnom malteru, javlja se kada je čvrstoća prijanjanja pri zatezanju reparaturnog maltera za betonsku podlogu veća od čvrstoće na zatezanje reparaturnog materijala, koja je veća od napona skupljanja usled sušenja reparaturnog materijala.

Zbog toga je važno odrediti granične vrednosti skupljanja usled sušenja za reparaturne materijale na bazi hidrauličnih veziva. Primer ispitivanja skupljanja usled sušenja reparaturnog maltera prikazan je na slici IV-5.



Slika IV-5. Ispitivanje skupljanja usled sušenja reparaturnog maltera: a) Oprema, b) Ispitivanje uzorka

Postupak za određivanje veličine skupljanja maltera usled sušenja opisan je u standardu SRPS B.C8.029 [155] i u standardu SRPS EN 12617-4 [20]: Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Metode ispitivanja - Poglavlje 6: Određivanje slobodnog (nesprečenog) skupljanja i bubrenja, dok je u poglavlju 7 istog standarda opisan postupak ispitivanja ograničenog skupljanja.

- Termički koeficijent linearnog širenja α_t ($1/^\circ\text{C}$) – predstavlja dilataciju štapa izrađenog od nekog materijala pri promeni temperature za 1°C . U slučaju betona i cementnog maltera, α_t iznosi od $8-12 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ i od $10-12 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, respektivno [90], stoga reparaturni materijali na bazi cementa imaju termički koeficijent koji je veoma sličan koeficijentu kod betona. Polimerni materijali bez punioca (metilmeta-krilat, epoksidi, poliestri, poliuretani i butadien-stireni) imaju od 4-18 puta veći termički koeficijent od betona [140]. Primenom punioca (kamenog brašna i agregata) može da se poboljša termička kompatibilnost polimernih materijala i betonske podloge [140]. U takvim slučajevima vrednost termičkog koeficijenta je za 1,5 - 5 puta veća od termičkog koeficijenta betona. U saniranom betonskom elementu (i) neće se pojaviti dodatno naprezanje ukoliko su vrednosti termičkih koeficijenata betonske podloge i reparaturnog materijala jednake, odnosno (ii) javiće se dodatna naprezanja kada su vrednosti termičkih koeficijenata betonske podloge i reparaturnog materijala različite [140]. Pojava dodatnog naprezanja u saniranom sistemu može da dovede do narušavanja adhezije između reparaturnog materijala i podloge, kao i da dovede do pojave deformacija [140].
- Statički modul elastičnosti – predstavlja sekantni modul. Kada je reč o proizvodima i sistemima za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija, statički modul elastičnosti pri pritisku reparaturnog materijala se određuje u skladu sa metodama 1 i 2 koje su opisane u standardu EN 13412 [47]. Reparativni

materijali koji sadrže polimere kao vezivo (primenjuje se metoda 1) imaju veće tečenje u odnosu na reparaturne materijale koji imaju polimerom modifikovano vezivo ili vezivo sa cementnim svojstvima (primenjuje se metoda 2). Na slici IV-6 prikazano je ispitivanje sekantnog modula.



Slika IV-6. Ispitivanje sekantnog modula maltera [140]

U slučaju konstrukcijske sanacije potrebno je da moduli elastičnosti reparaturnog materijala i betonske podloge budu jednaki, dok je u slučaju nekonstrukcijske sanacije poželjno koristiti materijale sa nižim modulom elastičnosti [159].

- Tečenje – spada u vremenske deformacije betona/maltera. Pod tečenjem betona/maltera podrazumijeva se pojava postepenog rasta deformacija tokom vremena usled dejstva konstantnog dugotrajnog opterećenja. Kada je reč o proizvodima i sistemima za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija, tečenje pri pritisku reparaturnog materijala se određuje u skladu sa procedurom datom u standardu EN 13584 [48]. U slučaju konstrukcijskih sanacija treba težiti da tečenje reparaturnih materijala bude što približnije tečenju betonske podloge, dok je za izvođenje zaštitnih slojeva pogodnije koristiti reparaturne materijale koji imaju veće tečenje [140].

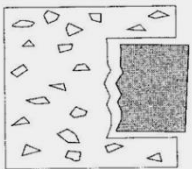
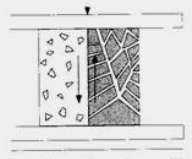
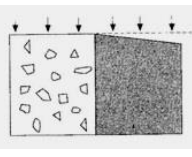
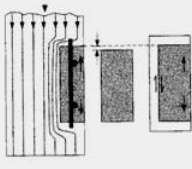
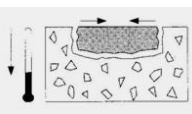
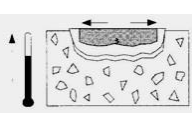
Svi nabrojani parametri koji utiču na kvalitet sanacije ilustrovani su i prikazani u tabeli IV-1.

Prema nameni, u skladu sa standardima iz grupe EN 1504, reparaturni malteri se dele na:

- Maltere za lokalnu popravku;
- Maltere za površinsku reparaciju.

Za navedenu grupu reparaturnih maltera data je klasifikacija, navedeni su uslovi kvaliteta i mogućnosti primene na osnovu odredbi serije standarda EN 1504, o čemu će detaljnije biti reči u okviru poglavlja IV 2. i IV 3.

Tabela IV-1. Tehnički zahtevi za reparaturne materijale [139]

Tehnički zahtevi	Nepoželjan odgovor - ponašanje (rezultat izbora pogrešnog materijala)	Potrebna svojstva	
Adhezija		Gubitak adhezije; Raslojavanje; Odvajanje reparaturnog materijala od podloge.	Adhezija pri zatezanju
Prijem i prenos opterećenja prema zahtevu projektanta		Ne nosi opterećenje kako je planirano, tj. preopterećenje podloge ili reparaturnog materijala.	Modul elastičnosti reparaturnog materijala sličan modulu elastičnosti podloge
		Prima i prenosi opterećenje na početku, ali kroz vreme dolazi do relaksacije reparaturnog materijala zbog deformacije tečenja.	Veoma malo tečenje pri pritisku
		Skupljanje (ograničeno) pri sušenju prouzrokuje smanjenje zapremine, što dovodi do redukcije sposobnosti prijema i prenosa opterećenja.	Veoma malo skupljanje pri sušenju
Promena ambijentalne temperature		Prsline u reparaturnom materijalu usled napona izazvanih termičkom kontrakcijom.	Termički koeficijent sličan podlozi
		Odvaljivanje reparaturnog materijala od podloge usled napona izazvanih termičkom ekspanzijom.	Termički koeficijent sličan podlozi

U pogledu sastava, odnosno različitih kombinacija veziva i dodataka, reparaturni malteri (koji se mogu naći na tržištu) pripadaju sledećim vrstama maltera [114]:

- Cementnih maltera;
- Cementnih maltera sa aditivima – hemijskim dodacima;
- Mineralno modifikovanih cementnih maltera;
- Polimerom modifikovanih cementnih maltera;
- Polimernih (epoksidnih) maltera.

Navedene vrste maltera mogu da se kupe kao fabrički pripremljene mešavine (i u varijanti mikroarmiranih maltera) ili se spravljaju po sopstvenoj recepturi. Prve četiri vrste prethodno navedenih maltera koriste se za lokalnu popravku i za površinsku popravku dubljih oštećenja u betonskim elementima. Za sanaciju oštećenja dubine između 1-5 cm koriste se reparaturni malteri sa maksimalnom veličinom zrna agregata od 4 mm, dok se dublja oštećenja saniraju se različitim vrstama sitnozrnih reparaturnih betona [147]. Od reparaturnih maltera najčešće se koriste polimer-cementni malteri, odnosno polimer modifikovani malteri, dok se polimerni (epoksidni) malteri koriste za sanaciju plićih površinskih oštećenja (do dubine od cca 10 mm) [114].

Površinska reparacija obuhvata popravku plitkih i/ili dubokih oštećenja kojima je zahvaćen veći deo betonske površine. U navedene svrhe najčešće se koriste kompoziti na bazi cementa, prvenstveno zbog obezbeđenja kompatibilnosti sa betonskom podlogom [147].

Generalno, za spravljanje reparaturnih maltera najčešće se koriste sledeći komponentni materijali [114].

- Vezivo - CEM I, CEM III ili CEM IV, specijalne vrste cementa i razne vrste polimera;
- Mineralni i hemijski dodaci;
- Voda;
- Agregat – prvenstveno kvarcni pesak sa maksimalnom veličinom zrna agregata od 4 mm, mada se mogu spravljati i reparaturni betoni, najčešće sa maksimalnom veličinom zrna agregata od 8 mm;
- Čelična, polimerna, staklena ili prirodna vlakna.

Izbor materijala za sanaciju je proces u kome se mora postići određeni kompromis. Pre samog izbora materijala za sanaciju potrebno je identifikovati ciljeve projekta [114].

- Uzroke deterioracije;
- Zahteve vlasnika (npr. životni vek, izgled, mogućnost korišćenja u toku sanacije, cena);
- Uslove za primenu (npr. očekivani vremenski uslovi, pristup konstrukciji, radni uslovi);
- Eksploatacione uslove (npr. vremenski uticaji, okruženje sa hemijskog aspakta, korisno opterećenje).

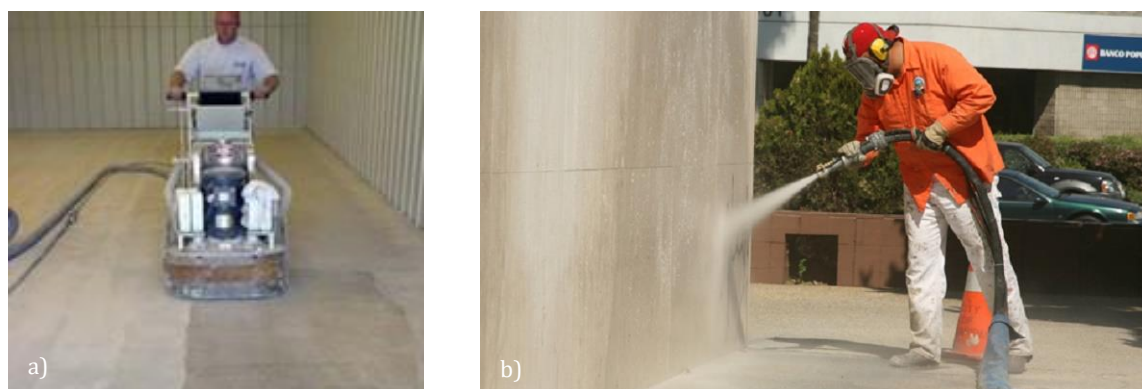
Nakon toga se definišu svojstva materijala potrebnih za ispunjenje ciljeva projekta, potom sledi identifikacija materijala ili sistema koji će obezbediti zahtevana svojstva,

nakon čeka sledi izbor materijala ili sistema koji obezbeđuje optimalni balans između svojstava, rizika i cene.

Pre nanošenja reparaturnih maltera mora se obaviti adekvatna priprema betonske površine za sanaciju radi uklanjanja labavih, trošnih i oštećenih delova betona kao i radi dobijanja adekvatne podloge za nanošenje odabranog reparaturnog materijala. Na taj način reparaturni malteri se nanose na "zdravu", kompaktnu i čistu betonsku površinu. Za uklanjanje oštećenih delova i pripremu površine betona za sanaciju mogu se primeniti različite tehnike koje se u osnovi dele na tehnike za grubo uklanjanje većih ili manjih količina betona (npr. udarne metode (slika IV-7a), voda pod pritiskom (slika IV-7b), metode cepanja itd.) i tehnike za finu pripremu površine betona za sanaciju (npr. čišćenje hemikalijama, nagrivanje kiselinama, mehanički (slika IV-8) i hidromehanički postupci itd.). Sva "otkrivena" armatura se mora očistiti od korozionih naslaga i cementnog kamena primenom žičane četke, dok se u slučaju velikih površina sa vidljivom armaturom primenjuje voda pod pritiskom [147].



Slika IV-7. Metode za grubo uklanjanje oštećenja: a) Udarna metoda – primena pneumatskog čekića [78], b) Voda pod pritiskom [80]



Slika IV-8. Metode za finu pripremu površine betona za sanaciju: a) Brušenje [83], b) Peskarenje [77]

Pojedini reparaturni malteri mogu zahtevati nanošenje odgovarajuće vrste predpremaza radi ostvarivanja bolje prionljivosti maltera za podlogu. Materijali za povećanje prionljivosti na bazi cementa se uglavnom nanose prskanjem ili četkama,

dok se sredstva na bazi epoksida i lateksa nanose pomoću valjka, četke ili prskanjem [147]. Bez obzira da li se koristi materijal za povećanje prionljivosti, pre nanošenja reparaturnog maltera potrebno je ispitati čvrstoću na zatezanje betonske podloge (koja se sanira) primenom "pull-off" metode.

Reparaturni malteri se sa aspekta postupka ugrađivanja (nanošenja) dele na [147]:

- Reparaturne maltere koji se ugrađuju/nanose ručno (*hand/trowelled*), Slika IV-9a;
- Mašinski nanete (prskane) reparaturne maltere (*Sprayed Concrete Repair Mortars*), Slika IV-9b;
- Reparaturne maltere koji se ugrađuju nalivanjem (*Flow Applied*), Slika IV-9c.



Slika IV-9. Metode nanošenja reparaturnog materijala: a) Ručno nanošenje maltera mistrijom [98], b) Prskanje betonom [79] i c) Ulivanje betona [98]

Moguće je i ručno ugrađivanje reparaturnih maltera, i to na dva načina: mistrijom i tehnikom "suvog" pakovanja.

2. REPARATURNI MALTERI U SKLADU SA EN 1504

Zaštita, reparacija i ojačanje (tj. rehabilitacija) betonskih konstrukcija zahteva relativno složen proces projektovanja, dimenzionisanja i kontrole izvedenih radova. Serijom Evropskih standarda EN 1504 (1-10) definišu se principi sanacije betonskih konstrukcija koje su oštećene, odnosno definišu se smernice za izbor proizvoda i sistema za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija, principi njihove opšte primene, kao i principi primene proizvoda i sistema na terenu, uključujući i kontrolu kvaliteta tih radova. Serija EN 1504 se sastoji od ukupno 10 standarda:

- EN 1504-1, Definicije;
- EN 1504-2, Sistemi za zaštitu površine betona;
- EN 1504-3, Konstrukcijske i nekonstrukcijske sanacije;
- EN 1504-4, Konstrukcijsko povezivanje;

- EN 1504-5, Injektiranje betona;
- EN 1504-6, Ankerovanje čelične armature;
- EN 1504-7, Zaštita armature od korozije;
- EN 1504-8, Kontrola kvaliteta i vrednovanje usaglašenosti;
- EN 1504-9, Opšti principi za upotrebu proizvoda i sistema;
- EN 1504-10, Primena proizvoda i sistema na terenu i kontrola kvaliteta radova.

Napomena: U okviru IV poglavlja ukoliko uz skraćeni naziv standarda nije navedena referenca ili godina, smatra se da se radi o najnovijoj verziji standarda.

U ovim standardima opisani su sledeći koraci po kojima se radi sanacija oštećenih betonskih konstrukcija [142]:

- Procena zatečenog stanja betonske konstrukcije;
- Određivanje uzroka oštećenja;
- Određivanje cilja sanacije oštećene betonske konstrukcije;
- Izbor relevantnih principa za sanaciju oštećene betonske konstrukcije;
- Izbor metoda za sanaciju oštećene betonske konstrukcije;
- Definicija svojstava reparaturnih materijala i sistema za sanaciju oštećene betonske konstrukcije ili njenih elemenata;
- Specifikacija zahteva za održavanje koje bi uvek trebalo da sledi rehabilitaciju oštećene betonske konstrukcije ili njenih elemenata.

Standardi EN 1504 ne isključuju mogućnost primene i drugačijih metoda od onih koje su navedene u EN 1504-9. Međutim, primena takvih metoda dozvoljena je samo u opravdanim situacijama, i tada je neophodno dostaviti dokumentaciju o svojstvima i karakteristikama primenjenih proizvoda i sistema za sanaciju.

U skladu sa standardom EN 1504-9 [52] postoji ukupno **šest projektnih faza** u okviru postupka sanacije i zaštite betonske konstrukcije:

1. Informacije o konstrukciji – uslovi korišćenja konstrukcije, analiza projektno-tehničke dokumentacije i podataka o prethodnim sanacijama i održavanju;
2. Procena stanja – definisanje defekata i oštećenja i njihova klasifikacija; uzroci koji su doveli do oštećenja defekata;
3. Strategija rada – mogućnosti, principi, metode i bezbednosna procena konstrukcije u toku izvođenja zaštite i sanacije;
4. Projekat sanacionih radova – konkretna namena odabranih reparaturnih materijala; zahtevi u pogledu podloge (*substrate*), reparaturnih materijala i

radova; specifikacije; crteži; bezbednosna procena konstrukcije u toku izvođenja zaštite i sanacije;

5. Sanacioni radovi – izbor i upotreba materijala i sistema za sanaciju, metoda i opreme; kontrola kvaliteta; uticaj na zdravlje i bezbednost;

6. Prijem izvedenih sanacionih radova – provera izvedenih radova; eventualni naknadni radovi; dokumentacija.

Navedene faze projekta sanacije se pozivaju na sledeće klauzule standarda EN 1504-9 kao i na druge standarde iz serije EN 1504, i to na sledeći način:

1. faza - klauzula 4 standarda EN 1504-9;
2. faza - klauzula 4 standarda EN 1504-9;
3. faza - klauzule 5 i 6 standarda EN 1504-9;
4. faza - klauzule 6, 7 i 9 standarda EN 1504-9, kao i standardi EN 1504(2-7);
5. faza - klauzule 6, 7, 9 i 10 standarda EN 1504-9, kao i standard EN 1504-10;
6. faza - klauzula 8 standarda EN 1504-9, kao i standard EN 1504-10.

Oštećenja i propadanje betonskih konstrukcija mogu da se posmatraju sa aspekta:

- Oštećenja samog betona;
- Korozije čelične armature.

Osnovni uzroci oštećenja betona su sledeći:

- Mehanička dejstva (npr. udar, preopterećenje, pomeranja konstrukcije kao što je npr. neravnomerno sleganje, eksplozija, vibracije, seizmička aktivnost);
- Hemijska dejstva (npr. alkalno-agregatna reakcija, biološka aktivnost iz okruženja, dejstvo agresivnih agenasa kao što su kiseline, soli ili meka voda);
- Fizička dejstva (npr. zamrzavanje/odmrzavanje, termički efekti, ekspanzija usled kristalizacije soli, skupljanje, erozija, habanje);
- Dejstvo požara.

Osnovni uzroci koji dovode do korozije čelične armature su:

- Odljuskavanje zaštitnog sloja betona;
- Hemijski gubitak alkalnosti u zaštitnom sloju betona kao rezultat hemijske reakcije sa CO₂ iz atmosfere (karbonatizacija);
- Korozivni zagađivači (npr. hloridne soli iz komponentnih materijala, morska ili podzemna voda, soli za odmrzavanje puteva);
- Zalutala električna struja sprovedena ili indukovana u armaturi iz susednih električnih instalacija.

U okviru standarda za sanaciju i zaštitu betonskih konstrukcija EN 1504-9 [52] definisani su različiti principi za upotrebu proizvoda i sistema, kao i metode sanacije, radi sprečavanja ili zaustavljanja različitih procesa koji dovode do deterioracije betona i korozije armature. Predmetni principi [52][98] dele se na:

- Principe za sanaciju oštećenja betona (principi od 1 do 6):
 - Princip 1 - Zaštita od prodora (smanjenje ili prevencija prodora štetnih agenasa, tj. vode, ostalih tečnosti, pare, gasova, hemikalija i bioloških agenasa, tretiranjem betonske površine (npr. korišćenjem sistema za zaštitu površine prema EN 1504-2 [50]) ili zaptivanje pukotina (npr. injektiranjem prema EN 1504-5 [51], ili bandažiranjem ili popunjavanjem površine));
 - Princip 2 - Kontrola vlage (prilagođavanje i održavanje sadržaja vlage u betonu unutar određenih granica);
 - Princip 3 - Restauracija betona (Restauracija betona do originalne specifikacije i funkcije, i restauracija betonske konstrukcije zamenom dela konstrukcije);
 - Princip 4 – Ojačanje konstrukcije (Ojačanje ili vraćanje originalne nosivosti betonske konstrukcije ili elementa betonske konstrukcije.);
 - Princip 5 – Povećanje fizičke otpornosti (Povećanje otpornosti na fizičke i mehaničke uticaje.);
 - Princip 6 - Otpornost na dejstvo hemikalija (Povećanje otpornosti površine betona na oštećenja usled hemijskog delovanja.);
- Principe za sanaciju oštećenja izazvanih korozijom armature (principi od 7 do 11):
 - Princip 7 – Očuvanje ili obnavljanje pasivnosti (Stvaranje hemijskih uslova u kojima se površina armature održava ili vraća u pasivno stanje.);
 - Princip 8 – Jačanje otpornosti (Jačanje električne otpornosti betona);
 - Princip 9 – Kontrola katodne reakcije (Stvaranje uslova u kojima potencijalno katodne oblasti armature nisu u mogućnosti da sprovedu anodne reakcije.);
 - Princip 10 – Katodna zaštita (primenjuje se u slučajevima visoke kontaminacije hloridima i u karbonatizovanom betonu kada postoji visok rizik od korozije armature);
 - Princip 11 – Kontrola anodnih oblasti (Stvaranje uslova u kojima potencijalno anodne oblasti armature nisu u mogućnosti da učestvuju u reakcijama korozije).

U tabeli IV-2 prikazani su principi i metode koji se odnose na sanaciju oštećenja betona, dok su u tabeli IV-3 prikazani principi i metode koji se odnose na sanaciju oštećenja izazvanih korozijom armature.

Tabela IV – 2. Principi i metode koji se odnose na sanaciju oštećenja betona [52]

Princip	Primeri metoda zasnovanih na principima	Relevantan broj standarda iz serije EN 1504
1. Zaštita od prodora	1.1 Hidrofobna impregnacija	2
	1.2 Impregnacija	2
	1.3 Premazivanje (u debelom sloju)	2
	1.4 Površinsko bandažiranje pukotina	
	1.5 Popunjavanje pukotina	5
	1.6 Pretvaranje pukotina u spojnice	
	1.7 Postavljanje spoljašnjih panela*	
	1.8 Upotreba membrane *	
2. Kontrola vlage	2.1 Hidrofobna impregnacija	2
	2.2 Impregnacija	2
	2.3 Premazivanje (u debelom sloju)	2
	2.4 Postavljanje spoljašnjih panela	
	2.5 Elektrohemijski tretman	
3. Restauracija betona	3.1 Ručno nanet malter	3
	3.2 Ulivanje (sipanje) betona ili maltera	3
	3.3 Prskanje betona ili maltera	3
	3.4 Zamena elemenata	
4. Ojačanje konstrukcije	4.1 Dodavanje ili zamena ugrađene čelične armature	
	4.2 Dodavanje nosača aknerisanih u prethodno formirane ili izbušene rupe	6
	4.3 Ojačanje lepljenjem čeličnih, karbonskih ili drugih ploča/lamela za ojačanje	4
	4.4 Dodavanje maltera ili betona	3, 4
	4.5 Injektiranje pukotina, šupljina ili međuprostora	5
	4.6 Popunjavanje pukotina, šupljiva ili međuprostora	5
	4.7 Prednaprezanje	
5. Povećanje fizičke otpornosti	5.1 Premazivanje (u debelom sloju)	2
	5.2 Impregnacija	2
	5.3 Dodavanje maltera ili betona	3
6. Otpornost na dejstvo hemikalija	6.1 Premazivanje (u debelom sloju)	2
	6.2 Impregnacija	2
	6.3 Dodavanje maltera ili betona	3

* Ove metode se takođe mogu primeniti i za druge principe

Tabela IV – 3. Principi i metode koji se odnose na oštećenja izazvanih korozijom armature [52]

Princip	Primeri metoda zasnovanih na principima	Relevantan broj standarda iz serije EN 1504
7. Očuvanje ili obnavljanje pasivnosti	7.1 Povećanje zaštitnog sloja betona dodatnim malterom ili betonom	3
	7.2 Zamena kontaminiranog ili karbonatizovanog betona	3
	7.3 Elektrohemijaska realkalizacija karbonatizovanog betona	
	7.4 Realkalizacija karbonatizovanog betona difuzijom	
	7.5 Elektrohemijaska ekstrakcija hlorida	
8. Jačanje otpornosti	8.1 Hidrofobna impregnacija	2
	8.2 Impregnacija	2
	8.3 Premazivanje (u debelom sloju)	2
9. Kontrola katodne reakcije	9.1 Ograničavanje količine kiseonika (na katodi) zasićenjem ili premazivanjem površine	
10. Katodna zaštita	10.1 Primena električnog potencijala	
11. Kontrola anodnih oblasti	11.1 Premazi za armaturu koji sadrže hemijski aktivne pigmente	7
	11.2 Premazi za armaturu koji je izoluju od porne vode	7
	11.3 Primena inhibitora korozije kao dodatka betonu ili se nanosi na očvršli beton	

Pre nanošenja proizvoda i sistema za zaštitu i sanaciju, potrebno je podlogu adekvatno očistiti, pripremiti i ispitati u skladu sa EN 1504-10 [22].

3. ZAHTEVI ZA REPARATURNE MALTERE PREMA EN 1504-3

Evropski standard EN 1504-3 [23] obuhvata reparaturne maltere i betone, koji se mogu koristiti zajedno sa drugim proizvodima i sistemi, za restauraciju i/ili zamenu oštećenog betona i za zaštitu armature, čime će se produžiti eksploatacioni vek prethodno devastirane betonske konstrukcije. Oblasti primene su u skladu sa principima reparacije 3, 4 i 7 iz standarda EN 1504-9 [52] i sledećim metodama:

- Metoda 3.1 – Restauracija betona ručnim nanošenjem maltera.
- Metoda 3.2 – Restauracija betona ulivanjem/sipanjem betona.
- Metoda 3.3 - Restauracija betona prskanjem malterom ili betonom.
- Metoda 4.4 – Konstrukcijsko ojačanje dodavanjem maltera ili betona.
- Metoda 7.1 - Povećanje debljine zaštitinog sloja dodatnim malterom ili betonom koji sadrže SCM.
- Metoda 7.2 - Zamena kontaminiranog ili karbonizovanog betona.

Izbor sistema za reparaciju se vrši na osnovu procene stvarnih ili potencijalnih uzroka nastanka oštećenja, kao i na osnovu razmatranja odgovarajućih principa i metoda zaštite i reparacije, a koji su navedeni u poglavlju IV-2. U tabeli IV-4 su navedena svojstva konstrukcijskih i nekonstrukcijskih proizvoda i sistema za sanaciju koja se zahtevaju za „sve predviđene namene“ ili „za određene namene“ prema principima i metodama definisanim u EN 1504-9 [52].

Tabela IV – 4. Zahtevana svojstva konstrukcijskih i nekonstrukcijskih reparaturnih materijala za sve i određene namene [23]

Svojstvo	Reparaturni princip			
	3		4	
	Reparaturni metod			
	3.1, 3.2	3.3 ^a	4.4	7.1, 7.2
Čvrstoća pri pritisku	X	X	X	X
Sadržaj hloridnih jona ^b	X	X	X	X
Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju	X	X	X	X
Ograničeno skupljanje/širenje ^c	X	X	X	X
Trajnost - Otpornost na karbonatizaciju ^{b d}	X	X	X	X
Trajnost - Termička kompatibilnost - Deo 1 ili 2 ili 4 standarda EN 13687 ^e	x	x	x	x
Modul elastičnosti	x	x	X	x
Otpornost na habanje ^f	x	x	x	x
Koeficijent toplotnog širenja ^{c g}	x	x	x	x
Kapilarno upijanje ^{e h}	x	x	x	x

X – za sve predviđene namene

x – za određene namene

^a Zbog prirode same primene metode, neke od metoda ispitivanja se mogu modifikovati. Pogledati EN 14487-1.

^b Ovaj zahtev nije relevantan za sanaciju armiranog betona.

^c Ako je urađeno istitivanje putem termičkih ciklusa, ovo ispitivanje nije potrebno dodatno uraditi.

^d U slučaju kada se koristi sanacioni sistem koji uključuje sistem površinske zaštite sa dokazanom zaštitom od karbonizacije (videti EN 1504-2) ili polimerni malter/beton, ovaj test nije relevantan.

^e U zavisnosti od uslova izloženosti životnoj sredini.

^f Relevantno samo za oblasti na kojima se odvija saobraćaj.

^g Relevantno samo za polimerne maltere i betone.

^h Otpornost na koroziiju se dovodi u vezu sa zahtevima za sadržaj hlorida i vodopropusnosti proizvoda/maltera.

U tabeli IV-5 su prikazani početni identifikacioni zahtevi u pogledu navedenih svojstava, standardi u skladu sa kojima se ispitivanja izvode kao i informacije u vezi tolerancijama.

Tabela IV – 5. Identifikacioni zahtevi prema [23]

Svojstvo	Standard	Tolerancije deklarirane od strane proizvođača
Granulometrijski sastav suvih komponenti	EN 12192-1	Proizvođači su odredili vrednosti i tolerancije
Infracrvena analiza ^a	EN 1767	Potvrđeno poređenjem ^b
Čvrstoća pri pritisku	EN 12190	Veća od 80% vrednosti određene od strane proizvođača
Zapreminska masa	EN 12190	± 5 %
Vreme očvršćavanja ^c	EN 13294	Proizvođači određuju vrednosti i tolerancije
Obradljivost – tiksotropni malter ^d	EN 13395-1	Proizvođači određuju vrednosti i tolerancije
Obradljivost – rasprostiranje maltera ^d	EN 13395-2	Proizvođači određuju vrednosti i tolerancije
Obradljivost – rasprostiranje betona ^d	EN 13395-3	Proizvođači određuju vrednosti i tolerancije
Termogravimetrijska analiza ^e	EN ISO 11358	Potvrđeno na osnovu poređenja ^b
Epoksidni ekvivalent ^e	EN 1877-1	± 5 %
Delovi amina ^e	EN 1877-2	± 6 %
Period upotrebljivosti smeše ^e	EN ISO 9514	± 20 %
Sadržaj isparljivih/neisparljivih materija u tečnim komponentama ^e	EN ISO 3251	± 10 %

^a za sve proizvode koji sadrže organske materijale

^b proveriti da li postoje znaci promene u sastavu

^c kao alternativni metod, promena obradljivosti u toku vremena po metodama opisanim u standima EN 13395 (1-3)

^d zavisi od svojstava materijala

^e samo za PC

U tabeli IV-6 navedena su svojstva materijala i sistema za reparaciju koja trebaju da se ispituju, standardi po kojima se navedena ispitivanja rade, kao i zahtevi koji treba da budu ispunjeni kako bi se materijal/malter svrstao u jednu od kategorija:

- Konstrukcijski reparaturni materijali/malteri:
 - Klasa R4;
 - Klasa R3.
- Nekonstrukcijski reparaturni materijali/malteri:
 - Klasa R2;
 - Klasa R1.

Pod konstrukcijskim reparaturnim materijalima i sistemima podrazumevaju se materijali i sistemi koji se nanose na betonsku podlogu kako bi se zamenio oštećeni beton ili da bi se obnovio integritet kao i trajnost konstrukcije [49]. Nekonstrukcijski reparaturni materijali i sistemi predstavljaju materijale i sisteme koji kada se nanesu

na betonsku podlogu obnavljaju konstrukciju sa geometrijskog ili estetskog aspekta [49].

Da bi se ispitale čvrstoća prijanjanja pri zatezanju reparaturnog materijala za betonsku podlogu, ograničeno skupljanje/širenje, kao i sve tri vrste termičke kompatibilnosti reparaturnog materijala i betonske podloge, neophodno je prvo napraviti betonske podloge i odnegovati ih u skladu sa standardom EN 1766 [24]. Pre nanošenja reparaturnog materijala, potrebno je adekvatno pripremiti površinu betonske podloge i ispitati je (peskarenje kvarcnim peskom u skladu sa standardom EN 1766 [24]).

Reparaturni materijali/malteri ne smeju da ispuštaju supstance opasne po zdravlje, higijenu i životnu sredinu.

Ukoliko reparaturni materijali/malteri sadrže ≤ 1 % po masi ili zapremini (u zavisnosti koja od njih je veća) homogeno raspoređene organske materije, može se deklarirati klasa A1 sa aspekta otpornosti na dejstvo požara, bez potrebe za ispitivanjem. Reparaturni materijali/malteri koji sadrže više od 1 % mase/zapremine homogeno raspoređene organske materije, klasifikuju se u skladu sa EN 13501-1 sa aspekta otpornosti na dejstvo požara.

Na osnovu analize oštećene betonske konstrukcije, sa aspekta kvaliteta postojećeg betona, intenziteta i vrste opterećenja, klimatskih i eksploatacionih uslova, određuje se klasa reparaturnog maltera kojim će se izvršiti predmetna sanacija. U nastavku su dati primeri upotrebe različitih klasa reparaturnih maltera [147]:

- Reparaturni malteri klase R4 – za sanaciju konstrukcija od betona visoke čvrstoće koje su izložene velikom opterećenju i/ili kada postoje posebni zahtevi sa aspekta trajnosti;
- Reparaturni malteri klase R3 - za sanaciju konstrukcija od betona normalne čvrstoće koje su izložene standardnom opterećenju i/ili kada postoje posebni zahtevi u pogledu trajnosti;
- Reparaturni malter klase R2 - za sanaciju betonskih konstrukcija, pri čemu sanirana zona ne učestvuje u prenosu opterećenja, u slučaju kada postoje određeni zahtevi u pogledu trajnosti;
- Reparaturni malter klase R1 - za sanaciju betonskih konstrukcija, pri čemu sanirana zona ne učestvuje u prenosu opterećenja i kada ne postoje nikakvi zahtevi sa aspekta trajnosti.

Tabela IV – 6. Zahtevi za konstrukcijske i nekonstrukcijske reparaturne proizvode/maltere sa aspekta svojstva [23]

Br.	Svojstvo	Referentna betonska podloga (EN 1766)	Standard	Zahtevi			
				Konstrukcijski reparaturni malter		Nekonstrukcijski reparaturni malter	
				Klasa R4	Klasa R3	Klasa R2	Klasa R1
1	Čvrstoća pri pritisku	-	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
2	Sadržaj hloridnih jona	-	EN 1015-17	≤ 0,05%		≤ 0,05%	
3	Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju - "pull-off" metoda	MC(0,40)	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
4	Ograničeno skupljanje/širenje ^{b c}	MC(0,40)	EN 12617-4	Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju nakon testa ^{d e}			Bez zahteva
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
5	Otpornost na karbonatizaciju ^f	-	EN 13295	$d_k \leq$ referentni beton (MC(0,45))		Bez zahteva ^a	
6	Modul elastičnosti	-	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Bez zahteva	
7	Termička kompatibilnost - 1. deo Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje ^{f h}	MC(0,40)	EN 13687-1	Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju nakon 50 ciklusa ^{d e}			Vizuelni pregled nakon 50 ciklusa ^e
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
8	Termička kompatibilnost - 2. deo - Ciklične toplotne promene ^{f h}	MC(0,40)	EN 13687-2	Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju nakon 30 ciklusa ^{d e}			Vizuelni pregled nakon 30 ciklusa ^e
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
9	Termička kompatibilnost - 4. deo - Toplotni ciklusi u suvim uslovima ^{f h}	MC(0,40)	EN 13687-4	Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju nakon 30 ciklusa ^{d e}			Vizuelni pregled nakon 30 ciklusa ^e
				≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa ^a	
10	Otpornost na habanje	-	EN 13036-4	I klasa: > 40 jedinica (mokro ispitivanje) II klasa: > 40 jedinica (suvo ispitivanje) III klasa: > 55 jedinica (mokro ispitivanje)		I klasa: > 40 jedinica (mokro ispitivanje) II klasa: > 40 jedinica (suvo ispitivanje) III klasa: > 55 jedinica (mokro ispitivanje)	
11	Koeficijent termičke toplotnog širenja ^c	-	EN 1770	Deklarisana vrednost, ili se ne zahteva u slučaju kada je ispitano svojstvo 7, 8 ili 9		Deklarisana vrednost, ili se ne zahteva u slučaju kada je ispitano svojstvo 7, 8 ili 9	
12	Kapilarno upijanje	-	EN 13057	≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}		≤ 0,5 kg·m ⁻² ·h ^{-0,5}	Bez zahteva

* d_k – dubina karbonatizacije (mm)

U okviru tabele IV-6 korišćena slova u superskriptu upućuju na sledeće:

- a – vrednost 0,8 MPa se ne zahteva kada dođe do kohezivnog loma u reparaturnom materijalu. Ako se javi kohezioni lom, zahteva se zatezna čvrstoća od minimum 0,5 MPa;
- b – ne zahteva se za sanacionu metodu 3.3;
- c – ne zahteva se ako su sprovedeni termički ciklusi;
- d – srednja vrednost bez pojedinačne vrednosti manje od 75% minimalne zahtevane vrednosti;
- e – najveća dozvoljena prosečna širina prsline $\leq 0,05$ mm, bez pojedinačnih prsline $\geq 0,1$ mm i bez raslojavanja;
- f – za trajnost;
- g – nije pogodno za zaštitu od karbonizacije, osim ako reparaturni sistem ne sadrži i površinski zaštitni sistem sa dokazanom otpornošću na dejstvo karbonatizacije;
- h - Izbor metode zavisi od uslova izlaganja. Kada proizvod zadovoljava 1. deo, smatra se da zadovoljava 2. i 4. deo.

V
PREGLED RELEVANTNE
LITERATURE IZ OBLASTI
ISTRAŽIVANJA

1. PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA CEMENTNIH PASTA, MALTERA I BETONA KOJI SADRŽE PRIRODNI ZEOLIT ILI ELEKTROFILTERSKI PEPEO

Zarad lakše preglednosti i praćenja referenci, sa aspekta primene cementnih pasta maltera i betona koji sadrže prirodni zeolit ili elektrofilterski pepeo kao SCM, u tabeli V-1 su navedeni relevantni radovi sa osnovnim podacima i smernicama u vezi sa primenjenim materijalima i urađenim ispitivanjima od strane citiranih autora, izuzev u slučaju izluživanja elemenata u tragovima, čiji pregled je dat isključivo u poglavlju V-1.7.

Tabela V-1. Relevantni radovi i osnovni podaci i smernice u vezi sa primenjenim materijalima i urađenim ispitivanjima od strane citiranih autora

Naziv rada	Autori	Materijal - veziva	Hidratacija, ispitivanje mikrostrukt.	Čvrstoće	Otpornost na prodor hlorida	Otpornost na dejstvo sulfata	Otpornost na dejstvo mraza	Skupljanje usled sušenja	Kapilarno upijanje	Nega
A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes (1999)	C.S. Poon, L. Lam, S.C. Kou, Z.S. Lin [132]	Paste: NZ (klinoptilolit, Kina) 15 i 25%, FA 25% PC ASTM TIP I, W/CM= 0,25 i 0,3	Stepen pucolanske reakcije (gubici žarenjem), Poroznost (živina porozimetrija)	Na 3, 7, 28, 90 i 180 dana						U vodi
Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production (2004)	F. Canpolat sa koautorima [30]	Paste: NZ (Manisa, Turska) 5, 10, 15, 20, 30, 35%, FA (Turska) 5% u kombinaciji sa prethodno navedenim količinama zeolite, PC I 42,5, W/CM varira	Ekspanzija TS 10156,	Na 2, 7, 28 i 90 dana						
Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material (2011)	C. Bilim [14]	Malteri: NZ (klinoptilolit, Turska), 0, 5, 10, 15, 20 i 30% CEM I 42,5 R W/CM= 0.5	Poroznost (nakon 28 dana)	Na 2, 7, 28, 56 i 90 dana TS EN 1015-11 Uzorci: 40*40*160 mm			Uzorci 40*40*160 mm starosti 28 dana 50 ciklusa: 3h na -20°C, potom se potapaju u vodu temp. 20°C na 0.5h			Čvrstoće - nega u vodi
Evaluation of West Texas natural zeolite as an alternative of ASTM Class F fly ash (2013)	C.S. Shon, Y.S. Kim [149]	Malteri: NZ (SAD), 10 i 20%, FA Klasa F 20%, ASTM TIP I PC, W/CM= 0,48	Mineral. Karakterizacija (XRD), hem. karakt. (XRF), hidratacija (Chapelle test)	Nakon 7, 28 i 90 dana		ASTM C 1012		ASTM C 806 Do 91. dana		
Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete (2011)	C. Karakurt I.B. Topcu [96]	Malteri: NZ (Turska)/ FA (klasa F) 10, 20, 30, 40 i 45% + 5% kreč + 3% gips NZ+FA (20%), NZ+GBFS (10%), NZ+GBFS (20%), NZ+FA+GBFS (10%) CEM II	XRD NZ, FA i GBFS SEM uzoraka maltera nakon izlaganja dejstu sulfata	Nakon 2, 7, 28 i 180 dana TS EN 196-1		ASTM C 1012 Uzorci su negovani 6 meseci u 10% rastvoru Na ₂ SO ₄				Čvrstoće - nega u krečnoj vodi Sulfati - nega prema ASTM C 511 23°C i 95% RH

Naziv rada	Autori	Materijal - veziva	Hdratacija, Ispitivanje mikrostrukture	Čvrstoće	Otpornost na prodor hlorida	Otpornost na dejstvo sulfata	Otpornost na dejstvo mraza	Skupljanje usled sušenja	Kapilarno upijanje	Nega
Sulphate resistance and passivationability of the mortar made from pozzolan cement with zeolite (2008)	I. Janotka, L. Krajiči [89]	Malter: NZ (Slovačka) u CEM IV/A (P) CEM I 42,5, W/CM= 0,6	Produkti hidratacije (DTA)	Nakon 28+90/365/ 720 dana izlaganja dejstvu sulfata		5% Na ₂ SO ₄ Uzorci za merenje ekspanzije: 20*20*120 mm, za čvrstoće: 40*40*160 mm				Nega u vodi
Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material (2010)	B. Ahmadi, M. Shekarchi [3]	Betoni: NZ (klinoptilolit, Iran) 5, 10, 15 i 20% ASTM TIP II PC W/CM= 0,4	Stepen pucolanske reakcije (gubici žarenjem, TGA na 1, 3, 7 14 i 28 dana)	Na 3, 7, 28 i 90 dana	Nakon 90 dana Priprema uzoraka: ASTM C 1556 Ispitivanje: ASTM C 1152 i 114					Nega u vlažnoj sredini na temp. vazuda od 23°C
Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes (1999)	S.Y.N. Chan, X. Ji [32]	Betoni (HPC): Seriya 1: NZ (Kina)/FA (Hong Kong) 5, 10, 15 i 30% W/CM= 0.28 Seriya 2: NZ /FA 5, 10, 15i 30%, W/CM=0,27; 0,33; 0,39; 0,45 OPC po BS 4550			Uzorci stari 28 dana izloženi su dejstvu hlorida 30 i 60 dana, Sadržaj hlorida je određen prema BS1881				Nakon 28 dana prema BS1881: Part 5 W/CM= 0.28	
An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan (2012)	M.Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, M. Shekarchi [127]	Betoni: NZ (klinoptilolit, Iran) 15 i 30% ASTM TIP II PC W/CM= 0,5	Puc. Reaktivnost (TGA)	Nakon 7, 14, 28, 90 i 356 dana	Nakon 28 i 90 dana ASTM C1202	28 dana standardne nege + 28 dana u lab. Uslovima + 300 dana izloženosti sumpornoj kiselini		Nakon 28 dana nege		Nakon 28 i 90 dana nege
A new look to an old pozzolan: Clinoptilolite – A promising pozzolan in concrete (2007)	D. Jana [88]	Betoni/ malteri: NZ (klinoptilolit, Iran) 10, 20, 30 i 40% ASTM TIP II PC W/CM zavisi od vrste ispitivanja	Mikrostruktura (SEM), Puc. reaktivnost (SEM, DSC, TGA, i XRD)	Nakon 3, 7, 28 i 56 dana	ASTM C 1202	ASTM C 1012 (malteri)		ASTM C 311		
Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study (2013)	M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, S. Khani [179]	Betoni: NZ 10, 20, i 30% ASTM TIP II PC W/CM= 0,4		Nakon 7 i 28 dana	NT Build 443- difuzija hlorida ASTM C 114 – merenje količine hlorida. Uzorci betona: cilindri prečnika 150 mm i visine 100 mm				Nakon 180 dana merenje prema Rilem-OPC-11.2 Uzorci betona: kocke stranice 100 mm	Nakon 28 dana merenje prema BS1881-122 i ASTM C 642 Uzorci betona: kocke stranice 300 mm

Naziv rada	Autori	Materijal - veziva	Hdratacija, Ispitivanje mikrostrukture	Čvrstoće	Otpornost na prodor hlorida	Otpornost na dejstvo sulfata	Otpornost na dejstvo mraza	Skupljanje usled sušenja	Kapilarno upijanje	Nega
Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash (2013)	F.A. Sabet, N.A. Libre, M. Shekarchi [145]	Betoni (SCHPC): NZ (Iran) 10, i 20% FA 10 i 20% ASTM TIP II PC W/CM= 0,33		Nakon 3, 28, 90 i 180 dana prema ASTM C 39	NT Build 443 (nakon 90 dana izlaganja dejstvu hlorida) ASTM C 1152.					CEB-FIP merenje nakon 30 min i 72h
Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance (2015)	E.Vejmelkova sa koautorima [181]	Betoni: NZ (ZEOBAU 200) 10, 20, 40 i 60% CEM I 42,5 R W/CM= 0,45	Pucolanska reaktivnost (Chapelle test)	Nakon 28, 90 i 360 dana			Prema ČSN 731322/Z1, nakon standardne nege od 28 dana podvrgavaju se na 100 ciklusa (4h na -20°C i 2h u vodi), Prema ČSN 731326/Z1 na dejstvo mraza+soli (3% NaCl)		Koef. Kapilarnog upijanja	
Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes (2012)	M. Uysal, V. Akyuncu [178]	Betoni: FA (klasa F) 10, 20, 40 i 60% CEM I 42,5 R W/CM= 0,45		Nakon 28 i 90 dana	ASTM C 1202 na uzorcima starosti 90 dana		ASTM C 666 procedura B, 300 ciklusa Preko gubitka mase, čvrstoće pri savijanju I UPV		Nakon 90 dana prema ASTM C 1585	
Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete (2013)	M.M. Ranjbar sa koautorima [141]	Betoni (SCC): NZ (Iran) 5, 10, 15 i 20% ASTM TIP I PC W/CM= 0,45 i 0,38		Nakon 3, 7, 14, 28 i 90						Nakon 28 i 90 dana CEB-FIP

Zelena boja se odnosi isključivo na korišćenje prirodnog zeolite kao SCM

Plava boja se odnosi isključivo na korišćenje elektrofilterskog pepela kao SCM

1.1. Čvrstoća pri pritisku

Generalno, teško je predvideti uticaj NZ kao SCM na čvrstoće maltera i betona. Mnogi parametri utiču na čvrstoće, kao što je vodo-vezivni faktor, procenat zamene cementa sa NZ (u odnosu na masu), mineraloški i hemijski sastav NZ, njegova pucolanska reaktivnost, finoća mliva, količina čistog zeolita u zeolitskom tufu itd.

Uticaj vodo-vezivnog faktora - U pogledu vodo-vezivnog faktora, dosadašnja istraživanja su pokazala da NZ više doprinosi razvoju čvrstoća pri njegovim nižim vrednostima. Poon je sa koautorima [132] ispitaio uticaj različitog vodo-vezivnog faktora (w/cm –od 0,25 i 0,30) na svojstva cementno-zeolitne paste i ustanovio je da su postignute veće čvrstoće pri nižem odnosu w/cm . Na osnovu istraživanja koje je sproveo Canpolat sa saradnicima [30] utvrđeno je da sa povećanjem udela NZ dolazi do porasta potrebe za vodom, kao i da je procenat potrebne vode kod cementno-zeolitnih pasta niži u odnosu na paste kod kojih je deo PC supstituisan sa mešavinom NZ i FA.

Ahmadi i Shekarchi [3] su ustanovili da su čvrstoće pri pritisku betona, koji je spravljen sa $w/cm = 0,40$ i koji sadrži NZ kao SCM, nakon 3, 7, 28 i 90 dana veće u odnosu na kontrolnu mešavinu (najverovatnije zbog visokog nivoa čistoće upotrebljenog zeolita, 90-95%). Prema Chan i Ji [32] betoni spravljeni sa NZ ili FA imaju veće čvrstoće pri pritisku u odnosu na kontrolne pri w/cm od 0,27, 0,33 i 0,39 dok su pri 0,45 skoro dostigli vrednost kontrolnih. U skladu sa prethodno navedenim Najimi je sa saradnicima [127] dobio slične rezultate, odnosno betoni koji su spravljeni sa w/cm od 0,50 imali su za sve starosti (uključujući i 356 dana) manje čvrstoće u odnosu na kontrolnu mešavinu.

Međutim, malteri ($w/cm = 0,48$) kod kojih je 10% i 20% cementa zamenjeno sa NZ, odnosno 10% sa FA, nakon 91-og dana nege sustigli su i premašili čvrstoće kontrolne mešavine [149]. Takođe je i Bilim [14] u svom istraživanju dobio veće čvrstoće cementno-zeolitnih maltera starosti 2, 7, 28, 56 i 90 dana, spravljenih sa w/cm od 0,5, u odnosu na kontrolne uzorke. Karakurt i Topcu [96] su ispitali čvrstoće pri pritisku maltera (w/cm od 0,5) spravljenih sa Portland-kompozitnim cementima koji sadrže različite količine i kombinacije NZ, FA i GBFS (zgure) i utvrdili su da su čvrstoće maltera sa NZ ili FA u količini do 30% kao i u slučaju mešavine NZ+FA (10%) i NZ+FA+GBFS (10%) nakon 180 dana veće u odnosu na čvrstoću maltera spravljenog sa CEM I 42,5.

Uticaj različitog procentualnog udela NZ i/ili FA - Poon je sa koautorima [132] ustanovio da su čvrstoće cementnih pasta koje sadrže 15% i 25% NZ, kao i one koje sadrže 25% FA kao SCM nakon 28 dana niže od kontrolnih. Posle 90 dana cementna pasta sa 25% FA je imala najveću čvrstoću, a potom sa 25% NZ, koja je bila u rangi sa

kontrolnom, dok je pasta sa 15% NZ imala manju čvrstoću od kontrolne. Nakon 180 dana je, generalno, došlo do povećanja čvrstoća cementno-zeolitnih pasta.

Ispitivanje koje je sproveo Canpolat sa saradnicima [30] je pokazalo da je već nakon 2 dana nege cementno-zeolitna pasta sa 15% NZ dostigla vrednost referentne čvrstoće. Na osnovu dobijenih rezultata (tabela V-2) autori [30] su zaključili da se postižu adekvatne čvrstoće pri supstituciji 20% PC sa NZ ili 10% PC sa mešavinom NZ i FA (5% NZ+5% FA), mada se postižu odlični rezultati i pri korišćenju 10% NZ+5% FA i 15% NZ+5% FA.

Tabela V-2. Čvrstoće pri pritisku i procentualno učešće vode kod cementno-zeolitnih pasta kao i kod cementnih pasta koje sadrže mešavinu NZ+FA [30]

Parcijalna zamena PC sa NZ i/ili FA	Voda (%)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)			
		2 dana	7 dana	28 dana	90 dana
0%, ref.pasta	25,4	21,2 (47)	34,4 (76)	45,1 (100)	57,6 (128)
5% NZ	29,2	25,2 (56)	38,6 (86)	52,5 (116)	55,7 (124)
10% NZ	29,0	23,5 (52)	36,8 (82)	51,3 (114)	53,6 (119)
15% NZ	30,5	22,1 (49)	33,5 (74)	52,8 (117)	56,8 (126)
20% NZ	31,0	17,8 (39)	30,7 (68)	54,2 (120)	58,5 (130)
25% NZ	32,5	14,2 (31)	25,6 (57)	49,8 (110)	57,2 (127)
30% NZ	33,5	13,4 (30)	26,8 (59)	47,8 (106)	58,5 (130)
35% NZ	34,5	11,7 (26)	22,2 (49)	46,2 (102)	53,5 (119)
5% NZ +5% FA	28,8	20,8 (46)	29,6 (66)	49,5 (110)	56,2 (125)
10% NZ +5% FA	29,8	19,4 (43)	33,8 (75)	51,4 (114)	58,7 (130)
15% NZ +5% FA	29,5	17,8 (39)	28,4 (63)	51,0 (113)	59,4 (132)
20% NZ +5% FA	32,5	15,4 (34)	26,2 (58)	50,8 (113)	60,8 (135)
25% NZ +5% FA	35,6	14,4 (32)	27,3 (61)	50,8 (113)	58,3 (129)
30% NZ +5% FA	35,7	11,8 (26)	24,2 (54)	47,6 (106)	54,3 (120)
35% NZ +5% FA	35,0	9,6 (21)	23,1 (96)	43,3 (96)	50,4 (112)

Bilim [14] je odredio čvrstoće pri pritisku maltera koji sadrže NZ (klinoptilolit) kao SCM (u količini od 0%, 5%, 10%, 15%, 20% i 30%), starosti 2, 7, 28, 56 i 90 dana. Ustanovljeno je da čvrstoće pri pritisku rastu u toku vremena, iako stopa prirasta zavisi od nivoa procentualnog udela NZ. Pri starosti od 28, 56 i 90 dana, uzorci maltera sa 15% i 20% NZ imali su najviše čvrstoće [14].

Na osnovu ispitivanja kojeg su sproveli Shon i Kim [149] utvrđeno je da malteri sa 10 i 20% NZ kao i sa 20% FA imaju u početku sporiji prirast čvrstoća u odnosu na kontrolni malter. Već nakon 56 dana njihove čvrstoće su u rangju kontrolne, a nakon 91-og dana je značajno premašuju, naročito mešavina sa 20% FA, a odmah posle nje i

mešavina sa 20% NZ. Na osnovu navedenih ispitivanja [14][149] može se zaključiti da optimalna količina zamene PC sa NZ kao SCM u malterima iznosi od 15-20%.

Karakurt i Topcu [96] su ispitali čvrstoće pri pritisku (TS EN 196-1) maltera spravljanih sa Portland-kompozitnim cementima koji sadrže različite količine i kombinacije NZ, FA i zgre iz visokih peći (GBFS). Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli V-3 može jasno da se uoči da su nakon 180 dana čvrstoće maltera koji sadrži CEM II sa NZ ili FA u količini do 30% veće u odnosu na referent vrednost, a slični rezultati su dobijeni za mešavine od 10% NZ+FA, kao i za 10% NZ+FA+GBFS.

Tabela V-3. Čvrstoće pri pritisku maltera koji su spravljani sa Portland-kompozitnim cementima koji sadrže različite količine i kombinacije NZ, FA i GBFS [96]

Malter	Čvrstoća pri pritisku (MPa)			
	2 dana	7 dana	28 dana	180 dana
CEM I 42,5	22,0	30,4	45,2	50,7
NZ-10	12,3	22,5	46,9	57,1
NZ-20	11,2	20,3	48,2	54,9
NZ-30	10,9	18,5	45,3	53,0
NZ-40	7,2	17,2	39,6	50,6
NZ-45	6,9	15,0	38,1	48,3
FA-10	11,5	22,0	44,6	52,9
FA-20	10,6	21,0	45,4	58,0
FA-30	8,6	19,5	41,0	54,9
FA-40	8,1	18,7	38,5	50,8
FA-45	7,8	16,4	37,5	48,7
NZGBFS-10	12,5	27,3	45,5	60,7
NZFA-20	12,2	25,1	43,7	52,0
NZFAGBFS-10	13,6	26,1	48,9	58,1

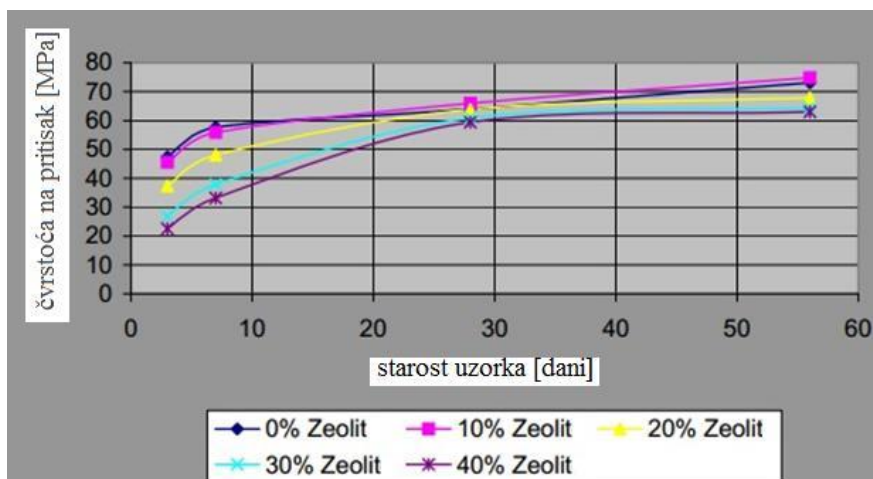
Ahmadi i Shekarchi [3] su ispitali čvrstoće pri pritisku betona i ustanovili da je već nakon 28 dana nege došlo do povećanja čvrstoće cementno-zeolitnih betona u odnosu na kontrolne i to za 14% (NZ5), 16% (NZ10), 23% (NZ15) i 25% (NZ20), a kao glavni uzrok se navodi upravo visok nivo čistoće upotrebljenog zeolite (90-95%). Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku uzoraka starih 90 dana [3] može se zaključiti da je optimalna količina zamene PC sa NZ kao SCM u betonima 15%.

Chan i Ji [32] su ispitali uticaj parcijalne zamene 0%, 5%, 10% i 30% PC sa NZ, kao i sa FA u istom odnosu na čvrstoće betona spravljanih sa w/cm od 0,28. Nakon 28 dana betoni sa NZ i FA su premašili čvrstoću kontrolnog betona, stim da je NZ više doprineo prirastu čvrstoća u odnosu na FA. Mešavina sa 15% NZ je imala za 14% veću čvrstoću nakon 28 dana u odnosu na kontrolnu.

Na osnovu istraživanja koje su sprovedeli Najimi i koautori [127], dobijeno je da su čvrstoće pri pritisku uzoraka betona spravljenih sa 15% i 20% NZ manje od kontrolnih, za sve starosti betona, stim da je korišćen $w/cm = 0,50$.

Uprkos prethodno navedenim rezultatima, Jana [88] je ispitala svojstva betona ($w/cm=0,38$) koji sadrže NZ (klinoptilolit) kao SCM u iznosu od 10%, 20%, 30% i 40% i ustanovila da NZ nije doprineo povećanju ranih čvrstoća betona, naprotiv, pri povećanju udela NZ došlo je do njihovog smanjenja (slika V-1). Nakon 28 i 56 dana uzorci betona sa 10% NZ imali su veće čvrstoće pri pritisku od kontrolnih uzoraka [88].

Na osnovu navedenih rezultata može da se zaključi da je optimalna količina zamene PC sa NZ u betonima 15% (eventualno 10%), u malterima od 15-20%, dok se za paste ne može dati generalni zaključak usled velikog rasipanja rezultata, te je potrebno utvrditi optimalnu količinu za konkretni NZ.



Slika V-1. Čvrstoće pri pritisku uzoraka cementno- klinoptilolitnih betona [88]

1.2. Upijanje vode

1.2.1. Kapilarno upijanje vode

Valipour je sa saradnicima [179] ispitao kapilarno upijanje vode betona pri starosti 180 dana prema RILEM-CPC-11.2. Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeno je da se sa povećanjem udela NZ povećava i količina kapilarno upijene vode, stim da je kapilarno upijanje betona sa 10 i 20% NZ manje nego kod kontrolnog betona.

Chan i Ji [32] su odredili početno kapilarno upijanje betona sa 0%, 5%, 10%, 15% i 30% NZ odnosno FA nakon 28 dana nege prema BS 1881:Part 5. Ustanovljeno je da su betoni sa NZ i FA imali manje kapilarno upijanje u odnosu na kontrolni beton. Najbolje se pokazala mešavina sa 15% NZ odnosno FA, dok se mešavina sa 10% NZ pokazala za nijansu bolja u odnosu na mešavinu sa istom količinom FA.

Uysal i Akyuncu [178] su ispitali kapilarno upijanje betonskih uzoraka, starih 90 dana, koji sadrže FA, prema standardu ASTM C 1585. Ustanovljeno je da sa porastom količine korišćenog cementa, odnosno ukupnog veziva dolazi do smanjenja kapilarnog upijanja. Takođe sa povećanjem udela FA dolazi do smanjenja kapilarnog upijanja u odnosu na referentni beton.

Vejmelkova je sa saradnicima [181] utvrdila da je na osnovu rezultata kapilarnog upijanja prihvatljivo koristiti NZ u količini do 20% u odnosu na masu PC u betonima. Rezultati koje je dobila su u skladu sa onima koje je dobio Valipour sa saradnicima [179].

1.2.2. Upijanje vode pri atmosferskom pritisku

Bilim [14] je utvrdio da se sa supstitucijom PC sa do 20% NZ (klinoptilolit) dobijaju malteri ($w/cm = 0,5$) koji imaju manje upijanje vode u odnosu na referentni, dok se kod maltera sa 30% NZ javlja veće upijanje vode u odnosu na referentnu vrednost.

Ispitivanja koje je sproveo Valipour sa saradnicima [179] su pokazala da najmanje upijanje ima beton sa 30% NZ, potom sa 10%, a da je beton sa 20% NZ u rangu sa kontrolnim. Ispitivanja su rađena na uzorcima starosti 28 dana i to prema oba standarda, BS1881-122 i ASTM C 642.

Ranjbar je sa saradnicima [141] odredio upijanje vode betona sa 5%, 10%, 15% i 20% NZ nakon 28 i 90 dana prema CEB-FIP i dobio manje vrednosti u odnosu na kontrolne.

Ahmadi i Shekarchi [3] su utvrdili da betoni sa do 20% NZ (klinoptilolit) imaju manje upijanje vode od kontrolnog betona ($w/cm = 0,4$), ali da različiti nivoi supstitucije PC (5%, 10%, 15% i 20%) daju slične rezultate.

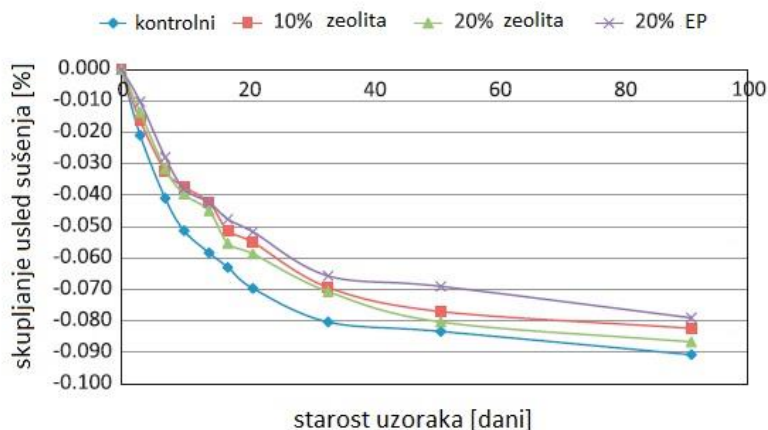
Za razliku od prethodno navedenih rezultata Najimi je sa saradnicima [127] utvrdio da NZ u betonu dovodi do povećanja upijanja vode uzoraka starosti 28 i 90 dana.

Sabet je sa saradnicima [145] ispitao uticaj zamene 10% i 20% PC sa NZ i sa FA. Nakon 28 dana nege uzorci su ispitani prema ASTM C 642. Ustanovljeno je da korišćenje NZ ili FA smanjuje upijanje vode, stim da slabije utiče na početno upijanje (nakon 30 min), a značajnije na krajnje (nakon 72 sata).

S obzirom na osipanje rezultata ispitivanja upijanja vode betona i maltera, ne može se dati generalna preporuka kada je reč o količini PC koji bi bio supstituisan sa NZ, već je potrebno sa konkretnim NZ uraditi preliminarna ispitivanja.

1.3. Skupljanje usled sušenja

Shon i Kim [149] su merili skupljanje usled sušenja uzoraka maltera sa 0%, 10% i 20% NZ kao i sa 20% FA tokom 91-og dana prema standardu ASTM C 806. Na slici V-2 su prikazani rezultati ispitivanja, i jasno se može uočiti da je najmanje skupljanje usled sušenja ustanovljeno kod maltera sa 20% FA, potom sa 10% i 20% NZ, a najveće kod referentnog maltera.



Slika V-2. Promene deformacija skupljanja usled sušenja maltera u toku vremena [149]

Najimi je sa saradnicima [127] takođe ispitao skupljanje ali betona sa 0%, 15% i 30% NZ. Uzorci su prvih 28 dana negovani u vodi, a potom su prebačeni u prostoriju sa temperaturom vazduha od 23°C i relativnom vlažnošću od 50%. Nakon 90 dana uzorci sa 15% NZ su imali 84%, a uzorci sa 30% zeolita 64% od vrednosti skupljanja referentnog betona.

Nasuprot svim navedenim rezultatima ispitivanja, Jana [88] je ustanovila da je skupljanje usled sušenja uzoraka maltera najmanje kod referentnog maltera, potom kod uzoraka sa 20% i 10% (vrednosti bliske referentnoj), i 30% NZ (za oko 20% veća od referentne), respektivno. Uzrok prethodno nevedenog je najverovatnije kraći period nege maltera, koji je u ovom slučaju iznosio samo 7 dana.

S obziroma na rezultate navedenih istraživanja može se zaključiti da je optimalna količina supstitucije PC sa NZ oko 20%, kada je reč o smanjenom skupljanju usled sušenja betona i maltera.

1.4. Otpornost na dejstvo mraza

Tek se nekolicina publikovanih istraživanja bavi uticajem NZ na otpornost maltera/betona na dejstvo mraza, iako se pokazalo da daje pozitivne efekte.

Bilim [14] je ispitao uticaj supstitucije 0%, 5%, 10%, 15%, 20% i 30% PC sa NZ u malterima na dejstvo 50 ciklusu smrzavanja i odmrzavanja. Na osnovu rezultata

(tabela V-4) utvrđeno je da je NZ u količini od 5% poboljšao trajnost maltera na dejstvo mraza.

Upotreba NZ u količini preko 10% dovodi do znatnog smanjenja čvrstoća (naročito čvrstoće pri savijanju) maltera nakon 50 ciklusa. Bilim [14] je kao rešenje predložio upotrebu aeranata, kako bi se smanjio pritisak u porama i da bi se obezbedio dodatni prostor za širenje zamrznute vode.

Tabela V-4. Čvrstoće pri pritisku i čvrstoće na zatezanje pri savijanju maltera nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [14]

Malter	Bez ciklusa smrzavanja/odmrzavanja		Nakon 50 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja	
	Čvrstoća pri pritisku (MPa)	Čvrstoća pri savijanju (MPa)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)	Čvrstoća pri savijanju (MPa)
Kontrolni	52,63	7,50	45,97	7,43
C5	54,28	8,79	51,12	8,15
C10	56,39	8,67	42,94	3,75
C15	59,87	9,02	42,59	2,93
C20	58,56	7,79	42,84	3,63
C30	53,69	7,62	43,00	3,40

Vejmelkova je sa saradnicima [181] ispitala otpornost betona koji sadrži 0%, 10%, 20%, 40% i 60% NZ na dejstvo mraza (ČSN 731322/Z1) kao i na zajedničko dejstvo mraza i soli za odmrzavanje (ČSN 731326/Z1). Nakon 28 dana standardne nege uzorci su tretirani sa 100 ciklusa smrzavanja (4h na -20°C) i odmrzavanja (2h u vodi na +20°C). Rezultati su pokazali ne samo da su betoni sa 10% i 20% NZ, kao i sa čistim PC ispunili uslov (da je maksimalni pad čvrstoće 25%), nego su betoni sa 10% i 20% NZ nakon izlaganja dejstvu mraza imali veće čvrstoće i pri pritisku i savijanju u odnosu na beton sa čistim PC, respektivno.

U okviru ovog istraživanja [181] ispitana je i otpornost cementno-zeolitnih betona na dejstvo mraza i soli. Uzorci zasićeni vodom su potapani u 3% rastvor NaCl, nakon čega su kadice sa uzorcima smeštene u klima komoru koja je programirana na poseban režim hlađenja i zagrevanja (od +20°C do -15°C, zadržavanje na -15°C, pa zagrevanje do +20°C). Nakon svakih 25 ciklusa uzorci su vađeni iz kadica, merena im je težina, a rastvor je potom zamenjen novim. Najmanji gubitak mase su imali uzorci sa 20% i 10% NZ kao i kontrolni, respektivno, dok su se uzorci sa 40% i 60% NZ loše pokazali.

Trajnost betona koji sadrže FA kao SCM, sa aspekta otpornosti na dejstvo ciklusa smrzavanje/odmrzavanje, je u rangu ili nešto manja u poređenju sa Portland cementnim betonima [100]. Kao glavni kvalitativni parametar FA, sa aspekta otpornosti betona koji sadrži FA kao SCM, na dejstvo mraza navodi se iznos gubitka

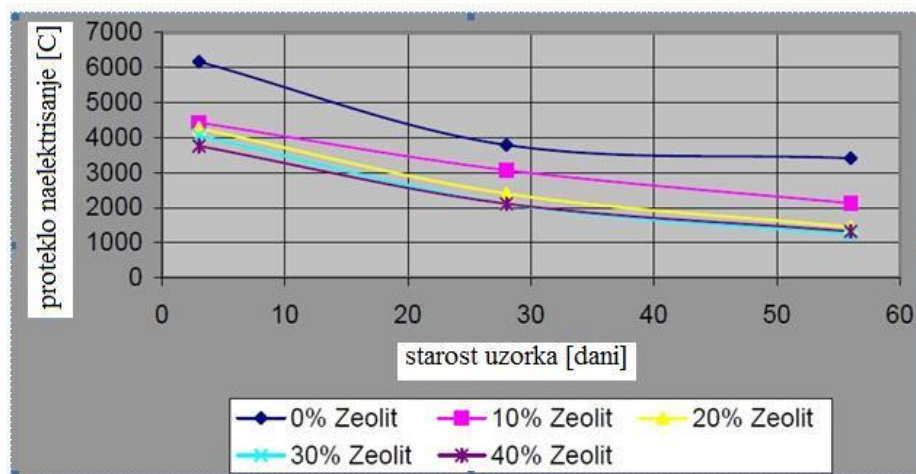
pri žarenju [95], odnosno FA sa velikim gubitkom pri žarenju ima negativan uticaj na otpornost betona na dejstvo mraza. U betonima koji kao mineralni dodatak imaju FA sa malim gubitkom pri žarenju, a sadrže i aerante, postižu se zadovoljavajući rezultati u pogledu otpornosti na dejstvo mraza [178].

S obziroma na rasipanje rezultata navedenih istraživanja potrebno je uraditi prethodna ispitivanja sa konkretnim NZ.

1.5. Otpornost na prodor hlorida

Najveća prednost upotrebe NZ kao SCM jeste povećanje otpornosti betona/maltera na prodor hlorida. U istraživanju koje je sproveda Jana [88] određena je količina električne struje koja je prošla kroz beton kao i ukupna količina naelektrisanja. Navedeni podaci su iskorišćeni kao pokazatelji otpornosti uzoraka na prodor hlorovog jona.

Na osnovu rezultata (slika V-3, tabela V-5) testa za brzo određivanje otpornosti na prodor hlorida (ASTM C1202), ustanovljeno je da sa povećanjem sadržaja zeolita u mešavinama, postoji značajno smanjenje propustljivosti naelektrisanja. Supstitucija 40% PC sa NZ dovela je do smanjenja količine propuštenog naelektrisanja za oko 40-60% (u odnosu na kontrolnu mešavinu) [88].



Slika V-3. Brzo određivanje otpornosti uzoraka cementno - klinoptilolitnih betona na prodor hlorida [88]

Slične rezultate dobio je i Najimi sa saradnicima [127] za betone koji sadrže 15% i 30% NZ. Vrednosti koje su nakon 28 dana dobijene primenom standarda ASTM C1202 za betone sa 15% i 30% NZ iznosile su 27,5% i 8,2% od kontrolne vrednosti, odnosno 15,1% i 6,4% nakon 90 dana.

Tabela V-5. Test za brzo određivanje prodora hlorida u uzorake cementno - klinoptilolitnih betona [88]

Starost uzoraka (dani)	Količina propuštenog naelektrisanja (C)				
	% supstitucije PC sa NZ				
	0	10	20	30	40
3	6169	4431	4267	4061	3766
28	3793	3073	2405	2112	2116
56	3415	2129	1449	1238	1234

Na osnovu navedenih rezultata ustanovljeno je da NZ vremenom sve više doprinosi otpornosti betona na prodor hloridnih jona i to kroz pucolansku reakciju. Naime, pucolani sa većom pucolanskom reaktivnošću "troše" veću količinu kalcijum-hidroksida i time smanjuju količinu OH⁻ jona u pornom rastvoru što direktno utiče na povećanje otpornosti betona na prodor hloridnih jona [127].

Ahmadi i Shekarchi [3] su ustanovili da se optimalna količina zamene PC sa NZ kreće od 10-20%, i da korišćenjem NZ u navedenom opsegu dolazi do značajnog smanjenja koeficijenta difuzije u odnosu na kontrolnu vrednost.

Valipour i koautori [179] su ispitali uticaj različitih vodo-vezivnih faktora (0,35, 0,40, 0,45 i 0,50) kao i zamene PC sa 10%, 20% i 30% NZ na prodor hlorida. Posle devet meseci izlaganja uzoraka dejstvu hlorida došlo je do smanjenja difuzionih parametara, dok je sa povećanjem količine NZ došlo do povećanja koncentracije hlorida na površini uzoraka. Takođe je utvrđeno da je sa povećanjem odnosa w/cm prisutna i veća količina hlorida na dubini od 20 mm [179].

U istraživanju koje je sproveo Sabet sa saradnicima [145] uporedno je ispitan uticaj NZ i FA na čvrstoće i trajnost samozbijajućeg betona visokih performansi. Količina rastvorenih hlorida je izmerena u skladu sa standardom ASTM C 1152 nakon 90 dana izlaganja uzoraka sonom rastvoru (*salt solution*). Korišćenje 10% i 20% NZ dovelo je do smanjenja efektivnog difuzionog koeficijenta za više nego duplo (za $4,3 \times 10^{-12}$ i $4,9 \times 10^{-12}$ m/s², respektivno) u odnosu na kontrolnu vrednost. Upotreba FA (10% i 20%) takođe dovodi do smanjenja efektivnog difuzionog koeficijenta (sa $7,9 \times 10^{-12}$ na $4,7 \times 10^{-12}$ i $3,2 \times 10^{-12}$ m/s², respektivno), ali ne i u meri u kojoj to čini NZ [145].

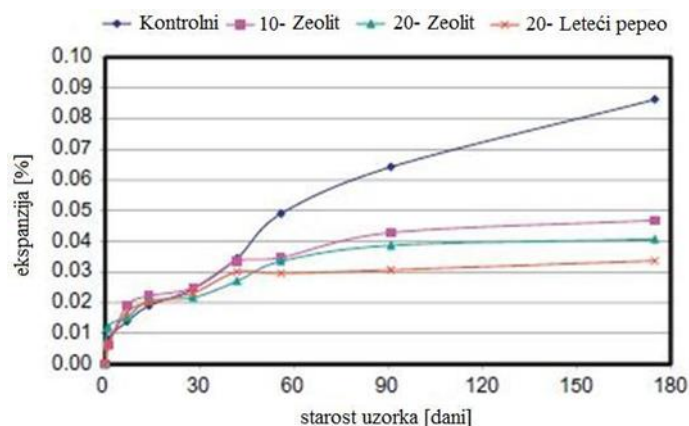
Na osnovu rezultata ispitivanja koje su dobili Chan i Ji [32] potvrđeno je da NZ i FA imaju sličan uticaj na prodor hloridnih jona u betone visokih performansi. Sa smanjenjem vodo-vezivnog faktora i povećanjem udela NZ ili FA poboljšava se otpornost betona viskih performansi na prodor hlorida [32].

Na osnovu navedenih istraživanja ustanovljeno je da se optimalna zamena PC sa NZ kreće između 10% i 20%, kada je reč o betonima otpornim na prodor hlorida.

1.6. Otpornost na dejstvo sulfata

Korišćenje NZ/FA prilikom spravljanja cementnih maltera/betona dolazi do povećanja njihove otpornosti na dejstvo sulfata.

Shon i Kim [149] su ocenili efektivnost NZ i FA u pogledu otpornosti na sulfate. Test na ekspanziju uzoraka maltera urađen je u skladu sa ASTM C 1012. Jedna kontrolna mešavina i tri različite (sa 10% i 20% NZ i 20% FA) su pripremljene sa w/cm od 0,48. Uzorci su bili izloženi rastvoru od 1 M Na_2SO_4 . Kontrolni uzorci su imali nisku početnu ekspanziju, do 28 dana, a potom je došlo do njenog ubrzanog rasta (slika V-4) [149]. Na kraju izlaganja dejstvu sulfata najmanju ekspanziju imala je mešavina sa 20% FA, potom mešavine sa 20% i 10% NZ, respektivno. Relativne čvrstoće pri pritisku svih mešavina (čvrstoća pri pritisku uzorka maltera izloženog rastvoru Na_2SO_4 /čvrstoća pri pritisku uzorka maltera negovanog u vodi iz gradskog vodovoda) su rasle u početnom periodu, ali nakon 14 dana došlo je do njihovog opadanja (izuzetak je mešavina sa 20% NZ kod koje je došlo samo do neznatnog opadanja). Nakon 56 dana nege uzoraka u rastvoru Na_2SO_4 , relativne čvrstoće pri pritisku su iznosile 0,98, 1,01, 1,00 i 1,19 za kontrolu i mešavine sa 20% FA, 10% NZ i 20% NZ, respektivno [149].



Slika V-4. Ekspanzija uzoraka maltera izloženih dejstvu 1 M Na_2SO_4 rastvora [149]

Janotka i Krajči [89] su ispitali otpornost maltera spravljenog sa pucolanskim cementom CEM IV/A (P), (60,82% PC klinkera, 35,09% NZ, 4,09% gipsa) na dejstvo sulfata tako što je u toku 720 dana izlaganja uzoraka 5% rastvoru Na_2SO_4 merena njihova ekspanzija, a nakon isteka navedenog perioda ispitane su i čvrstoće pri pritisku. Ustanovljeno je da je otpornost maltera sa NZ znatno veća u odnosu na maltere sa PC.

Slične rezultate je dobila i Jana [88] za maltere spravljene sa w/cm od 0,48 i sadržajem NZ od 0%, 10%, 20% i 30%.

Najimi je sa saradnicima [127] ispitao uticaj sulfata na gubitak mase uzoraka od betona spravljenih sa 0%, 15% i 30% NZ kao i njihove čvrstoće pri pritisku nakon 356 (kontrolni uzorci su negovani u vodi 356 dana, dok su ostali 28 dana negovani u vodi, potom su još 28 bili u laboratorijskim uslovima, a onda u rastvoru narednih 300 dana). Pod dejstvom sulfata došlo je do povećanja mase uzoraka NZ0, dok su se mase NZ15 i NZ30 prvo smanjile usled devastacije površine uzoraka, a potom je došlo do povećanja zbog prodora kiseline. Nakon 300 dana izlaganja dejstvu sulfata na uzorcima koji sadrže NZ jasno se uočavao agregat, dok to nije bio slučaj sa uzorkom NZ0. Takoće je nakon dejstva sulfata NZ0 imao najmanji pad čvrstoće (5,5%), dok su se čvrstoće NZ15 i NZ30 smanjile za 20,8% i 23,3%, respektivno. Do ovako velikih gubitaka čvrstoće i mase uzoraka koji sadrže NZ najverovatnije je došlo zbog preranog potapanja u rastvor (nakon 56 dana), tako da se pucolanska reakcije nije sprovela do kraja, jer je kalcijum-hidroksid izreagovao sa sulfatnom kiselinom. Kao posledica navedenog "izgubljen" je deo C-S-H gela što je dovelo do pada čvrstoća betona.

S obziroma na rezultate navedenih istraživanja može da se zaključi da je optimalna količina supstitucije PC sa NZ 20%, kada je reč o betonima otpornim na dejstvo sulfata.

1.7. Izluživanje elemenata u tragovima

Vyšvaril i Bayer [183] su ispitali efikasnost cementno-zeolitne paste, starosti 28 dana, u pogledu imobilizacije teških metala. NZ je korišćen kao parcijalna zamena PC u količini od 0% i 20% u odnosu na masu cementa, dok su rastvorljive soli teških metala dodate u vodu sa kojom su spravljeni uzorci, i to u količini od 1% i 5% u odnosu na masu veziva. Ispitivanja su urađena u skladu sa standardom CSN EN 12457-2, a na osnovu dobijenih rezultata utvrđeno je da ispitana cementno-zeolitna pasta najefikasnija u imobilisanju Pb i Cu, potom i Ba, Cr i Ni, u poređenju sa referentnom pastom, dok nije pogodna za imobilizaciju Hg^{2+} , Sr^{2+} i Zr^{2+} .

Krolo je sa saradnicima [101] ispitao mogućnost stabilizacije zeolita zasićenog sa Zn u okviru cementnih kompozita. Sve mešavine pasta su spravljene sa vodovezivnim faktorom od 0,5, dok je CEM I supstituisan sa 15% i 30% zeolita u odnosu na masu. Nakon 24h od spravljanja, uzorci su izvađeni iz kalupa i stavljeni u termostat (temperatura vazduha od 20°C, bez direktnog kontakta sa vodom) gde su držani 1, 3 ili 7 dana. Potom je sprovedeno ispitivanje na izluživanje Zn prema TCLP testu [177] u trajanju od 24h. Nakon izluživanja, koncentracija Zn u eluatima je određena pomoću UV/Vis spektrofotometrije. Na osnovu rezultata ispitivanja izluživanja cementnih pasta koje sadrže zeolit zasićen sa Zn utvrđeno je da se sa povećanjem vremena hidratacije i solidifikacije smanjuje izluživanje Zn. Niska koncentracija Zn u eluatima

ukazuje da zeoliti zasićeni cinkom mogu da budu uspešno stabilizovani u Portland cementnim kompozitima.

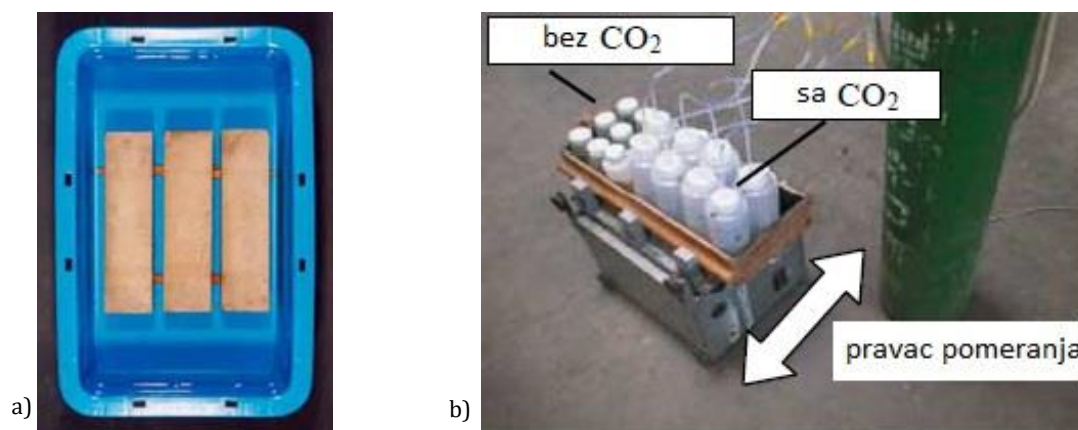
Yu i saradnici [189] su, između ostalog, ispitali izluživanje teških metala i toksičnih elemenata iz cementnih maltera koji su sadržali 0%, 25% i 40% elektrofilterskog pepela. Varirani su odnosi vode i veziva, kao i peska i veziva. Superplastifikator je dodat tako da obezbedi istu ugradljivost svih mešavina. Najpre je urađeno ispitivanje izluživanja komponentnih materijala, a potom je urađeno uporedno ispitivanje izluživanja teških metala i toksičnih elementata iz cementnih maltera koji sadrže elektrofilterski pepeo preko dve metode: (i) *Tank leaching* testa, i (ii) *Shaken extraction* testa. Za potrebe navedenih ispitivanja spravljani su uzorci maltera, koji su posle 24h od ugrađivanja izvađeni iz kalupa i stavljeni na negu u klima-komoru (temperatura vazduha od 22°C i relativna vlažnost > 90%) do starosti od 28, 91, 180 i 360 dana. Jedan deo uzoraka (isključivo za potrebe *shaken extraction* testa) je pri starosti od 28 dana bio izložen uticaju CO₂ u koncentraciji od 5% i relativnoj vlažnosti vazduha od 50%, sve dok nije postignuta njihova potpuna karbonatizacija.

Za potrebe *tank leaching* testa, slika V-5a, korišćena je *pure* voda (destilovana, dejonizovana ili demineralizovana voda, nije precizirano u radu) u količini koja je tri puta veća u odnosu na zapreminu prizmi. Tečnost je menjana na svaka 3 dana do 21-og dana, potom na svakih 7 dana narednih 14 dana, pa na svakih 14 dana. Nakon 100 dana je menjana na 28 dana. Rezultati izluživanja su sabirani, odnosno u radu su prikazani kumulativne količine izluženih teških metala (Cr, Pb, Cu, Cd, Zn i Mn – za svaki posebno).

Utvrđeno je (i) da se teški metali izlužuju i iz čistog cementnog maltera i iz cementnog maltera koji sadrži elektrofilterski pepeo kao SCM, (ii) da sa povećanjem vodovezivnog faktora, kao i supstitucije cementa sa elektrofilterskim pepelom dolazi do povećanja izluživanja, i (iii) da dolazi do ispiranja teških metala samo iz površinskih slojeva uzoraka, dok je za oslobađanje metala iz unutrašnjeg dela uzorka u spoljašnje okruženje potrebno mnogo više vremena zbog poteškoća u difuziji, efekta fiksacije od strane cementnih hidrata i smanjenog izluživanja većine teških metala u uslovima visokog pH u unutrašnjem delu uzorka.

Za potrebe *shaken extraction* testa uzorci su predhodno izdrobljeni do veličine od 1-5 mm. *Shaken extraction* ispitivanja su rađena bez i sa unošenja CO₂ u tečnost (*leachant*), slika V-5b. U prvom slučaju, pH vrednosti tečnosti su bile iznad 12, a u drugom oko 6,6 što je dovelo do povećanog izluživanja teških metala, a posebno u slučaju Mn i Zn. Prednost unošenja CO₂ je prvenstveno u održavanju stabilnosti pH, kao i činjenici da je ona biska sedmici, odnosno onoj koja se javlja u eksploatacionim uslovima (npr. kiša, podzemne vode itd.). Ustanovljeno je da je u slučaju karbonatizovanih uzoraka povećano izluživanje Cr.

Na osnovu rezultata istraživanja [189] je zaključeno da se putem *shaking extraction* metode iz maltera izlužuje veća količina teških metala u odnosu na *tank leaching* metodu.



Slika V-5. Metode ispitivanja izluživanja: a) Tank leaching test, i b) Shaken extraction test [189]

Terzić sa saradnicima [172] je u svojim istraživanjima ispitala izluživanje odabranih elemenata: Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba, Sb i Se, iz sirovih FA, kao i iz maltera, betona i asfalta koji sadrže različite FA, u skladu sa standardom EN 12457:2012. Dobijeni rezultati su upoređeni sa onima dobijenim iz referentnih uzoraka, kao i sa propisanim gornjim granicama, i ustanovljeno je da su svi ispitani elektrofilterski pepeli neopasni po životnu sredinu kada su ugrađeni u cementne kompozite.

S obzirom da se u okviru eksperimentalnog dela doktorske disertacije koristi elektrofilterski pepeo kao SCM i da se kombinuje sa prirodnim zeolitom, u nastavku su dati mehanizmi vezivanja odabranih potencijalno toksičnih elemenata, sa pozivanjem na referentnu literaturu.

Pb (olovo)

Pb je amfoterni element i njegova koncentracija je minimalna pri vrednosti pH oko 9. Sa povećanjem pH vrednosti do oko 11,5, raste koncentracija Pb zbog anjonskog hidroksi kompleksa čija je rasvorljivost nešto veća. Ipak apsolutna vrednost koncentracije nije velika. Pb se ne fiksira za C-S-H gel, ali se može adsorbovati za njegovu površinu. Teško je očekivati da se postigne visok stepen imobilizacije korišćenjem samo cementa [143]. Pb se najbolje imobilize u strukturama sa malom poroznošću.

Cd (kadmijum)

Imobilizacija dvovalentnih jona kao što je Cd^{2+} je moguća u strukturama kao što su kalcijum sulfoaluminatni hidrati (npr. etringit) i kalcijum monohloraluminatni hidrat

(Fridelova so), zahvaljući jonskoj substituciji Ca^{2+} [60]. Identifikovan je nastanak mešovitog hidroksida $\text{CaCd}(\text{OH})_4$. Cd^{2+} se takođe može imobilizovati u C-S-H gelu, ili fizički ili putem površinske adsorpcije. Može se reći da je Cd nerastvoran u slabo alkalnim ili neutralnim uslovima.

Zn (cink)

Tokom procesa hidratacije cink formira hidrokside u uslovima kada je $\text{pH} > 8$. Anjonska priroda ovih hidroksida sprečava adsorpciju na negativno naelektrisanju površini C-S-H gela. Oni mogu da formiraju kompleksno jedinjenje $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [107] ili se fizički zatvore u strukturu kompozita.

Cu (bakar)

Bakar je obično imobilisan u staklastoj fazi FA, stoga je njegovo otpuštanje otežano. Podaci iz literature [107] sugerišu da se u procesu hidratacije formira bakar hidroksid koji se fizički enkapsulira u C-S-H ili se fiksira u etringitu i Fridelovoj soli putem jonske substitucije ili adsorpcije.

Ni (nikl)

Nikl, kao i metali bakar i cink, može se imobilizovati ukoliko se prevede u hidrokside koji imaju malu rastvorljivost za određene vrednosti pH ($\text{pH} \sim 10,3$ [174]). Ward sa saradnicima [185] ukazuje da je najmanja rastvorljivost u intervalu od 8-10 pH i da raste sa porastom pH vrednosti što ukazuje na amfoterni karakter Ni.

Cr (hrom)

Hrom postoji u dva valentna oblika (Cr^{6+} i Cr^{3+}). Hrom u šestovalentnom stanju je kancerogen i veoma rastvorljiv u vodi, dok je u trovalentnom obliku mnogo manje rastvorljiv, i ne predstavlja kancerogeni element.

Enkapsulizacija hroma je veća pri manjim starostima cementnih kompozita zahvaljujući prisustvu veće količine etringita i Fridelove soli. Poznato je da hidrati kalcijum sulfoaluminata imaju veoma značajnu ulogu u imobilizaciji hroma. Cr može delimično da zameni aluminijum u etringitu [60], a takođe može da se integriše u sloj Fridelove soli, bilo putem substitucije jona ili površinske adsorpcije. U alkalnim i oksidacionim uslovima, Cr se javlja u obliku hromata, CrO_4^{2-} , tj. kao oksianjon. Rastvorljivost Cr veoma zavisi od pH vrednosti (tabela III-8) i najmanja je za pH vrednost blizu neutralne, dok se sa rastom pH vrednosti povećava i postiže maksimum za pH između 8 i 12.

Hg (živa)

Imobilizacija Hg se odvija kroz fizičku enkapsulizaciju uz formiranje HgO [63]. Smatra se da HgO nastaje u uslovima visoke alkalnosti i fizički se enkapsulira u C-S-H gelu. Rastvorljivost Hg ne pokazuje zavisnost od pH vrednosti pornog rastvora.

As (arsen)

Imobilizacija As se pre svega vezuje za C-S-H gel, njegovu veliku specifičnu površinu i amorfnu strukturu iako u tabeli III-2 stoji da oksianjon AsO_4^{3-} može da supstituiše sulfatni anjon. On u obliku oksianjona je prilično velik tako da se putem sorbcije vezuje za površinu etringita. Gao sa saradnicima [59] ukazuje da je u pitanju čvrst rastvor C-S-H gela i etringita. Dominantan mehanizam imobilizacije As je taloženje jedinjenja CaHAsO_3 , $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CaNaAsO}_4 \cdot 7.5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_4(\text{OH})_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ i $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})$. Iz ovih primera se zapaža da pri visokoj koncentraciji Ca^{2+} dolazi do imobilizacije arsena stvaranjem slabo rastvornih Ca-arsenata.

Ba (barijum)

Ba se smatra teškim metalom, iako ima gustinu od $3,62 \text{ g/cm}^3$. Soli Ba su rastvorljive u vodi, a najveću rastvorljivost ima BaCl_2 . Izuzeci su barijum sulfat, karbonat i sulfid koji su slabo rastvorljivi u vodi. Rastvorljivost Ba je nije posebno vezana za pH vrednost, ali je vezana za koncentraciju Ca^{2+} jona sa kojim se „takmiči“ za reakciju sa sulfatima [85].

Sb (antimon)

Antimon formira oksianjon $\text{Sb}(\text{OH})_6^-$ koji je rastvorljiviji u alkalnim uslovima. Fizička enkapsulizacija je dominantan mehanizam imobilizacije antimona [59]. Veći sadržaj aluminijuma može da dovede do negativno naelektrisanih Si-O-Al mesta u strukturi što olakšava otpuštanje oksianjona antimona, koji su takođe negativno naelektrisani.

2. PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA REPARATURNIH MALTERA NA BAZI CEMENTA

Pregled stanja u oblasti istraživanja reparaturnih maltera je obuhvatio veliki broj različitih materijala i metoda za ispitivanje fizičkih, mehaničkih svojstava i svojstava pomoću kojih se procenjuje trajnost reparaturnih maltera. S obzirom da su malteri kompozitni materijali, svaka komponenta može biti varirana, međutim u radovima je najčešće varirana vrsta veziva, tako da su ispitivani reparaturni malteri sa mineralnim, polimernim vezivima i sa njihovom kombinacijom. Konkretno korišćeni su: Portland cement i cementi na bazi Portland cementa, magnezijum-sulfatni cement, sulfoaluminatni cement, silikatna prašina, elektrofilterski pepeo nastao sagorevanjem uglja u termoelektranama i granulirana zguza visokih peći (kao aktivni mineralni dodaci za zamenu dela cementa), polimeri, a ispitivani su cementni malteri, mineralno modifikovani cementni malteri, polimerni, polimerima modifikovani cementni malteri (kao laboratorijske recepture ili kao fabrički proizvedeni-brendirani reparaturni malteri), kao i geopolimeri. U okviru ovog dela doktorske disertacije dat je pregled radova u kojima su korišćena mineralna veziva i SCM materijali za spravljanje reparaturnih materijala (maltera ili betona). Zarad bolje preglednosti, u tabeli V-6 su navedeni relevantni radovi, a prikazani su i osnovni podaci u vezi sa primenjenim cementnim i SCM reparaturnim materijalima i urađenim ispitivanjima od strane citiranih autora.

Tabela V-6. Relevantni radovi i osnovni podaci u vezi sa primenjenim reparaturnim cementnim i SCM materijalima i urađenim ispitivanjima od strane citiranih autora

Naziv rada	Autori	Reparaturni materijal	Podloga	Čvrstoća	Adhezija	Skupljanje	Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja	Napomene
A method for assessing bond performance of cement-based repair materials (2014)	J. Qian, C. You, Q. Wang, H. Wang, X. Jia [134]	Malteri: magnezijum-fosfatni cement, sulfoaluminatni cement i PC 42,5. Odnosi cementna, agregata (max 5 mm), vode i superplastifikatora iznose: 1:1,5:0,12:0, 1:1,5:0,25:0,01 i 1:1,5:0,25:0,01, respektivno.	Disk od betona sa rupom u sredini, u obliku obrnute zarubljene kupe, koja se ispunjava reparaturnim malterom do određene visine. Beton je spravljen od PC, rečnog agregata (max 10 mm) i superplastifikatora u odnosu 1:1,3:1,7:0,01 W/C=0,27 čvrstoća pri pritisku nakon 120 dana je iznosila 80,8 MPa.	Čvrstoća pri pritisku reparaturnih maltera pri starosti uzoraka od 7 dana	Predlog metode za ispitivanje	Ograničeno skupljanje po originalnoj metodi		Sanirani uzorci su nakon 24h izvađeni iz kalupa i negovani su do starosti od 7 dana na 20°C i relativnoj vlažnosti vazduha od 50%. Urađen je i vizuelni pregled spoja maltera i podloge kao i test propustljivosti vode, ali i rastvora od 0,1 mol/L NaOH.
Analyzing bond-deterioration during freeze-thaw exposure in cement-based repairs using non-destructive methods (2021)	B. Wang, R. Gupta [184]	Beton: komercijalni SCM beton sa max veličinom zrna agregata od 9,5 mm. Odnos vode i materijala iznosi 0,1, a količina uvučenog vazduha 5,1%. Čvrstoća pri pritisku nakon 28 dana je iznosila 55 MPa Malter: komercijalni SCM malter sa max veličinom zrna agregata od 2,36 mm. Odnos vode i materijala iznosi 0,09, a količina uvučenog vazduha 5,0%. Čvrstoća pri pritisku nakon 28 dana je iznosila 68 MPa	Podloge (slika V-7a) su spravljene od betona. Predmetni beton je spravljen od 450 kg/m ³ , CEM I, 762 kg/m ³ peska, 1053 kg/m ³ šljunka, 2,25 kg/m ³ superplastifikatora, 2,25 kg/m ³ aeranata, 153,7 kg/m ³ vode. Čvrstoća pri pritisku nakon 28 dana je iznosila 59,4 MPa. Odnos vode i materijala iznosi 0,067, W/C=0,34, a količina uvučenog vazduha 4,9%.	Čvrstoća na zatezanje pri savijanju saniranog uzorka nakon 29 dana od sanacije.			Čvrstoća na zatezanje pri savijanju saniranog uzorka nakon 30, 60, 90, 150, 210, 270 i 300 ciklusa.	Pregled optičkim mikroskopom i merenje dinamičkog modula elastičnosti saniranog uzorka nakon 29 dana od sanacije.
Behaviour of self compacting repair mortars based on natural pozzolana in hot climate (2018)	A. Benyahia, M. Ghrici [13]	Malteri: beli cement CEM I 52,5, 0%, 10%, 20%, 30% i 40% prirodnog pucolana – plovuća , filer, rečni pesak (max zrno agregata od 3 mm), superplastifikator, mešavina dve vrste vlakana , vodo-praškasi faktor od 0,4.	Podloge su spravljene od maltera, W/C=0,5. Nakon 28 dana čvrstoć pri pritisku i savijanju iznosile su 30 MPa i 5,3 MP u slučaju nege u vodi, i 27 MPa i 4 MPa u vrućim klimatskim uslovima, respektivno.	Čvrstoća pri pritisku i pri savijanju uzoraka rep. malt. starosti 7, 28 i 56 dana. Čvrstoća pri savijanju saniranog uzorka (28 i 56 dana).				Za spravljanje reparaturnih maltera korišćena je mešavina od 50% vlakana polivinil alkohola i 50% polipropilenskih vlakana.

Naziv rada	Autori	Reparaturni materijal	Podloga	Čvrstoća	Adhezija	Skupljanje	Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja	Napomene
The bond between repair materials and concrete substrate in marine environment (2005)	K. Behfarnia i dr. [12]	Betoni: Mešavina reparaturnog betona je ista kao i mešavina betonske podloge, s tim da je 0% (referentni reparaturni beton) i 15% cementa (po masi) zamenjeno sa mikrosilikom	Podloge su pravljene od betona. Korišćen je PC tipa II prema ASTM C 150, drobljeni kaamen sa max veličinom zrna agregata od 9,5 mm, pesak. Odnos vode, cementa, peska, drobljenog kamena iznosi 0,5:1,0:2,35:1,04. Čvrstoća pri pritisku betonske podloge je iznosila 35 MPa.					Ispitivanje saniranog uzorka na koso smicanje, nakon (i) 180 dana izloženosti sirovoj nafti, (ii) nakon 90 i 180 dana izlaganja dejstvu 15% rastvora MgSO ₄ .
Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials (2005)	A. Momayez i dr. [122]	Betoni: Reparaturni betoni koji sadrže 0%, 5%, 7%, i 10% silikatne prašine kao SCM, cement tipa II min 400 kg/m ³ , W/C = 0,4, max zrno agregata 10 mm, superplastifikator.	Betonske podloge - cement tipa II min 400 kg/m ³ , W/C = 0,46, max zrno drobljenog agregata 16 mm. Projektovana čvrstoća pri pritisku je 35 MPa, nakon 28 dana. Pre ugradnje reparaturnog maltera naneto je adekvatno vezivno sredstvo u debljini od 3 mm.		Korišćene su četiri različite metode: Pull-off, ispitivanje čvrstoće prijanjanja pri cepanju, direktno smicanje duž dve površine i koso smicanje.			Nega betonske-24 h u kalupu, potom sledi ohrapljavane betonske podloge, do starosti od 28 dana se neguju u vodi, potom se vade i suše u trajanju od 30 dana.
Accelerated performance evaluation of repair mortars for concrete sewer pipes subjected to sulfuric acid attack (2020)	H.B. Chang, Y.C. Choi [34]	Malteri: brzovezujući cement, PVA smola u pravu, pesak, najlonska vlakna , retarder.	Malterska podloga: OPC, W/C=0,4, OPC/pesak=1:2,5	Čvrstoća pri pritisku reparaturnih maltera pri starosti uzoraka od 28 dana, u skladu sa ISO 679			Vodonepropusnost sa cilusima smrzavanja i odmrzavanja (100 ciklusa u skladu sa ASTM C 666)	Metode za ubrzano ispitivanje (vodonepropustljivost, vodonepropustljivost sa dejstvom kiseline i vodonepropustljivost sa ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, kontaktne zone između podloge i reparaturnog maltera)
Comparative study on the new-old mortar interface deterioration after wet-dry cycles and heat-cool cycles (2020)	S. Zuo, J. Xiao, Q. Yuan [191]	Malteri: Portland cement 42,5, pesak, PVA vlakna , disperzibilni polimerni prah, različiti odnosi W/C, kao i peska i cementa.	Malterske podloge: odnos cement/pesak=1:2, W/C=0,4. Čvrstoća pri pritisku nakon 56 dana je iznosila 48,31 MPa, Nakon 28 dana od spravljena malterske podloge su sanirane.	Čvrstoća pri pritisku reparaturnih maltera pri starosti uzoraka od 28 dana,				Dinamički modul elastičnosti I koeficijent termičke ekspanzije reparaturnih maltera. Čvrstoća pri savijanju, na koso smicanje, ciklusi toplotoplo-hladno, udruženi ciklusi mokrosuvo i toplotoplo-hladno nakon 28 dana od sanacije.

Naziv rada	Autori	Reparaturni materijal	Podloga	Čvrstoća	Adhezija	Skupljanje	Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja	Napomene
Evaluation of Cementitious Repair Mortars for Corrosion Resistance (2008)	V. Sarawat hy, H.-W. Song [146]	Malteri: OPC, rečni pesak dejonizovana voda, mikrosilica , superplastifik. netretiran FA, tretiran FA (OPC/pesak=1:3, W/CM=0,42)	Za izradu podloge korišćen je beton M20.					Otpornost na prodor hlorida preko različitih vrsta ispitivanja.
Determination of Mechanical Properties of Repair Mortars using in situ Methods under Different Curings. (2020)	A.S. Varzaneh, M. Naderi [180]	Malteri: cement tipa II , pesak (max zrno 4,75 mm), odnos cement/peska = 1:2, za I mešavinu je korišćen W/CM od 0,4, a za II od 0,5		Čvrstoće pri pritisku, na zatezanje i na zatezanje pri savijanju.	„pull-off metoda,” „Friction-Transfer” metoda			Različita starost uzoraka i režimi nege.
Experimental study of performance of repair mortar: Evaluation of in-situ tests and correlation analysis (2020)	J.Shi I drugi [148]	Malteri: OPC 42,5, FA klase F, mlevena granulirana zgrna iz visoke peći -GGBS , rečni pesak, destilovana voda Odnos cement/pesak = 1:1,75, W/C=0,4		Čvrstoća pri pritisku i čvrstoća na zatezanje pri savijanju uzoraka starih 28 dana.				Četiri različita režima nege uzoraka. Ispitivanje (pri starosti uzoraka od 28 dana) kapilarnog upijanja vode prema ASTM C1585, prodora hlorida prema NT Build 492, propustljivosti gasa prema CNS JTJ270-89, in-citu metode namernog prskanja vodom i površinske propustljivosti gasova
Bond strength between concrete and repair mortar and its relation with concrete removal techniques and substrate composition (2020)	Yazdi i dr. [187]	Malter: komercijalni reparaturni malter MasterEmaco S 5400 (Portland cement, pesak, odabrana polimerna vlakna , posebni aditivi)	Betonska podloga: sitnozrni beton (W/C=0,4), beton sa max zrnom agregata od 16 mm (0,45), beton sa max zrnom drobljenog krečnjaka od 20 mm (0,45). Ispitana je čvrstoća pri pritisku i čvrstoća na zatezanje primenom „pull-off” metode, pri starosti od 28 dana.		Čvrstoća pri zatezanju maltera starog 28 dana, prema NBN EN 1542.			Tretiranje betonske podloge peskarenjem (kvarcni pesak), vodom pod pritiskom I elektro-pneumatskim čekićem. Određivanje hrapavosti podloge, prisustva mikroprslina, otvorene poroznosti, čvrstoće na zatezanje primenom „pull-off” metode.

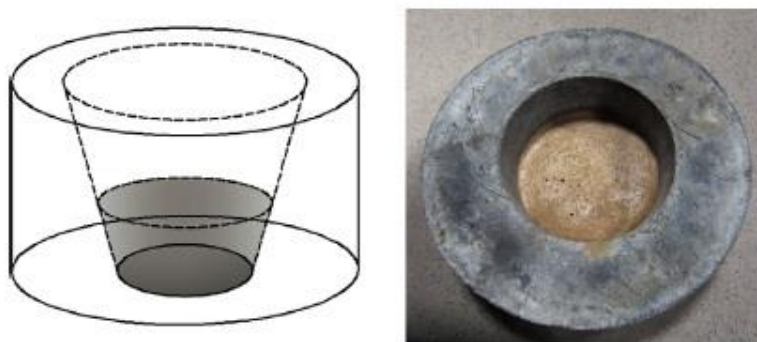
Naziv rada	Autori	Reparaturni materijal	Podloga	Čvrstoća	Adhezija	Skupljanje	Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja	Napomene
Axially loaded RC columns repaired on one side with cement-based mortars (2018)	A.I. Ortega, T.M. Pellicer, P.A. Calderón, H.M. Adam [130]	Malteri: Komerrijalni reparaturni malteri klase R3 i R4, u skladu sa standardom EN 1504-3. U pitanju su reparaturni SCM malteri ojačani vlaknima.	Betonska podloga je zapravo deo armiranobetonskog stuba. Stubovi su sanirani pri starosti od 59 dana, na ambijentalnoj temperature između 28°C i 34°C.					Sanirani uzorci su negovani u uslovima visoke vlažnosti i temperature vazduha od 20°C u periodu od 7 dana, a potom su držani 26 dana na istoj temperaturi i pri relativnoj vlažnosti vazduha od 50%. 24 h pre ispitivanja (pri starosti od 28 dana) uzorci su izvađeni iz komore i ostavljeni da se kondicioniraju u laboratorijskim uslovima.

Qian je sa saradnicima [134] predstavio metod po kojem može da se uradi procena performansi prijanjanja reparaturnih materijala na bazi cementa za betonsku podlogu. Za potrebe ispitivanja nove metode spravljene su betonske „podloge“ (u dve veličine) u obliku diska sa rupom u sredini (u obliku obrnute zarubljene kupe). Nakon dva meseca nege, u betonske „podloge“ ugrađen je po jedan od tri reparaturna maltera, slika V-6. Svaka od mešavina je spravljena sa različitom vrstom cementa. Prva je sadržala magnezijum-fosfatni cement, druga sulfoaluminatni cement, a treća OPC 42,5. Odnosi cementna, agregata (max 5 mm), vode i superplastifikatora u mešavinama iznosili su: 1:1,5:0,12:0, 1:1,5:0,25:0,01 i 1:1,5:0,25:0,01, respektivno. Nakon sedam dana adekvatne nege, ispitana je čvrstoća prijanjanja između reparaturnog maltera i podloge, kao i propustljivost ove veze na vodu i rastvor od 0,1 mol/L NaOH. Za potrebe poređenja rezultata, u slučaju ispitivanja čvrstoće prijanjanja između reparaturnog maltera i podloge, spravljani su i „tradicionalniji“ uzorci (slika V-7), od istog beton i istih mešavina maltera, pod istim uslovima.

Čvrstoća pri pritisku reparaturnih maltera nakon 7 dana je iznosila 61,8 MPa (u slučaju magnezijum-fosfatnog cementa), 66,1 MPa (u slučaju OPC) i 69,1 MPa (u slučaju sulfoaluminatnog cementa).

Na osnovu vizuelnog pregleda ustanovljena je pojava prslina u novopredloženim saniranim uzorcima koji su sanirani sa malterima koji sadrže OPC ili sulfoaluminatni sistem, dok u slučaju magnezijum-fosfatnog cementa nisu registrovane prsline na kontaknoj zoni između podloge i maltera. U slučaju „tradicionalnijih“ saniranih uzoraka u obliku prizmi, nije zabeležena pojava prslina u kontaknoj zoni. Dobijeni rezultati ukazuju na prednosti predložene metode sa aspekta uticaja skupljanja na

čvrstoću prijanjanja reparaturnog maltera za betonsku podlogu. Na osnovu ispitivanja novopredloženih saniranih uzoraka na čvrstoću prijanjanja reparaturnog maltera i betonske „podloge“, kao i propustljivosti vode i navedenog rastvora, ustanovljeno je da je ostvareno najbolje prijanjanje u slučaju primene reparaturnog maltera na bazi magnezijum-fosfatnog cementa, potom na bazi sulfoaluminatnog cementa, dok je referenti reparaturni malter ostvario najlošiju vezu sa podlogom.

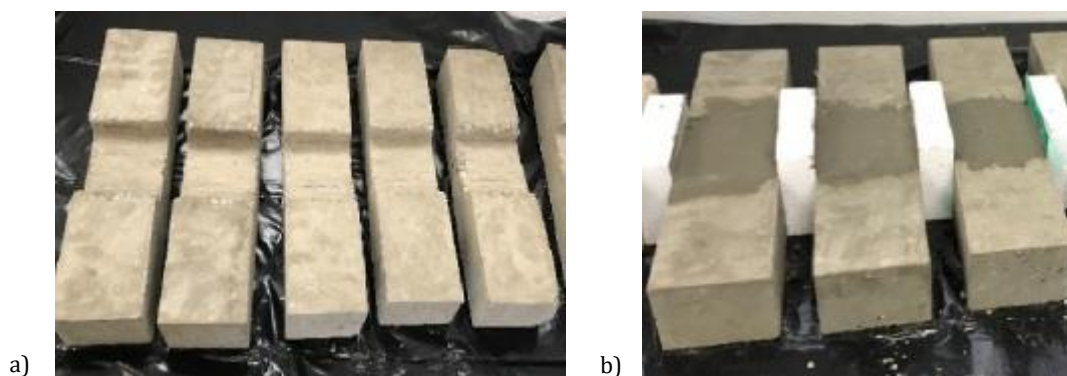


Slika V-6. Sanirani uzorak: a) Shema, b) Betonska „podloga“ u čiju je sredinu ugrađen reparaturni malter do određene visine [134]



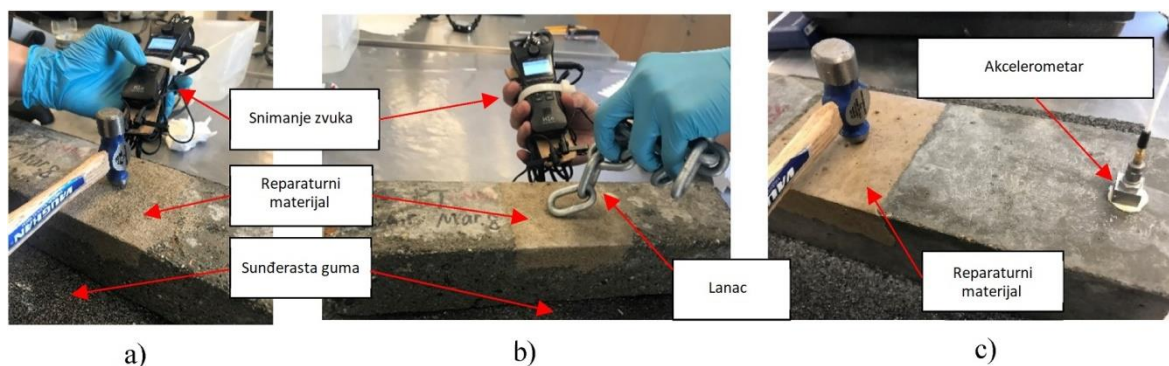
Slika V-7. Sanirani uzorci: levo – prizme dimenzija 40 mm×40 mm×160 mm, desno - prizme dimenzija 40 mm×40 mm×140 mm [134]

Wanga i Gupta [184] predložili su primenu metoda bez razaranja kako bi se odredio uticaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na stanje kontakne površine između reparaturnog maltera i betonske podloge, kao i na stvaranje oštećenja u materijalu. Za potrebe ispitivanja, napravljene su grede sa otvorom (slika V-8a), kao i cele grede kao kontrolna grupa. Nakon ugrađivanja betona u kalup, uzorak je negovan 24 časa na $18 \pm 2^\circ\text{C}$, pri relativnoj vlažnosti vazduha od 60%, potom je ugrađen reparaturni SCM malter/reparaturni SCM beton (slika V-8b), a sanirani uzorka je negovan dodatnih 24h na $18 \pm 2^\circ\text{C}$, pri relativnoj vlažnosti vazduha od 60%, nakon čega je narednih 28 dana negovan u vodi temperature $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Po završetku nege uzorci su podvrgnuti ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja. Jedan ciklus zamrzavanja/odmrzavanja sastojao se od snižavanja temperature uzorka sa 4 na -18°C i podizanje sa -18 na 4°C za oko 3,5 sata.



Slika V-8. Betonske podloge: a) Pre nanosenja reparaturniog materijala, b) Sanirane betonske podloge – sanirani uzorak [184]

Nakon 0, 30, 60, 90, 150, 210, 270 i 300 ciklusa, korišćene su metode bez razaranja (metoda rezonantne frekvencije, metoda udaranja čekićem i modifikovana metoda povlačenja lanca) za određivanje rezonantne frekvencije i izračunavanje dinamičkog modula elastičnosti saniranih uzoraka, slika V-9. Takođe je praćen gubitak mase uzoraka, određene su i čvrstoće na zatezanje pri savijanju uzoraka nakon 0 i 300 ciklusa. Nakon ispitivanja saniranih uzoraka na zatezanje savijanjem, napukli uzorci su stavljeni pod optički mikroskop kako bi se odredile karakteristike prslina u kontaktnoj zoni.

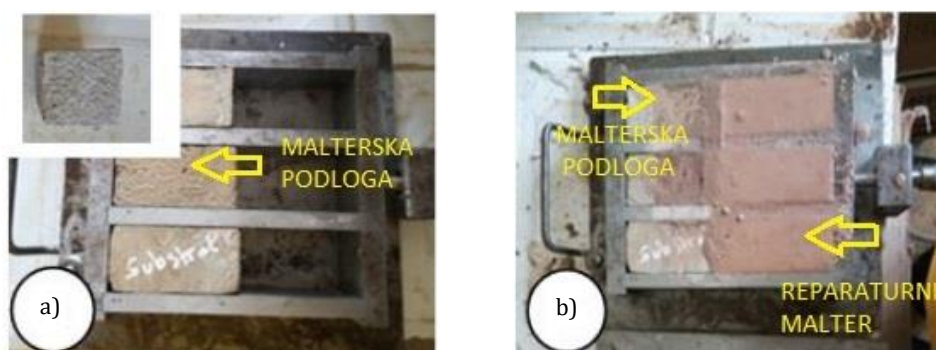


Slika V-9. Ispitivanje uticaja ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja na sanirani uzorak: a) Metodom udaranja čekićem, b) Modifikovanom metodom povlačenja lanca i c) Metodom rezonantne frekvencije [184]

Eksperimentalno istraživanje je pokazalo da je promena dinamičkog modula elastičnosti, utvrđena na osnovu ispitivanja bez razaranja, u skladu sa promenom u drugim merenjima, uključujući čvrstoću na zatezanje pri savijanju, širinu prslina u kontaktnoj zoni i gubitak mase uzorka nakon izlaganja ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja. Ova studija je takođe potvrdila primenljivost predloženih metoda bez razaranja za detekciju oštećenja u reparaturnom materijalu nakon ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja. Od ispitanih mešavina, reparaturni SCM beton je imao najveće smanjenje modula elastičnosti (za 14,3%), najveći gubitak mase,

najintezivnije površinsko ljušpanje i najveću prosečnu širinu prsline u kontaktnoj zoni. U slučaju uzorka saniranog reparaturnim SCM malterom, nakon 300 ciklusa imao je najveći prirast čvrstoće na zatezanje pri savijanju, i kod njega nisu detektovane prsline, a takođe je imao i najmanje smanjenje modula elastičnosti.

Benyahia i Ghrici [13] su ispitali uticaj primene prirodnog pucolana plovućca (< 0,125 mm) kao parcijalne zamene belog cementa CEM I 52,5 u reparaturnim samozbijajućim malterima sa aspekta čvrstoće prijanjanja reparaturnog maltera za maltersku podlogu, u vrućim klimatskim uslovima (tokom leta temperatura ide i do 45°C, a relativna vlažnost vazduha se kreće od 30% do 60%; lokacija: Klef, Alžir). Kao malterska podloga korišćene su poluprizme veličine 40 × 40 × 80 mm (slika V-10a), spravljene u laboratoriji, a zatim negovane u ambijentalnim uslovima u periodu od 6 meseci. Pet samozbijajućih maltera koji sadrže 0%, 10%, 20%, 30% i 40% prirodnog pucolana (plovućac) kao SCM, kao i mešavinu polipropilenskih vlakana i vlakna polivinil alkohola, korišćeno je za sanaciju datih malterskih podloga, ali i za spravljenje uzoraka kojima je ispitana čvrstoća pri pritisku i čvrstoća na zatezanje pri savijanju.



Slika V-10. Spravljanje kompozitnog uzorka: a) Postavljanje malterske podloge u kalup, b) Ugradnja reparaturnog maltera [13]

Sanirani kompozitni uzorci (slika V-10b), negovani su u vrućim klimatski uslovima (slika V-11) do starosti od 28, odnosno 56 dana. U toku prve nedelje nege, sanirani uzoci su dva puta dnevno prskani vodom. Uzorci samozbijajućih reparaturnih maltera negovani su u vodi do starosti od 7, 28 i 56 dana.

Na osnovu ispitivanja čvrstoće na zatezanje pri savijanju saniranih uzoraka utvrđeno je da su reparaturni malteri koji sadrže 10%, 20% i 30% prirodnog pucolana pokazali dobro prijanjanje za maltersku podlogu u vrućim klimatskim uslovima, koje se povećalo sa produženjem nege sa 28 na 56 dana. Takođe je zapaženo da je kontrolni sanirani uzorak imao najveće čvrstoće pri starosti od 28 i 56 dana, a da je sa povećanjem udela prirodnog pucolana dolazilo do smanjenja čvrstoća.



Slika V-11. Nega saniranih uzoraka u vrućim klimatskim uslovima [13]

Slična situacija je bila i u slučaju ispitivanja čvrstoće pri pritisku i čvrstoće na zatezanje pri savijanju uzoraka reparaturnih maltera. Pri starosti od 7, 28 i 56 dana, referentni reparaturni malter je imao najveće čvrstoće, dok je sa povećanjem udela prirodnog pucolana došlo do smanjenja čvrstoća.

Sa aspekta ispitivanja čvrstoće pri pritisku i čvrstoće na zatezanje pri savijanju uzoraka reparaturnih maltera ustanovljeno je da je optimalna količina zamene belog cementa sa prirodnim pucolanom 10%. U pogledu adhezije reparaturnog maltera za maltersku podlogu, utvrđeno je da se beli cement može supstituisati sa prirodnim pucolanom u količini do 30%.

Behfarnia i saradnici [12] su ispitali uticaj morske sredine i sirove nafte na vezu između reparaturnih materijala i betonske podloge. Betonske podloge su izrađene u skladu sa standardom BS 6319-4, slika V-12. Izliveni su kao prizme dimenzija 55×100×150 mm, a zatim su dijamantskom testerom isečene pod uglom od 30° u odnosu na vertikalnu osu. Za pripremu površine betonske podloge korišćena je metoda nagrizanja rastvorom hlorovodonične kiseline.

Sanirani uzorci su dobijeni tako što su betonske podloge vraćene u kalupe u kojima su i izliveni, a u preostali prostor kalupa su ručno ugrađeni reparaturni betoni (sa 0% mikrosilike-referentni reparaturni beton, i sa 15% mikrosilike kao SCM). Sanirani uzorci su posle 24 h izvađeni iz kalupa i stavljeni u vodu u kojoj su proveli naredna 24 h. Nakon ukupno 48 h od spravljanja, sanirani uzorci su izvađeni iz vode. Za potrebe ispitivanja dejstva sirove nafte na čvrstoću prijanjanja (adheziju) reparaturnog materijala za betonsku podlogu, jedan deo referentnih uzoraka i uzoraka koji sadrže 15% mikrosilike su ostavljeni u laboratorijskim uslovima, dok je drugi deo uzoraka potopljen u sirovu naftu. U slučaju ispitivanja dejstva sulfata na adheziju reparaturnog materijala za betonsku podlogu, jedan deo referentnih uzoraka i uzoraka koji sadrže 15% mikrosilike su ostavljeni u vodi, dok je drugi deo uzoraka potopljen u 15% rastvor $MgSO_4$ (pH vrednost rastvora je održavana na 7).

Nakon 180 dana, sanirani uzorci su izvađeni iz sirove nafte, i ispitana im je čvrstoća prijanjanja na koso smicanje (kombinacija čvrstoće pri pritisku i čvrstoće na smicanje), kao i njihovim kontrolnim uzorcima koji su negovani u laboratorijskim uslovima, slika V-13. Nakon 90 i 180 dana, sanirani uzorci su takođe izvađeni i iz sulfatnog rastvora. Ispitana im je čvrstoća na koso smicanje, kao i njihovim kontrolnim uzorcima koji su držani u vodi.



Slika V-12. Uzorci betonske podloge [12]



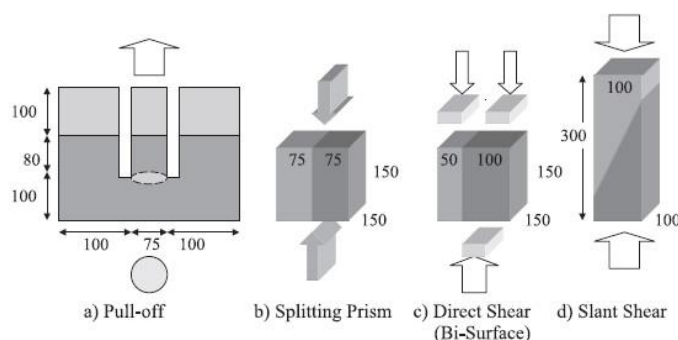
Slika V-13. Ispitivanje saniranog uzorka na koso smicanje [12]

Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je (i) da se jačina athezije reparaturnog betona smanjuje usled izloženosti sirovoj nafti, (ii) da se štetni efekat sirove nafte može značajno smanjiti upotrebom odgovarajućeg procenta mikrosilike kao SCM prilikom spravljanja reparaturnog betona, i (iii) da u slučaju dejstva sulfata ($15\% \text{MgSO}_4$) dolazi do smanjenja čvrstoće (adhezije) referentnih maltera za 12,8% i 19,4% nakon 90 i 180 dana izloženosti sulfatnom rastvoru, dok je redukcija čvrstoće (adhezije) reparaturnih betona koji sadrže 15% mikrosilike, pri istim starostima i uslovima, manja i iznosi 5,4% i 8,7%, respektivno.

Momayez je sa saradnicima [122] istraživano efekat primene različitih metoda ispitivanja na dobijenu čvrstoću prijanjanja reparaturnog materijala za betonsku podlogu. Proučene su četiri metode ispitivanja, a testirani su SCM reparaturni materijali (sa 0%, 5%, 7%, i 10% silikatne prašine kao SCM) kao i uticaj nivoa hrapavosti betonske podloge (gruba i fina hrapavost). Od metoda korišćene su (i) *pull-off* metoda, (ii) metoda ispitivanja prijanjanja reparaturnog materijala za betonsku podlogu pri cepanju prizme, (iii) metoda direktnog smicanja duž dve površine, i (iv) metoda kosog smicanja. Sheme uzoraka po metodama su prikazane na slici V-14.

Prvo je spravljen beton za izradu betonskih podloga. Nakon 24 h od spravljanja, uzorci su izvađeni iz kalupa, površina im je očišćena i ohrapavljena (grubo: neravnine od 7-8 mm, fino: neravnine od 3-4 mm), potom su stavljeni u vodu. Pri starosti od 28 dana uzorci su izvađeni iz vode i ostavljeni da se suše narednih 30 dana. Pre

nanošenja adekvatnog vezivnog sredstva u debljini od 3 mm, površina im je očetkana žičanom četkom, a nečistoće su odstranjene vazduhom pod pritiskom.



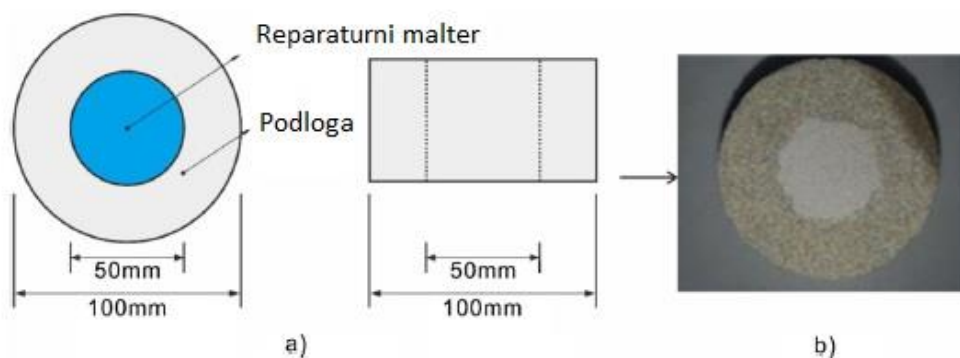
Slika V-14. Vrste ispitivanja čvrstoće prijanjanja (adhezije) reparaturnog materijala za podlogu [122]: a) Pull-off metoda, b) Metoda cepanjem, c) Metoda direktnog smicanja duž dve površine, d) Metoda kosog smicanja

Nakon saniranja betonske podloge reparaturnim betonima, sanirani uzorci su negovani u uslovima visoke vlažnosti i temperature vazduha od 20°C u periodu od 7 dana, a potom su držani 26 dana na istoj temperaturi i pri relativnoj vlažnosti vazduha od 50%. 24 h pre ispitivanja (pri starosti od 28 dana) uzorci su izvađeni iz komore i ostavljeni u laboratorijskim uslovima.

Na osnovu rezultata ispitivanja zaključeno je da čvrstoća prijanjanja u velikoj meri zavisi od izbora metode ispitivanja. Čvrstoća prijanjanja za istu vrstu saniranog uzoraka je bila i do osam puta veća u slučaju primene dve različite metode ispitivanja, stoga je preporučeno da izbor metode bude u skladu sa naponskim stanjem koje će se javiti u toku eksploatacije. Najveće vrednosti čvrstoće prijanjanja dobijene su primenom metode kosog smicanja, a potom sledi metoda ispitivanja smicanja po dve površine (*Bi-Surface*), metoda ispitivanja prijanjanja pri cepanju, a najmanje vrednosti dobijene su primenom *pull-off* metode. Čvrstoća prijanjanja raste sa povećanjem sadržaja silikatne prašine (prvenstveno do 7%), za sve metode ispitivanja. Veća hrapavost betonske podloge dovodi do povećane sile prijanjanja. Povećanje se kretalo od 9% u slučaju *pull-off* metode do 25% u slučaju metode kosog smicanja. Predloženo ispitivanje smicanja po dve površine (*Bi-Surface*) se lako izvodi i daje dosledne rezultate.

Chang i Choi [34] su osmislili i ispitivali reparaturne maltere sa poboljšanom otpornošću na dejstvo kiseline, kojima mogu da se saniraju delimično oštećene betonske kanalizacione cevi. Korišćene su ubrzane metode ispitivanja kako bi se vrednosvale performanse reparaturnih maltera izloženih dejstvu sumporne kiseline iz spoljašnjeg okruženja. Za izradu podloga korišćena je malterska mešavina (OPC 534 kg/m³, w/c = 0,4, pesak 1334 kg/m³). Spravljeno je ukupno šest reparaturnih malterskih mešavina: referentna sa brzovezujućim cementom (brzovezujući cement

665 kg/m³, w/c = 0,43, pesak 1042 kg/m³, retarder 3,325 kg/m³(0,5%)), tri mešavine sa brzovezujućim cementom koji je supstituisan sa PVA smolom u prahu u količini od 1,5%, 3% i 4,5% (brzovezujući cement 655/645/635 kg/m³, PVA smola u prahu 10/20/30 kg/m³, w/c = 0,43, pesak 1042 kg/m³, retarder 3,325 kg/m³(0,5%)) i dve mešavine sa brzovezujućim cementom kod kojeg 1,5%, 3% i 4,5% supstituisano sa brzovezujućim cementom koji je supstituisan sa najlonskim vlaknima u količini od 1,5%, 3% i 4,5% (brzovezujući cement 635 kg/m³, PVA smola u prahu 30 kg/m³, w/c = 0,43, pesak 1042 kg/m³, retarder 3,325 kg/m³ (0,5%), najlonska vlakna 66,5/199,5 kg/m³). Za poboljšanje prijanjanja reparaturnog maltera za postojeću betonsku podlogu korišćena je smola u prahu na bazi polivinil acetata (PVA). Ispitana je čvrstoća pri pritisku reparaturnih maltera (uzorci dimenzija 40 mm×40 mm×160 mm), starih 28 dana, u skladu sa ISO 679. Sanirani uzorci su osmišljeni tako da simuliraju parcijalnu sanaciju stvarnih kanalizacionih cevi, slika V-15.

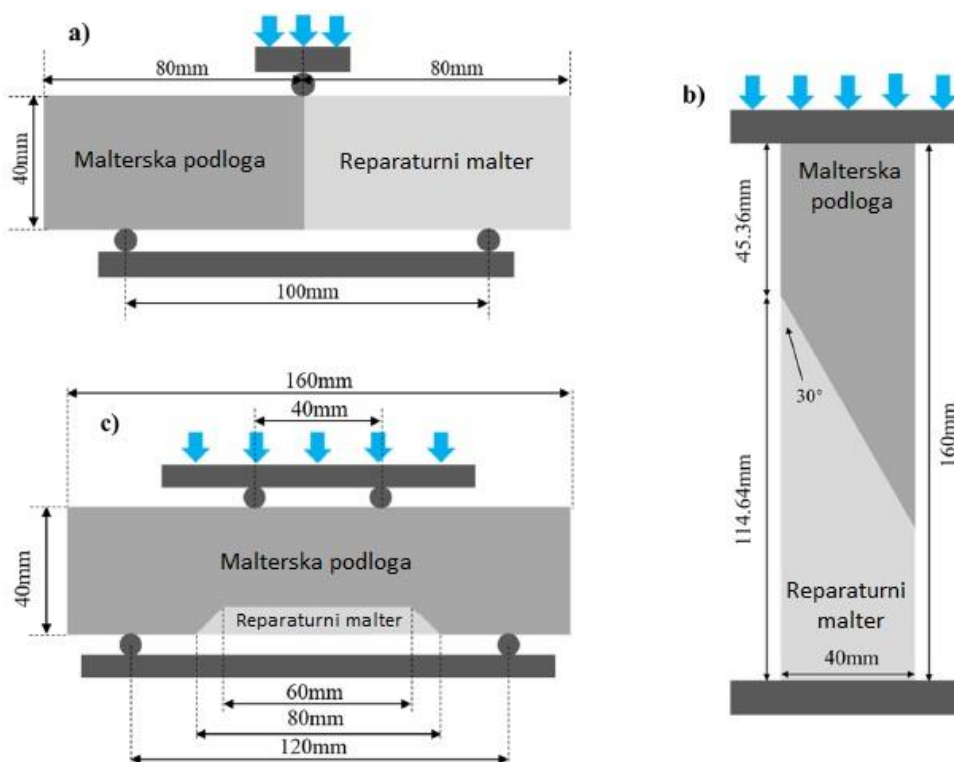


Slika V-15. Saniran uzorak: a) Shema, b) Stvaran uzorak [34]

Rezultati ubrzanih ispitivanja korišćeni su za kvantitativnu analizu vodonepropusnosti (preko ispitivanja dejstva hloridnih jona, odnosno koeficijenta migracije hlorida), vodonepropusnosti sa dejstvom kiseline (ubrzano ispitivanje vodonepropusnosti nakon uranjanja saniranih uzoraka u 10% rastvor sulfatne kiseline, u trajanju od 7 dana) i vodonepropusnosti sa ciklusima smrzavanja i odmrzavanja (u skladu sa ASTM C 666, 100 ciklusa, 1 ciklus traje 4h, temperaturni opseg od -18°C do +4°C) spoja između reparaturnog maltera i malterske podloge. Na osnovu rezultata ispitivanja utvrđeno je da sa povećanjem udela PVA smole u prahu dolazi do povećanja vodonepropustljivosti kontakta između reparaturnog maltera i podloge. Za sanaciju betonske kanalizacione cevi u umereno agresivnoj sredini, preporučuje se malterska mešavina koja sadrži brzovezujući cement i 4,5% PVA smole u prahu. Međutim, u sredini koja zahteva visoku otpornost na dejstvo sulfata i ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja preporučuje se upotreba reparaturne malterske mešavine koja sadrži brzovezujući cement, 4,5% PVA smole u prahu i 0,03% najlonskih vlakana. Od svih ispitanih reparaturnih maltera, mešavina sa 1,5% PVA smole u prahu je imala najveću čvrstoću pri pritisku (55,3 MPa), dok je sa povećanjem

udela smole došlo je do opadanja čvrstoće. Najmanju čvrstoću imao je reparaturni malter sa 0,01% najlonskih vlakana i 4,5% PVA smole u prahu (35,8 MPa).

Zuo sa saradnicima [191] je ispitao performanse veze novog (reparaturnog) i starog (podloga) maltera, kao i oštećenje nakon ciklusa mokro-suvo odnosno toplo- hladno, preko ispitivanja mehaničkih svojstava. Reraraturni malteri sa različitim vodocementnim faktorima, odnosima peska i cementa, sadržajem PVA vlakana i dodatkom disperzibilnog polimernog praha su spravljeni, a potom i naneti na maltersku podlogu staru 28 dana. Da bi rezultati ispitivanja bili uporedivi, dimenzije svih saniranih uzoraka iznosile su 40 mm×40 mm×160 mm. Čvrstoća na zatezanje pri savijanju u tri tačke (slika 16a) i čvrstoća na koso smicanje su poslužile za procenu jačine veze starog i novog maltera, slika 16b. Jačina veze između reparaturnog maltera i podloge nakon ciklusa toplo-hladno i spregnutih ciklusa mokro-suvo i toplo-hladno određena je preko ispitivanja kosog smicanja i ispitivanja čvrstoće na savijanje u četiri tačke, slika 16c. Na uzorcima reparaturnih maltera starih 28 dana urađena su i sledeća ispitivanja: ispitivanje čvrstoće pri pritisku, određivanje dinamičkog modula elastičnosti i određivanje termičkih koeficijenata ekspanzije u vodozasićenom i suvom stanju.

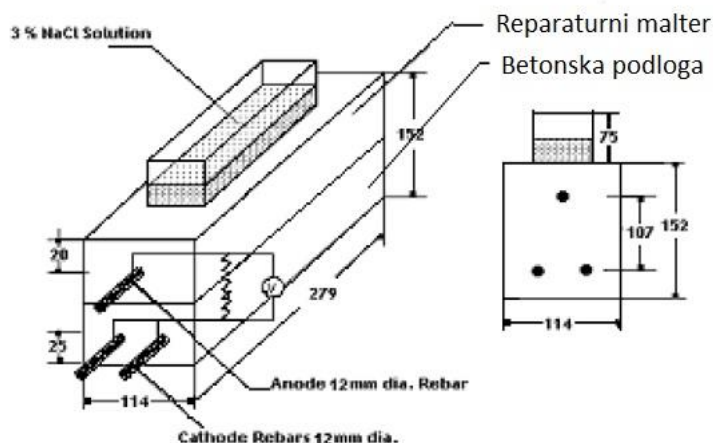


Slika V-16. Sheme ispitivanja saniranih uzoraka: a) Čvrstoća na zatezanje savijanjem, b) Čvrstoća na koso smicanje, i c) Čvrstoća na savijanje sanirane grede u četiri tačke [191]

Rezultati ispitivanja su pokazali da je test kosog smicanja pogodan za procenu čvrstoće prijanjanja između reparaturnog maltera i malterske podloge. Komponentni

malterijali reparaturnih maltera utiču na čvrstoću spoja staro-novo, ali imaju i mali uticaj na čvrstoću na savijanje saniranih greda. Udruženi efekat ciklusa mokro-suvo i toplo-hladno rezultirao je ozbiljnijim propadanjem spoja između reparaturnog maltera i podloge u poređenju sa dejstvom isključivo ciklusa toplo-hladno.

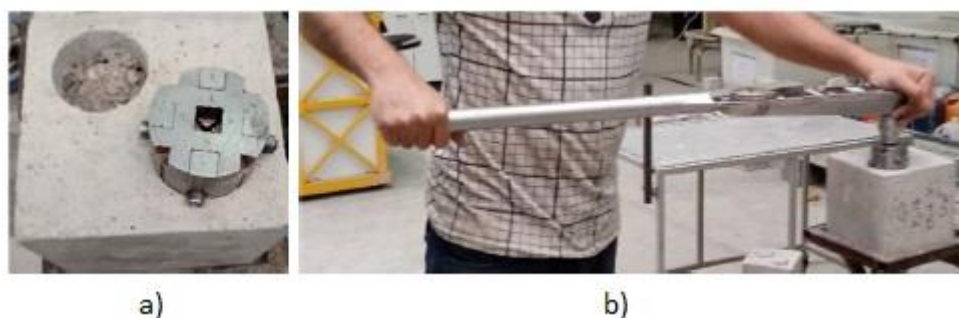
Saraswathy i Song [146] su u svom istraživanju uradili procenu pet vrsta modifikovanih maltera na bazi cementa sa aspekta trajnosti. Za izradu reparaturnih malterskih mešavina korišćen je OPC, rečni pesak dejonizovana voda, mikrosilica, superplastifikator, netretiran elektrofilterski pepeo i tretiran elektrofilterski pepeo (OPC/pesak=1:3, W/CM=0,42). Otpornost reparaturnog maltera na koroziju ocenjivana je na osnovu rezultata ispitivanja upijanja vode, brzog testa na prodiranje jona hlorida, na osnovu potrebnog vremena za nastanak pukotine usled dejstva apliciranog napona (*impressed voltage*), ispitivanje uticaja 3% rastvora NaCl (izložena je samo gornja površina uzorka) na dubinu prodora hlorida (*ponding test*), makroćelijskog korozionog testa (*Macrocell corrosion test*) u skladu sa ASTM G109:2001 (slika V-17), merenje gubitka mase itd.



Slika V-17. Shematski prikaz makroćelijskog korozionog testa [146]

Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeno je da su modifikovani reparaturni malteri na bazi cementa, koji sadrže različite mineralne dodatke (leteći pepeo i/ili silikatna prašina) pokazali poboljšanu otpornost na koroziju. Mešavina sa 5% tretiranog elektrofilterskog pepela i 5% mikrosilike je imala bolje performanse u odnosu na ostale mešavine, te se može koristiti za konstrukcijske sanacije, dok se preostale mešavine ispitanih reparaturnih maltera mogu koristiti za nekonstrukcijske sanacije.

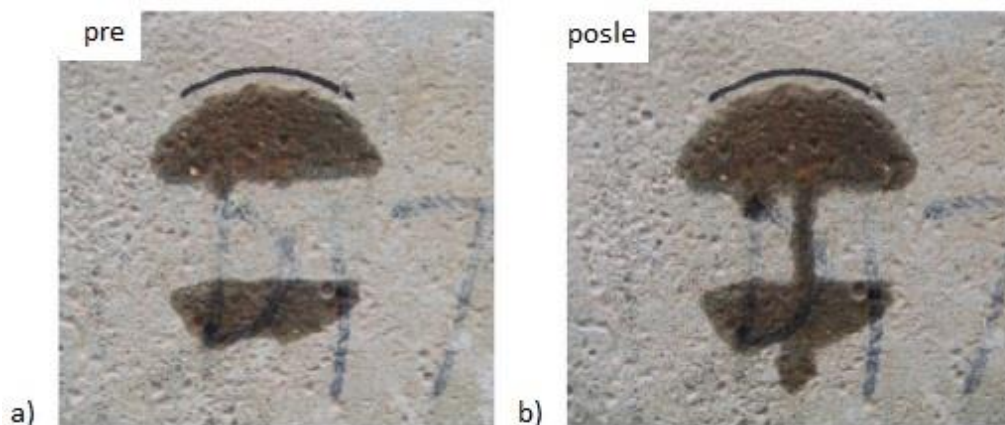
Varzaneh i Naderi [180] su odredili čvrstoće (pri pritisku, na zatezanje, na zatezanje pri savijanju) reparaturnih SCM maltera različite starosti, očvrslili pod različitim režimima nege, a koristili su i *in situ* metode „*Friction-Transfer*“ (slika V-18) i „*Pull-off*“.



Slika V-18. Situ metoda „Friction-Transfer“: a) Pričvrščivanje metalnog elementa za površinu uzorka;; b) Ispitivanje smičuće čvrstoće prianjanja [180]

Eksperimenti su izvedeni na malterima starim 3, 7, 28, 42 i 90 dana. Rezultati su pokazali visoki stepen korelacije između čvrstoće pri pritisku, čvrstoće na zatezanje i čvrstoće na zatezanje pri savijanju SCM maltera (laboratorijska ispitivanja) sa rezultatima dobijenim primenom „Friction-Transfer“ i „Pull-off“ in situ metoda, stoga se ove dve metode mogu koristiti kao *in situ* metode za određivanje čvrstoće SCM maltera.

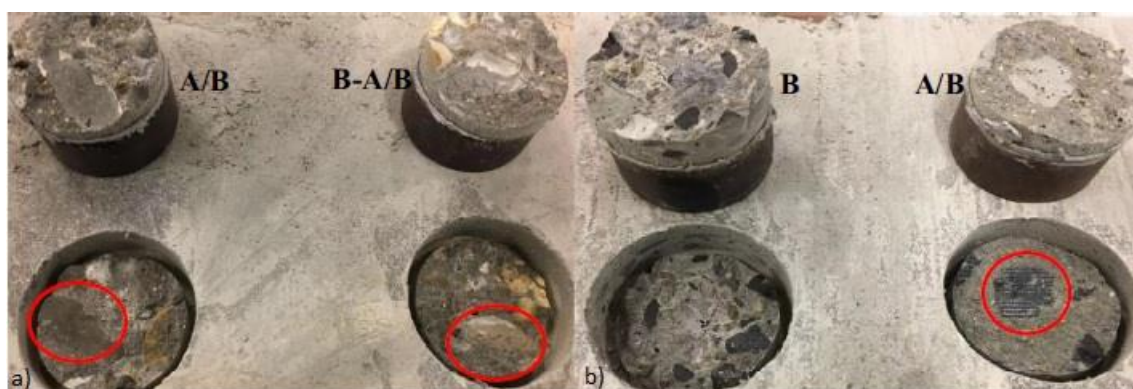
Shi i saradnici [148] su odredili uticaj različitih režima nege na mehanička svojstva, proces hidratacije, strukturu pora, propustljivost (vode, hloridnih jona, gasa) i *in-citu* merenje transportnih svojstava kompozitnog maltera na bazi cementa (referentni malter, malter sa 15% FA, malter sa 15% GGBS i malter sa 15% FA+15% GGBS), a ujedno su uspostavili i korelaciju između navedenih svojstava. Za procenu *in situ* površinskih transportnih svojstava reparaturnog maltera korišćena je metoda namernog prskanja vodom (slika V-19) i metoda površinske propustljivosti gasova. Primenljivost navedene dve metode je potvrđena uspostavljanjem korelacija sa strukturom pora i konvencionalnim pokazateljima trajnosti.



Slika V-19. Metoda namernog prskanja vodom: a) Prskanje je u toku, b) Završetak prskanja [148]

Na osnovu rezultata utvrđeno je da primena mineralnih dodataka smanjuje mehanička svojstva i nepropustljivost SCM maltera starih 28 dana. Takođe je ustanovljeno da i voda koja potiče od režima nege ima važanu ulogu u procesu očvršćavanja maltera, a stoga utiče i na njegova mehanička svojstva. Postoji jasna korelacija između koeficijenta sorpcije, difuzije jona hlorida, propustljivosti gasa i mehaničkih svojstava, bez obzira na primenjeni režim nege i vrstu/kombinaciju SCM. Utvrđeno je da su rezultati primenjenih *in situ* metoda u korelaciji sa strukturom pora, mehaničkim svojstvima i propustljivošću maltera. Odnos je opisan kroz linearne funkcije sa visokim koeficijentima determinacije. Ove korelacije potvrđuju da se metoda namernog prskanja vodom i metoda površinske propustljivosti gasova mogu koristiti za predviđanje mehaničkih svojstava, propustljivosti, pa čak i trajnosti materijala na bazi cementa.

Yazdi je sa saradnicima [187] istražio kako tehnike uklanjanja „oštećenog“ betona utiču na betonske podloge različitih sastava, i kako se to odražava na čvrstoću prijanjanja pri zatezanju reparaturnog maltera. U tu svrhu, površine betonskih podloga, spravljenih od sitnozrnog betona, betona sa max zrnim agregata od 16 mm i betona sa max zrnim drobljenog krečnjaka od 20 mm, tretirane su na tri načina: vodom pod pritiskom, peskarenjem kvarcnim peskom i pneumatskim čekićem. Za određivanje površinske hrapavosti podloga korišćena su automatska laserska merenja i tehnika volumetrijskog peska. Ispitan je uticaj parametara betonske podloga, kao što su veličina agregata i uniformnost, na čvrstoću pranja i tip loma, slika V-20.



Slika V-20. Različiti tipovi loma (kada je betonska podloga tretirana vodom pod pritiskom): a) Podloga spravljena od betona sa max zrnim agregata od 16 mm, b) Podloga spravljena od betona sa max zrnim drobljenog krečnjaka od 20 mm [187]

Uniformnost podloge ocenjena preko izmerene poroznosti. Na osnovu rezultata ispitivanja ustanovljeno je da čvrstoća prijanjanja, površinska čvrstoća na zatezanje, kao i tipa loma i hrapavosti površine zavise od veličine agregata, oblika agregata i uniformnosti betonske mešavine. Najveću veličinu zrna agregata, najveću poroznost zajedno sa najvećom gustinom mikroporslina i hrapavošću imala je betonska podloga

spravljena sa drobljenim krečnjakom. Uočena je velika korelacija između izmerenog transporta vode i čvrstoće prijanjanja pri zatezanju. Slaba tranzitna zona i pojava mikroprslina imali su negativan uticaj na čvrstoću prijanjanja kod uzoraka tretiranih sa vodom pod pritiskom i pneumatskim čekićem. Uticaj vode pod pritiskom na čvrstoću prijanjanja reparaturnog maltera za podlogu je zavisio od karakteristika komponentnih materijala, kao što je veličina zrna agregata.

Ortega je sa saradnicima [130] ispitala ukupno 18 aksijalno opterećenih armiranobetonskih stubova, od kojih je 12 sa jedne („oštećene“) strane sanirano reparaturnim SCM malterima pre nego što su podvrgnuti aksijalnom opterećenju do loma. Cilj istraživanja bio je da se utvrde performanse stubova koji su sanirani različitim malterima, da se proceni uticaj korišćenih reparaturnih maltera klase R3 i R4, kao i primene vezivnog sredstva (poseban sloj koji se nanosi kako bi se povećala prionljivost reparaturnog materijala za betonsku podlogu). Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima neoštećenih kontrolnih stubova i sa rezultatima nesaniranih oštećenih stubova, kako bi se vrednovala efikasnost sanacije i povećanje kapaciteta nosivosti stubova.

Stubovi su armirani sa po četiri uzdužne šipke prečnika 10 mm, u centralnoj zoni su utegnutim sa uzengijama prečnika 6 mm. „Glave“ stubova su armirane sa uzengijama prečnika 8 mm i 10 mm (slika V-21). Granica razvlačenja armature je iznosila 500 MPa.

Sanacije stubova su izvedene pri starosti betonske podloge od 59 dana, na ambijentalnoj temperaturi (28-34°C). Za sanaciju stubova korišćeni su komercijalni reparaturni malteri, klase R3 i R4 (ovi proizvodi su jednokomponentni, vlaknima ojačani reparaturni SCM malteri, a svojstva ispitana pri starosti od 28 dana su prikazana u tabeli V-7), a naneseni su špahtlom u skladu sa standardom EN 1504-3.





Slika V-21. Proces formiranja saniranog uzorka [130]: a) Ošalovani stub sa postavljenom armaturom, b) „Oštećen“ stub koji treba da se sanira, c) Kvašenje dela stuba koji će se sanirati u slučaju kada se direktno nanose reparaturni malteri, d) Nanošenje vezivnog sredstva, e) Nanošenje reparaturnog maltera u dva sloja i f) Zaglađivanje površine saniranog dela stuba

Tabela V-7. Karakteristike komercijalnih reparaturnih maltera klase R3 i R4 pri starosti od 28 dana [130]

Parametar	Komercijalni malter klase R3	Komercijalni malter klase R4
Čvrstoća pri pritisku (MPa)	40,3	54,0
Čvrstoća prijanjanja (MPa)	1,9	2,5
Modul elastičnosti (GPa)	25,2	36,7
Čvrstoća pri savijanju (MPa)	8,3	9,0

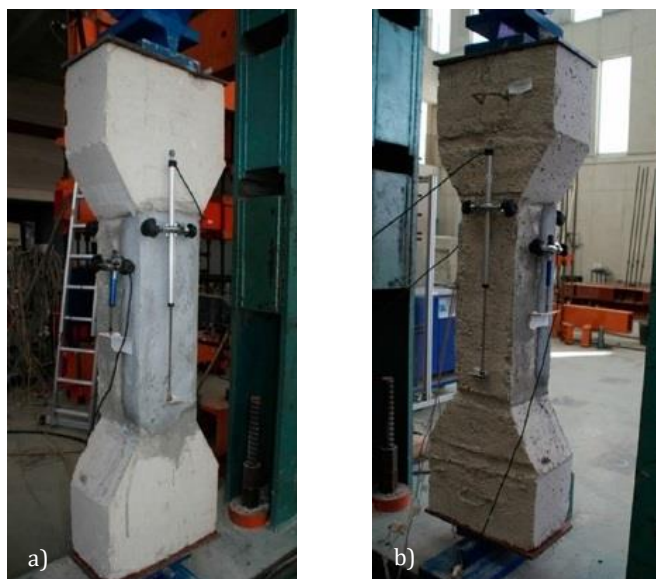
Pre nanošenja prvog sloja reparaturnog maltera, jedna grupa stubova je nakvašena u zoni koja je predmet sanacije, dok je kod druge grupe stubova naneto vezivno sredstvo u predmetnoj zoni. Karakteristike vezivnog sredstva prikazane su u tabeli V-8.

Tabela V-8. Karakteristike komercijalnog vezivnog sredstva pri starosti od 28 dana [130]

Parametar	Komercijalno vezivno sredstvo
Čvrstoća pri pritisku (MPa)	39,0
Čvrstoća prijanjanja (MPa)	8,0
Čvrstoća pri savijanju (MPa)	3,0

Merne trake (*strain gauges*) su ugrađene na četiri uzdužne armaturne šipke stuba. Deformetri (*displacement sensors*) su postavljeni na saniranu stranu stuba kao i na njoj naspramnu stranu, tako da obuhvataju deo saniran sa malterom i deo neoštećenog betona. Treći deformetar je postavljen na jednoj od preostale dve strane

stuba radi merenja relativnog pomeranja betona i maltera, slika V-22. Stubovi su ispitani na pritisak pomoću hidraulične prese od 2500 kN.



Slika V-22. Postavljanje opreme za merenje relativnog pomeranja na sanirani stub [130]: a) Sanirana strana stuba, b) Naspramna strana stuba

Kod sve četiri vrste saniranih uzoraka (oštećeni stubovi sanirani sa reparaturnim malterom klase R3 ili R4, sa ili bez vezivnog sredstva) tipovi loma su bili slični – reparaturni malter se odvojio od stuba, nakon čega se stub ponašao slično kao i nesanirani oštećeni stubovi kod kojih je usled dejstva ekscentričnog pritiska došlo do loma. Kako bi se uporedili dobijeni rezultati sračunati su koeficijenti efikasnosti sanacije (odnos maksimalnog opterećenja koje može da ponese sanirani stub u odnosu na ono koje može da podnese neoštećeni stub, izražen u procentima), kao i koeficijenti povećanja otpornosti (odnos maksimalnog opterećenja koje može da ponese sanirani stub u odnosu na ono koje može da podnese nesanirani oštećeni stub, izražen u procentima). Koeficijenti efikasnosti sanacije u slučaju saniranih stubova sa reparaturnim malterom klase R3 sa i bez vezivnog sredstva, kao i sa reparaturnim malterom klase R4 sa i bez vezivnog sredstva, iznosili su 97%, 93%, 65% i 65%, dok su koeficijenti povećanja otpornosti iznosili 150%, 146%, 102% i 102%, respektivno. Rezultati ispitivanja su ukazali na činjenicu da su u okviru predmetnog eksperimenta stubovi sanirani malterom klase R3 povratili skoro svu nosivost (koju imaju neoštećeni stubovi), za razliku od stubova saniranih sa malterom klase R4, najverovatnije zbog bolje kompatibilnosti sa betonskom podlogom s obzirom na niži modul elastičnosti i manju čvrstoću pri pritisku. Nije utvrđeno da li je prisustvo ili odsustvo vezivnog sredstva odlučujući faktor u poboljšanju ponašanja saniranih elemenata. Glavna novina studije leži u činjenici da je to prva eksperimentalna studija na RC stubovima saniranim samo s jedne strane, koristeći različite vrste maltera sa i bez nanošenja vezivanog sredstva.

3. ZAKLJUČCI

Na osnovu pregleda objavljenih rezultata relevantnih istraživanja sa aspekta primene prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela kao SCM u cementnim pastama, malterima i betonima mogu se formulirati sledeći zaključci:

- Ispitivanja su rađena prema različitim standardima, a često i prema internim metodama, dok za neka istraživanja nisu ni navedene metode ispitivanja. Ovo se posebno odnosi na ispitivanja skupljanja i upijanja vode, gde su režimi nege od posebnog značaja, a kod kojih trajanje nege u prikazanim radovima varira od 1 do 28 dana (u vlažnoj sredini, na vazduhu ili u vodi).
- S obzirom na razvoj čvrstoća pri pritisku u toku vremena, optimalna količina zamene PC sa NZ u betonima iznosi 15% (eventualno 10%), u malterima od 15-20%, dok se za paste ne može dati generalni zaključak usled velikog rasipanja rezultata, te je potrebno utvrditi optimalnu količinu za konkretni NZ.
- Kod pasta i betona kod kojih je jedan deo PC zamenjen sa NZ, sa smanjenjem vodo-vezivnog faktora (kada je manji od 0,45) dolazi do porasta čvrstoća u toku vremena u odnosu na referentnu vrednost.
- Čvrstoće maltera kod kojih je jedan deo PC zamenjen sa NZ ili sa mešavinama NZ+FA (10%) i NZ+FA+GBFS (10%), u toku vremena prelaze referentnu vrednost čak i pri vodo-vezivnom faktoru od 0,5.
- Utvrđeno je da sa povećanjem udela NZ dolazi do porasta potrebe za vodom, kao i da je procenat potrebne vode kod cementno-zeolitnih pasta niži u odnosu na paste kod kojih je deo PC supstituisan sa mešavinom NZ i FA.
- Jedna od glavnih prednosti upotrebe NZ kao SCM jeste povećanje otpornosti betona/maltera na prodor hlorida. Na osnovu objavljenih rezultata ispitivanja može se zaključiti da NZ i FA značajno doprinose povećanju otpornosti betona na prodor hloridnih jona, a efekat je veći sa povećanjem njihovog udela i smanjenjem vodo-vezivnog faktora. Takođe je ustanovljeno da se optimalna zamena PC sa NZ u ovom slučaju kreće između 10 i 20%.
- Korišćenje NZ/FA prilikom spravljanja cementnih maltera i betona dolazi do povećanja njihove otpornosti na dejstvo sulfata. S obzirom na rezultate navedenih istraživanja može se zaključiti da je optimalna količina supstitucije PC sa NZ u betonima otpornim na dejstvo sulfata 20%.
- Ustanovljeno je da NZ kao SCM u betonima i malterima doprinosi njihovoj otpornosti na dejstvo mraza, s tim da je potrebno uraditi prethodna ispitivanja za konkretni NZ kako bi se odredio nivo optimalne zamene PC, dok se pri primeni FA zajedno sa aerantima postižu zadovoljavajući rezultati, pod uslovom da FA nema veliki gubitak pri žarenju.

- Na osnovu rezultata prethodno navedenih istraživanja može da se zaključi da je optimalna količina supstitucije PC sa NZ oko 20%, kada je reč o smanjenom skupljanju usled sušenja betona i maltera. Isto važi i za primenu FA s tim da su rezultati njegove primene donekle bolji u odnosu na rezultate NZ.
- S obzirom na rasipanje rezultata ispitivanja upijanja vode betona i maltera ne može se dati generalna preporuka kada je reč o količini PC koji bi bio supstituisan sa NZ već je potrebno sa konkretnim NZ uraditi prethodna ispitivanja.
- Teški metali se izlužuju i iz čistog cementnog maltera i iz cementnog maltera koji sadrži elektrofilterski pepeo kao SCM, ali i iz cementnog maltera koji sadrži prirodni zeolit (u kojoj meri zavisi od konkretnog zeolita, od toga da li je i u kojoj meri već imobilisao neke toksične elemente itd.). Sa povećanjem vodovezivnog faktora, kao i supstitucije cementa sa elektrofilterskim pepelom dolazi do povećanja izluživanja. Pri većim starostima dolazi do smanjenja izluživanja u slučaju maltera koji sadrže zeolit (u konkretnom slučaju je zasićen cinkom) kao SCM. Različiti elementi, kao što su: Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba i Sb, se putem različitih mehanizma (ulazak u strukturu etringita ili C-S-H gela, adsorpcija itd.) vezuju/imobilisuju unutar kompozita na bazi cementa. U slučaju *tank leaching* testa da dolazi do ispiranja teških metala samo iz površinskih slojeva uzoraka maltera, dok je za oslobađanje metala iz unutrašnjeg dela uzorka u spoljašnje okruženje potrebno mnogo više vremena zbog poteškoća u difuziji, efekta fiksacije od strane cementnih hidrata i smanjenog izluživanja većine teških metala u uslovima visokog pH u unutrašnjem delu uzorka, stoga se preporučuje primena *shaken extraction* sa i bez unošenja CO₂ u tečnost (leachant). Prednost unošenja CO₂ je prvenstveno u održavanju stabilnosti pH, kao i činjenici da je ona biska sedmici, odnosno onoj koja se javlja u eksploatacionim uslovima. Ustanovljeno je da karbonatizacija može da dovede do povećanog izluživanja određenih elemenata.

Na osnovu pregleda izabranih, objavljenih rezultata istraživanja iz oblasti reparaturnih materijala na bazi cementa mogu se formulisati sledeći zaključci:

- Kao SCM najčešće je korišćena silikatna prašina, ređe elektrofilterski pepeo, mlevena granulirana zgora iz visokih peći i plovuđac, dok prirodni zeoliti nisu ispitivani kao SCM u reparaturnim cementnim malterima. U određenom broju istraživanja korišćeni su gotove – fabrički pripremljene malterske mešavine na bazi SCM čiji sastav nije poznat. Zaključeno je da primena SCM u reparaturnim materijalima na bazi cementa generalno pozitivno utiče na ispitana svojstva (fizička, mehanička, trajnost) kako samih reparaturnih maltera tako i saniranih uzoraka.

- Ispitivanja su fokusirana na adheziju reparaturnog materijala za betonsku podlogu, i najveći broj svojstava, uključujući i različite aspektne trajnosti, se indirektno ispituje upravo preko čvrstoće prijanjanja reparaturnog materijala za betonsku podlogu. Zaključeno je da sam izbor metode ispitivanja čvrstoće prijanjanja prvenstveno treba da zavisi od naponskog stanja koje će se javiti u toku eksploatacije elementa/konstrukcije, a prilikom izbora reparaturnog materijala neophodno je voditi računa o njegovoj kompatibilnosti sa betonskom podlogom.
- Prisustvo ili odsustvo vezivnog sredstva između betonske podloge i reparaturnog materijala ne predstavlja odlučujući faktor u poboljšanju ponašanja saniranih elemenata.
- Izbor metode za uklanjanje oštećenog betona i pripremu betonske podloge za nanošenje reparaturnog materijala ima određeni uticaj na čvrstoću prijanjanja maltera za podlogu. Sastav betonske/malterske mešavine sa kojom je spavljena podloga, kao i karakteristike samih komponentnih materijala (npr. vrsta agregata i veličina maksimalnog zrna agregata) takođe utiču na čvrstoću prijanjanja reparaturnog maltera za podlogu.
- Konstatovano je da istraživači koriste u svojim eksperimentima vrlo različite interne laboratorijske i *in situ* metode ispitivanja podobnosti materijala za određenu vrstu sanacije. U nekim slučajevima ustanovljene su i korelacije između pojedinih *in situ* metoda i laboratorijskih metoda ispitivanja, ali je generalno publikovan mali broj radova u kojima su prikazani rezultati ispitivanja reparaturnih maltera na bazi cementa u skladu sa Evropskim standardom EN 1504 za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija, odnosno sa njegovim trećim delom koji se odnosi na konstrukcijske i nekonstrukcijske sanacije, EN 1504-3.

VI
EKSPERIMENTALNO
ISTRAŽIVANJE

1. UVOD

Analizom dostupne literature iz oblasti primene prirodnog zeolita kao mineralnog dodatka kojim se supstituiše deo Portland cementa u malterima, betonima i pastama, uočeno je da postoji relativno mali broj publikovanih istraživanja koja se bave aspektima trajnosti maltera i betona kao i mikrostrukturom pasta, a prvenstveno je malo onih u kojima je urađena komparativna analiza primene prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela u navedene svrhe. U okviru teorijskog dela doktorske disertacije dat je i pregled odabranih radova u kojima su korišćena mineralna veziva i SCM materijali za spravljanje reparaturnih materijala (maltera ili betona). Kao SCM najčešće je korišćena silikatna prašina, ređe elektrofilterski pepeo, mlevena granulirana zgora iz visokih peći i plovuće, dok prirodni zeoliti nisu ispitivani kao SCM u reparaturnim cementnim malterima. Ustanovljeno je da su istraživači u svojim eksperimentima koristili vrlo različite interne laboratorijske i *in situ* metode ispitivanja podobnosti materijala za određenu vrstu sanacije. Generalno, izvestan je broj publikacija u kojima je analizirana primena reparaturnih maltera u skladu sa standardom EN 1504-3 [23].

Cilj ovog istraživanja je da se na osnovu eksperimentalnih rezultata i njihove analize odredi da li malteri u kojima su određeni procenti Portland cementa supstituisani prirodnim zeolitom mogu koristiti kao konstrukcijski i/ili nekonstrukcijski reparaturni malteri u skladu sa standardom EN 1504-3 [23], kao i da se dobijeni rezultati uporede sa onima kod kojih je korišćen elektrofilterski pepeo.

U početnoj fazi istraživanja ispituje se da li malteri u kojima je 10%, 15% ili 20% Portland cementa supstituisano prirodnim zeolitom imaju ista ili uporediva fizička i mehanička svojstva kao referentni cementni i referentni SCM malteri (odnosi se u ovom slučaju na maltere koji u istim procentima sadrže elektrofilterski pepeo kao SCM).

Na osnovu dobijenih rezultata određuje se procenat supstitucije Portland cementa mešavinom prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela u malteru, a takođe se utvrđuje da li takav malter ima ista ili uporediva fizička i mehanička svojstva u odnosu na referentni cementni malter i maltere koji u istom procentu i odnosu sadrže mešavinu prirodnog zeolita i filera (CaCO_3), odnosno elektrofilterskog pepela i filera. Dodatno se ispituje i uticaj na životnu sredinu preko izluživanja teških metala iz maltera koji sadrže mešavinu prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela, prirodnog zeolita i filera, kao i elektrofilterskog pepela i filera.

Na osnovu rezultata ispitivanja fizičkih i mehaničkih svojstava maltera sa početka istraživanja, od tri nivoa supstitucije Portland cementa prirodnim zeolitom biraju se dva kako bi se uporedno ispitala izabrana svojstva reparaturnih maltera propisana

standardom EN 1504-3 [23] (prionljivost maltera „pull-off“ metodom, ograničeno skupljanje i termička kompatibilnost maltera i betonske podloge – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje), ali i sušenje usled skupljanja, otpornost na prodor hlorida i dejstvo sulfata.

Dodatno se ispituju i analiziraju promene u strukturi i mineraloškom sastavu pasta koje sadrže 0%, 10%, 15% i 20% NZ, odnosno FA, a rezultati se stavljaju u korelaciju sa izluživanjem elemenata u tragovima.

Rezultati istraživanja i izvedeni zaključci biće podloga za definisanje preporuka za primenu optimalne količine prirodnog zeolita kao parcijalne zamene cementa u konstrukcijskim i/ili nekonstrukcijskim reparaturnim malterima.

Najveći deo ispitivanja je obavljen u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Ispitivanja mineraloškog i faznog sastava pasta kao i Portland cementa, prirodnog zeolita (samo FTIR spektroskopija) i elektrofilterskog pepela, urađena su na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Ispitivanje mineraloškog sastava prirodnog zeolita (XRD analiza) urađeno je u Laboratorija za kristalografiju Univerziteta u Beogradu na Rudarsko-geološkom fakultetu. Testovi izluživanja teških metala iz maltera urađeni su na Institutu zaštite na radu u Novom Sadu.

Ispitivanja su obavljena u periodu: novembar 2017 - jun 2019. godine.

2. PROGRAM EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

Po planu eksperimenta predviđeno je da se eksperimentalna istraživanja odvijaju u tri faze.

U okviru **prve faze istraživanja** ispituju se osnovna svojstva komponentnih materijala (PC, NZ, FA) koji se koriste za spravljanje maltera i pasta. Kod malterskih mešavina se varira vodo-vezivni faktor (0,5, označen sa **a** i 0,4, označen sa **b**) dok je kod pasta konstantan (0,5). Za spravljanje svih malterskih mešavina (u svim fazama istraživanja) koristi se CEN standardni pesak. Paste i malteri se spravljaју sa dejonizovanom vodom.

U okviru prve faze planirano je ispitivanje čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže 0%, 10%, 15% i 20% NZ odnosno FA, starosti 28, 60, 90 i 180 dana, kao i kapilarnog upijanja vode istih malterskih mešavina, starosti 28 i 90 dana. Takođe je predviđeno određivanje faznog sastava očvrslih pasta (primenom XRD analize i FTIR spektroskopije) starosti 28, 90 i 180 dana, spravljenih sa 0%, 10%, 15% i 20% NZ i 0%, 10%, 15% i 20% FA kao SCM.

U okviru prve faze istraživanja ukupno se ispituje 14 malterskih mešavina i 7 mešavina pasta.

U okviru **druge faze** istraživanja planirano je ispitivanje tri nove malterske mešavine. Na osnovu rezultata prve faze istraživanja (uzoraka starosti do 90 dana) određuje se procenat zamene Portland cementa, koji je isti za sve 3 nove malterske mešavine, mešavinama koje sadrže prirodni zeolit i elektrofilterski pepeo, prirodni zeolit i filer, kao i elektrofilterski pepeo i filer, u razmeri 1:1 (maseni odnos). Uzorci se u drugoj fazi ispitivanja spravljaју isključivo sa vodo-vezivnim faktorom od 0,5. Predviđeno je da se na prethodno navedenim mešavinama ispita čvrstoća pri pritisku maltera starosti 28, 60, 90 i 180 dana kao i kapilarno upijanje vode maltera starosti 28 i 90 dana. U okviru ove faze predviđeno je da se ispita i izluživanje teških metala iz očvrslih maltera starosti 28 i 180 dana.

Na osnovu rezultata ispitivanja maltera iz prve faze, određuju se optimalne količine zamene Portland cementa sa prirodnim zeolitom, i sa elektrofilterskim pepelom. U okviru **treće faze** planirano je da se broj malterskih mešavina iz prve faze smanji za četiri, odnosno planirano je da se ispitivanja urade na 10 malterskih mešavina (dva vodo-vezivna faktora, po jednom da se uradi: referentna mešavina i po dve izabrane mešavine sa prirodnim zeolitom, i sa elektrofilterskim pepelom u istoj količini). Od odabranih vrsta maltera iz prve faze, u trećoj fazi se formiraju uzorci na kojima se ispituju odabrana svojstva koja su propisana za reparaturne maltere prema EN 1504-3 [23].

Takođe se ispituje i otpornost predmetnih maltera na sulfatnu koroziju, prodor hlorida i skupljanje usled sušenja.

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;
- pripremu i nabavku komponentnih materijala;
- ispitivanje kvaliteta komponentnih materijala uključujući i kategorizaciju prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela kao mineralnih dodataka;
- određivanje sastava malterskih mešavina i pasta;
- izbor svojstava maltera i pasta pomoću kojih će se ocenjivati moguća upotreba prirodnog zeolita kao mineralnog dodatka u reparaturnim malterima kao i uticaj kojeg ima na trajnost maltera (dodatno se ispituje izluživanje teških metala iz maltera, kao i fazni sastav pasta), a poređenje će biti urađeno u odnosu na referentne cemetne uzorke i referentne SCM uzorke (kod kojih je Portland cement u istom nivou supstituisan elektrofilterskim pepelom);
- definisanje oblika, dimenzija i broja uzoraka za ispitivanje maltera i pasta;
- izradu dinamičkog plana ispitivanja odabranih svojstava maltera i pasta.

Za izradu malterskih mešavina odabrani su sledeći komponentni materijali:

- Portland cement CEM I 42,5R ("*Lafarge*", Beočinska fabrika cementa);
- Prirodni zeolit sa veličinom čestica < 125 µm ("*Zeo Kop*", ležište "*Igroš – Vidojevići*", Brus);
- Elektrofilterski pepeo (pepelište TENT B, silos br. 4, Obrenovac, nije urađena desulfurizacija);
- Kalcijum-karbonat ("*Jelen Do*");
- Standardni kvarcni pesak (CEN);
- Superplastifikatori (tip HRWRA+SRA, "*Sika ViscoCrete 3070*", proizvođač "*Sika*" Švajcarska);
- Dejonizovana voda.

Za izradu mešavina pasta odabrani su sledeći komponentni materijali:

- Portland cement CEM I 42,5R ("*Lafarge*", Beočinska fabrika cementa);
- Prirodni zeolit sa veličinom čestica < 125 µm ("*Zeo Kop*", ležište "*Igroš – Vidojevići*", Brus);
- Elektrofilterski pepeo (pepelište TENT B, silos br. 4, Obrenovac, nije urađena desulfurizacija);

- Dejonizovana voda.

U okviru I, II i III faze istraživanja planirana su ispitivanja grupa malterskih mešavina, čije su oznake i okvirni sastavi prikazani u tabeli VI-1, dok su u okviru I faze istraživanja planirana i ispitivanja grupa mešavina pasta čije su oznake i okvirni sastavi prikazani u tabeli VI-2.

Analiziraće se sledeće grupe maltera:

- Grupe PCa i PCb - malteri spravljeni sa Portland cementom kao jedinim vezivom – referentni uzorci;
- Grupe NZa i NZb - malteri spravljeni sa Portland cementom i prirodnim zeolitom;
- Grupe FAa i FAb - malteri spravljeni sa Portland cementom i elektrofilterskim pepelom;
- Grupe NZFAa - malteri spravljeni sa Portland cementom i mešavinom prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela.
- Grupe NZFila - malteri spravljeni sa Portland cementom i mešavinom prirodnog zeolita i filera (kalcijum-karbonata).
- Grupe FAFila - malteri spravljeni sa Portland cementom i mešavinom elektrofilterskog pepela i filera (kalcijum-karbonata).

Tabela VI-1. Pregled odabranih malterskih mešavina

Vezivo	Učešće SCM u malterskim mešavinama							
	0%		10%		15%		20%	
w/cm	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4
I faza istraživanja								
PC	PCa	PCb	-	-	-	-	-	-
PC+NZ	-	-	NZ10a	NZ10b	NZ15a	NZ15b	NZ20a	NZ20b
PC+FA	-	-	FA10a	FA10b	FA15a	FA15b	FA20a	FA20b
II faza istraživanja								
PC+NZ+FA	-	-	-	-	-	-	NZFA20a	-
PC+NZ+Fil	-	-	-	-	-	-	NZFil20a	-
PC+FA+Fil	-	-	-	-	-	-	FAFil20a	-
III faza istraživanja								
PC	PCa	PCb	-	-	-	-	-	-
PC+NZ	-	-	NZ10a	NZ10b	-	-	NZ20a	NZ20b
PC+FA	-	-	FA10a	FA10b	-	-	FA20a	FA20b

Analiziraće se i sledeće grupe pasta:

- Grupa P-PCa - paste spravljene sa Portland cementom kao jedinim vezivom – referentni uzorci;
- Grupa P-NZa - paste spravljene sa Portland cementom i prirodnim zeolitom;
- Grupa P-FAa - paste spravljene sa Portland cementom i elektrofilterskim pepelom.

Tabela VI-2. Pregled odabranih mešavina pasta

Vezivo	Učešće SCM u mešavinama pasta			
	0% w/cm=0,5	10% w/cm=0,5	15% w/cm=0,5	20% w/cm=0,5
I faza istraživanja				
PC	P-PCa	-	-	-
PC+NZ	-	P-NZ10a	P-NZ15a	P-NZ20a
PC+FA	-	P-FA10a	P-FA15a	P-FA20a

Predviđeno je da se u okviru I faze istraživanja ispita sledeće:

Osnovna svojstva komponentnih vezivnih materijala (npr. hemijski i mineraloški sastav, specifična masa, specifična površina, a za NZ i za FA ispitaće se i njihova pucolanska reaktivnost);

Svojstva očvrsljih maltera iz grupa PCa, PCb, NZa, NZb, FAa i FAb:

- Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana (EN 12190 [17], EN 196-1 [158]);
- Kapilarno upijanje vode pri starosti od 28 dana i od 90 dana +7 dana kondicioniranja (EN 13057 [45]);

Svojstva očvrsljih pasta iz grupa P-PCa, P-NZa i P-FAa:

- Mineraloški sastav očvrsljih uzoraka pasta pri starosti od 28, 90 i 180 dana (XRD);
- Vibraciona svojstva produkata hidratacije kod pasti pri starosti od 28, 90 i 180 dana (FTIR).

Predviđeno je da se u okviru II faze istraživanja ispita sledeće:

Svojstva očvrsljih maltera iz grupa NZFAa, NZFila i FAFila:

- Čvrstoća pri pritisku pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana (EN 12190 [17], EN 196-1 [158]);
- Kapilarno upijanje vode pri starosti od 28 dana i od 90 dana +7 dana kondicioniranja (EN 12190 [17]);

U okviru ove faze ispituju se malteri koji sadrže odabrani procenat zamene PC sa mešavinom NZ + FA, kao i mešavine NZ+Fil i FA+Fil. Navedeni procenat će se odrediti na osnovu rezultata ispitivanja iz I faze. Nakon ispitane čvrstoće pri pritisku uzoraka navedenih mešavina starih 28 i 180 dana planirano je da se ispita izluživanje sledećih elemenata u tragovima iz njih: Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba i Sb.

III faza istraživanja:

Na osnovu rezultata ispitivanja maltera u okviru faze I, određuju se optimalne količine zamene PC sa NZ i sa FA. Od odabranih vrsta maltera iz I faze formiraju se uzorci na kojima se ispituju svojstva koja su propisana za reparaturne maltere prema EN 1504 [23], kao i otpornost predmetnih maltera na sulfatnu koroziju, prodor hlorida i skupljanje usled sušenja.

U okviru ove faze, ispitivanja će se obaviti na sledećim vrstama maltera, za oba vodo-vezivna faktora:

- Malteri spravljeni sa Portland cementom kao jedinim vezivom – referentni uzorci;
- Dva odabrana maltera iz grupe maltera koji su spravljeni sa Portland cementom i prirodnim zeolitom;
- Dva odabrana maltera iz grupe maltera koji su spravljeni sa Portland cementom i elektrofilterskim pepelom;

Na opisanim malterima ispituju se sledeća svojstva, koja su propisana prema EN1504-3 [23]:

- Prionljivost maltera (*“pull-off”* metoda) nakon 28 dana+7 dana kondicioniranja (EN 1542 [157]);
- Ograničeno skupljanje (*restrained shrinkage*) pri starosti od 28 dana+56 dana kondicioniranja (EN 12617-4 [20]);
- Termička kompatibilnost – ciklusi smrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje, pri starosti od 28 dana + 50 ciklusa (EN 13687-1 [21]).

Pored prethodno navedenih svojstava na očvrslim malterima ispituju se i sledeća svojstva:

- Skupljanje usled sušenja pri starosti od 3, 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana (SRPS B.C8.029 [155]);
- Otpornost na prodor hlorida nakon 28 dana (NT Buil 492 [129]);
- Otpornost na dejstvo sulfata (ASTM C 1012 [7]).

Na osnovu plana i programa, kao i standarda koji su navedeni u istim i u skladu sa kojim se izvode eksperimenti, utvrđene su dimenzije i broj uzoraka maltera i pasta kao i njihove količine, tabela VI-3 i VI-4, respektivno.

Tabela VI-3. Specifikacija uzoraka za malterske mešavine

Ispitivano svojstvo	Dimenzije i broj uzoraka po mešavini	Potrebna količina maltera za navedena ispitivanja (m ³)	Napomena
I faza istraživanja			
Čvrstoća pri pritisku	Prizme: 40×40×160 mm (po 3 kom.) Ukupan broj uzoraka: 7×2×3×4=168 kom.	$168 \times 0,04 \times 0,04 \times 0,16 = 0,043008 \text{ m}^3$	Ispitivanje uzoraka pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana
Kapilarno upijanje	Diskovi: Ø 100 mm, h=25 mm (po 3 kom.) Ukupan broj uzoraka: 7×2×3=42 kom.	$42 \times 0,1^2 / 4 \times \pi \times 0,025 = 0,008247 \text{ m}^3$	Ispitivanje uzoraka pri starosti od 28 i 90 dana
II faza istraživanja			
Čvrstoća pri pritisku	Prizme: 40×40×160 mm (po 3 kom.) Ukupan broj uzoraka: 3×1×3×4=36 kom.	$36 \times 0,04 \times 0,04 \times 0,16 = 0,009216 \text{ m}^3$	Ispitivanje uzoraka pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana
Kapilarno upijanje	Diskovi: Ø 100 mm, h=25 mm (po 3 kom.) Ukupan broj uzoraka: 3×1×3=9 kom.	$9 \times 0,1^2 / 4 \times \pi \times 0,025 = 0,001767 \text{ m}^3$	Ispitivanje uzoraka pri starosti od 28 i 90 dana
Izluživanje elemenata u tragovima	Iskorišćeni su uzorci koji su prethodno ispitani na čvrstoću pri pritisku.		Ispitivanje uzoraka pri starosti od 28 i 180 dana
III faza istraživanja			
Skupljanje usled sušenja	Prizme-epruvete: 40×40×160 mm (po 3 kom.) Ukupan broj uzoraka: 5×2×3=30 kom.	$30 \times 0,04 \times 0,04 \times 0,16 = 0,007680 \text{ m}^3$	Ispitivanje uzoraka pri starosti od 3, 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana
Otpornost na prodor hlorida	Cilindri: Ø 100 mm, h=50 mm (po 3 kom.) Ukupan broj uzoraka:	$30 \times 0,1^2 / 4 \times \pi \times 0,05 = 0,011781 \text{ m}^3$	Ispitivanje uzoraka pri starosti od 28 dana

	5×2×3=30 kom.		
Otpornost na dejstvo sulfata	Prizme-epruvete: 25×25× 285 mm (po 6 kom) Broj uzoraka: 5×2×6=60 kom. Prizme: 40×40×160 mm (po 3 kom.) Broj uzoraka: 5×2×3=30 kom.	Prizme-epruvete: 60×0,025×0,025×0,285 = 0,010688 m ³ Prizme: 30×0,04×0,04×0,16 = 0,007680 m ³	Izlaganje epruveta dejstvu sulfata počinje kada prizme dostignu zahtevanu čvrstoću pri pritisku.
Prionljivost maltera ("pull-off" metoda)	Malter u sloju debljine 25 mm nanet na betonsku podlogu površine 175 x 350 mm* (po 1 kom.) Ukupan broj uzoraka: 5×2×1=10 kom. (ukupno 5 podloga)	10×0,175×0,350×0,025 = 0,015313 m ³	Ispitivanje pri starosti maltera od 28+7 dana
Ograničeno skupljanje	Malter u sloju debljine 25 mm nanet na betonsku podlogu površine 175 x 350 mm* (po 1 kom.) Ukupan broj uzoraka: 5×2×2=20 kom. (ukupno 10 podloga)	20×0,175×0,350×0,025 = 0,030625 m ³	Ispitivanje pri starosti maltera od 28+56 dana
Termička kompatibilnost – ciklusi smrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje	Malter u sloju debljine 25 mm nanet na betonsku podlogu površine 175 x 350 mm* (po 2 kom. +1 etalon) Ukupan broj uzoraka: 5×2×2+5×2=30 kom. (ukupno 15 podloga)	30×0,175×0,350×0,025 = 0,045938 m ³	Ispitivanje pri starosti maltera od 28+50 dana (50 ciklusa, po jedan dnevno)
	Ukupno:	465 kom.	0,191941 m ³

*polovina betonske ploče na koju je nanet malter čini jedan uzorak i ima pet mernih mesta

Tabela VI-4. Specifikacija uzoraka za mešavine pasta

Ispitivano svojstvo	Dimenzije i broj uzoraka po mešavini	Potrebna količina maltera za navedena ispitivanja (m ³)	Napomena
I faza istraživanja			
XRD analiza i FTIR spektroskopija	Prizme: 10×10×60 mm (po 3 kom.)	63×0.01×0.01×0.06 = 0,000378 m ³	Ispitivanje uzoraka pri starosti od 28, 90 i 180 dana
	Ukupan broj uzoraka: 7×1×3×3=63 kom.		
Ukupno:		63 kom.	0,000378 m ³

Za potrebe istraživanja potrebno je ukupno napraviti 465 uzoraka maltera i 63 uzoraka pasta. Planom je predviđeno da se spravi 0,191941 m³ maltera i 0,000378 m³ pasta.

Za potrebe ispitivanja prionljivosti maltera, ograničenog skupljanja i termičke kompatibilnosti – ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje, neophodno je napraviti i podloge od betona dimenzija 350 mm ×350 mm ×50 mm prema standardu EN 1766 [24] (ukupno je potrebno 0,196 m³ betona za izradu 32 podloge).

3. PODACI O KOMPONENTNIM MATERIJALIMA

Za potrebe karakterizacije PC, NZ i FA sa aspekta mineraloškog i hemijskog sastava korišćene su metode koje su navedene u daljem tekstu. Hemijski sastav PC, NZ i FA je određen primenom XRF analize, korišćenjem ED-XRF spektrometra, proizvođača *Spectro Xepos* iz Nemačke. Gubitak žarenjem je određen nakon izlaganja uzorka PC, NZ i FA u količini od po 2 g, temperaturi od 950°C u toku 1h. XRD analize uzoraka PC i FA su urađene po metodi opisanoj u poglavlju VI-9.2.1., dok je u slučaju XRD analize uzorka NZ korišćen difraktometar za prah marke *Rigaku* model *SmartLab* (Uzorak je ispitan pod sledećim eksperimentalnim uslovima: radni napon od 40 kV, jačina struje od 30 mA, rendgensko zračenje sa antikatode bakra (Cu), talasna dužina: $\text{CuK}\alpha=1,54178 \text{ \AA}$, prikupljanje podataka: kontinualni mod, opseg ispitivanja 2 θ : 3–60°, korak: 0,01° 2 θ i brzina snimanja: 5 °/min). FTIR analize uzoraka PC, NZ i FA su urađene po metodi opisanoj u poglavlju VI-9.2.2.

3.1. Cement

Za eksperimentalno istraživanje odabran je Portland cement oznake CEM I 42,5R koji je proizveden u fabrici cementa "Lafarge", Beočinska fabrika cementa. Provera fizičkih i mehaničkih svojstava cementa izvršena u skladu sa procedurama datim u standardima EN 196-1 [158], EN 196-3 [160] i EN 196-6 [25]. Na osnovu dobijenih rezultata, koji su dati u Prilogu 1, zaključeno je da cement (CEM I 42,5R) ispunjava

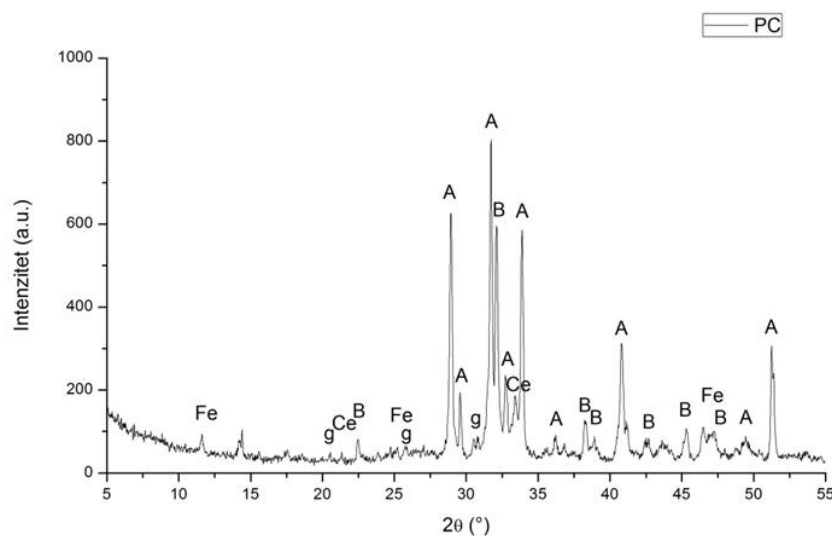
zahteve koji su definisani u standardu EN 197-1 [161], u pogledu fizičko-hemijskih i mehaničkih svojstava.

Rezultati hemijskog sastava CEM I 42,5R su prikazani u tabeli VI-5, dok su rezultati merenja dati u Prilogu 2.

Tabela VI-5. Hemijski sastav PC dobijen primenom XRF analize

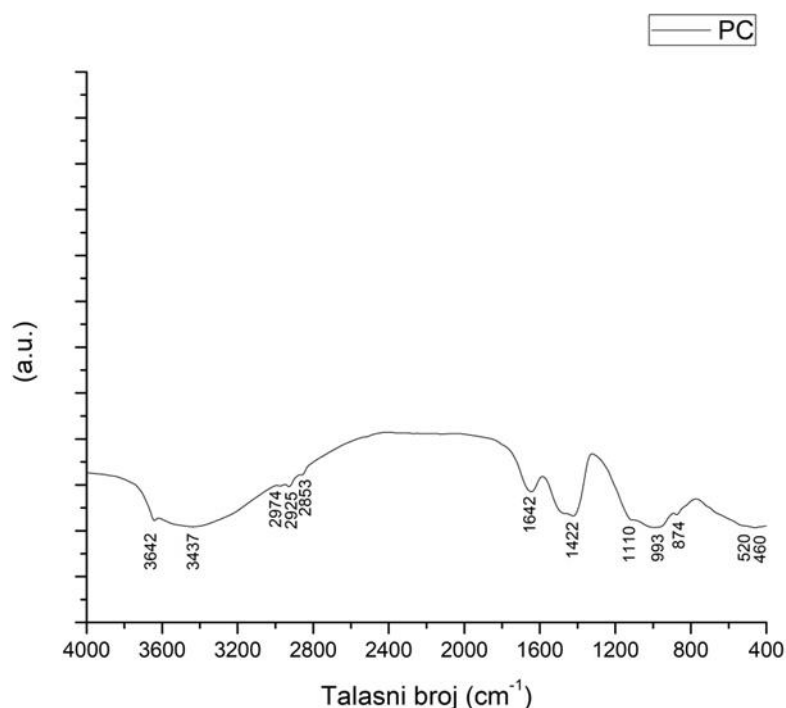
Hemijski sastav uzorka PC (%)			
Na ₂ O	0,318	TiO ₂	0,231
MgO	2,754	V ₂ O ₅	0,000
Al ₂ O ₃	5,102	Cr ₂ O ₃	0,019
SiO ₂	21,396	Mn ₂ O ₃	0,091
P ₂ O ₅	0,137	Fe ₂ O ₃	2,645
SO ₃	3,469	ZnO	0,053
Cl ⁻	0,023	SrO	0,101
K ₂ O	0,765	BaO	0,039
CaO	60,657	L.O.I.	2,2

Na slici VI-1 prikazan je rendgenski difraktogram uzorka PC koji je korišćen u eksperimentalnom radu (korišćena je ista aparatura kao u slučaju ispitivanja pasta, poglavlje VI-9.2.1.). XRD analiza PC je pokazala prisustvo minerala koji predstavljaju uobičajen sastav PC klinkera, a to su: trikalcijum silikat (C₃S) - alit i dikalcijum silikat (C₂S) - belit, kao i trikalcijum aluminat (C₃A) - celit i tetrakalcijum alumo-ferit (C₄AF). Pored glavnih mineralnih faza registrovana je i manja količina gipsa.



Slika VI-1. Rendgenski difraktogram uzorka PC (A – alit, B – belit, Ce – celit, Fe – ferit, g - gips)

FTIR analiza PC-a, slika VI-2, je ukazala na postojanje apsorpcionih pikova na 460 cm^{-1} i 520 cm^{-1} koji su povezani sa prisustvom Al-O i Si-O veza. Pik na 993 cm^{-1} je karakterističan za Si-O asimetrične vibracije u C_2S i C_3S mineralnim fazama. Apsorpcioni pik na 1110 cm^{-1} (koji se odnosi na S-O veze) ukazuje na prisustvo gipsa. Apsorpcioni pikovi na 874 cm^{-1} i 1422 cm^{-1} , kao i grupa pikova u intervalu od $2850\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, ukazuju na prisustvo vibracija C-O molekularne grupe, dok su apsorpcioni pikovi na 1642 cm^{-1} i 3437 cm^{-1} karakteristični za OH^- jone i molekule vode prisutne u strukturi.

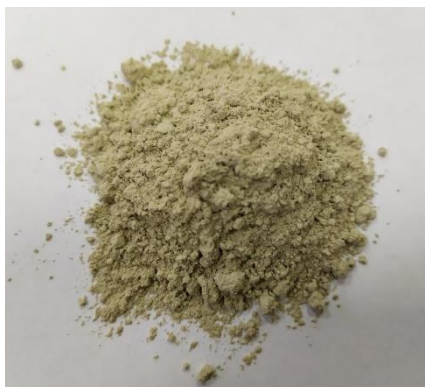


Slika VI-2. FTIR spektar PC

Određivanje finoće mliva PC je urađeno *Air-jet* metodom po proceduri opisanoj u standardu EN 933-10 [57], i ona iznosi 4,9 %.

3.2. Dopunski cementni materijali - SCM

Osnovni SCM korišćen u okviru ovog istraživanja je NZ iz nalazišta „Igroš-Vidojevići“ koji je prethodno prosejan kroz sito otvora $125\text{ }\mu\text{m}$ (slika VI-3), dok je kao referentni SCM upotrebljen FA (slika VI-4) sa pepelišta Termoelektrane „Nikola Tesla B“ (silos br. 4), koje se nalazi u Obrenovcu.



Slika VI-3. Prirodni zeolit – klinoptilolit



Slika VI-4. Elektrofilterski pepeo

3.2.1. Karakterizacija prirodnog zeolita

Hemijski sastav NZ je određen XRF analizom, primenom TQ metodom. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli VI-6, dok su rezultati merenja dati u Prilogu 2.

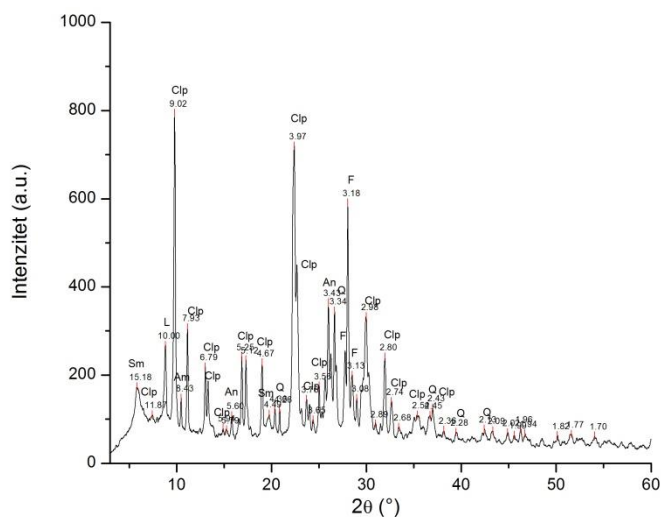
Tabela VI-6. Hemijski sastav NZ dobijen primenom XRF analize

Hemijski sastav uzorka NZ (%)			
Na ₂ O	0,984	Cl-	0,005
MgO	2,692	K ₂ O	1,195
Al ₂ O ₃	12,415	CaO	4,165
SiO ₂	65,151	Fe ₂ O ₃	2,635
P ₂ O ₅	0,102	MicE+TE	0,635
SO ₃	0,022	LOI	10.0

S obzirom da je suma osida SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃ ispitivanog uzorka NZ-a veća od 70% (80,201%), NZ spada u mineralne dodatke tipa II u skladu sa EN 206-1 [162], odnosno EN 450-1 [26]. Takođe, NZ se u pogledu gubitka pri žarenju (≥ 9%) ne može podvesti ni pod jednu od kategorija navedenih u standardu EN 450-1 [26].

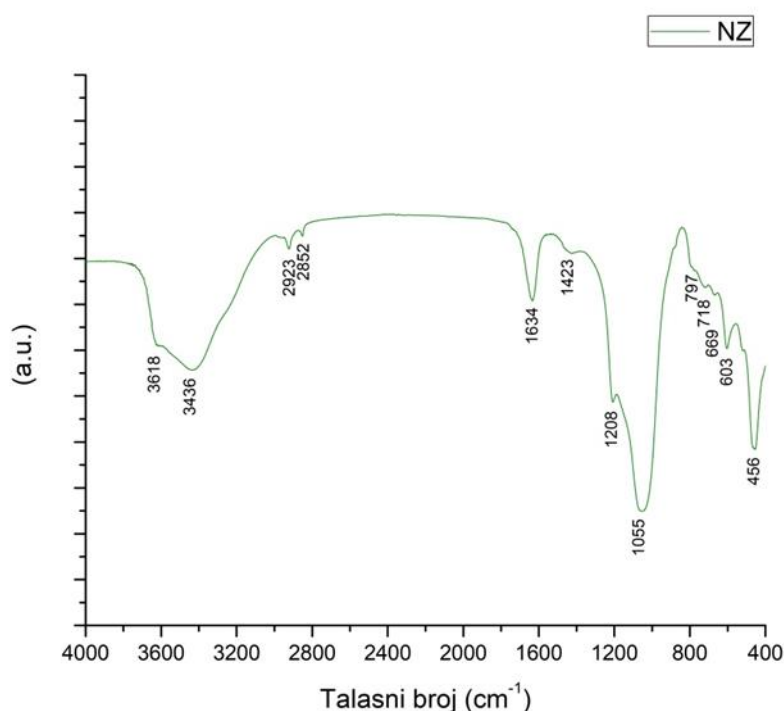
Specifična težina NZ-a je ispitana prema standardu SRPS B.B8.032 [152], i iznosi 2,386 g/cm³. Specifična površina NZ-a iznosi 8292,97 cm²/g, a određena je u skladu sa procedurom navedenom u standard SRPS B.C8.024 [154]. Finoća mliva je ispitana *Air-Jet* prosejavanjem u skladu sa standardom EN 933-10 [57], i ona u slučaju NZ iznosi 30,1 %. Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u tabeli P2.1, urađenih u skladu sa standardom SRPS B.C1.018 [153], NZ pripada klasi 10 pucolanskih materijala. Određivanje vrednosti indeksa aktivnosti NZ-a urađeno je u skladu sa standardom EN 450-1 [26], i nakon 28 i 90 dana oni iznose 92,85 % i 102,93 %, respektivno.

Rendgenski difraktogram zeolitnog tufa, odnosno prirodnog zeolita (NZ) koji je korišćen u eksperimentalnom radu, prikazan je na slici VI-5. U analiziranom uzorku NZ-a utvrđeno je prisustvo zeolitskih minerala iz hojlanditske grupe klinoptilolitskog tip, kao i liskuna, feldspata (podgrupa plagioklasa), smektita, kvarca, analcima i amfibola.



Slika VI-5. Rendgenski difraktogram uzorka zeolitnog tufa (NZ) iz ležišta „Igroš-Vidojevići“ (Clp – klinoptilolit, L – liskuni, F – feldspat, Sm – smektit, Q – kvarc, An – analcim, Am – amfibol)

FTIR spektar NZ se može podeliti u nekoliko oblasti. Apsorpcione trake u intervalu $400-1200\text{ cm}^{-1}$ koje su vezane za unutrašnje Si-O i Al-O vibracije u tetraedrima koje spadaju u vibracije pseudo-rešetke strukturnih jedinica [123] i oblast od $1600-3700\text{ cm}^{-1}$ ukazuje na prisustvo zeolitne vode. Pod pojmom vibracije pseudo-jedinične ćelije se podrazumevaju vibracije prstenova koji su osnov strukture zeolita. Karakteristike ovih vibracija su da odražavaju uređenost strukture na srednjim rastojanjima. Na vrednost ovih frekvencija utiče broj prstenova, vrednost Al/Si odnosa, vrsta katjona u tetraedru, stepen deformacije prstena, količina vode u zeolitu i raspored prstenova. U radu Mozgawa sa saradnicima [124], u kojem su objavljeni rezultati FTIR spektara klinoptilolita, dobijeni su apsorpcioni spektri koji su veoma slični analiziranom NZ. U strukturi klinoptilolita, analiziranom u navedenom radu, pretežno je prisutna mešavina prstenova sa četiri i pet članova. Struktura sa pet članova daje najverovatnije apsorpcione trake u oblasti od $590-610\text{ cm}^{-1}$, dok struktura sa četiri člana prstena daje apsorpcione trake u oblasti od $700-720\text{ cm}^{-1}$. Prisustvo slabih traka u oblasti od $660-670\text{ cm}^{-1}$ ukazuje na postojanje i većeg od navedenog broja članova prstena. Apsorpcione trake prikazane na slici VI-6 ukazuju na prisustvo prstenova sa pet i više članova.



Slika VI-6. FTIR spektar NZ

Apsorpciona traka na 456 cm^{-1} ukazuje na T-O savijajuće vibracije (sa T se obeležava Si ili Al), dok apsorpciona traka na 797 cm^{-1} odražava prisustvo savijajućih vibracija O-T-O grupa. Pik na 1055 cm^{-1} je najjači i vezuje se za T-O izvijajuće vibracije, dok pik na 1423 cm^{-1} može pripisati asimetričnom istezanju CO_3^{2-} grupe.

3.2.2. Karakterizacija elektrofilterskog pepela

Hemijski sastav FA je određen XRF analizom, primenom TQ metodom. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli VI-7, dok su rezultati merenja priloženi u Prilogu 2.

Tabela VI-7. Hemijski sastav FA dobijen primenom XRF analize

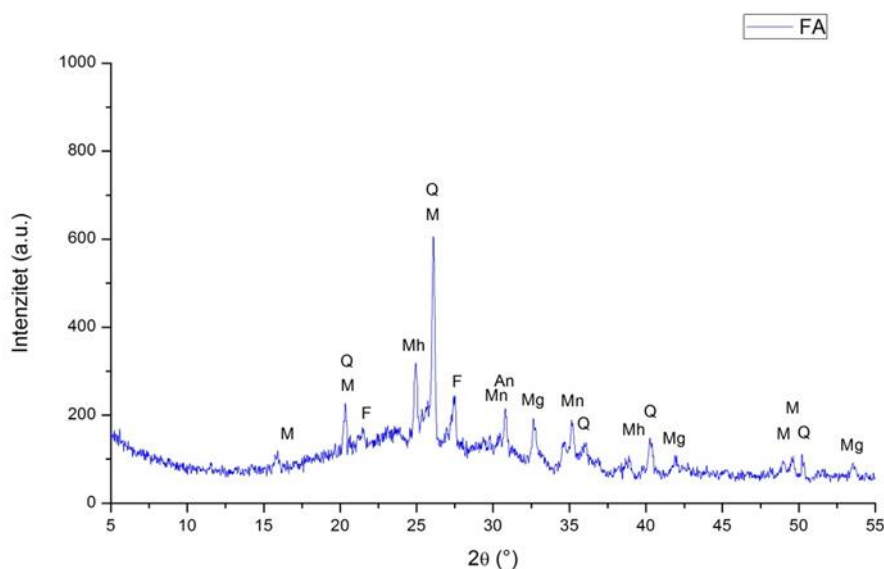
Hemijski sastav uzorka FA (%)			
Na ₂ O	0,284	Cl ⁻	0,000
MgO	3,288	K ₂ O	1,364
Al ₂ O ₃	21,324	CaO	9,255
SiO ₂	45,903	Fe ₂ O ₃	8,389
P ₂ O ₅	0,066	MicE+TE	1,116
SO ₃	6,712	LOI	2,3

S obzirom da je suma osida SiO₂, Al₂O₃ i Fe₂O₃ ispitanog uzorka FA veća od 70% (75,616%), FA spada u mineralne dodatke tipa II u skladu sa EN 206-1 [162],

odnosno EN 450-1 [26]. Na osnovu dobijene vrednosti gubitka žarenjem, FA pripada kategoriji A propisanoj standardom EN 450-1 [26].

Specifična težina FA iznosi $2,313 \text{ g/cm}^3$, a ispitana je prema standardu SRPS B.B8.032 [152]. Specifična površina FA je određena u skladu sa procedurom navedenom u standard SRPS B.C8.024 [154] i iznosi $10212,47 \text{ cm}^2/\text{g}$. Finoća mliva je ispitana *Air-Jet* prosejavanjem u skladu sa standardom EN 933-10 [57], i ona u slučaju FA iznosi 18,0 %. Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u tabeli P2.1, urađenih u skladu sa standardom SRPS B.C1.018 [153], FA pripada klasi 15 pucolanskih materijala. Određivanje vrednosti indeksa aktivnosti FA-a urađeno je u skladu sa standardom EN 450-1 [26], i nakon 28 i 90 dana oni iznose 125,29 % i 130,94 %, respektivno.

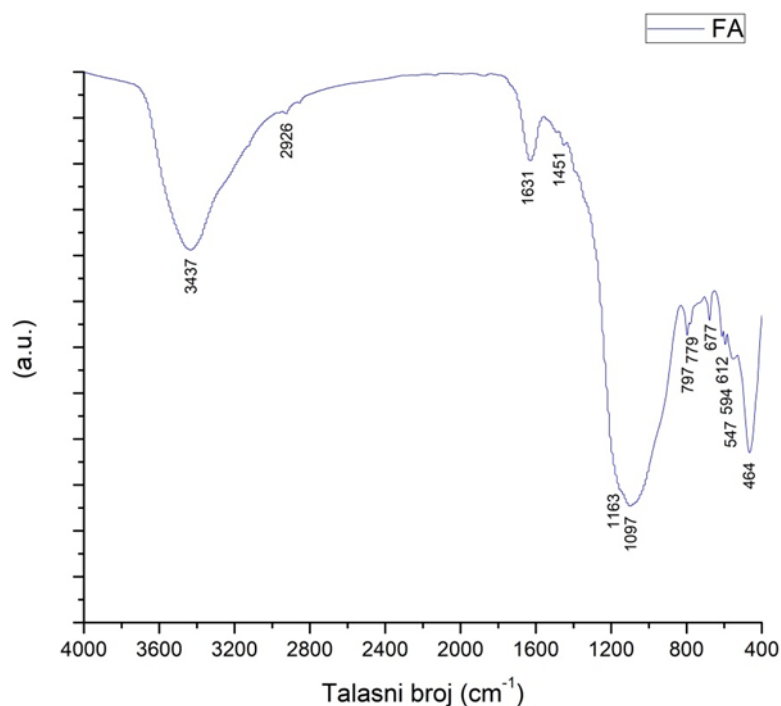
Rendgenski difraktogram FA koji je korišćen u eksperimentalnom radu je prikazan na slici VI-7. XRD analiza FA-a je pokazala prisustvo sledećih minerala: kvarca, mulita, feldspata, melilita, magnezita, magnetita i ankerita.



Slika VI-7. Rendgenski difraktogram uzorka FA sa pepelišta termoelektre „Nikola Tesla“ u Obrenovcu (Q – kvarc, M – mulit, F – feldspat, Mh – melilit, Mg – magnezit, Mn – magnetit, An – ankerit)

Na slici VI-8 prikazan je FTIR spektar FA. Apsorpciona traka na 1097 cm^{-1} je vezana za T-O (T=Al, O) asimetrične izvijajuće vibracije, dok je apsorpcioni prevoj na 1163 cm^{-1} , dupli apsorpcioni pik na 797 cm^{-1} i 779 cm^{-1} , kao i pik na 464 cm^{-1} povezan sa prisustvom kvarca.

Traka koje se pojavljuju na 554 cm^{-1} je povezana sa Al-O vibracijama u mulitu (oktaedarska koordinacija Al). Traka koja se javlja na $\sim 1160 \text{ cm}^{-1}$ je takođe povezan sa vibracijama mulita. Drugim rečima, vibracije Si-O veze iz kvarca i T-O veze u mulitu se preklapaju.

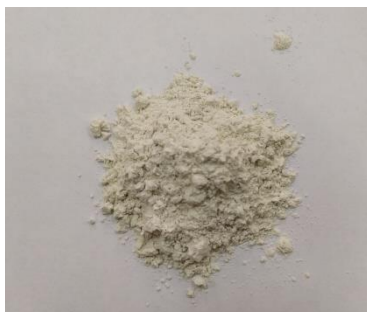


Slika VI-8. FTIR spektar FA

Apsorpciona traka na 1451 cm⁻¹ pripisuje se asimetričnom istežanju CO₃²⁻ grupe. Prema autorima Ylmén i saradnicima [188] kao i apsorpciona traka na 2926 cm⁻¹ se pripisuje kalcijum karbonatu. U spektru se takođe primećuje apsorpciona traka na 1641 cm⁻¹ koja se dovodi u vezu sa savijajućim vibracijama ν_2 molekula H₂O, dok se traka na 3437 cm⁻¹ dovodi u vezu sa ν_1 istežućim vibracijama molekula H₂O [103].

3.3. Filer

Kao filer u okviru II faze istraživanja korišćen je kalcijum-karbonat (CaCO₃), slika VI-9, proizvođača „Jelen Do“ iz Požege.



Slika VI-9. Kalcijum-karbonat

Specifična težina filera iznosi $2,587 \text{ g/cm}^3$, a ispitana je prema standardu SRPS B.B8.032 [152]. Specifična površina filera je određena u skladu sa procedurom navedenom u standard SRPS B.C8.024 [149] i iznosi $3182,21 \text{ cm}^2/\text{g}$.

3.4. Agregat

Za izradu malterskih mešavina korišćen je CEN standardni pesak, slika VI-10, koji ispunjava zahteve navedene u EN 196-1 [158].



Slika VI-10. CEN standardni pesak

3.5. Hemijski dodaci

Za poboljšanje ugradljivosti pojedinih malterskih mešavina predviđena je upotreba superplastifikatora tipa HRWRA (odnosno u pitanju je $HRWRA+SRA = \text{High-Range Water-Reducing Admixture} + \text{Set-Retarding Agent}$ = Hemijski dodatak visokog stepena redukcije vode + usporivač vezivanja (retarder)) proizvođača "Sika" – Švajcarska. Osnovni podaci o primenjenom superplastifikatoru prikazani su u Tabeli VI-8.

Tabela VI-8. Osnovni podaci o primenjenom superplastifikatoru

Vrsta superplastifikatora	Zapreminska masa (kg/m^3)	Sadržaj suve materije (%)	Uobičajeno doziranje (%)
Sika ViscoCrete 3070	1090	30	0,5-1,2

3.5.1. Voda

Za spravljanje maltera i pasta korišćena je dejonizovana voda.

4. REFERENTNI BETON ZA IZRADU PODLOGA PREMA EN 1766

Za potrebe ispitivanja prionljivosti maltera „pull-off“ metodom [157], ograničenog skupljanja [20], kao i termičke kompatibilnosti nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje [21], prema standardu EN 1504-3 [23] propisana je upotreba referentne betonske podloge tipa MC (0,40). Kako bi se sproveda prethodno navedena ispitivanja bilo je potrebno napraviti, odnegovati i adekvatno pripremiti 30 referentnih betonskih podloga u skladu sa standardom EN 1766 [24].

S obzirom da je navedenim standardom [24] propisano da se na svakih 15 betonskih podloga proveri njihov kvalitet određivanjem čvrstoće na zatezanje “pull-off” metodom na jednoj podlozi, ukupno su napravljene 32 referentne betonske podloge dimenzija 350mm×350mm×50mm, kao i tri kocke ivica 150 mm.

Sastav mešavine referentnog betona:

Sastav betonske mešavine (BM) za izradu referentnih betonskih podloga - MC(0,40) propisan je standardom EN 1766 [24] i određen je na osnovu sledećih polaznih parametara koji su u skladu sa prethodno navedenim standardom:

- C50/60;
- Čvrstoća na zatezanje betonske podloge $f_h \geq 3$ MPa;
- $m_c = 455$ kg;
- $m_v/m_c = 0,40$;
- $D_{max} = 8$ mm;
- CEM I 42,5 R.

Količina vode je određena na osnovu zahtevanog vodocementog faktora i iznosi:

- $m_v = 182$ kg.

Količina superplastifikatora SikaViscocrete 4000BP ($\gamma_{sp} = 1080$ kg/m³, sadržaj suve materije 30%, doziranje (0,4-1,6)% m_c , usvojeno 1% m_c) i stvarna količina vode iznose:

- $m_{spk} = 455 \text{ kg} \times 0,01 = 4,55$ kg;
- $\Delta m_{v,spk} = 4,55 \text{ kg} \times 0,7 = 3,185$ kg;
- $m_{v,stv} = m_v - \Delta m_{v,spk} = 182 - 3,185 \approx 179$ kg.

Količina agregata je dobijena iz sume apsolutnih zapremina materijala u 1m³ betona, uz pretpostavljenu količinu uvučenog vazduha, $\Delta p = 2\%$.

$$\frac{455}{3100} + \frac{179}{1000} + \frac{m_a}{2550} + \frac{4,55}{1080} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1658 \text{ kg}$$

Učešća pojedinih frakcija agregata usvojena su tako da granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata odgovara krivi koja prolazi kroz sredinu područja datog u Aneksu A standarda EN 1766 [24]. Učešća frakcija iznose:

- frakcija 0/4 – $X_{0/4}=66\%$;
- frakcija 4/8 – $X_{4/8}=34\%$.

Količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- frakcija 0/4 – $m_{0/4}=1094$ kg;
- frakcija 4/8 – $m_{4/8}=564$ kg.

$$\gamma_{b,sv} = 455 + 179 + 4,55 + 1658 = 2297 \text{ kg/m}^3$$

Nakon spravljanja i ugrađivanja referentnog betona u kalupe (slika VI-11a), uzorci su negovani 24 h ispod polietilenske folije, potom su izvađeni iz kalupa (slika VI-11b) i negovani 27 dana u vodi iz vodovoda temperature $(20\pm 2)^\circ\text{C}$. Po isteku 28-og dana od spravljanja i kocke i betonske podloge su izvađene iz vode. Potom je ispitana čvrstoća pri pritisku betonskih kocki (slika VI-12) prema standardu EN 12390-3 [18]. Sa srednjom vrednošću čvrstoće pri pritisku od 67,95 MPa, referentni beton je ispunio uslov za klasu C 50/60 prema standardu EN 206-1 [162] i time je zadovoljen uslov propisan standardom EN 1766 [24].



Slika VI-11. Izrada betonskih podloga i kocki: a) Beton ugrađen u kapule, b) Podloge nakon vađenja iz kalupa

Nakon vađenja referentnih betonskih podloga iz vode donja strana im je ispeskarena u skladu sa standardom EN 1766 [24]. Ploče su, zatim, kondicionirane u laboratorijskim uslovima (na temperaturi vazduha od $(21\pm 2)^\circ\text{C}$ i pri relativnoj vlažnosti od $(60\pm 10)\%$) u trajanju od dva meseca.



Slika VI-12. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku kocki od referentnog betona starosti 28 dana: a) Merenje mase kocke b) Uzorak nakon ispitivanja

Neposredno pre nanošenja reparaturnih maltera, ukupno dve betonske podloge su ispitane “pull-off” metodom (slika VI-13), a rezultati ispitivanja su prikazani u Prilogu 5, tabela P-2. Prva podloga je ispitana neposredno pre spravljanja maltera za etalonske uzorke i test-uzorke za ispitivanje termičke kompatibilnosti [21], dok je druga podloga ispitana pre spravljanja maltera za uzorke kojima se ispituje prionljivost [157] i ograničeno skupljanje [20].



Slika VI-13. Ispitivanje čvrstoće na zatezanje neposredno pre nanošenja reparaturnog maltera na betonsku podlogu

Na osnovu dobijenih srednjih vrednosti čvrstoće na zatezanje betonskih podloga f_h od 5,82 MPa, odnosno 5,87 MPa, zaključeno je da su referentne betonske podloge ispunile uslov od minimum 3,0 MPa, propisan standardom EN 1766 [24].

5. SASTAV MALTERSКИH MEŠAVINA I PASTA

Sastav malterskih mešavina odgovara standardnom cementnom malteru koji je propisan standardom EN196-1 [158]. U projektovanim malterskim mešavinama:

- ukupna masa veziva iznosi 450 g, a masa standardnog peska 1350 g;
- odnos mase veziva i mase standardnog peska iznosi 1:3;
- vodovezivni faktor iznosi 0,5 ili 0,4.

Za razliku od maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5, za adekvatno ugrađivanje maltera sa vodovezivnim faktorom 0,4 bila je neophodna upotreba superplastifikatora.

U slučaju pasta, ukupna masa veziva iznosi 450 g, a vodovezivni faktor 0,5.

U tabeli VI-9 prikazan je sastav malterskim mešavina koje se ispituju u okviru I i III faze istraživanja, dok je u tabeli VI-10 prikazan je sastav malterskim mešavina koje se ispituju u okviru II faze. Sastav mešavina pasta prikaza je u tabeli VI-11.

Tabela VI-9. Sastav malterskih mešavina korišćenih u okviru I faze i III faze ispitivanja

Vrsta maltera	Broj faze ispitivanja	Komponentni materijali					
		PC (g)	NZ (g)	FA (g)	Voda (ml)	HRWRA+SRA (g)	Standardni pesak (g)
Vodo-vezivni faktor 0,5							
PCa	I i III	450	-	-	225	-	1350
NZ10a	I i III	405	45	-	225	-	1350
NZ15a	I	382,5	67,5	-	225	-	1350
NZ20a	I i III	360	90	-	225	-	1350
FA10a	I i III	405	-	45	225	-	1350
FA15a	I	382,5	-	67,5	225	-	1350
FA20a	I i III	360	-	90	225	-	1350
Vodo-vezivni faktor 0,4							
PCb	I i III	450	-	-	180	5,4 (1,2%)	1350
NZ10b	I i III	405	45	-	180	5,4 (1,2%)	1350
NZ15b	I	382,5	67,5	-	180	5,4 (1,2%)	1350
NZ20b	I i III	360	90	-	180	5,4 (1,2%)	1350
FA10b	I i III	405	-	45	180	5,4 (1,2%)	1350
FA15b	I	382,5	-	67,5	180	5,4 (1,2%)	1350
FA20b	I i III	360	-	90	180	5,4 (1,2%)	1350

Tabela VI-10. Sastav malterskih mešavina korišćenih u okviru II faze ispitivanja

Vrsta maltera	Broj faze ispitivanja	Komponentni materijali					Standardni pesak (g)
		PC (g)	NZ (g)	FA (g)	Filer (g)	Voda (ml)	
Vodo-vezivni faktor 0,5							
NZFA20a	II	360	45	45	-	225	1350
NZFil20a	II	360	45	-	45	225	1350
FAFil20a	II	360	-	45	45	225	1350

Tabela VI-11. Sastav pasta korišćenih u okviru I faze ispitivanja

Vrsta paste	Broj faze ispitivanja	Komponentni materijali			
		PC (g)	NZ (g)	FA (g)	Voda (ml)
Vodo-vezivni faktor 0,5					
P-PCa	I	450	-	-	225
P-NZ10a	I	405	45	-	225
P-NZ15a	I	382,5	67,5	-	225
P-NZ20a	I	360	90	-	225
P-FA10a	I	405	-	45	225
P-FA15a	I	382,5	-	67,5	225
P-FA20a	I	360	-	90	225

6. IZRADA MALTERSКИH MEŠAVINA I PASTA

Za potrebe spravljanja malterskih mešavina prvo su izmerene potrebne količine komponentnih materijala (slika VI-14a), potom je u činuju od miksera (mešalice) sipana potrebna količina vode, i superplastifikator po potrebi, nakon čega je dodato vezivo (slika VI-14b). Spravljanje malterskih mešavina urađeno je pomoću laboratorijske mešalice (slika VI-14c) po režimu mešanja koji je propisan standardom EN 12190 [17]. U toku miksiranja je po programu dodat pesak.

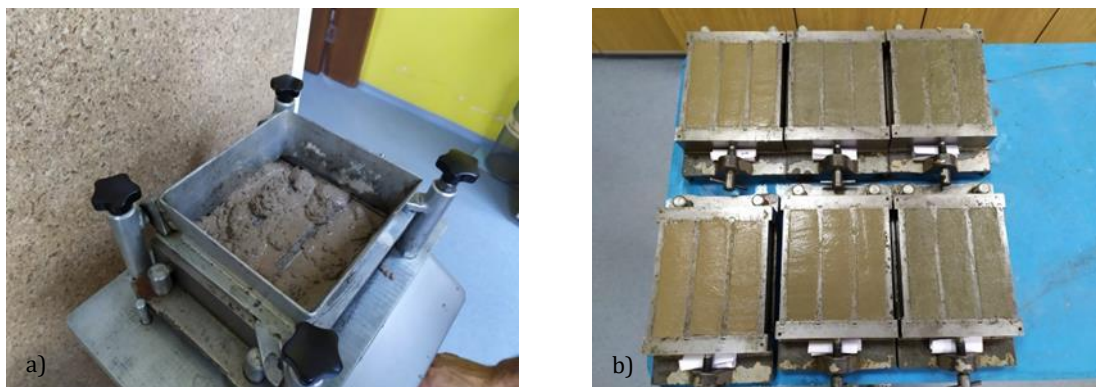
Ugrađivanje u kalupe dimenzija 40x40x160 mm (malterske mešavine) i u kalupe prečnika 100 mm (malterske mešavine), urađeno je na laboratorijskom vibro-stolu (slika VI-15a). Na slici VI-15b prikazano je šest različitih mešavina maltera neposredno nakon ugrađivanja. Za potrebe spravljanja uzoraka za ispitivanje prionljivosti maltera za betonsku podlogu „pull-off“ metodom, ograničenog skupljanja i termičke kompatibilnosti sa ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni ratvor soli za odmrzavanje, malter je ručno nanesen na betonsku podlogu, u dva sloja, slika VI-16.

Nakon toga uzorci su negovani 24h na temperaturi od 22°C i relativnoj vlažnosti vazduha od 90%, a potom su izvađeni iz kalupa i stavljeni na adekvatnu dalju negu (poglavljje VI-7) u zavisnosti od vrste ispitivanja kojoj će biti podvrgnuti.

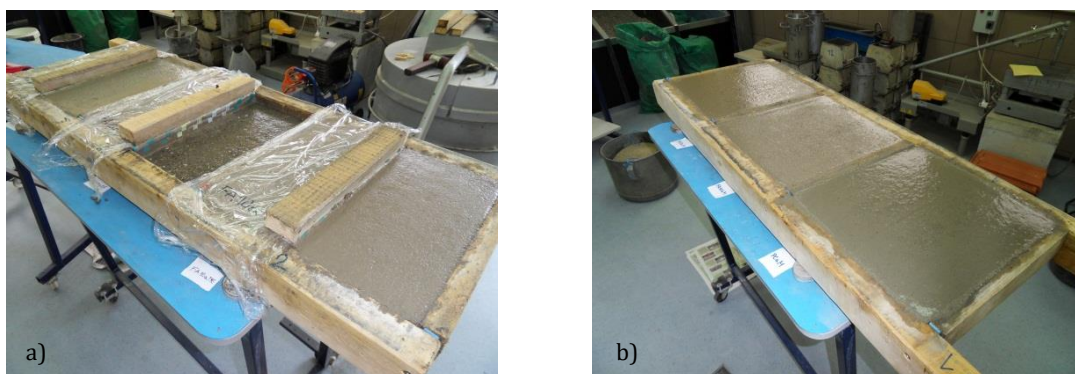
Za potrebe spravljanja pasta takođe su prvo izmerene potrebne količine komponentnih materijala, potom je u činuju od mešalice sipana potrebna količina vode, nakon čega je dodato vezivo. Spravljanje pasta urađeno je pomoću laboratorijske mešalice (koja je korišćena i pri spravljanju malterskih mešavina) po režimu mešanja koji je propisan standardom EN 12190 [17]. Ugrađivanje u kalupe dimenzija 10x10x60 mm urađeno najpre ručno, u dva sloja, a potom i na laboratorijskom vibro-stolu. Na slici VI-17 prikazane su tri različite mešavine pasta neposredno nakon ugrađivanja.



Slika VI-14. Primer spravljanja malterskih prizmi: a) Komponentni materijali, b) Dodavanje veziva u tečnu fazu, i c) Miksiranje



Slika VI-15. Primer ugrađivanja maltera u kalup 40×40×160 mm: a) Ugrađivanje na vibro-stolu i b) Ugrađeni malteri

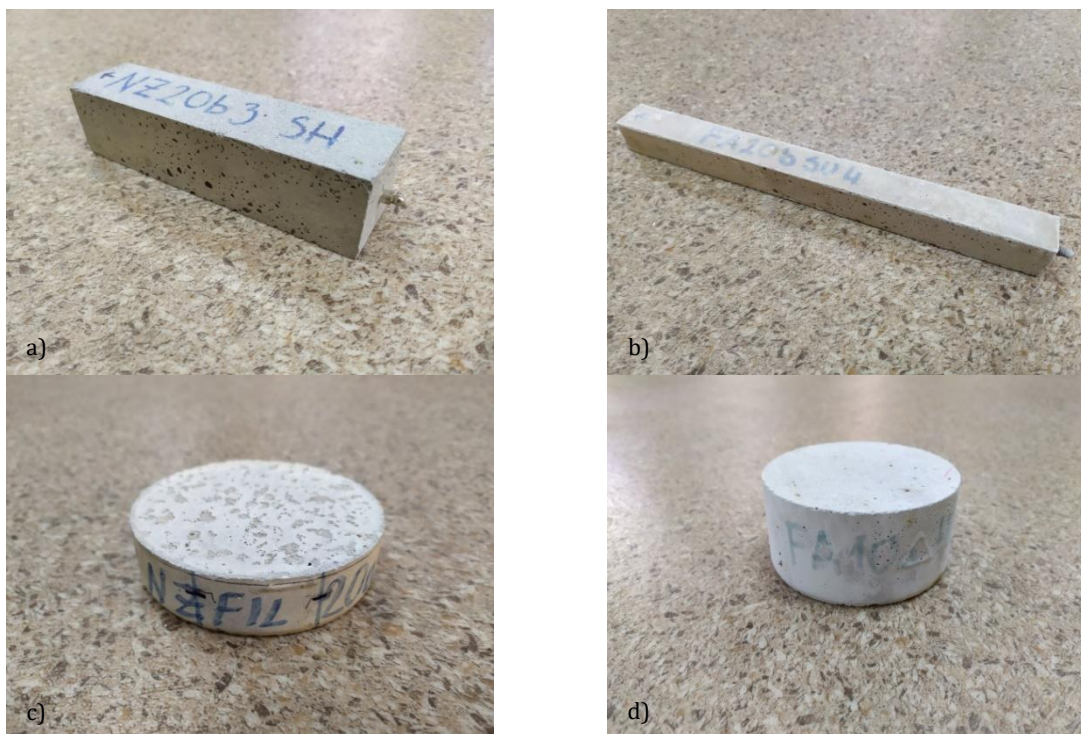


Slika VI-16. Uzorci maltera naneti na betonske podloge za potrebe ispitivanja termičke kompatibilnosti: a) etaloni b) test-uzorci



Slika VI-17. Primeri ugrađenih pasta u kalupe dimenzija 10×10×60 mm

Nakon vađenja iz kalupa svi uzorci su adekvatno obeleženi. Primeri odabranih uzoraka maltera su prikazani na slici VI-18, dok je prizmica od paste prikazana na slici VI-19.



Slika VI-18. Izabrani uzorci maltera: a) Epruveta 40×40×160 mm, b) Epruveta 25×25×285 mm, c) Disk Ø 100 mm, h=25 mm i d) Cilindar Ø 100 mm, h=50 mm

Prilikom ugrađivanja maltera za potrebe spravljanja uzoraka za ispitivanje dejstva sulfata (slika VI-18b), kapilarnog upijanja vode (slika VI-18c) i otpornosti na prodor hlorida (slika VI-18d), kalupi nisu prethodno premazani mineralnim uljem, kao ni prilikom ugrađivanja pasta.



Slika VI-19. Primeri ugrađenih pasta u kalupe dimenzija 10×10×60 mm

Specifikacije uzoraka maltera i pasta (dimenzije, broj uzoraka i količine malterskih mešavina i mašavine pasta) su prikazane u tabelama VI-3 i VI-4, respektivno.

7. NEGA I KONDICIONIRANJE UZORAKA

U zavisnosti od vrste ispitivanja i standarda u skladu sa kojima su rađena, primenjeni su različiti režimi nege uzoraka maltera i pasta, a detalji su navedeni u tabeli VI-12.

Tabela VI-12. Osnovni podaci o primenjenim režimima nege uzoraka

Vrsta ispitivanja	Dimenzije uzoraka	Režim nege uzoraka	
I faza ispitivanja			
Čvrstoća pri pritisku	Malteri - prizme 40mm×40mm×160mm	24 h u kalupu na (20±1)°C i ≥90% RH	→ 27/59/89/179 dana u vodi iz vodovoda na (20±1)°C
Kapilarno upijanje vode	Malteri - diskovi Ø100mm×25mm	24 h u kalupu koji je prekriven, na (21±2)°C	→ 27/89 dana u vodi iz vodovoda na (21±2)°C, potom min. 7 dana u sušnici na (40±2)°C i 24 h u klima komori na (21±2)°C i (60±10)% RH
XRD analiza	Paste – prizme 10mm×10mm×60mm	24 h u kalupu na (20±1)°C i ≥90% RH	→ 27/89/179 dana u vodi iz vodovoda na (21±2)°C
FTIR spektroskopija	Paste – prizme 10mm×10mm×60mm	24 h u kalupu na (20±1)°C i ≥90% RH	→ 27/89/179 dana u vodi iz vodovoda na (21±2)°C
II faza ispitivanja			
Čvrstoća pri pritisku/ izluživanje teških metala	Malteri - prizme 40mm×40mm×160mm	24 h u kalupu na (20±1)°C i ≥90% RH	→ 27/59/89/179 dana u vodi iz vodovoda na (20±1)°C Nakon ispitivanja čvrstoće pri pritisku uzorci su zdrobljeni i prosejani kroz sito otvora 4 mm, i zaštićeni da ne gube vlagu do početka ispitivanja izluživanja teških metala.
Kapilarno upijanje vode	Malteri - diskovi Ø100mm×25mm	24 h u kalupu koji je prekriven, na (21±2)°C	→ 27/89 dana u vodi iz vodovoda na (21±2)°C, potom min. 7 dana u sušnici na (40±2)°C i 24 h u klima komori na (21±2)°C i (60±10)% RH
III faza ispitivanja			
Skupljanje	Malteri - prizme 40mm×40mm×160mm	24 h u kalupu na (20±2)°C i ≥90% RH	→ 48h u vodi iz vodovoda na (20±2)°C
Prodor hlorida	Malteri - cilindri Ø100mm×50mm	24 h u kalupu na (20±2)°C i ≥90% RH (u zatvorenoj konzervi)	→ 6 dana u vodi iz vodovoda na (23±2)°C, potom 21 dan u krečnoj vodi na (20±2)°C

Dejstvo sulfata			
Ispitivanje čvrstoće pri pritisku prizmi koje su bile na ubrzanom očvršćavanju	Malteri – prizme 40mm×40mm×160mm	Do 24 h u adekvatno zaštićenim kalupima, u vodi temperature (35±3)°C (parno kupatilo)	→ Prebacuju se u zasićenu krečnu vodu i periodično ispituju dok ne dostignu čvrstoću pri pritisku od 21 MPa
Ispitivanje dejstva sulfata	Malteri – prizme/epruvete 25mm×25mm×285mm	→	Prebacuju se u zasićenu krečnu vodu dok ne dostignu čvrstoću pri pritisku od 21 MPa
Betonske podloge i reparaturni maltera ugrađeni na iste			
Betonske podloge – referentni beton za ispitivanje	Beton – ploče 350mm×350mm×50mm	24 h u kalupu koji je prekriven, na (21±2)°C	→ 27 dana dana u vodi iz vodovoda na (20±1)°C, potom kondicioniranje na (21±2)°C i (60±10)% RH do starosti od 90 dana
Čvrstoća pri pritisku kocki spravljenih od referentnog betona	Beton – kocke 150mm×150mm×150mm	24 h u kalupu na (20±1)°C i ≥90% RH	→ 27 dana u vodi iz vodovoda na (20±1)°C
Prionljivost maltera za betonsku podlogu – „pull-off“ metoda	Malteri u sloju debljine 25 mm na betonskim podlogama površine 175 mm x 350 mm	24 h u kalupu koji je prekriven, na (21±2)°C	→ 27 dana u vodi iz vodovoda na (20±1)°C, potom 7 dana na (21±2)°C i (60±10)% RH
Ograničeno skupljanje	Malteri u sloju debljine 25 mm na betonskim podlogama površine 175 mm x 350 mm	24 h u kalupu koji je prekriven, na (21±2)°C	→ 27 dana u vodi iz vodovoda na (20±1)°C, potom 56 dana na (21±2)°C i (60±10)% RH
Toplotna kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje	Malteri u sloju debljine 25 mm na betonskim podlogama površine 175 mm x 350 mm	24 h u kalupu koji je prekriven, na (21±2)°C	→ 6 dana u vodi iz vodovoda na (20±1)°C, potom 21+7 dana na (21±2)°C i (60±10)% RH

8. PRIPREMA UZORAKA ZA ISPITIVANJE

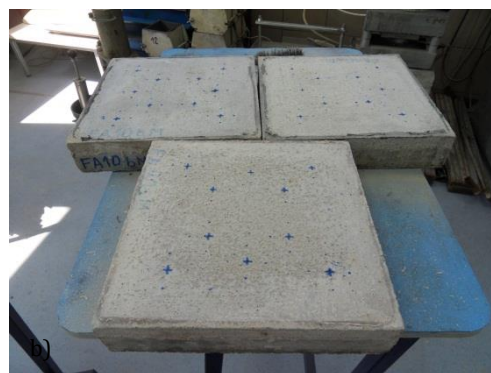
U slučaju pojedinih vrsta ispitivanja bilo je potrebno dodatno pripremiti uzorke za samo ispitivanje.

Pre ispitivanja otpornosti na prodor hlorida poravnate su baze cilindara-uzoraka korišćenjem mašine za finu pripremu uzoraka brušenjem, slika VI-20.



Slika VI-20. Mašina za finu pripremu uzoraka brušenjem

Pre lepljenja pečata za potrebe ispitivanja prionljivosti maltera za podlogu „pull-off“ metodom, ograničenog skupljanja i termičke kompatibilnosti, površina maltera (sanirani uzorci) je tretirana žičanom četkom (slika VI-21a), a skinuta skrama je uklonjena primenom kompresora za vazduh. Potom su označena mesta na kojima će se lepiti pečati, tako da budu na propisanom međurastojanju i dovoljno udaljeni od ivice uzorka, slika VI-21b.



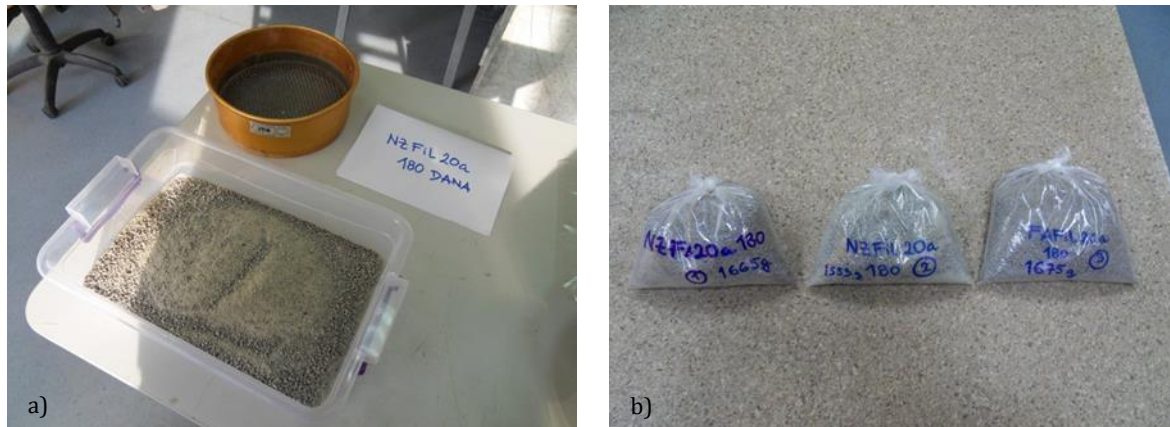
Slika VI-21. Priprema površine maltera (sanirani uzorci) za lepljenje pečata: a) Tretiranje test-površine žičanom četkom, i b) Označavanje položaja za lepljenje pečata

Za lepljenje pečata korišćen je dvokomponentni lepak *Sikadur 31 EF*, slika VI-22.



Slika VI-22. Dvokomponentni lepak za lepljenje pečata

Za potrebe ispitivanja izluživanja elemenata u tragovima iskorišćeni su ostaci uzoraka maltera nakon što im je ispitana čvrstoća pri pritisku. Materijal je usitnjen primenom čekića, a potom i prosejan kroz sito otvora 4 mm (slika VI-23).



Slika VI-23. Priprema maltera za ispitivanje izluživanja elemenata u tragovima: a) Usitnjen i prosejan malter, i b) Tri spakovana uzorka materijala koji se šalju na ispitivanje

Za potrebe XRD analize i FTIR spektroskopije pasta, uzoci su prvo usitnjeni u laboratorijskom avanu (slika VI-24), nakon čega su prosejani kroz sito 0,09/0,1 mm radi dobijanja praha sa veličinom čestica manjom od 0,09 mm, a potom su natopljeni izopropanolom kako bi se zaustavio proces hidratacije (slika VI-25). Tako pripremljeni su vakimirani u trajanju od 4h (slika VI-26), nakon čega su sušeni u sušnicu (35°C) u trajanju od 72h.



Slika VI-24. Usitnjavanje pasta u avanu



Slika VI-25. Zaustavljanje procesa hidratacije primenom izopropanola



Slika VI-26. Vakumiranje adekvatno pripremljenih uzoraka pasta

9. ISPITIVANA SVOJSTVA

9.1. Svojstva očvrslog maltera

9.1.1. Čvrstoća pri pritisku

Čvrstoća maltera pri pritisku određena je prema standardu EN 12190 [17] na uzorcima oblika prizme dimenzija 40mm×40mm×160mm u skladu sa standardom EN 196-1 [158] pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana. Kao merodavna vrednost uzeta je srednja vrednost čvrstoće dobijena ispitivanjem po tri uzorka od svake vrste maltera (odnosno srednja vrednost od 6 merenja, jer je svaka prizma imala dva merna mesta). Pre početka ispitivanja uzoraka izmerena im je masa, kao i dimenzije. Sila loma je određena pomoću hidraulične prese kapaciteta 150 kN, a brzina nanošenja opterećenja iznosila je $0,6\pm 0,2$ MPa/s. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku maltera je prikazano na slici VI-27.



Slika VI-27. Određivanje čvrstoće pri pritisku maltera

9.1.2. Kapilarno upijanje vode

Kapilarno upijanje vode uzoraka od maltera je određeno prema standardu EN 13057 [45] na diskovima prečnika 100 mm i visine 25 mm pri starosti maltera od 28 i 90 dana (slika VI-28). Od svake vrste maltera napravljena su po tri uzorka. Prilikom ispitivanja uzorci su stavljani u zasebne plitke posude tako da im je površina koja je prilikom ugrađivanja bila slobodna postavljena na oslonce „oštrih“ ivica. Potom je sipana dejonizovana voda do visine od $2,0\pm 1,0$ mm u odnosu na donju ivicu uzorka i započeto je merenje vremena sa hronometrom. Masa uzoraka je izmerena neposredno pre samog ispitivanja kapilarnog upijanja vode, kao i nakon 12', 30', 1h, 2h, 4h i 24h od početka ispitivanja. Između merenja posude su bile prekrivene poklopcem, a nakon svakog merenja mase uzorka proveravan je nivo vode i po potrebi je korigovan. Standardom je propisano da posude koje se koriste prilikom ispitivanja moraju da imaju ravno dno čija je površina minimum dva puta veće od površine izložene osnove uzorka.

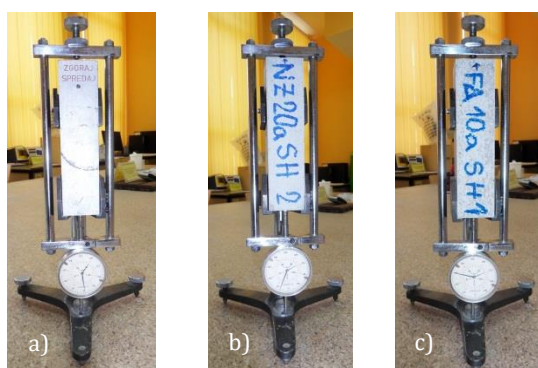
Osim merenja mase kapilarno upijene vode, nakon 2h od početka ispitivanja zabeležen je i nivo do kojeg se „popela“ voda, na osam aksijalnih linija po omotaču uzorka. Kao merodavan rezultat uzeta je srednja vrednost dizanja vode po omotaču tri uzorka od svake vrste ispitanih maltera.



Slika VI-28. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode

9.1.3. Skupljanje usled sušenja

Ispitivanje skupljanja uzoraka maltera usled sušenja (slika VI-29) urađeno je u skladu sa procedurom navedenom u standardu SRPS B.C8.029 [155]. Od opreme je korišćen komparator dužine (deformetar prema Graf-Kaufmann-u) za merenje epruveta dimenzija 40mm×40mm×160mm, koji je snabdeven mikrometrom sa mernom skalom opsega 10 mm i podeocima od 0,01 mm. Nakon 72h od izrade, epruvete su izvađene iz vode, obrisane vlažnom krpom, nakon čega im je izmerena dužina – očitana je vrednost sa Graf-Kaufmann-ovog ugredaja (početno - inicijalno merenje), a zatim i posle 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana.



Slika VI-29. Ispitivanje skupljanja maltera usled sušenja: a) Etalon, b) Uzorak koji sadrži NZ, i c) Uzorak koji sadrži FA

U periodu između merenja epruvete su držane u klima-komori na temperaturi od $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i relativnoj vlažnosti vazduha od $55\pm 5\%$ (slika VI-30). Korišćena je klima-komora tipa KKT-300 proizvođača "Elektron" (Banja Koviljača, Srbija) sa integrisanim

sistemom kontrole relativne vlažnosti vazduha od 10% do 90% i temperature od -40°C do +160°C.

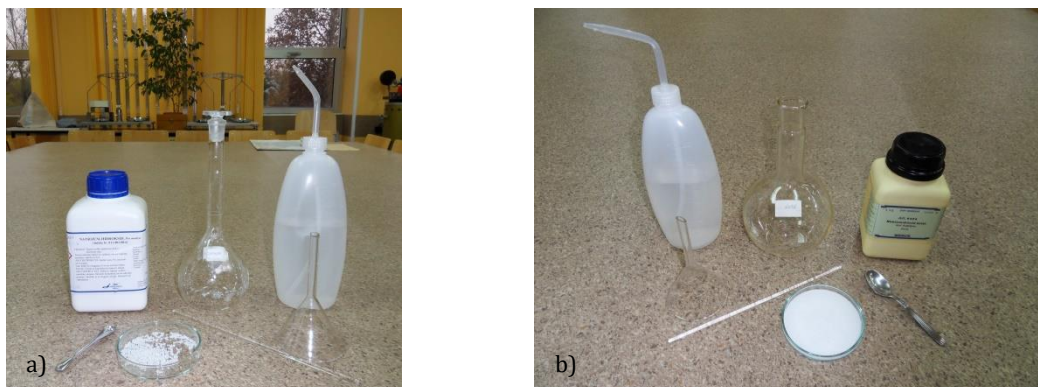


Slika VI-30. Nega uzoraka maltera u toku ispitivanja skupljanja usled sušenja u klima-komori:
a) Unutrašnjost komore sa uzorcima, i b) Kontrolna tabla

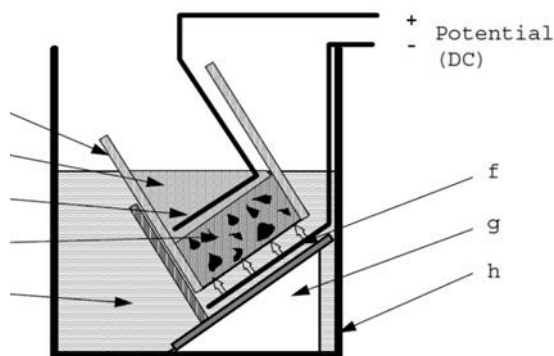
9.1.4. Otpornost na prodor hlorida

Otpornost maltera na prodor hlorida određena je u skladu sa procedurom koja je definisana standardom NT BUILD 492 [129] (Napomena: Prilog P nacionalnog standarda SRPS U.M1.206:2013 [164] – „Određivanje dubine penetracije hlorida u betonu“ je u potpunosti zasnovan na metodi ispitivanja koja je propisana standardom NT BUILD 492 [129]). U okviru ispitivanja za svaku vrstu maltera upotrebljena su tri cilindrična uzorka, prečnika 100 mm i debljine 50 mm, starosti 28 dana. U skladu sa NT BUILD 492 [129] urađeno je prekondicioniranje uzoraka. Uzorci su oprani, očišćeni i ostavljeni da se osuše u laboratorijskim uslovima. Nakon što im se površina osušila, vakumirani su tri sata, i pri tome su bili postavljeni tako da su im obe baze bile slobodne, potom su, bez prekida u radu vakuum pumpe, potopljeni u krečnu vodu, i vakuum se održava tokom još jednog sata. Po završetku vakuumiranja, ponovo je pušten vazduh u posudu, a uzorci su ostavljeni u krečnoj vodi tokom 18 ± 2 h.

Za potrebe ispitivanja, napravljeni je anoltni rastvor (0,3 N NaOH) i katoltni rastvor (10% NaCl u odnosu na masu), slika VI-31. Po završetku prekondicioniranja, katoltni rastvor je sipan u posudu za ispitivanje prodora hlorida, a uzorci su postavljeni u skladu sa shemom koja je prikazana na slici VI-32. Potom je u cilinar usut anoltni rastvor, tako da mu je bila izložena gornja baza uzorka, a katoltnom donja baza. Potom je katoda je smeštena u katoltni rastvor, a anoda u anoltni. Oprema je adekvatno povezana i puštena u rad, a napon je podešavan u skladu sa tabelom 1 iz standarda NT BUILD 492 [129].



Slika VI-31. Spravljanje: a) Anolitnog rastvora (0,3 N NaOH) b) Katolitnog rastvora (10% (w) NaCl)



Slika VI-32. Shema izlaganje uzorka dejstvu hlorida [129]

Nakon 24h uzorci su aksijalno presečeni, a jedna od sveže presečenih površina je poprskana rastvorom srebrno nitrata (0,1 M AgNO₃). Dubina prodora hlorida izmerena je na osnovu vidljivog belog taloga srebrno hlorida (kolorimetrijska metoda) nakon čega je sračunat nestacionarni koeficijent migracije hlorida prema navedenom simplifikovanom izrazu [129]:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right) \quad (3)$$

gde je:

D_{nssm} – nestacionarni koeficijent migracije hlorida ($\times 10^{-12}$ m²/s);

U – apsolutna vrednost napona (V);

T – srednja vrednost početne i krajnje temperature anolita (°C);

L – visina uzorka (mm);

x_d – prosečna vrednost dubine prodora hlorida (mm);

t – vreme trajanja testa (h).

Na osnovu sračunatih vrednosti nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida utvrđuje se otpornost ispitanih maltera na prodor hlorida na osnovu jedne od dve klasifikacije. Prvu klasifikaciju je predložio Tang [168], a drugu Gjørv [61] Tabela VI-13.

Tabela VI-13. Klasifikacije betona/maltera u odnosu na otpornost na prodor hlorida

Klasifikacija prema Tang-u [168]		Klasifikacija prema Gjørv-u [61]	
Otpornost betona/maltera	D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Otpornost betona/maltera	D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)
nije pogodan za agresivnu sredinu	> 16	smanjena	> 15
umerena	8 -16	umerena	10 -15
dobra	2 -8	povišena	5 -10
veoma dobra	< 2	veoma visoka	2,5 -5
		izuzetno visoka	< 2,5

U ovom konkretnom slučaju klasifikacija maltera je urađena prema Gjørv-u [61], (i) jer je preciznija, i (ii) granice D_{nssm} od 5×10^{-12} m²/s i 10×10^{-12} m²/s se poklapaju sa granicama za klase izloženosti hloridima koje su definisane nemačkim tehničkim preporukama [11], tabela VI-14.

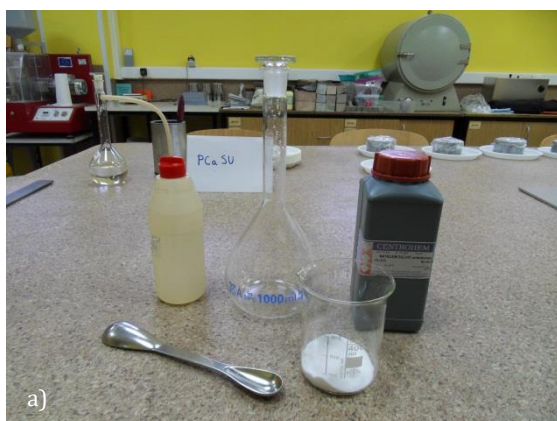
Tabela VI-14. Srednje vrednosti i najveće dozvoljene pojedinačne vrednosti koeficijenata migracije u zavisnost od klase izloženosti [11]

Klase izloženosti	D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	
	Srednja vrednost	Maksimalna pojedinačna vrednost
XD1, XS1	$\leq 10,0$	$\leq 12,0$
XD2, XS2	$\leq 5,0$	$\leq 7,0$
XD3, XS3	$\leq 5,0$	$\leq 7,0$

9.1.5. Otpornost na dejstvo sulfata

Otpornost maltera na dejstvo sulfata određena je u skladu sa procedurom koja je definisana standardom ASTM C 1012 [7], a koja se primenjuje i u slučaju maltera spravljenih sa mešavinom Portland cementa i pucolana. Za potrebe navedenog ispitivanja neophodno je istovremeno napraviti 6 uzoraka u obliku prizme/epruveta dimenzija 25mm×25mm×160mm, i do 21 kocke ivice 50 mm po mešavini (umesto kocki napravljene su tri prizme dimenzija 40mm×40mm×160mm, a predviđeno je da se svaka prizma na dva mesta ispita na čvrstoću pri pritisku). Nakon ugrađivanja maltera u kalupe, kalupi su adekvatno zaštićeni i stavljeni u vodeno kupatilo (voda temperature $35 \pm 3^\circ\text{C}$) na ubrzano očvršćavanje maltera u trajanju do 24 h. Po isteku 24 h, kalupi su izvađeni iz vodenog kupatila, a potom su uzorci raskalupljeni. 6

epruveta i 2 prizme po mešavini su odmah stavljene na negu u tank sa zasićenom krečnom vodom, dok je jedna prizma (na jednom mestu) odmah ispitana na čvrstoću pri pritisku. U slučaju da je dobijena čvrstoća pri pritisku veća od 21 MPa (po standardu ASTM C 1012 [7] je 20 MPa, ali kada se uzme u obzir da je koeficijent korelacije $k=0,95$, u ovom konkretnom slučaju potrebno je da čvrstoća pri pritisku bude veća od 21 MPa), ispituje se i druga polovina prizme, i beleži dobijena srednja vrednost, a epruvete se vade iz tanka sa zasićenom krečnom vodom, prekrivaju vlažnom krpom i ostavljaju da se ohlade do ambijentalne temperature. Kada se ohlade određuje se promena njihove dužine u odnosu na referentnu šipku (početno merenje), a potom se prebacuju u tank sa sulfatnim rastvorom (352 M Na_2SO_4 po m^3 , odnosno 50 g/l, pH rastvora pre upotrebe je unutar propisanih vrednosti prema standardu ASTM C 1012 [7]), slika VI-33. U slučaju da nije dostignuta čvrstoća od 21 MPa, polovina prizme se stavlja u zasićenu krečnu vodu, a u skladu sa prethodno dobijenim rezultatom određuje se kada će se ispitivanje ponoviti. Ispitivanja se ponavljaju dok se ne dostigne čvrstoća od 21 MPa, i tada se radi početno merenje epruveta, nakon čega se prebacuju u tank sa sulfatnim rastvorom. Na svaku epruvetu (zapremine ~ 178 ml) treba da ide oko 4 puta veća zapremina sulfatnog rastvora (propisano je od 625 ml do 800 ml).



Slika VI-33. Izlaganje malterskih epruveta dejstvu sulfatnog rastvora: a) Spravljanje sulfatnog rastvora b) Uzorci u sulfatnom rastvoru

Dan kada su epruvete prebačene u sulfatni rastvor se obeležava kao nulti, i u odnosu na njega se dalje meri vreme, odnosno meri se promena dužine epruveta izloženih dejstvu sulfatnog rastvora u trajanju od 1, 2, 3, 4, 8 13 i 15 nedelja, kao i 4, 5 i 6 meseci (u odnosu na nulti dan), slika VI-34.



Slika VI-34. Merenje promene dužine malterskih epruveta usled dejstva sulfatnog rastvora

Sulfatni rastvor je menjan nakon završetka svakog ciklusa merenja, a referenti uzorci, uzorci koji sadrže NZ, kao i oni koji sadrže FA, su sve vreme i nege i dejstva sulfatnog rastvora držani u zasebnim tankovima.

Na osnovu sračunatih vrenosti ekspanzije maltera nakon 180 dana (~ 6 meseci), ustanovljena je otpornost maltera na dejstvo sulfata u skladu ACI 318 [1], tabela VI-15.

Tabela VI-15. Klase izloženosti maltera izloženih dejstvu sulfata [1]

Klasa izloženosti	Maksimalna vrednost ekspanzije dobijene u skladu sa ASTM C 1012		
	nakon 6 meseci	nakon 12 meseci	nakon 18 meseci
S1 – umerena otpornost na prodor hlorida	0,10%		
S2 - visoka otpornost na prodor hlorida	0,05%	0,10%*	
S3 – veoma visoka otpornost na prodor hlorida			0,10%

*granica za ekspanziju nakon 12 meseci izlaganja destvu sulfata primenjuje se samo u slučaju kada izmerena ekspanzija nakon 6 meseci prekoračuje maksimalnu dozvoljenu vrednost

9.1.6. Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda

Merenje čvrstoće prionjanja pri zatezanju maltera urađeno je u skladu sa odredbama standard EN 1542 [157]. Od svake vrste maltera iz III faze ispitivanja napravljen je po jedan uzorak, odnosno, malter je ugrađen na polovinu betonske podloge. Na osnovu postignute prionljivosti određene su klase reparaturnih maltera u pogledu ispitanog svojstva prema kriterijumima koji su dati u standardu EN 1504-3 [23].

9.1.7. Ograničeno skupljanje

Ispitivanje ograničenog skupljanja maltera urađeno je prema proceduri navedenoj u standard EN 12617-4 [20]. Za potrebe navedenog ispitivanja napravljena su po dva uzorka od svake vrste maltera, odnosno iskorišćena je jedna betonska podloga po vrsti maltera. Nakon 28 dana nege (tabela VI-12), urađen je prvi vizuelni pregled test-površina uzoraka, odnosno proverava se da li je došlo do delaminacije, pojave prslina ili nekog drugog defekta (Prilog 14, tabela P14-1). Nakon pregleda, uzorci su držani u laboratorijski uslovima u period od 56 dana (period skladištenja) u uslovina navedenim u tabeli VI-12, a potom je usledio drugi vizuelni pregled (Prilog 14, tabela P14-2), kao i ispitivanje čvrstoće prionjanja pri zatezanju maltera.

Na osnovu postignute prionljivosti određene su klase reparaturnih maltera sa aspekta ograničenog skupljanja prema kriterijumima datim u standardu EN 1504-3 [23].

9.1.8. Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje

Metoda kojom je određen efekat toplotnog šoka usled zamrzavanja i odmrzavanja, sa potapanjem izložene (test) površine u zasićen rastvor soli za odmrzavanje, maltera ugrađenih na betonske podloge, propisana je standardom EN 13687-1 [21].

Za svaku vrstu ispitivanih maltera propisano je da se napravi po jedan etalonski uzorak i po dva test-uzorka.

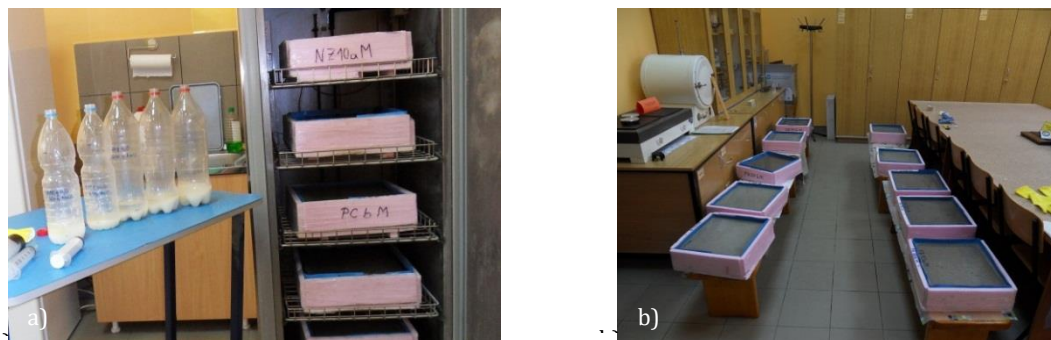
Nakon propisane nege od 28 dana (tabela VI-12) test-uzorci su hidroizolovani sa svih strana, izuzev gornje test-površine na kojoj je napravljena “kadica”. 24 h pre početka prvog ciklusa u “kadice” je sipana voda iz vodovoda. Test-uzorci su potom izlagani ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja u skladu sa standardom EN 13687-1 [21] (slika VI-35). Svaki uzorak je izlagan jednom ciklusu u toku dana, od ukupno 50 ciklusa koji su propisani standardom EN 1504-3 [23]. Svaki ciklus se sastojao iz dve faze:

- U prvoj fazi, u trajanju od 2h, test-uzorci su smešteni u klima-komoru u kojoj je vazduh ohlađen na (-15 ± 2) °C, nakon čega im je sipan zasićeni rastvor NaCl u “kadice”, prethodno ohlađen takođe na temperaturi od (-15 ± 2) °C;

- U drugoj fazi, u trajanju od 22h, uzorci su bili u laboratorijskim uslovima, dok im je test-površina bila pod vodom iz vodovoda temperature (21 ± 2) °C.

Nakon svakih 10 ciklusa test-uzorci su vizuelno pregledani.

Tokom prvih 25 ciklusa etalonski uzorci su bili izloženi laboratorijskim uslovima, dok su za vreme preostalih 25 ciklusa držani u vodi iz vodovoda temperature (21 ± 2) °C.



Slika VI-35. Ciklusi: a) zamrzavanja sa „potapanjem“ izložene površine zasićenom rastvoru soli za odmrzavanje; b) i odmrzavanja

Nakon 50-og ciklusa test-uzorci su odmrznuti, a potom su zajedno sa etalonskim uzorcima kondicionirani 7 dana na vazduhu temperature (21 ± 2) °C i relativne vlažnosti od (60 ± 10) %. Nakon 24h od lepljenja pečata, urađeno je ispitivanje čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera “pull-off” metodom. Na osnovu postignute prionljivosti određene su klase reparaturnih maltera u pogledu ispitivane performanse, prema kriterijumima koji su dati u standardu EN 1504-3 [23].

9.1.9. Izluživanje elemenata u tragovima

Priprema uzoraka za Ispitivanje izluživanja elemenata u tragovima iz maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a (malteri iz II faze ispitivanja) urađena je prema standardu EN 12457-2 [19] kao jednostepeno šaržno ispitivanje pri odnosu tečno – čvrsto od 10 l/kg za materijale sa veličinom “zrna” manjom od 4 mm.

U skladu sa pregledom dostupne literature (poglavlje V-1.7) odabrani su sledeći teški metali čije izluživanje je predmet ispitivanja: Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba i Sb.

Sadržaj elemenata u tragovima u izabranim mešavinama malterima određuje se u skladu sa EPA 7000B:2007 (za Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr i Ba), EPA 7010:2007 (za As i Sb) primenom ICP-OES. - ICPE9820, Shimadzu, Japan, kao i US EPA 7471B:2007 (za Hg) primenom AAS - (AA7000) Shimadzu, Japan. U okviru navedenog ispitivanja koriste se sledeći instrumenti: analitička vaga - XT 220A Precisa Švajcarska, sušnica - LSW-53 Vims Electronic, Srbija i shaker Vekamer, Srbija.

Na osnovu dobijenih rezultata radi se karakterizacija uzoraka prema Odluci Saveta [105], odnosno indirektno se utvrđuje da li dati malteri spadaju u inertne, nereaktivne ili reaktivne materijale (granične vrednosti su prikazane u tabeli VI-16).

Tabela VI-16. Direktiva – granične vrednosti [105]

Materijal	Granične vrednosti odabranih elemenata (mg/kg suve materije)									
	Pb	Cd	Zn	Cu	Ni	Cr	Hg	As	Ba	Sb
Inertan	0,5	0,04	4	2	0,4	0,5	0,01	0,5	20	0,06
Neopasan	10	1	50	50	10	10	0,2	2	100	0,7
Opasan	50	5	200	100	40	70	2	25	300	5

9.2. Određivanje faznog sastava očvrsljih pasta

Za potrebe utvrđivanja faznog sastava očvrsljih pasta korišćena je XRD analiza i FTIR spektroskopija.

9.2.1. Određivanje mineraloškog sastava metodom rendgenske difrakcije (XRD)

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 Å, opseg snimanja je između 2θ : 5-55°, sa brzinom skeniranja od 0,02° i 0,5s po koraku, pri naponu od 40 kV i jačini struji struji od 30 mA.

9.2.2. Određivanje strukturnih promena metodom infracrvene spektroskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR)

Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR), *Thermo-Nicolet Nexus 670 FTIR spectrometer*, je izvedena pod sledećim eksperimentalnim uslovima: uzorci su pripremljeni tako što je ispitivana supstanca izmešana sa fino sprášenim i osušnim KBr (*KBr pellet technique*), u odgovarajućem kalupu u vakuumu, pri spektralnoj rezoluciji od 4 cm^{-1} , opsega 4000-400 cm^{-1} i u proseku sa 32 skeniranja po jednom merenju.

10. REZULTATI ISPITIVANJA

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u priložima, sračunate su vrednosti svih svojstava maltera planiranih programom ispitivanja. Karakteristične vrednosti svojstava očvrslog maltera prikazane su tabelarno u cilju što lakše analize i izvođenja zaključaka, dok su rezultati faznog sastava kod pasta prikazani u okviru Poglavlja VII-1.1.3, VII-1.1.4, VII-1.2.3 i VII-1.2.4. u cilju bolje preglednosti prilikom njihove analize.

10.1. Svojstva očvrslog maltera

10.1.1. Čvrstoća pri pritisku

Na osnovu postupka prikazanog u poglavlju VI-9.1.1 određene su čvrstoće pri pritisku maltera, a rezultati pojedinačnih ispitivanja dati su u Prilogu 7. Srednje vrednosti zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku maltera, po fazama ispitivanja, prikazane su u tabelama VI-17, VI-18, VI-19, VI-20 VI-21.

Oznake u tabelama imaju sledeća značenja:

- $\gamma_{m,ws,sr}$ – srednja vrednost zapreminske mase vodom zasićenog maltera (u ovom konkretnom slučaju pri starosti od 28 dana)
- $R_{c,28}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od 28 dana
- $R_{c,60}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od 60 dana
- $R_{c,90}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od 90 dana
- $R_{c,180}$ – čvrstoća maltera pri pritisku pri starosti od 180 dana
- a – malteri spravljani sa $w/cm=0,5$
- b – malteri spravljani sa $w/cm=0,4$

Tabela VI-17. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljanih sa NZ kao SCM, $w/cm=0,5$

Vrsta maltera	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku, R_c (MPa)			
		$R_{c,28}$	$R_{c,60}$	$R_{c,90}$	$R_{c,180}$
PCa	2176	51,719	55,781	56,146	58,125
NZ10a	2192	55,521	58,333	61,458	62,083
NZ15a	2153	53,854	57,708	59,948	61,146
NZ20a	2168	48,958	57,135	59,792	60,885

Tabela VI-18. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljениh sa NZ kao SCM, $w/cm=0,4$

Vrsta maltera	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku, R_c (MPa)			
		$R_{c,28}$	$R_{c,60}$	$R_{c,90}$	$R_{c,180}$
PCb	2192	74,740	75,208	76,927	77,448
NZ10b	2170	70,000	76,875	77,448	78,281
NZ15b	2179	68,490	73,854	74,948	75,260
NZ20b	2166	68,073	73,594	74,844	74,948

Tabela VI-19. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljениh sa FA kao SCM, $w/cm=0,5$

Vrsta maltera	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku, R_c (MPa)			
		$R_{c,28}$	$R_{c,60}$	$R_{c,90}$	$R_{c,180}$
PCa	2176	51,719	55,781	56,146	58,125
FA10a	2179	55,365	60,365	63,542	64,844
FA15a	2165	59,479	63,281	65,000	67,708
FA20a	2137	54,328	58,698	60,260	62,396

Tabela VI-20. I faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljениh sa FA kao SCM, $w/cm=0,4$

Vrsta maltera	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku, R_c (MPa)			
		$R_{c,28}$	$R_{c,60}$	$R_{c,90}$	$R_{c,180}$
PCb	2192	74,740	75,208	76,927	77,448
FA10b	2212	74,953	79,792	82,708	83,021
FA15b	2213	75,729	81,979	83,646	85,156
FA20b	2180	72,448	77,917	79,427	81,875

Tabela VI-21. II faza - Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera spravljениh sa NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil kao SCM, $w/cm=0,5$

Vrsta maltera	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	Čvrstoća pri pritisku, R_c (MPa)			
		$R_{c,28}$	$R_{c,60}$	$R_{c,90}$	$R_{c,180}$
PCa	2176	51,719	55,781	56,146	58,125
NZFA20a	2157	53,958	58,594	60,938	64,115
NZFil20a	2097	52,240	57,292	58,438	60,729
FAFil20a	2141	53,698	58,229	61,510	63,281

10.1.2. Kapilarno upijanje vode

Merenje kapilarnog upijanja vode ispitivanih vrsta maltera određeno je prema odredbama standarda EN 13057 [45]. Rezultati pojedinačnih merenja kapilarnog upijanja vode (preko mase uzoraka u toku ispitivanja, kao i visine dizanja vode po omotaču uzoraka nakon 2h od početka ispitivanja), dobijeni ispitivanjem po tri uzorka od svake vrste maltera starih 28 i 90 dana, prikazani su u Prilogu 8. Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode maltera prikazane su u tabelama VI-22, VI-23, VI-27 i VI-28, jednačine upijanja vode kao i koeficijenti kapilarnog upijanja prikazani su u tabelama VI-24, VI-25, VI-29 i VI-30, dok su u tabelama VI-26 i VI-31 date srednje vrednosti visine dizanja vode po omotaču uzoraka maltera izmerene nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode.

Pod kapilarnim upijanjem vode - I , u ovom slučaju, podrazumeva se odnos mase upijene vode i izložene površine uzorka (tj. osnove uzorka prečnika 100 mm), a izražava se u kg/m^2 . Koeficijent kapilarnog upijanja (sorpcije) vode - S se izražava u $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0.5})$, a predstavlja nagib linearne funkcije dobijene regresionom analizom rezultata merenja kapilarnog upijanja vode (x osa - kvadratni koren vremena proteklog od početka kapilarnog upijanja vode, \sqrt{h} ; y osa - masa kapilarno upijene vode u datom vremenskom trenutku po jedinici površine baze uzorka, I u kg/m^2). U slučaju kada se ne može uspostaviti linerana regresija sa dovoljnom tačnošću, odnosno kada je faktor korelacije manji od 0,95, koeficijent kapilarnog upijanja S predstavlja količnik I uzorka određenog nakon 24h od početka ispitivanja i kvadratnog korena proteklog vremena (24h), što predstavlja drugi specijalni slučaj po standardu EN 13057 [45].

Tabela VI-22. I faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (I) maltera starih 28 dana

Vrsta maltera	Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (kg/m ²)						
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h
PCa	0	0,670	0,819	0,947	1,085	1,240	1,944
NZ10a	0	0,652	0,784	0,901	1,018	1,134	1,661
NZ15a	0	0,488	0,616	0,720	0,824	0,926	1,377
NZ20a	0	0,442	0,561	0,658	0,759	0,853	1,251
FA10a	0	0,566	0,700	0,816	0,928	1,045	1,402
FA15a	0	0,647	0,743	0,838	0,919	1,011	1,280
FA20a	0	0,633	0,726	0,810	0,890	0,964	1,210
PCb	0	0,351	0,409	0,462	0,518	0,592	0,830
NZ10b	0	0,314	0,387	0,447	0,527	0,619	0,911
NZ15b	0	0,285	0,349	0,399	0,469	0,541	0,753
NZ20b	0	0,249	0,313	0,359	0,426	0,493	0,689
FA10b	0	0,499	0,565	0,607	0,644	0,708	0,899
FA15b	0	0,464	0,523	0,565	0,602	0,668	0,850
FA20b	0	0,411	0,465	0,505	0,542	0,600	0,772

Tabela VI-23. I faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (I) maltera starih 90 dana

Vrsta maltera	Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (kg/m ²)						
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h
PCa	0	0,504	0,688	0,841	1,032	1,240	1,872
NZ10a	0	0,406	0,551	0,679	0,802	0,947	1,439
NZ15a	0	0,307	0,412	0,506	0,601	0,711	1,107
NZ20a	0	0,283	0,370	0,448	0,532	0,626	0,994
FA10a	0	0,130	0,183	0,233	0,300	0,384	0,675
FA15a	0	0,128	0,158	0,187	0,223	0,289	0,525
FA20a	0	0,110	0,125	0,161	0,186	0,255	0,475
PCb	0	0,175	0,271	0,347	0,446	0,508	0,792
NZ10b	0	0,188	0,270	0,341	0,442	0,499	0,892
NZ15b	0	0,157	0,218	0,263	0,322	0,364	0,643
NZ20b	0	0,163	0,218	0,272	0,336	0,379	0,676
FA10b	0	0,075	0,105	0,145	0,179	0,216	0,399
FA15b	0	0,078	0,092	0,113	0,148	0,172	0,353
FA20b	0	0,063	0,082	0,097	0,118	0,140	0,304

Tabela VI-24. I faza - Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana

Vrsta maltera	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R ²	S (kg/(m ² h ^{0,5}))
PCa	$y=0,2728x + 0,6417$	0,9830	0,2728
NZ10a	$y=0,2130x + 0,6533$	0,9694	0,2130
NZ15a	$y=0,1859x + 0,5007$	0,9624	0,1859
NZ20a	$y=0,1687x + 0,4595$	0,9550	0,1687
FA10a	$y=0,1721x + 0,6092$	0,9233	(0,2861)*
FA15a	$y=0,1308x + 0,6783$	0,9218	(0,2613)
FA20a	$y=0,1184x + 0,6656$	0,9179	(0,2469)
PCb	$y=0,1022x + 0,3487$	0,9684	0,1022
NZ10b	$y=0,1276x + 0,3118$	0,9652	0,1276
NZ15b	$y=0,0991x + 0,2930$	0,9472	(0,1538)
NZ20b	$y=0,0927x + 0,2598$	0,9429	(0,1407)
FA10b	$y=0,0831x + 0,5089$	0,9568	0,0831
FA15b	$y=0,0808x + 0,4709$	0,9577	0,0808
FA20b	$y=0,0758x + 0,4173$	0,9586	0,0758

*vrednosti u zagradi predstavljaju koeficijent S dobijen kao količnik kapilarnog upijanja vode nakon 24h izlaganja kapilarnom upijanju vode i kvadratnog korena vremena proteklog od početka ispitivanja – 24h

Tabela VI-25. I faza – Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 90 dana

Vrsta maltera	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R ²	S (kg/(m ² h ^{0,5}))
PCa	$y=0,2891x + 0,5249$	0,9508	0,2891
NZ10a	$y=0,2167x + 0,4260$	0,9534	0,2167
NZ15a	$y=0,1690x + 0,3125$	0,9630	0,1690
NZ20a	$y=0,1515x + 0,2777$	0,9721	0,1515
FA10a	$y=0,1189x + 0,1102$	0,9828	0,1189
FA15a	$y=0,0882x + 0,0976$	0,9969	0,0882
FA20a	$y=0,0825x + 0,0747$	0,9961	0,0825
PCb	$y=0,1276x + 0,2005$	0,9328	(0,1616)*
NZ10b	$y=0,1502x + 0,1765$	0,9770	0,1502
NZ15b	$y=0,1034x + 0,1476$	0,9828	0,1034
NZ20b	$y=0,1100x + 0,1489$	0,9835	0,1100
FA10b	$y=0,0700x + 0,0646$	0,9839	0,0700
FA15b	$y=0,0617x + 0,0517$	0,9979	0,0617
FA20b	$y=0,0535x + 0,0408$	0,9979	0,0535

*vrednosti u zagradi predstavljaju koeficijent S dobijen kao količnik kapilarnog upijanja vode nakon 24h izlaganja kapilarnom upijanju vode i kvadratnog korena vremena proteklog od početka ispitivanja – 24h

Tabela VI-26. I faza – Srednje vrednosti visine dizanja vode po omotaču uzorka maltera nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

w/cm	Starost maltera (dani)	Srednja visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)						
		PC	NZ10	NZ15	NZ20	FA10	FA15	FA20
0,5	28	12,56	10,08	9,44	7,69	11,17	11,21	10,32
	90	9,51	8,47	7,28	6,58	6,61	6,75	7,23
0,4	28	8,70	10,48	9,22	8,70	9,98	9,71	9,12
	90	7,10	8,48	7,63	11,76	7,74	7,57	8,01

Tabela VI-27. II faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (I) maltera starih 28 dana

Vrsta maltera	Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (kg/m ²)						
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZFA20a	0	0,522	0,629	0,712	0,794	0,910	1,223
NZFil20a	0	0,571	0,678	0,754	0,846	0,952	1,267
FAFil20a	0	0,569	0,643	0,707	0,772	0,845	1,062

Tabela VI-28. II faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (I) maltera starih 90 dana

Vrsta maltera	Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode (kg/m ²)						
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZFA20a	0	0,454	0,550	0,627	0,710	0,878	1,212
NZFil20a	0	0,505	0,618	0,700	0,784	0,876	1,179
FAFil20a	0	0,455	0,535	0,589	0,628	0,698	0,886

Tabela VI-29. II faza - Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana

Vrsta maltera	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R ²	S (kg/(m ² h ^{0,5}))
NZFA20a	y=0,1464x + 0,5429	0.9438	(0,2496)*
NZFil20a	y=0,1455x + 0,5908	0.9449	(0,2587)
FAFil20a	y=0,1026x + 0,5874	0.9346	(0,2168)

*vrednosti u zagradi predstavljaju koeficijent S dobijen kao količnik kapilarnog upijanja vode nakon 24h i kvadratnog korena vremena proteklog od početka ispitivanja – 24h

Tabela VI-30. II faza - Jednačina upijanja i koeficijent kapilarnog upijanja vode maltera starih 90 dana

Vrsta maltera	Jednačina upijanja	Faktor korelacije R ²	S (kg/(m ² h ^{0,5}))
NZFA20a	y=0,1627x + 0,4545	0.9524	0,1627
NZFil20a	y=0,1388x + 0,5348	0.9369	(0,2406)*
FAFil20a	y=0,0879x + 0,4784	0.9326	(0,1808)

*vrednosti u zagradi predstavljaju koeficijent S dobijen kao količnik kapilarnog upijanja vode nakon 24h i kvadratnog korena vremena proteklog od početka ispitivanja – 24h

Tabela VI-31. II faza – Srednje vrednosti visine dizanja vode po omotaču uzoraka maltera nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Starost maltera (dani)	Srednja visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)		
	NZFA20a	NZFil20a	FAFil20a
28	8,48	7,26	8,95
90	8,61	9,06	8,36

10.1.3. Izluživanje elemenata u tragovima

Koncentracije elemenata u tragovima izluženih iz maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, starosti 28 i 180 dana, prikazane su u tabelama VI-32 i VI-33, respektivno.

Tabela VI-32. II faza – Koncentracija elemenata u tragovima u procednoj tečnosti - eluatu (L/S= 10 l/1 kg suve materije) za maltere NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, pri starosti od 28 dana

Sadržaj u EP ekstraktu L/S= 10 l/1 kg* (mg/kg sm**)			
Elementi u tragovima	NZFA20a 28	NZFil20a 28	FAFil20a 28
Olovo, Pb	0,043	0,469	0,466
Kadmijum, Cd	0,1	0,099	0,086
Cink, Zn	0,5	0,4	0,7
Bakar, Cu	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Nikl, Ni	0,202	0,228	0,209
Hrom, Cr	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Živa, Hg	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Arsen, As	0,057	0,083	<0,03
Barijum, Ba	< 1	< 1	< 1
Antimon, Sb	< 1	< 1	< 1

L/S* - odnos tečno - čvrsto
sm** - suva materija

Tabela VI-33. II faza – Koncentracija elemenata u tragovima u procednoj tečnosti - eluatu (L/S= 10 l/1 kg suve materije) za maltere NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, pri starosti od 180 dana

Sadržaj u EP ekstraktu L/S= 10 l/1 kg* (mg/kg sm**)			
Elementi u tragovima	NZFA20a 180	NZFil20a 180	FAFil20a 180
Olovo, Pb	1,9	2,7	4,9
Kadmijum, Cd	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cink, Zn	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Bakar, Cu	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Nikl, Ni	0,64	0,52	< 0,5
Hrom, Cr	0,16	0,13	0,14
Živa, Hg	< 0,003	< 0,003	< 0,003
Arsen, As	0,05	< 0,04	< 0,04
Barijum, Ba	15,9	24,8	12,5
Antimon, Sb	< 1	< 1	< 1

L/S* - odnos tečno - čvrsto
sm** - suva materija

10.1.4. Skupljanje usled sušenja

Ispitivanje skupljanja epruveta od maltera usled sušenja pri određenim uslovima temperature i relativne vlažnosti vazduha urađeno je u skladu sa procedurom datom u standardu SRPS B.C8.029 [155]. Na osnovu rezultata pojedinačnih merenja koji su prikazani u Prilogu 10 izračunate su srednje vrednosti promene dužine za svaku vrstu maltera iz III faze ispitivanja, u mm/m (tabela VI-34), u odnosu na Lg - mernu bazu od 160 mm umanjenu za dužine repera unutar maltera (Prilog 10).

Tabela VI-34. III faza – Srednje vrednosti skupljanja maltera usled sušenja

Srednje vrednosti skupljanja maltera iz III faze ispitivanja usled sušenja (mm/m)											
Vrsta maltera	Starost maltera u trenutku merenja skupljanja usled sušenja (dani)										
	3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
PCa	0	-0,24	-0,25	-0,36	-0,39	-0,48	-0,63	-0,82	-0,96	-1,01	-1,02
NZ10a	0	-0,14	-0,26	-0,51	-0,66	-0,71	-0,79	-0,91	-0,97	-1,02	-1,06
NZ20a	0	-0,15	-0,30	-0,59	-0,73	-0,78	-0,85	-0,96	-1,00	-1,06	-1,11
FA10a	0	-0,11	-0,33	-0,47	-0,65	-0,69	-0,76	-0,82	-0,91	-0,98	-1,04
FA20a	0	-0,12	-0,33	-0,50	-0,65	-0,66	-0,72	-0,82	-0,89	-0,97	-1,02
PCb	0	-0,22	-0,23	-0,26	-0,27	-0,39	-0,54	-0,60	-0,73	-0,76	-0,80
NZ10b	0	-0,22	-0,23	-0,34	-0,41	-0,42	-0,49	-0,58	-0,67	-0,72	-0,73
NZ20b	0	-0,18	-0,27	-0,40	-0,42	-0,50	-0,61	-0,69	-0,74	-0,77	-0,81
FA10b	0	-0,17	-0,28	-0,39	-0,40	-0,48	-0,56	-0,67	-0,77	-0,80	-0,83
FA20b	0	-0,18	-0,29	-0,41	-0,42	-0,48	-0,56	-0,63	-0,69	-0,75	-0,80

10.1.5. Otpornost na prodor hlorida

Na osnovu rezultata merenja i sračunatih srednjih vrednosti i temperature anolitnog rastvora i visine uzoraka (tabela P11-1), kao i dubine prodora hlorida (tabela P11-2), Prilog 11, sračunati su nestacionarni koeficijenti migracije hlorida, koji su zajedno sa reprezentnim poprečnim preseccima prikazani u tabelama VI-35 i VI-36.

Tabela VI-35. III faza – Prosečna dubina prodora hlorida x_d (mm) i nestacionarni koeficijent migracije hlorida $D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m²/s) za maltere spravljene sa $w/cm=0,5$, kao i klase izloženosti hloridima











Oznaka maltera	Poprečni presek uzorka	x_d (mm)	$D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /s) (klase izloženosti prema [11])
PCa		25,55	23,55 (-)
NZ10a		18,33	12,27 (-)
NZ20a		12,46	5,36 (XD1, XS1 XD2, XS2)
FA10a		11,21	5,87 (XD1, XS1 XD2, XS2)
FA20a		8,23	3,54 (XD3, XS3)

Tabela VI-36. III faza – Prosečna dubina prodora hlorida x_d (mm) i nestacionarni koeficijent migracije hlorida $D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m²/s) za maltere spravljene sa $w/cm=0,4$, kao i klase izloženosti hloridima

Oznaka maltera	Poprečni presek uzorka	x_d (mm)	$D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m ² /s) (klase izloženosti prema [11])
PCb		14.97	9,90 (XD1, XS1 XD2, XS2)
NZ10b		11.32	4,95 (XD3, XS3)
NZ20b		7.53	3,11 (XD3, XS3)
FA10b		7.03	2,87 (XD3, XS3)
FA20b		5,10	1,54 (XD3, XS3)

10.1.6. Otpornost na dejstvo sulfata

Ispitivanje otpornosti maltera na dejstvo sulfata urađeno je u skladu sa procedurom koja je definisana standardom ASTM C 1012 [7]. Kako bi počelo izlaganja epruveta sulfatnom rastvoru bilo je neophodno da im čvrstoća pri pritisku (f_m) dostigne vrednost od 20 MPa, odnosno 21 MPa s obzirom na dimenzije ispitanih uzoraka ($k=0,95$). Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku „kocki“ ivice 40 mm (prizme dimenzija 40mm×40mm×160mm, koje su ispitane na po dva mesta) su prikazani u Tabeli VI-37.

Tabela VI-37. III faza – Dostizanje čvrstoće pri pritisku maltera od 21 MPa kako bi otpočelo izlaganje epruveta sulfatnom rastvoru

Vrsta maltera	Čvrstoća pri pritisku, f_m (MPa)			
	$f_{m,24h^*}$	$f_{m,48h}$	$f_{m,72h}$	$f_{m,96}$
PCa	18,44	19,38	20,00	(23,13 i 23,44) 23,28
NZ10a	(21,56 i 21,25) 21,41	-	-	-
NZ20a	15,31	19,38	(21,25 i 20,94) 21,09	-
FA10a	(28,75 i 28,44) 28,60	-	-	-
FA20a	(20,94 i 21,25) 21,10	-	-	-
PCb	8,13	(32,50 i 31,25) 31,88	-	-
NZ10b	(33,13 i 32,81) 32,94	-	-	-
NZ20b	(27,50 i 27,19) 27,34	-	-	-
FA10b	(24,38 i 24,06) 24,22	-	-	-
FA20b	(28,75 i 28,44) 28,60	-	-	-

* vreme koje je proteklo od spravljanja maltera

Nakon dostizanja čvrstoće od 21 MPa, urađeno je početno merenje promene dužine epruveta, nakon čega su izložene dejstvu sulfatnog rastvora. Rezultati promene dužine po epruvetama su prikazani u Prilogu 12, a srednje vrednosti ekspanzije za svaku ispitanu vrstu maltera u procentima, za mernu bazu od 250 mm, su date u Tabeli VI-38. Da bi rezultati bili validni potrebno je da pri svakom merenju od šest epruveta bar tri budu dostupne (u ispravnom stanju).

Tabela VI-38. III faza – Srednje vrednosti ekspanzije maltera usled dejstva sulfata

Srednje vrednosti ekspanzije maltera iz III faze ispitivanja usled dejstva sulfata (%)											
Vrsta maltera	Vreme koje je proteklo od početka izlaganja epruveta dejstvu sulfatnog rastvora (dani)										
	0	7	14	21	28	56	91	105	120	150	180
PCa	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,09
NZ10a	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
NZ20a	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FA10a	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
FA20a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
PCb	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
NZ10b	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
NZ20b	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
FA10b	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
FA20b	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01

Da bi rezultati bili validni potrebno je da pri svakom merenju od šest epruveta bar tri budu dostupne (u ispravnom stanju). Broj epruveta na kojima je urađeno nulto merenje se zadržao tokom svih šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora. Po isteku navedenih šest meseci, urađena je i vizuelna kontrola stanja uzoraka, a fotografije epruveta sa komentarima su prikazane u tabelama VI-39 i VI-40.

Tabela VI-39. III faza – Stanje epruveta ($w/cm=0,5$) nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfata

Oznaka maltera (i broj epruveta)	Izgled epruveta	Stanje epruveta
PCa (6)		<p>Veći broj tamnih mrlja. Mestimično se javlja krunjenje, ljuškanje, ogoljavanje i/ili ispadanje zrna agregata duž ivica, kao i prslina (širine $\leq 0,1$ mm) po gornjoj površini uzorka, paralelno sa dužim ivicama i u zoni krajeva.</p> <p>Kod svih uzoraka je registrovano značajnije oštećenje (krunjenje, intezivnije ispadanje zrna agregata) bar jednog kraja epruvete, u suprotnom su oba kraja srednje oštećena (ogoljavanje i ispadanje zrna agregata u manjoj količini).</p>
NZ10a (4)		<p>Veći broj tamnih mrlja. Mestimična pojava prslina uz ivice sa gornje strane uzorka.</p> <p>1 – krunjenje pojava prslina (širine $\leq 0,1$ mm) u zoni levog kraja sa gornje strane uzorka, kao i mestimično duž gornjih ivica.</p> <p>2 – manje krunjenje desnog kraja uzorka sa gornje i donje strane, mestimična pojava prslina (širine $\leq 0,1$ mm) duž gornjih ivica uzorka.</p> <p>3 – srednje oštećena (ogoljavanje i ispadanje zrna agregata u manjoj količini) levog kraja uzorka sa gornje strane i pojava prslina (širine $\leq 0,1$ mm) po 1/3 gornje površine uzorka sa iste strane, oba kraja sa gornje strane, manje krunjenje u zoni desnog kraja uzorka sa gornje strane sa pojavom prslina (širine $\leq 0,1$ mm).</p> <p>4 – srednje oštećena (ogoljavanje i ispadanje zrna agregata u manjoj količini) levog kraja, i manje oštećenje desnog kraja uzorka sa donje strane uz mestimičnu pojavu prslina duž svih ivica uzorka sa gornje strane.</p>
NZ20a (5)		<p>Veći broj tamnih mrlja.</p> <p>2 – prslina (širine $\leq 0,1$ mm) uz levi kraj, sa gornje strane uzorka.</p> <p>6 – mestimična pojava prslina (širine $\leq 0,1$ mm) sa gornje strane uzorka uz donju ivicu.</p>
FA10a (5)		<p>Srednji broj tamnih mrlja. Krunjenje krajeva manjeg intenziteta.</p> <p>Mestimična pojava prslina (širine $\leq 0,1$ mm) uz ivice sa gornje strane uzorka.</p>
FA20a (6)		<p>Srednji broj tamnih mrlja (sitnije su nego kod drugih maltera).</p>

Tabela VI-40. III faza – Stanje epruveta ($w/cm=0,4$) nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfata

Oznaka maltera (i broj epruveta)	Izgled epruveta	Stanje epruveta
PCb (5)		Krunjenje krajeva epruveta manjeg intenziteta, a mestimično i ivica sa gornje strane uzoraka. Veći broj tamnih mrlja.
NZ10b (6)		Srednji broj tamnih mrlja. 1 i 2 – sitno skidanje skrame po celoj površini uzorka. 3 – mestimično skidanje skrame uz ivice sa gornje strane, a na dva mesta je evidentirano i krunjenje. Skidanje skrame je primetno i po površini gornje strane uzorka u blizini levog kraja. 6 – mestimično skidanje skrame sa gornje strane uzorka uz ivice.
NZ20b (6)		Manji broj tamnih mrlja. Sitno skidanje skrame po celoj površini uzoraka.
FA10b (6)		Manji broj tamnih mrlja. 1 – na gornjoj strani uz gornju ivicu jedno veće i jedno manje oštećenje. 2 – mrlja sa bočne strane. 3 – sa donje strane mestimično rasporedene sitne prsline. 4 – veća mrlja sa bočne strane, krajevi sitnije oštećeni. 5 – mestimično skidanje skrame uz donju ivicu sa gornje strane, veća mrlja sa donje strane. 6 – veća mrlja sa donje strane.
FA20b (4)		Mestimično skidanje skrame u obliku malih okruglih fleka.

10.1.7. Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda

Merenje prionljivosti maltera za betonsku podlogu urađeno je prema standardu EN 1542 [157]. U okviru Priloga 13 su prikazani izgledi pečata, dat je opis loma, određen je tip loma, a prikazana je i vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju – f_h (MPa) po pečatima, za svaku vrstu maltera iz III faze ispitivanja.

Na osnovu pojedinačnih rezultata ispitivanja određen je tip dominantnog loma za svaku vrstu ispitanih maltera, a sračunate su i srednje vrednosti čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom. Navedeni rezultati, kao i reprezentni pečati, prikazani su u tabeli VI-41.

U skladu sa standardom EN 1542 [157], korišćene su sledeće oznake za različite tipove lomova u sistemu betonska podloga-malter-lepak-pečat:











- A – kohezivni lom u referentnoj betonskoj podlozi ($\geq 70\%$);
- A/B – athezivni lom po kontaktu betonske podloge i maltera ($\geq 70\%$);
- B – kohezivni lom u malteru ($\geq 60\%$);
- B/Y – athezivni lom po kontaktu maltera i lepka ($\geq 70\%$);
- Y – kohezivni lom u lepku ($\geq 70\%$);
- Y/Z – athezivni lom po kontaktu lepka i pečata ($\geq 70\%$).

Dodatno su uvedene i sledeće oznake podvrsta loma:

- B* – kohezivni lom u malteru, ali prvenstveno u njegovom površinskom sloju odnosno skrami ($\geq 60\%$), spada u lom tipa B;
- B/Y*(B) – athezivni lom po kontaktu maltera i lepka $\geq 5\%$, stim da je lom po malteru+skrami $\geq 70\%$, spada u lom tipa B/Y. Na dijagramima je označen kao B/Y**;
- B/Y* – athezivni lom po kontaktu maltera i lepka $\geq 5\%$ i $< 70\%$, stim da je lom po malteru+skrami $< 70\%$, spada u lom tipa B/Y.
- Y/Z* – athezivni lom po kontaktu lepka i pečata $\geq 5\%$ i $< 70\%$, spada u lom tipa Y/Z.

Da bi se rezultati ispitivanja „pull-off“ metodom smatrali relevantnim, potrebno je da od pet pečata po uzorku bar tri imaju normalan tip loma u skladu sa standardom EN 1542 [157], odnosno, ako se zahtevaju po dva uzorka po mešavini maltera da minimum šest od deset pečata ima normalan tip loma. Nakon ispitivanja, određuje se dominantan tip loma i u skladu sa njim se određuje srednja vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera (uzimaju se u obzir samo pečati koji imaju isti dominantni tip loma). U okviru komparativnih analiza moguće je direktno porediti samo rezultate sa istim tipom dominantnog loma.

Tabela VI-41. III faza – „Pull-off“ metoda – Srednja vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom

Vrsta maltera	Ugledni pečati	Dominantni lom	$f_{h,sr}$ (MPa)	Napomena
PCaPO		B	4,34	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ10aPO		B	4,60	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ20aPO		B	4,74	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA10aPO		B	5,27	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA20aPO		B	4,71	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
PCbPO		B	4,95	3 pečata sa dominantnim lomom tipa B, a 2 su odbačena
NZ10bPO		B	5,68	4 pečata sa dominantnim lomom tipa B, a 1 je odbačen
NZ20bPO		B	5,23	4 pečata sa dominantnim lomom tipa B, a 1 je odbačen
FA10bPO		B	5,55	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA20bME		B	4,88	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B

10.1.8. Ograničeno skupljanje

Merenje ograničenog skupljanja maltera nanesenog na betonsku podlogu urađeno je u skladu sa standardom EN 12617-4 [20].

Nakon 28 dana propisane nege uzoraka (tabela VI-12), kao i nakon dodatnih 56 dana skladištenja, urađene su vizuelne provere stanja test-površina, a njihov izgled je prikazan u Prilogu 14 (tabele P14-1 i P14-2).

U okviru Priloga 14 su prikazani izgledi pečata, dat je opis loma, određen je tip loma, a prikazana je i vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju – f_h (MPa) po pečatima, za svaku vrstu maltera iz III faze ispitivanja.

Na osnovu pojedinačnih rezultata ispitivanja određen je tip dominantnog loma za svaku vrstu ispitanih maltera, a sračunate su i srednje vrednosti čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom. Prethodno navedeni rezultati, kao i ugledni pečati, prikazani su u tabeli VI-42.

Tabela VI-42. III faza – Ograničeno skupljanje – Srednja vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom

Vrsta maltera	Ugledni pečati	Dominantni lom	$f_{h,sr}$ (MPa)	Napomena
PCaOS		B	4,70	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ10aOS		B	4,79	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ20aOS		B	4,41	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA10aOS		B	4,67	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA20aOS		B	4,50	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
PCbOS		B	5,42	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ10bOS		B	5,04	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ20bOS		B	5,01	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA10bOS		B	5,22	10 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA20bOS		B	5,47	9 pečata sa dominantnim lomom tipa B, a 1 je odbačen

10.1.9. Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje

Metoda kojom je određen efekat toplotnog šoka usled zamrzavanja i odmrzavanja, sa potapanjem izložene površine u zasićen rastvor soli za odmrzavanje, maltera iz III faze ispitivanja ugrađenih na betonske podloge, propisana je standardom EN 13687-1 [21].

U Prilogu 15 u tabelama od P15-1 do P15-6, prikazan je izgled površine uzoraka nakon svakih 10 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, sa opisom stanja test-površina, dok su u tabelama P15-7 do P15-21 prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera etalonskih i test-uzoraka, kao i slike svih ispitanih pečata, a dat je i opis i tip dominantnog loma po pečatima.

Na osnovu prethodno navedenih rezultata ispitivanja sračunate su srednje vrednosti čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom, a dobijene vrednosti za etalonske i test-uzorke su prikazane u tabelama VI-43 i VI-44, respektivno.

Tabela VI-43. III faza – Etalonski uzorci – Srednja vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom














Vrsta maltera	Ugledni pečat	Dominantni lom	$f_{h,sr}$ (MPa)	Napomena
PCaME		B	4,78	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B (4B+1B*)
NZ10aME		B	4,97	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ20aME		B	4,50	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA10aME		B	4,88	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
FA20aME		B	4,17	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B (5B*)
PCbME		B	4,85	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B (5B*)
NZ10bME		B	5,62	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B
NZ20bME		B	4,55	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B (4B*+1B)
FA10bME		B	5,57	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B (5B*)
FA20bME		B/Y	4,39	5 pečata sa dominantnim lomom tipa B/Y

Tabela VI-44. III faza – Test - uzorci – Srednja vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za određen dominantni lom

Vrste maltera	Ugledni pečat	Dominantni lom	$f_{h,sr}$ (MPa)	Napomena
PCaM		B	4,28	8 pečata sa lomom tipa B, a 2 su odbačena
NZ10aM		B	3,71	6 pečata sa lomom tipa B, a 4 su odbačena
NZ20aM		B	5,18	6 pečata sa lomom tipa B, a 4 su odbačena
FA10aM		B	4,79	Svih 10 pečata imaju dominantni lom tipa B
FA20aM		B	4,41	6 pečata sa lomom tipa B, a 4 su odbačena
PCbM		B	4,55	7 pečata sa lomom tipa B, a 3 su odbačena
NZ10bM		B/Y	3,73	Svih 10 pečata imaju dominantni lom tipa B/Y
NZ20bM		B/Y	5,21	10 pečata sa lomom tipa B/Y (7 B/Y, +2 B/Y*(B) +1 B/Y*)
FA10bM		B/Y	4,42	8 pečata sa lomom tipa B/Y* (B), a 2 su odbačena
FA20bM		B/Y	5,42	9 pečata sa lomom tipa B/Y (8 B/Y* +1 B/Y) i 1 je odbačen

10.2. Određivanje faznog sastava očvrsljih pasta

10.2.1. Mineraloški sastav – XRD analiza

Rezultati mineraloškog sastava pasta koje sadrže NZ, odnosno FA kao SCM, su prikazani u okviru Poglavlja VII-1.1.3. (slika VII-39) i VII-1.2.3. (slika VII-44), respektivno, radi njihove bolje preglednosti, praćenja i tumačenja.

10.2.2. Strukturne promene – FTIR spektroskopija

Rezultati ispitivanja strukturnih promena pasta su prikazani u okviru Poglavlja VII-1.1.4. (slika VII-40) i VII-1.2.4. (slika VII-45), respektivno, radi njihove bolje preglednosti, praćenja i tumačenja.

VII
ANALIZA I DISKUSIJA
REZULTATA

1. I FAZA ISTRAŽIVANJA

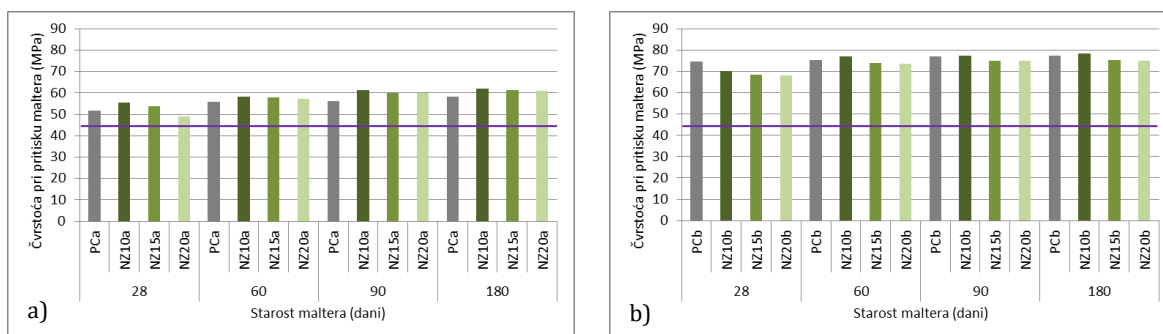
1.1. Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera i pasta spravljenih sa 0%, 10%, 15% i 20% NZ kao SCM – I faza

1.1.1. Čvrstoća pri pritisku maltera NZa i NZb

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u Prilogu 7 i srednjih vrednosti čvrstoće pri pritisku maltera datih u poglavlju VI-10.1.1., na slici VII-36 prikazane su srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku maltera koji sadrže NZ kao SCM spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika VII-36a) i 0,4 (slika VII-36b) pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana.

S obzirom na dobijene rezultate pri starosti od 28 dana, malteri spravljeni sa NZ kao SCM su ispunili uslov da im je $R_{c,28} \geq 45$ MPa, te prema standardu EN 1504-3 [23] pripadaju klasi R4 konstrukcijskih maltera sa aspekta čvrstoće pri pritisku ispitane u skladu sa standardom EN 12190 [17].

Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-36, jasno se može uočiti da su dobijene veće čvrstoće pri pritisku kod cementno-zeolitnih maltera spravljenih sa manjim vodovezivnim faktorom. Opseg čvrstoća prethodno navedenih maltera, ispitanih pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana i spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, iznosi: 48,96-55,52 MPa, 55,78-58,33 MPa, 56,15-61,46 MPa i 58,13-62,08 MPa, respektivno. Za iste starosti cementno-zeolitnih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4 opseg čvrstoća iznosi: 68,07-74,74 MPa, 73,59-75,21 MPa, 74,84-77,45 MPa i 74,95-78,28 MPa, respektivno.

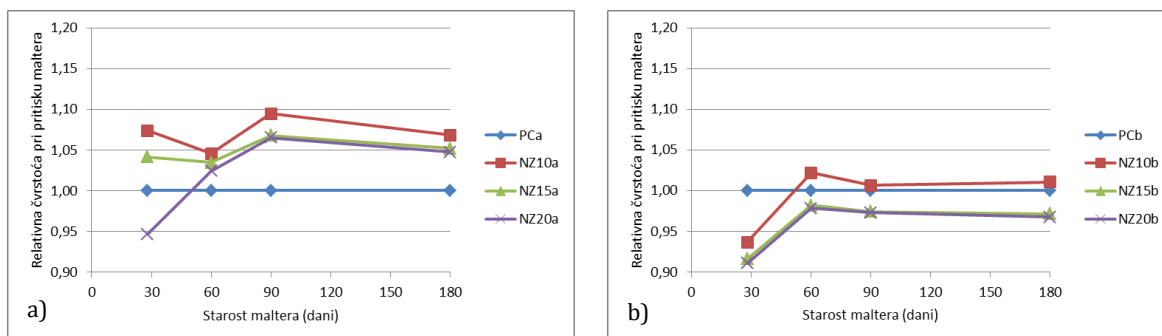


Slika VII-36. I faza – Čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa:
a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Relativne čvrstoće pri pritisku cementno-zeolitnih maltera su prikazane na slici VII-37.

U slučaju cementno-zeolitnih maltera spravljenih sa većim vodovezivnim faktorom (slika VII-37a) jedino je malter sa 20% NZ imao manju čvrstoću pri pritisku u odnosu

na referentnu vrednost (za 5,34%) i to isključivo pri starosti od 28 dana. Pri istoj starosti malteri NZ10a i NZ15a su imali veće čvrstoće u odnosu na referentnu za 7,35% i 4,13%, respektivno. Nakon 60 dana nege, kao i nakon 90 i 180 dana, cementno-zeolitni malteri su imali veće relativne čvrstoće u odnosu na referentne vrednosti, i to prvenstveno malter NZ10a (za 4,58%, 9,46% i 6,81%, respektivno), a potom podjednako malteri NZ15a i NZ20a (za 3,45% i 2,43%, za 6,77% i 6,49%, kao i za 5,20% i 4,75%, respektivno).



Slika VII-37. I faza – Relativna čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljanih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

U slučaju maltera spravljanih sa manjim vodovezivnim faktorom (slika VII-37b) jedino su pri starosti od 28 dana svi cementno-zeolitni malteri imali manje relativne čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentnu vrednost i to za 6,34% (NZ10b), 8,36% (NZ15b), i 8,92% (NZ20b). Nakon 60, 90 i 180 dana nege, malter NZ10b je imao za 2,22%, 0,68% i 1,08%, respektivno, veće čvrstoće u odnosu na referentne vrednosti, dok su malteri NZ15b i NZ20b i dalje imali manje čvrstoće u odnosu na referentne vrednosti (NZ15b za 1,80%, 2,57% i 2,83%, a NZ20b za 2,15%, 2,71% i 3,23%, respektivno).

U slučaju maltera spravljanih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, najveće pozitivne razlike u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti relativne čvrstoće pri pritisku dostižu se pri starosti od 90 dana.

U slučaju maltera spravljanih sa vodovezivnim faktorom 0,4, jedino relativne čvrstoće maltera NZ10b premašuju odgovarajuće referentne vrednosti pri starosti od 60 dana, dok su relativne čvrstoće maltera NZ15a i NZ20a u ispitivanom periodu uvek niže u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti.

Zaključci:

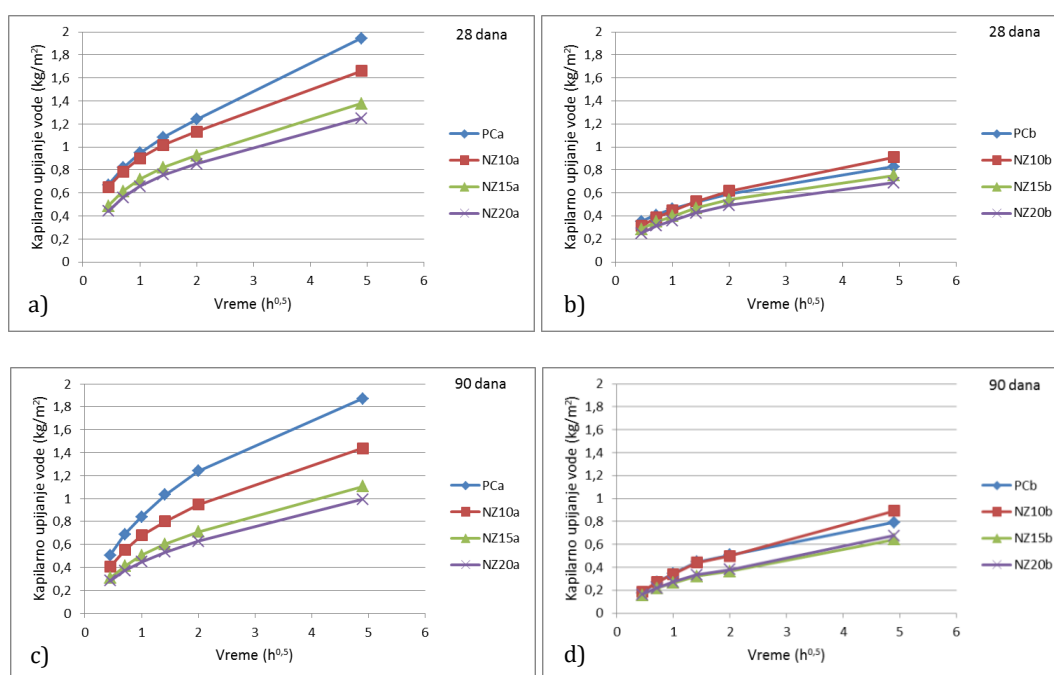
Na osnovu prikazanih rezultata, može da se zaključi da na čvrstoću pri pritisku maltera koji sadrže NZ kao SCM prvenstveno utiče vodovezivni faktor, a potom starost maltera u trenutnu ispitivanja (između 28 do 180). Pri istom nivou

supstitucije PC sa NZ, malteri spravljeni sa manjim vodovezivnim faktorom (0,4) imaju veće čvrstoće pri pritisku u odnosu na maltere spravljene sa većim vodovezivnim faktorom (0,5).

S obzirom da pri ispitanim starostima, relativne čvrstoće pri pritisku cementno-zeolitnih maltera spravljenih i sa vodovezivnim faktorom 0,5 i sa 0,4, se nisu razlikovale za više od 10% u odnosu na korespodentne referentne vrednosti, zaključuje se da su relativne čvrstoće pri pritisku ostale u rangi referentnih, bez obzira na nivo supstitucije PC sa NZ i primenjeni vodovezivni faktor.

1.1.2. Kapilarno upijanje vode maltera NZa i NZb

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 8, kao i rezultata ispitivanja datih u poglavlju VI-10.1.2. na slici VII-38 predstavljena je kinetika kapilarnog upijanja vode maltera sa NZ kao SCM-a kao i referentnog cementnog maltera, spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 i 0,4, starih 28 i 90 dana.



Slika VII-38. I faza – Kinetika kapilarnog upijanja vode maltera iz I faze ispitivanja: a) Malteri sa NZ starosti 28 dana, $w/cm=0,5$ b) Malteri sa NZ starosti 28 dana, $w/cm=0,4$ c) Malteri sa NZ starosti 90 dana, $w/cm=0,5$ d) Malteri sa NZ starosti 90 dana, $w/cm=0,4$

Na osnovu prikazanih dijagrama (slika VII-38) kapilarnog upijanja vode može se zaključiti da na kinetiku upijanja najviše utiče vodovezivni faktor, a potom i nivo supstitucije PC sa NZ, kao i starost maltera u trenutku ispitivanja.

Sa smanjenjem vodovezivnog faktora sa 0,5 na 0,4 dolazi do značajnog smanjenja kapilarnog upijanja vode, prvenstveno kod referentnog cementnog maltera, a potom i

kod maltera koji sadrže NZ, a sami dijagrami imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja (slika VII-38).

U slučaju maltera koji su spravljani sa vodovezivnim faktorom 0,5, sa povećanjem udela NZ i starosti maltera smanjuje se kapilarno upijanje vode. Na osnovu prikazanih dijagrama (slike VII-38a i VII-38c, respektivno) evidentno je da referentni PCa malter ima najveće kapilarno upijanje vode i pri starosti od 28 i od 90 dana.

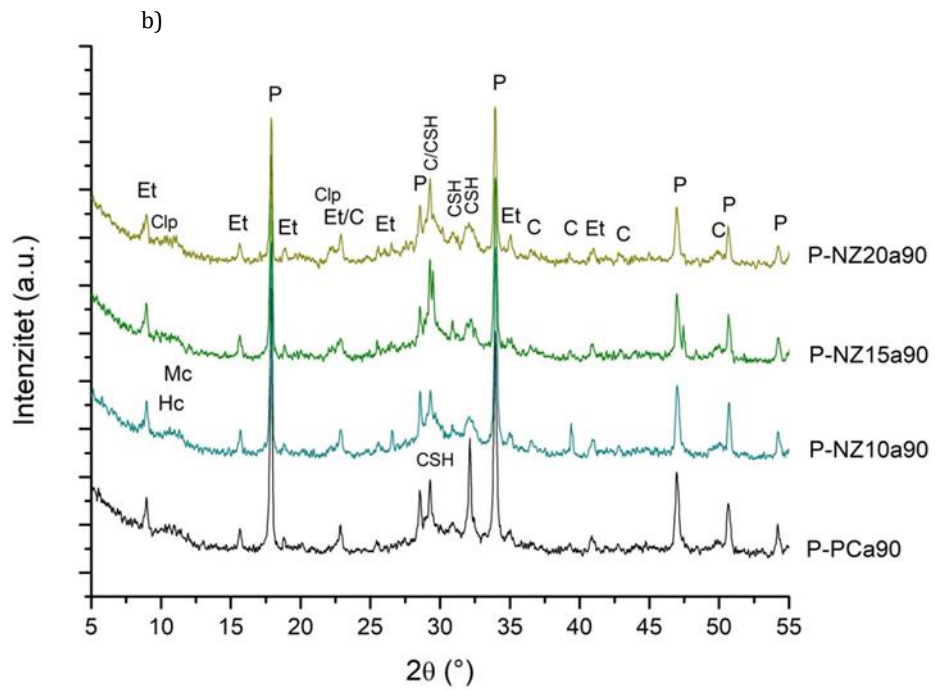
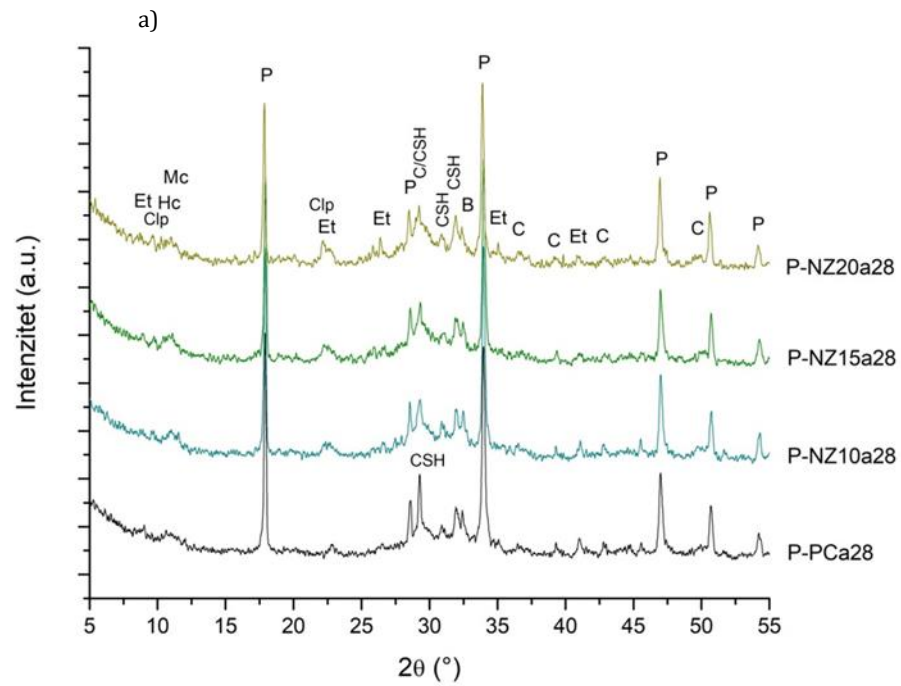
U slučaju maltera koji su spravljani sa vodovezivnim faktorom 0,4, malter NZ10b ima najveće kapilarno upijanje vode i pri starosti od 28 i od 90 dana (slike VII-38b i VII-38d, respektivno). Nakon 28 dana, sa povećanjem udela NZ sa 10% na 15% i 20% smanjuje se kapilarno upijanje vode u odnosu na maltere NZ10b i PCb, dok je redosled smanjenja kapilarnog upijanja vode maltera nakon 90 dana hidratacije sledeći: NZ10b > PCb > NZ20b > NZ15b.

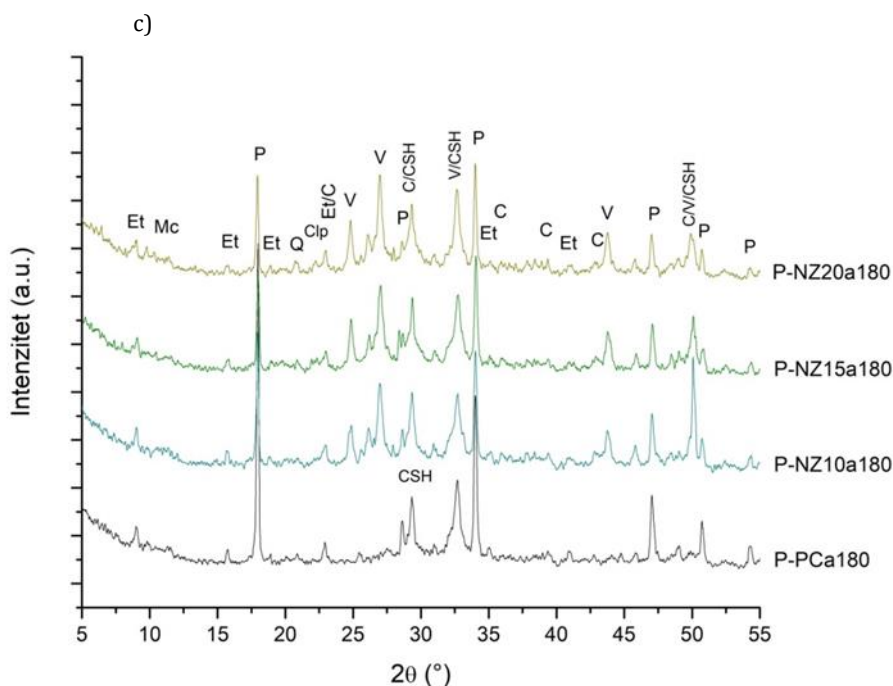
S obzirom da je standardom EN 13057 [45] propisano da se ispitivanje kapilarnog upijanja vode radi na uzorcima starim 28 dana, ti rezultati su detaljnije analizirani. Srednja vrednost kapilarnog upijanja referentnog maltera PCa starog 28 dana iznosi $1,944 \text{ kg/m}^2$, za NZa je u opsegu od $1,251 - 1,661 \text{ kg/m}^2$, dok je srednja vrednost kapilarnog upijanja referentnog maltera PCb starog 28 dana $0,830 \text{ kg/m}^2$, a za NZb je u opsegu od $0,689 - 0,911 \text{ kg/m}^2$.

Na osnovu koeficijenata kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana, prikazanih u tabeli VI-24, svi malteri iz I faze ispitivanja koji sadrže NZ kao SCM ispunjavaju kriterijum za klasu R4 konstrukcijskog reparaturnog maltera, s obzirom da su im koeficijenti kapilarnog upijanja vode pri starosti od 28 dana $\leq 0,5 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-0,5}$. Navedeni uslov su ispunili i isti malteri pri starosti od 90 dana (tabela VI-25).

1.1.3. Mineraloški sastav pasta P-NZa određen metodom rendgenske difrakcije (XRD)

Mineraloški sastav pasta starosti 28, 90 i 180 dana, koje sadrže 0%, 10%, 15% i 20% NZ-a kao SCM, prikazan je na slici VII-39 u vidu rendgenskih difraktograma. Kao što je dobro poznato, proizvodi hidratacije i pucolanske reakcije veziva kod kojeg je deo cementa zamenjen sa NZ su u suštini slični produktima hidratacije „čistog“ cementa. Na osnovu rezultata XRD analize (slika VII-39) jasno se može uočiti da su produkti hidratacije i pucolanske reakcije zajednički za sve cementno-zeolitne paste, a to su C-S-H gel, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u kristalnom obliku - portlandit, etringit i monokarbonat.





Slika VII-39. XRD podaci referentne paste i pasta koje sadrže NZ kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana (P - portlandit, Et - etringit, C-S-H - kalcijum-siliko-hidrat, Clp - klinoptilolit, Q - kvarc, C - kalcit, B - belit, V - vaterit, Mc - kalcijum monokarbonat, Hc - kalcijum hemikarbonat)

Kod cementno-zeolitnih pasta starosti 28 dana (slika VII-39a) nije došlo do smanjenja pikova koji upućuju na prisustvo portlandita u odnosu na iste kod referentne paste. Takođe, klinoptilolit nije skroz izreagovao, jer su zabeležena oba njegova pika što dodatno ukazuje na odloženu pucolansku reakciju. Potvrđeno je i prisustvo oba karbonata (kalcijum monokarbonata i kalcijum hemikarbonata).

Nakon 90 dana (slika VII-39b), intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu, u slučaju pasta koje sadrže 10% NZ, su u rangu sa istima kod referentne paste, dok se uočava njihovo smanjenje u slučaju pasti koje sadrže 15% i 20% NZ. Tek nakon 180 dana se može primetiti značajnije smanjenje sadržaja portlandita kod cementno-zeolitnih pasti, koje je približno isto za sve nivoe zamene PC sa NZ, u poređenju sa istim kod referentnog uzorka. Kod referentne paste i paste koja sadrži 10% NZ, pri starosti od 90 dana, potvrđeno je prisustvo i kalcijum monokarbonata i kalcijum hemikarbonata, dok je kod svih pasta starih 180 dana potvrđeno prisustvo samo kalcijum monokarbonata.

Kod pasta sa NZ je veoma izražena karbonatizacija, a kao njen produkt detektovan je vaterit pri starosti od 180 dana (slika VII-39c), i kalcit pri svim starostima, kao i dolomit u tragovima.

Glavni pik C-S-H gela (2θ : 29,36) je prisutan za sve ispitane starosti pasta. Uži pik i veća kristaličnost ukazuju da je manja verovatnoća da se formirao C-A-S-H gel. Na ovo upućuje i hemijski sastav NZ-a (sadržaj Al_2O_3 oksida je 12,415%, tabela VI-6, a kod FA 21,324%, tabela VI-7).

Povećanje relativnog udela etringita je uočljivo kod pasta starih 90 dana, slika VII-39b), u odnosu na količinu stvorenog etringita nakon 28 i 180 dana hidratacije, slike VII-39a i VII-39c, respektivno, kako u referentnom uzorku, tako i u pastama sa NZ. Povećanje učešća NZ u pastama ne utiče na količinu formiranog etringita za paste starosti 28 i 180 dana. Pri starosti od 90 dana pasta P-NZ10a ima nešto veću količinu etringita u odnosu na ostale paste koje sadrže NZ kao SCM.

1.1.4. Strukturne promene pasta P-NZa određene metodom infracrvene spektriskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR)

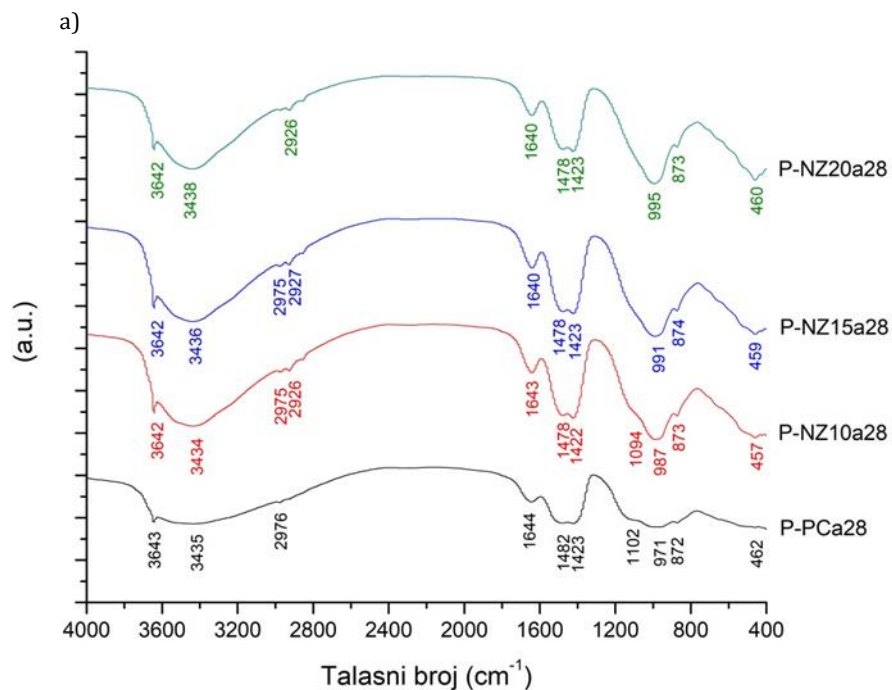
Primenom FTIR spektroskopije određene su strukturne promene pasta starosti 28, 90 i 180 dana kod kojih je cement supstituisan sa 0%, 10%, 15% i 20% NZ. Pošto je struktura C-S-H gela (glavni produkt hidratacije cementa koji određuje čvrstoću i trajnost proizvoda na bazi cementa) uglavnom amorfnu ili slabo kristalnu, teško se može analizirati putem XRD analize, stoga se zajedno sa XRD analizom koristi i FTIR. Generalno, FTIR spektroskopija se može koristiti za karakterizaciju kristalnih i amorfne strukture, jer funkcionalne grupe u jedinjenjima absorbuju različite talasne dužine u zavisnosti od vrste atoma koji čine funkcionalnu grupu, kao i od njihove geometrije i okruženja.

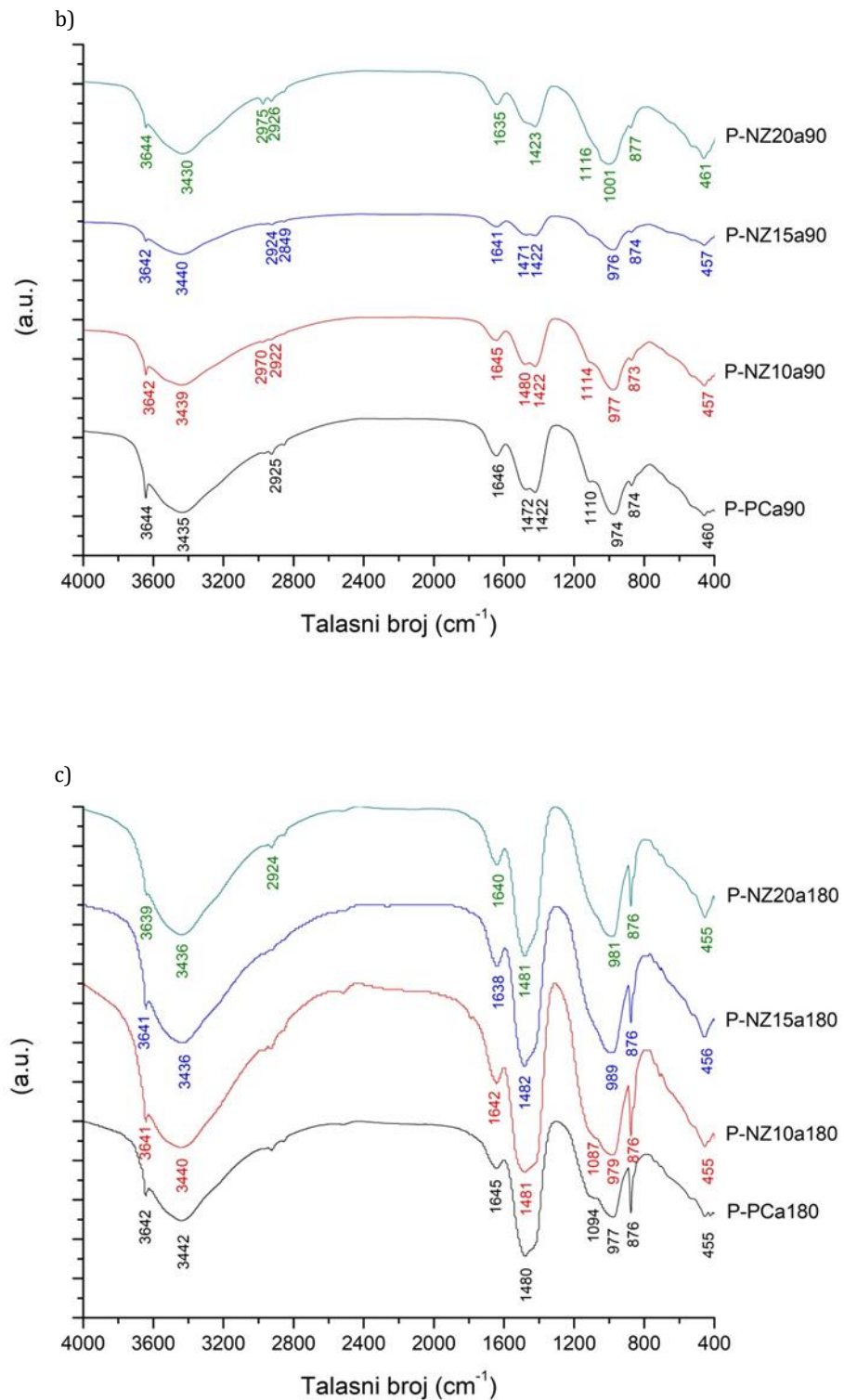
Na osnovu dobijenih FTIR dijagrama prikazanih na slici VII-40, može se uočiti pojava apsorpcionih traka na $\sim 3642\text{ cm}^{-1}$, $\sim 3435\text{ cm}^{-1}$ i $\sim 1643\text{ cm}^{-1}$ koje se pripisuju postojanju vibracija različitih oblika O-H molekulske grupe. Naime, apsorpcione trake na $\sim 3642\text{ cm}^{-1}$ [64] upućuju na prisustvo istežućih vibracija Ca-OH iz portlandita, dok se apsorpciona traka na $\sim 3435\text{ cm}^{-1}$ dovode u vezu sa ν_1 istežućim vibracijama molekula H_2O ($\sim 3430\text{ cm}^{-1}$ [103]), a traka na $\sim 1643\text{ cm}^{-1}$ sa ν_2 savijajućim vibracijama molekula H_2O ($\sim 1642\text{ cm}^{-1}$ [103]).

Pojava apsorpcione trake na $\sim 1422\text{--}1482\text{ cm}^{-1}$ (ν_3 – asimetrično istežanje CO_3^{2-} grupe [91]), kao i na $\sim 873\text{ cm}^{-1}$ (ν_2 – savijajuće vibracije van ravni CO_3^{2-} grupe [91]) dovodi se u vezu sa prisustvom karbonata u strukturi ispitanih uzoraka (873 cm^{-1} kalcit, C-O savijajuće vibracije kod karbonata [35], 876 cm^{-1} kalcit [128]).

Postojanje apsorpcione trake na $\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ može se pripisati prisustvu SO_4^{2-} molekulske vibracije koja može da ukaže na postojanje faze etringita ili gipsa [137].

Postojanje apsorpcione O-H trake na $\sim 3435 \text{ cm}^{-1}$ koja se prepisuje vodoničnoj vezi OH grupe i dovodi se u vezu sa prisustvom vode u strukturi etringita, dodatno potvrđuje činjenicu da je etringit prisutan. Prisustvo produkata hidratacije kao što je C-S-H gel može da se poveže sa apsorpcionom trakom na $\sim 971 \text{ cm}^{-1}$ zbog postojanja Si-O asimetričnih istežućih vibracije Q^2 tetraedara SiO_2 . Dodatno, apsorpciona traka na $\sim 450\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$, u kojoj je utvrđeno prisustvo deformacionih vibracija SiO_4 tetraedra, može se takođe prepisati prisustvu C-S-H faze [188][137]. Traka na 462 cm^{-1} koja se prepisuje deformacionim vibracijama SiO_4 tetraedra [111][137].





Slika VII-40. FTIR spektri referentne paste i pasta koje sadrže NZ kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana

Upoređujući FTIR spektre referentne paste i pasta koje sadrže različitu količinu NZ u sva tri slučaja (nakon 28, 90 i 180 dana hidratacije), primećene su značajne promene koje bi mogle da ukažu na izvesne izmene u strukturi ispitanih pasta. Sa povećanjem udela NZ kao i starosti ispitanog uzorka, postoji razlika u vezi sa pomeranjem apsorpcione trake na 971 cm^{-1} koja se odnosi na postojanje Si-O istežućih vibracija Q^2 tetraedra u C-S-H gelu, tabela VII-45.

Tabela VII-45. I faza – Pomeranje apsorpcione trake na 971 cm^{-1} koja se dovodi u vezu sa C-S-H gelom u referentnoj i pastama sa NZ tokom vremena

Vrsta maltera	Talasni brojevi (cm^{-1})		
	28 dana	90 dana	180 dana
P-PCa	971	974	977
P-NZ10a	987	977	979
P-NZ10a	991	976	989
P-NZ20a	995	1001	981

Nakon 28 dana hidratacije može se uočiti pomeranje traka kod P-NZ10a, P-NZ15a i P-NZ20a (987 cm^{-1} , 991 cm^{-1} i 995 cm^{-1} , respektivno) ka višim vrednostima talasnih brojeva u odnosu na referentnu pastu P-PCa (971 cm^{-1}) što se može pripisati povećanju stepena polimerizacije C-S-H strukture, slika VII-40a. Takođe, sa povećanjem udela NZ, koji sadrži znatnu količinu silicijum oksida (65,151%), opaža se pomeranje talasnih brojeva uzorka P-NZ10a, P-NZ15a i P-NZ20a ka većim vrednostima. Ova pojava ukazuje da povećanje udela NZ utiče na formiranje C-S-H gela sa većim stepenom polimerizacije, tj. sa manjom vrednošću odnosa Ca/Si u poređenju sa vrednošću apsorpcionog pika referentne paste. Do najvećeg pomeranja pozicije pomenute Si-O apsorpcione trake došlo je kod uzorka P-NZ20a, sugerišući da razlaganje zeolita utiče na sastav C-S-H faze tokom proces hidratacije.

Nakon 90 dana hidratacije drugačija je situacija u pogledu položaja apsorpcione trake koja se odnosi na postojanje Si-O istežućih vibracija Q^2 tetraedara. Naime, u slučaju P-NZ20a (1001 cm^{-1}) došlo je do većeg pomeranja apsorpcione trake u odnosu na vrednost pri starosti od 28 dana, dok je kod P-NZ10a i P-NZ15a (977 cm^{-1} i 976 cm^{-1} , respektivno) došlo je do mnogo manjeg pomeranja apsorpcione trake prema većim talasnim brojevima, odnosno frekvencije su im slične frekvenciji referentnog uzorka, slika VII-40b. Pomeranje u suprotnom pravcu, tj. bliže vrednostima referentne paste, ukazuje da C-S-H gel nakon 90 dana ima veću vrednost Ca/Si ili Al/Si odnosa u poređenju sa istom pastom nakon 28 dana. Promene talasnog broja koji se odnosi na strukturu C-S-H gela sa protokom vremena su potvrđene i u radu Sáez del Bosque sa saradnicima [38].

Vrednosti talasnih brojeva za apsorpcione trake pasta NZ15 (989 cm^{-1}) i NZ 20 (981 cm^{-1}) nakon 180 dana hidratacije ipak ukazuju da C-S-H gel sa povećanjem sadržaja NZ ima veći stepen polimerizacije ili manji odnos Ca/Si nego referentan uzorak, slika VII-40c. Uzrok pomeranja apsorpcione trake karakteristične za C-S-H gel, pri starosti od 180 dana, ka većim vrednostima talasnih brojeva može da bude i visok stepen karbonizacije. On utiče na formiranje amorfnog silikata, što znači veći stepen polimerizacije, odnosno manju vrednos Ca/Si. Na ovaj zaključak upućuje i činjenica da je uočeno značajno povećanje inteziteta apsorpcione trake (876 cm^{-1}) koja upućuje na prisustvo karbonata, tačnije kalcita [128], i kod referentne i kod pasta sa NZ.

Značajno smanjenje intenziteta pikova koji se odnose na klinoptilolit u oblasti 400-1200 cm^{-1} ukazuju na napredovanje procesa hidratacije NZ.

Apsorpcione trake u oblasti 872-877 cm^{-1} odgovaraju ν_2 vibracijama CO_3^{2-} grupe, međutim kod svih pasta sa NZ oni postaju veoma izraženi nakon 180 dana hidratacije, slika VII-40c. Istovremeno asimetrično istezanje CO_3^{2-} grupe iskazano kroz superponiranje dva pika oko 1422 cm^{-1} i pika između 1471-1482 cm^{-1} koji se pripisuju kristalnim strukturama kalcita i vaterita, vidljivo je za hidrataciju nakon 28 dana da bi nakon 180 dana hidratacije postao dominantan samo pik oko 1480 cm^{-1} koji se pripisuje vateritu [92]

Prema autorima Ylmén sa saradnicima [188] kao i autorima Jones i Jackson [92] pikovi na $\sim 2926 \text{ cm}^{-1}$ i $\sim 2975 \text{ cm}^{-1}$, koji su vidljivi kod pasta starosti 28 i 90 dana se pripisuju kalcijum karbonatu. Nakon 90 dana pojavljuje se i mali pik na $\sim 2840 \text{ cm}^{-1}$, dok nakon 180 dana nestaje pik na $\sim 2975 \text{ cm}^{-1}$, a prisutni su pikovi na 2924 cm^{-1} , na $\sim 2830 \text{ cm}^{-1}$, ali i na $\sim 2520 \text{ cm}^{-1}$. Postojanje pika na $\sim 2840 \text{ cm}^{-1}$ i $\sim 2520 \text{ cm}^{-1}$ ukaze na prisustvo dolomita [92] Postojanje vaterita i kalcita je takođe potvrđeno i XRD analizom.

Na osnovu rezultata FTIR analize može se zaključiti da uvođenje NZ kao SCM utiče na sastav i strukturu C-S-H faze tokom process hidratacije.

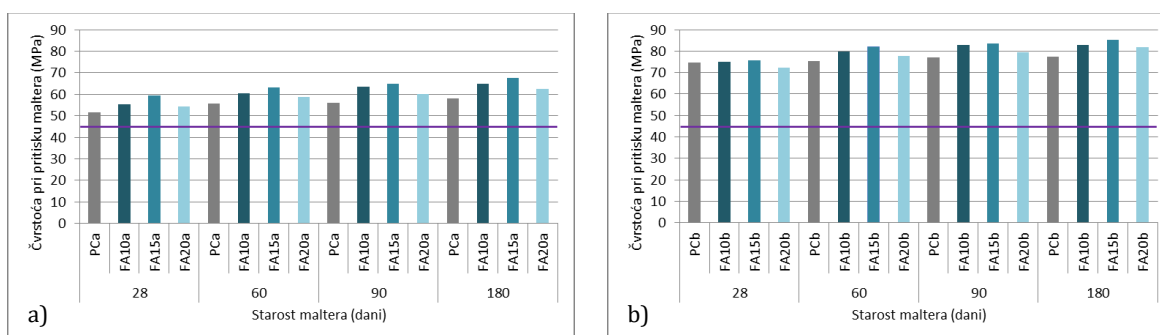
1.2. Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera i pasta spravljenih sa 0%, 10%, 15% i 20% FA kao SCM – I faza

1.2.1. Čvrstoća pri pritisku maltera FAa i FAb

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u Prilogu 7 i srednjih vrednosti čvrstoće pri pritisku maltera datih u poglavlju VI-10.1.1., na slici VII-41 prikazane su srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku maltera koji sadrže FA kao SCM spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika II-1a) i 0,4 (slika II-1b) pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana.

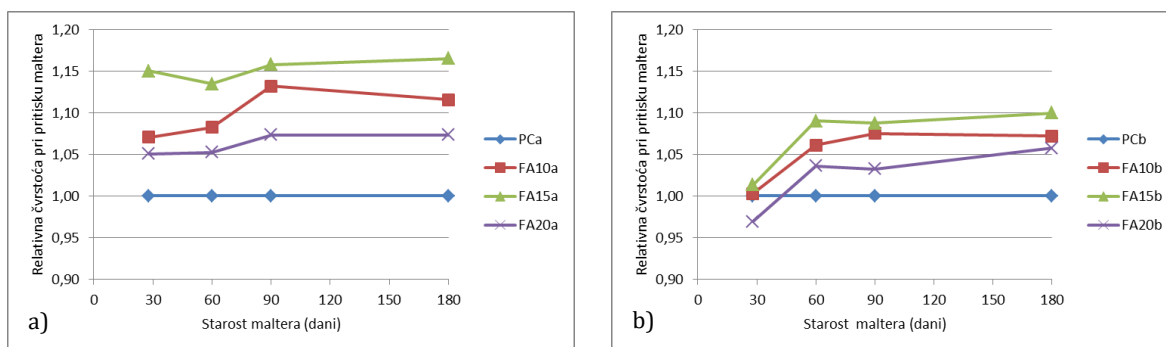
S obzirom na dobijene rezultate pri starosti od 28 dana, malteri spravljeni sa FA kao SCM su ispunili potreban uslov: $R_{c,28} \geq 45$ MPa prema standardu EN 1504-3 [23], te sa aspekta čvrstoće pri pritisku ispitane u skladu sa standardom EN 12190 [17] pripadaju klasi R4 konstrukcijskih maltera.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-41, evidentno je da su dobijene veće čvrstoće pri pritisku kod maltera koji sadrže FA, spravljenih sa manjim vodovezivnim faktorom ($w/cm=0,4$) u odnosu na veći ($w/cm=0,5$). Opseg čvrstoća maltera ispitanih pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana i spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, iznosi: 51,72-59,48 MPa, 55,78-63,28 MPa, 56,15-65,00 MPa i 58,13-67,71 MPa, respektivno. Za iste starosti predmetnih maltera samo spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4 opseg čvrstoća iznosi: 72,45-75,73 MPa, 75,21-81,98 MPa, 76,93-83,65 MPa i 77,45-85,16 MPa, respektivno.



Slika VII-41. I faza – Čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Relativne čvrstoće pri pritisku maltera kod kojih je PC supstituisan sa 10%, 15% i 20% FA prikazane su na slici VII-42. U slučaju maltera spravljenih sa većim vodovezivnim faktorom (slika VII-42a), malter sa 15% FA je nakon samo 28 dana nege premašio čvrstoću referentnog maltera i takav trend se održao tokom svih 180 dana. Relativne čvrstoće FA15a su bile veće u odnosu na odgovarajuće referentne za 15,00%, 13,45%, 15,77% i 16,49%, respektivno. Relativne čvrstoće pri pritisku maltera FA10a su nakon 28 i 60 dana bile u rangu referentnih (veće za 7,05% i 8,22%, respektivno). Nakon 90 dana relativna čvrstoća maltera FA10a je značajnije premašila referentnu vrednost (za 13,17%) kao i nakon 180 dana nege (za 11,56%). Jedino je malter FA20a imao neznatnije povećanje relativne čvrstoće u periodu od 28 do 180 dana (za 5,04%, 5,23%, 7,33% i 7,35%, nakon 28, 60, 90 i 180 dana, respektivno). S obzirom da su razlike manje od 10%, smatra se da im je relativna čvrstoća ostala u rangu odgovarajućih referentnih vrednosti.



Slika VII-42. I faza – Relativna čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

U slučaju primene manjeg vodovezivnog faktora (slika VII-42a), čvrstoće pri pritisku maltera koji sadrže FA su ostale u rangu odgovarajućih referentnih vrednosti u periodu između 28 i 180 dana. Nakon 28, 60, 90 i 180 dana nege, maltera FA10b je imao veće relativne čvrstoće pri pritisku u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti za 0,28%, 6,10%, 7,51% i 7,20%, maltera FA15b za 1,32%, 9,00%, 8,73% i 9,95%, dok je malter FA20b nakon 28 dana nege imao za 3,07% manju relativnu čvrstoću u odnosu na referentnu, dok je nakon 60, 90 i 180 dana imao veće za 3,60%, 3,25% i 5,72%, respektivno.

Zaključci:

Na osnovu prikazanih rezultata ispitivanja maltera kod kojih je PC supstituisan sa FA, može da se zaključi da najveći uticaj na čvrstoću predmetnih maltera ima vodovezivni faktor, a potom starost uzorka u trenutku ispitivanja (odnosi se na period između 28 i 180 dana od spravljanja uzorka), ali i količina supstitucije PC sa FA. Sa povećanjem starosti maltera kao i primene nižeg vodovezivnog faktora, dobijaju se veće čvrstoće pri pritisku.

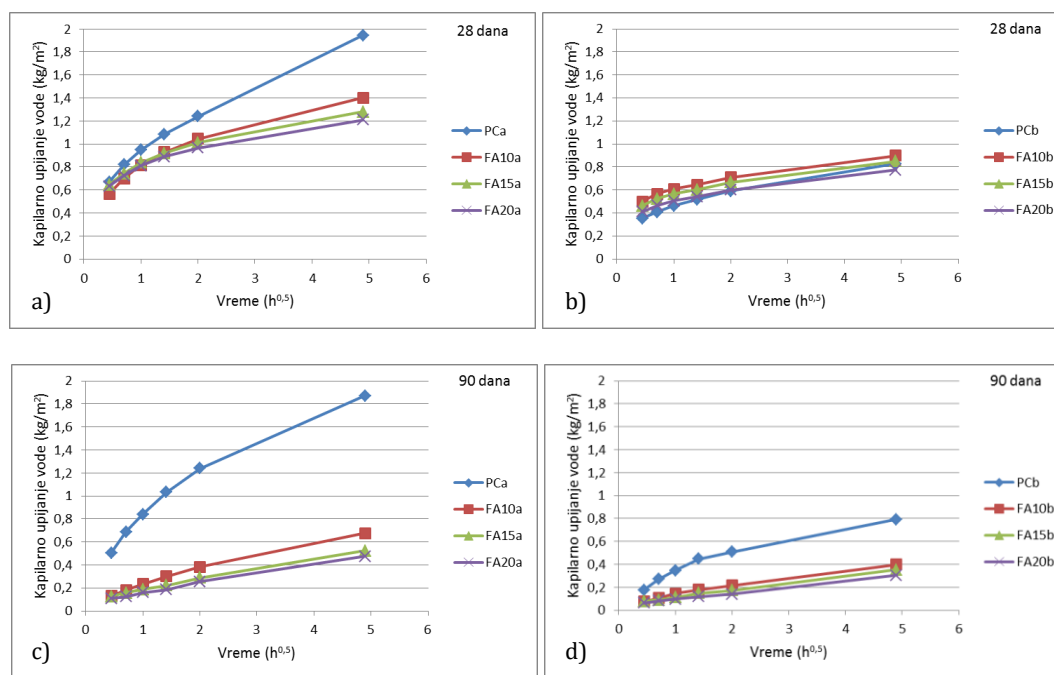
Primena FA kao SCM je generno imala pozitivan uticaj na čvrstoću pri pritisku ispitanih maltera. U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, čvrstoće maltera sa FA su pri svim ispitanim starostima imale veće vrednosti u odnosu na odgovarajuće referentne, s tim da je relativna čvrstoća maltera FA15a bila veća u odnosu na referentne vrednosti u proseku za cca 15%, dok je relativna čvrstoća maltera FA10a tek nakon 90 dana premašila odgovarajuću referentnu vrednost za preko 10%. Malter FA20a, iako je imao sve vreme ispitivanja veće čvrstoće pri pritisku u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti, nije premašio usvojenu granicu od 10% tako da se smatra da su mu čvrstoće ostale u rangu referentnih.

Relativne čvrstoće pri pritisku maltera koji sadrže FA, a spravljeni su sa vodovezivnim faktorom 0,4, se nisu razlikovale za više od 10% u odnosu na

referentne vrednosti, stoga se može zaključiti da su čvrstoće pri pritisku ostale u rang referentnih, bez obzira na nivo supstitucije PC sa FA i primenjeni vodovezivni faktor. Međutim, može da se istakne (i) da je malter FA15b u periodu između 60 i 90 dana nege u proseku imao veću relativnu čvrstoću za cca 9% u odnosu na referentne vrednosti, da bi se nakon 180 dana približi razlici od 10% (9,95%), (ii) da je najmanja relativna čvrstoća pri pritisku (u slučaju maltera FA20b) za samo 3 % manja od odgovarajuće referentne vrednosti, kao i (iii) da je generalno supstitucija PC sa FA u slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4, pri starosti maltera većoj od 60 dana imala pozitivan uticaj na relativnu čvrstoću pri pritisku.

1.2.2. Kapilarno upijanje vode maltera FAa i FAB

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 8, kao i rezultata ispitivanja datih u poglavlju VI-10.1.2. na slici VII-43 predstavljena je kinetika kapilanog upijanja vode maltera sa FA kao SCM-a kao i referentnog cementnog maltera, spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 i 0,4, starosti 28 i 90 dana.



Slika VII-43. I faza – Kinetika kapilarnog upijanja vode maltera iz I faze ispitivanja: a) Malteri sa FA starosti 28 dana, w/cm=0,5 b) Malteri sa FA starosti 28 dana, w/cm=0,4 c) Malteri sa FA starosti 90 dana, w/cm=0,5 d) Malteri sa FA starosti 90 dana, w/cm=0,4

Na osnovu prikazanih dijagrama (slika VII-43) kapilarnog upijanja vode može se zaključiti da na kinetiku upijanja vode značajno primena FA kao SCM-a, smanjenje vodovezivnog faktora, starost maltera u trenutku ispitivanja, kao i količina supstitucije PC sa FA.

Generalno, može se uočiti da sa smanjenjem vodovezivnog faktora (sa 0,5 na 0,4) dolazi do značajnog smanjenja kapilarnog upijanja vode, prvenstveno kod referentnog cementnog maltera, a potom i kod maltera koji sadrže FA kao SCM, a da sami dijagrami imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja (slika VII-43).

U slučaju maltera koji su spravljani sa vodovezivnim faktorom 0,5, sa povećanjem udela FA i starosti maltera smanjuje se kapilarno upijanje vode. Na osnovu prikazanih dijagrama (slike VII-43a i VII-43c) evidentno je da referentni PCa malter ima najveće kapilarno upijanje vode i pri starosti od 28 i od 90 dana.

U slučaju maltera koji su spravljani sa vodovezivnim faktorom 0,4 (slike VII-43b i VII-43d), redosled smanjenja kapilarnog upijanja vode maltera starog 28 dana je sledeći: FA10b > FA15b > PCb > FA20b. Pri starosti maltera od 90 dana najveće kapilarno upijanje vode je zabeleženo kod referentnog maltera PCb, dok sa povećanjem udela FA dolazi do smanjenja kapilarnog upijanja vode.

S obzirom da je standardom EN 13057 [45] propisano da se kapilarno upijanje vode ispituje na uzorcima starim 28 dana, ti rezultati su detaljnije analizirani. Srednja vrednost kapilarnog upijanja referentnog maltera PCa starog 28 dana iznosi 1,944 kg/m², za FAa je od 1,210 - 1,402 kg/m², dok je srednja vrednost kapilarnog upijanja referentnog maltera PCb starog 28 dana 0,830 kg/m², za FAb je od 0,772 - 0,899 kg/m².

Na osnovu koeficijenata kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana, prikazanih u tabeli VI-24, svi malteri iz I faze ispitivanja koji sadrže FA kao SCM ispunjavaju kriterijum za klasu R4 konstrukcijskog reparaturnog maltera u skladu sa standardom EN 1504-3 [23], s obzirom da su im koeficijenti kapilarnog upijanja $\leq 0,5 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-0.5}$. Navedeni uslov su ispunili i isti malteri pri starosti od 90 dana (tabela VI-25).

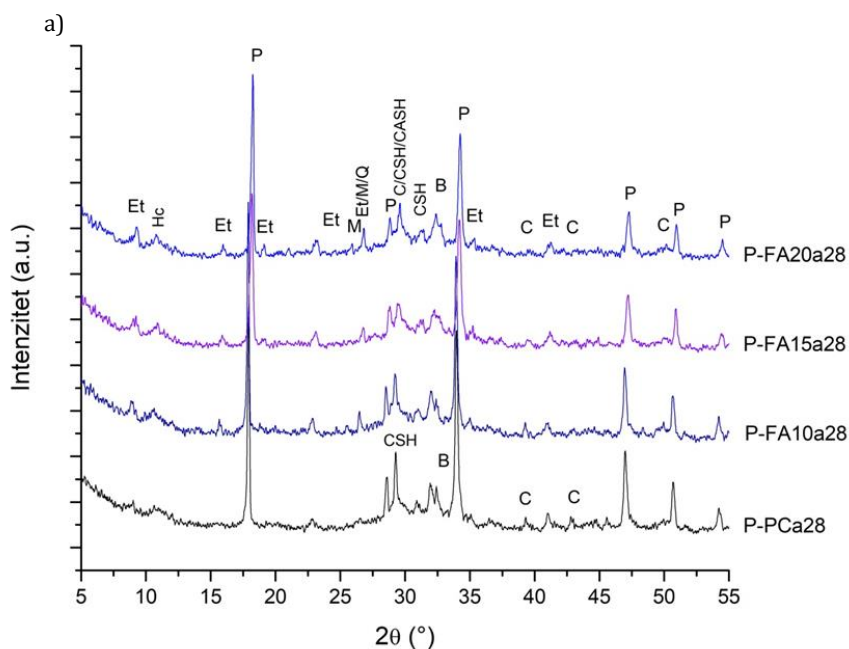
1.2.3. Mineraloški sastav pasta P-FAa određen metodom rendgenske difrakcije (XRD)

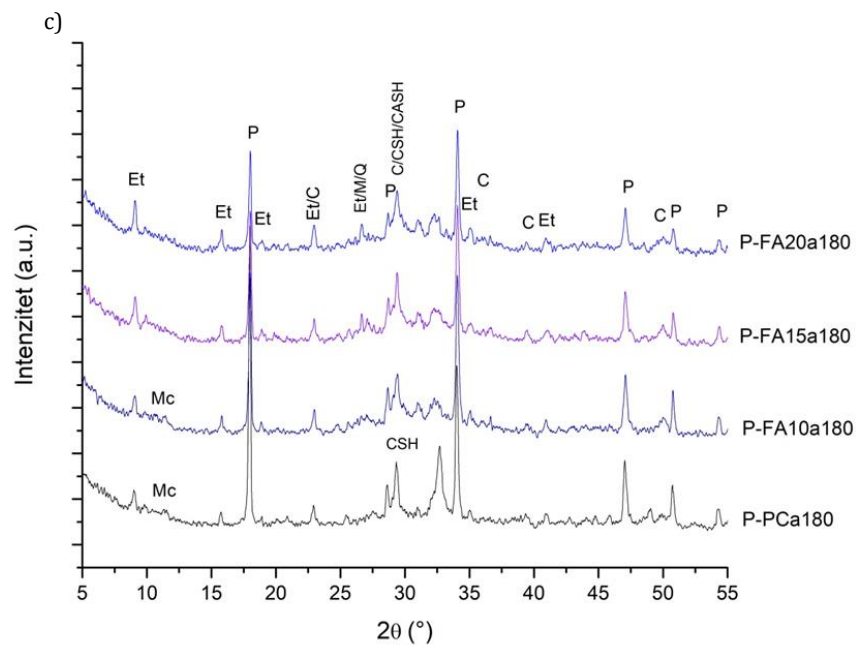
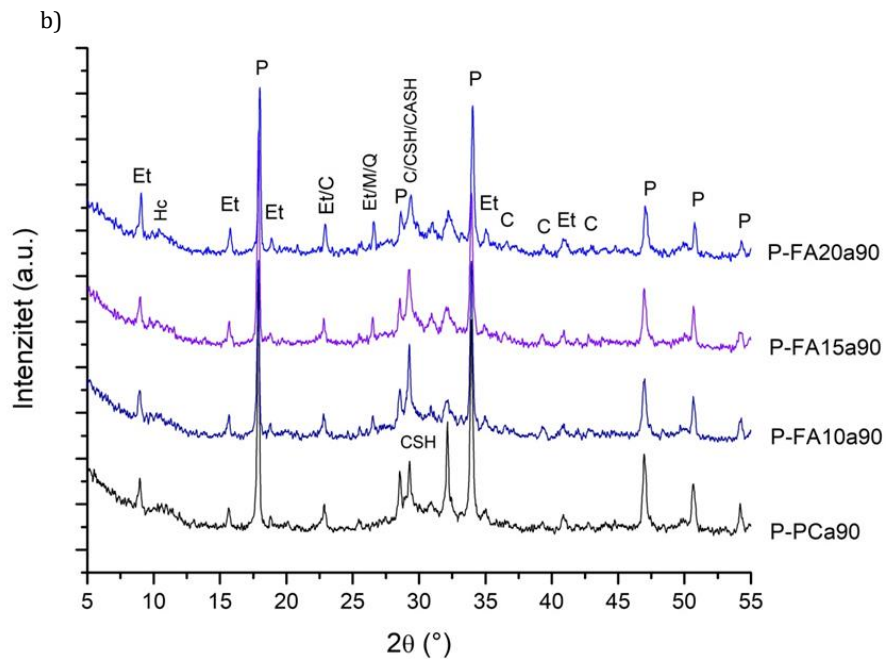
Mineraloški sastav pasta starosti 28, 90 i 180 dana, koje sadrže 0%, 10%, 15% i 20% FA kao SCM, prikazan je na slici VII-44 u vidu rendgenskih difraktograma. Produkti hidratacije i pucolanske reakcije koji su zajednički za sve paste koje sadrže FA su C-S-H gel, C-A-S-H gel, Ca(OH)₂ u kristalnom obliku - portlandit, etringit i hemikarbonat. Dodatno je kod svih navedenih pasta starosti 28, 90 i 180 dana detektovano i prisustvo mulita i kvarca koji potiče iz FA.

U slučaju pasta koje sadrže 10% FA, starosti 28 dana, intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu su u rangu sa istima kod referentne paste, dok se uočava smanjenje njihovog intenziteta u slučaju pasti koje sadrže 15% i 20% FA. Nakon 90 dana se uočava primetna razlika u intenzitetima pikova koji odgovaraju portlanditu referentne paste i paste koja sadrži 10% FA. Poređenje intenziteta pikova pasta sa

10%, 15% i 20% FA ukazuje da su intenziteti pikova portlandita slični. Tek nakon 180 dana se može primetiti značajnije smanjenje sadržaja portlandita kod svih pasti u odnosu na raniji period. Takođe se jasno može uočiti da sa povećanjem udela FA dolazi do relativnog smanjenja inteziteta pikova koji odgovaraju portlanditu.

Kalcijum hemikarbonat (Hc) je registrovan u pastama sa FA i referentnom uzorku nakon 28 dana hidratacije. Nakon 90 dana još je prisutan kod P-FA20a, a kod ostalih pasta se gubi. Prisutni su karbonati u obliku kalcita, ali i vaterit. U manjim količinama je prisutan i dolomit.





Slika VII-44. XRD podaci referentne paste i pasta koje sadrže FA kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana (P - portlandit, Et - etringit, C-S-H - kalcijum-siliko-hidrat, C-A-S-H - kalcijum-aluminijum-siliko-hidrat, M – mulit iz FA, Q - kvarc, C - kalcit, B - belit, V - vaterit, Mc - kalcijum monokarbonat, Hc - kalcijum hemikarbonat)

Na osnovu relativnih odnosa intenziteta pikova može se zapaziti da sa povećanjem udela FA u pastama dolazi do:

- smanjenja sadržaja portlandita usled pucolanske reakcije FA;
- povećanja relativnog udela etringita sa povećanjem učešća FA u pastama, i sa protokom vremena. Hemijski sastav FA ukazuje na značajnu količinu sulfata (6,712 %, tabela VI-7). što je verovatno uticalo na povećanje količine etringita u odnosu na referentni uzorak. Količina etringita se povećava sa vremenom. Njegov intenzitet se povećava za starost od 90 dana u odnosu na 28 dana, dok za starost 180 dana ostaje isti ili nešto manji u odnosu na intenzitet pika nakon 90 dana. Ova pojava je najuočljivija za pik na 2θ : $9,1^\circ$ koji ima najveći intenzitet prema JCPDS: 41-1451. Stoga se može govoriti o „odloženom formiranju etringita“ koje je u literaturi proučavano sa stanovišta uticaja na fizičko-mehanička svojstva cementnih kompozita [173];
- C-S-H gel: Glavni pik C-S-H gela za 2θ : $29,36^\circ$ je prisutan za sve starosti pasta. Poređenje intenziteta pikova pasta sa FA u odnosu na referentni uzorak ukazuje da paste sa FA imaju manji intenzitet pri starosti od 28 dana, dok je nešto veći za starost od 90 dana. Kada poredimo paste sa FA najveći intenzitet ima pasta sa 10 % FA za starosti od 28 i 90 dana. Za učešća FA od 15% i 20 % se uočava smanjenje intenziteta pomenutog pika u odnosu na pik kod pasti sa 10% za starosti od 28 i 90 dana, slike VII-44a i VII-44b, dok za starost od 180 dana nema velike razlike, slika VII-44c. Oblik pika ukazuje na manju kristaličnost (širi pik usled drugačijih molarnih odnosa u C-S-H strukturi), što ukazuje na formiranje C-A-S-H gela. Na mogućnost formiranja ovog gela upućuju pikovi na $29,5^\circ$ i na $49,8^\circ$ kao i hemijski sastav FA, koji ukazuje na prisustvo značajne količina aluminijuma (21,324 % Al_2O_3 , u FA, tabela VI-7). Pošto XRD rezultati ukazuju da nema promene dimenzija ćelije, odnosno nema pomeranja pikova kod pasta sa FA u odnosu na referentni uzorak, to implicira da Al verovatno nema koordinaciju V i VI [165] u C-A-S-H gelu. Na ovo upućuju i rezultati XRD analize u pogledu prisustva etringita i monosulfata. Naime, Anderson i saradnici [6][5] ukazuju da prisustvo etringita i monosulfata znači da je Al[VI] ugrađen u njihovu strukturu, tako da verovatno nije prisutan u C-A-S-H gelu.

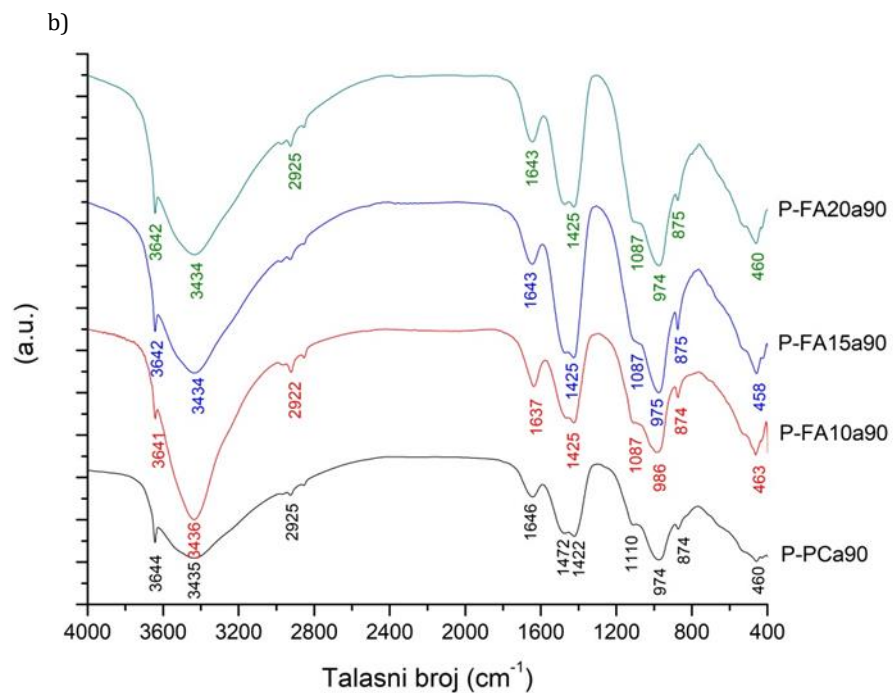
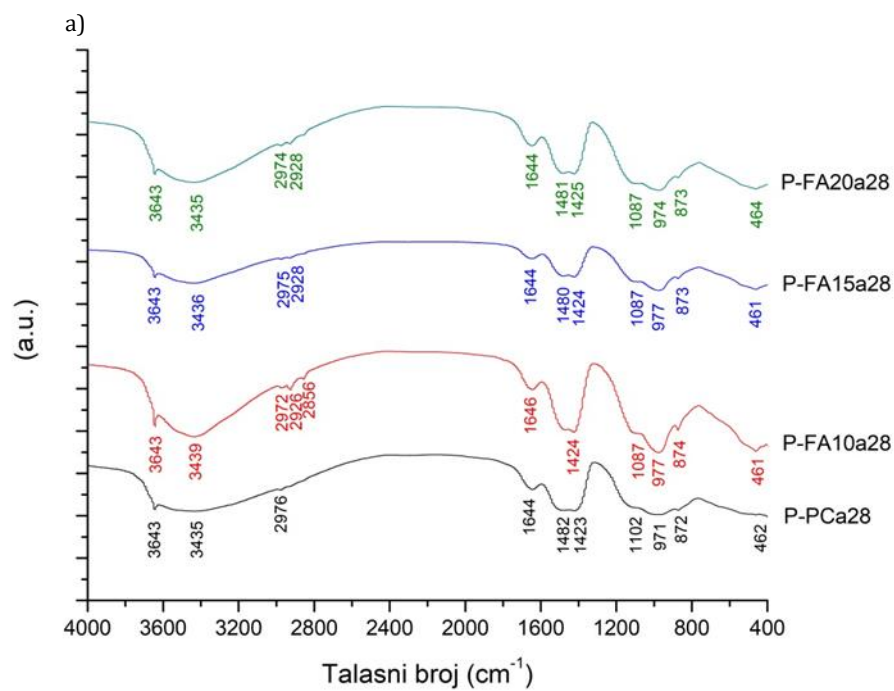
1.2.4. Strukturne promene pasta P-FAa određene metodom infracrvene spektriskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR)

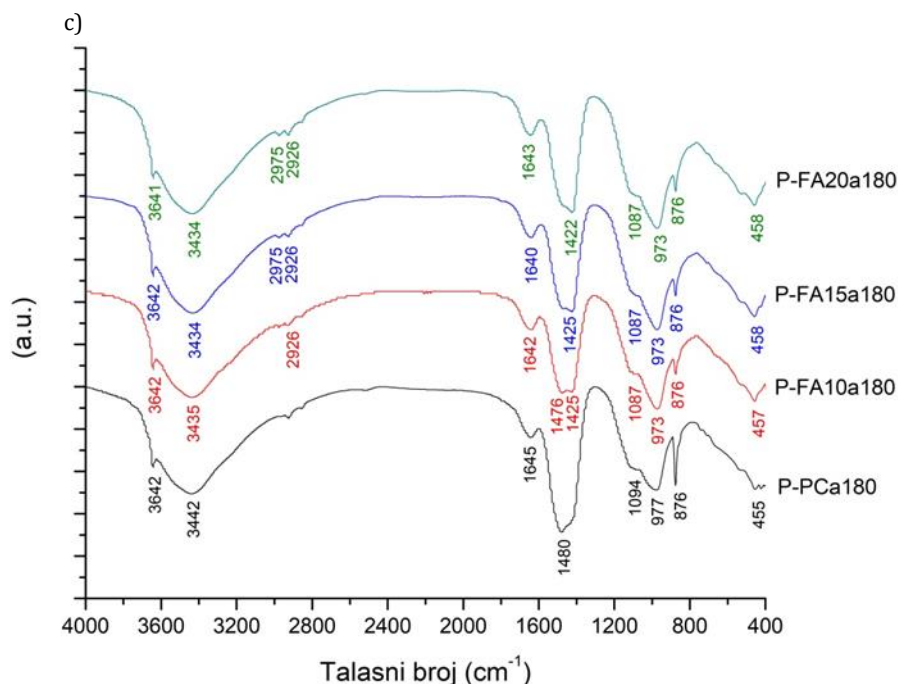
Strukturne promene pasta starosti 28, 90 i 180 dana kod kojih je cement supstituisan sa 0%, 10%, 15% i 20% FA određene su primenom FTIR spektroskopije. Na osnovu dobijenih FTIR dijagrama prikazanih na slici VII-45, može se uočiti pojava apsorpcionih traka na $\sim 3643\text{ cm}^{-1}$, $\sim 3435\text{ cm}^{-1}$ i $\sim 1644\text{ cm}^{-1}$ koje se pripisuju postojanju vibracija različitih oblika O-H molekulske grupe. Apsorpcione trake na $\sim 3643\text{ cm}^{-1}$ [64] upućuju na prisustvo istežućih vibracija Ca-OH iz portlandita, dok se

apsorpciona traka na $\sim 3435 \text{ cm}^{-1}$ dovode u vezu sa ν_1 istežućim vibracijama molekula H_2O [103], a traka na $\sim 1644 \text{ cm}^{-1}$ sa savijajućim ν_2 vibracijama molekula H_2O [103] koji su vezani za površinu hidratnih faza ili savijajućim vibracijama ν_2 molekula vode u sulfatima.

Prema autorima Ylmén sa saradnicima [188], kao i Jones i Jackson [92], apsorpcione trake na 2926 cm^{-1} i 2978 cm^{-1} se pripisuju kalcijum karbonatu. Postojanje vaterita i kalcijum karbonata je takođe potvrđeno XRD analizom, slika VII-44.

Pojava apsorpcione trake na $\sim 1422\text{-}1482 \text{ cm}^{-1}$ ($1429\text{-}1492 \text{ cm}^{-1}$, ν_3 - asimetrično istezanje CO_3^{2-} grupe [91] dovodi se u vezu sa prisustvom karbonata u strukturi ispitanih uzoraka. Ove vibracije se mogu pripisati superponiranju kristalnih struktura kalcita i vaterita [92]. Takođe se i pojava apsorpcione trake na $\sim 873 \text{ cm}^{-1}$ (ν_2 - savijajuće vibracije van ravni CO_3^{2-} grupe [91]) može dovesti u vezu sa prisustvom karbonata [35]. Postojanje apsorpcione trake odnosno prevoja (*shoulder*) na $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ može se pripisati prisustvu SO_4^{2-} molekulske vibracije koja može da ukaže na postojanje faze etringita ili gipsa [137]. Pojava apsorpcione O-H trake na $\sim 3435 \text{ cm}^{-1}$ koja se prepisuje vodoničnoj vezi OH grupe i dovodi se u vezu sa prisustvom vode u strukturi etringita, dodatno ukazuje na prisustvo etringita. Prisustvo produkata hidratacije kao što je C-S-H gel može da se poveže sa apsorpcionom trakom na $\sim 971 \text{ cm}^{-1}$ zbog postojanja Si-O asimetrične istežuće vibracije Q^2 tetraedara SiO_2 . Dodatno, apsorpciona traka na $\sim 450\text{-}500 \text{ cm}^{-1}$, u kojoj je utvrđeno prisustvo deformacionih vibracija SiO_4 tetraedra, može se takođe prepisati prisustvu C-S-H faze [137][188]. Traka na 462 cm^{-1} koja se pripisuje vibracijama pri saviljanju Si-O-Si (SiO_4) pokazuje promene u C-S-H gelu i prepisuje se deformacionim vibracijama SiO_4 tetraedra [111] [137].





Slika VII-45. FTIR spektri referentne paste i pasta koje sadrže FA kao SCM pri starosti od: a) 28 dana; b) 90 dana; c) 180 dana

Upoređujući FTIR spektre referentne paste i pasta koje sadrže različitu količinu FA u sva tri slučaja (nakon 28, 90 i 180 dana hidratacije, slika VII-45), primećuju se značajne promene koje bi mogle da ukažu na izmene u strukturi ispitanih pasta. Generalno, javlja se razlika u vezi sa pomeranjem apsorpcione trake na 971 cm^{-1} koja se odnosi na postojanje Si-O istežućih vibracija Q^2 tetraedra u C-S-H pri povećanju starosti ispitanih pasta, dok su razlike između samih pasta koje sadrže različite količine FA u najvećem broju slučajeva neznatne.

Si-O vibracije u C-S-H gelu, kao najvažnijem produktu hidratacije PC, su slične 1,4 tobermoritu, jer se njegova osnovna apsorpciona traka javlja oko talasnog broja 970 cm^{-1} , a prevoj na $\sim 1110\text{ cm}^{-1}$, slika VII-45. Međutim, ovaj talasni broj se pripisuje i prisustvu ν_3 vibracija SO_4 grupe u sulfatima ili prisustvu neizreagovanog C_2S -belita.

Rezultati FTIR-a ukazuju na pomeranje apsorpcione trake na 971 cm^{-1} koja se dovodi u vezu sa C-S-H gelom u referentnoj i pastama sa FA tokom vremena, tabela VII-46.

Tabela VII-46. I faza – Pomeranje apsorpcione trake na 971 cm^{-1} koja se dovodi u vezu sa C-S-H gelom u referentnoj i pastama sa FA tokom vremena

Vrsta maltera	Talasni brojevi (cm^{-1})		
	28 dana	90 dana	180 dana
P-PCa	971	974	977
P-FA10a	977	986	973
P-FA10a	977	975	973
P-FA20a	974	974	973

Nakon 28 dana hidratacije može se uočiti pomeranje traka kod P-FA10a, P-FA15a i P-FA20a (977 cm^{-1} , 977 cm^{-1} i 974 cm^{-1} , respektivno) ka višim vrednostima talasnih brojeva u odnosu na referentnu pastu PCa (971 cm^{-1}) što se može pripisati povećanju stepena polimerizacije C-S-H strukture sa manjim odnosom Ca/Si, slika VII-45a. S druge strane, na osnovu poređenja talasnih brojeva uzoraka P-FA10a, P-FA15a i P-FA20a opaža se da su u slučaju P-FA10a i P-FA15a oni isti, dok je kod paste P-FA20a neznatno manji. Dobijeni rezultati sugerišu da prisustvo FA utiče na sastav C-S-H faze tokom proces hidratacije.

Nakon 90 dana hidratacije dolazi do pomeranja apsorpcione trake koja se odnosi na postojanje Si-O asimetričnih istežućih vibracija Q_2 tetraedara, ka većim talasnim brojevima u slučaju P-FA10a (986 cm^{-1}), dok su P-FA15a (975 cm^{-1}) i P-FA20a (974 cm^{-1}) u rangu sa P-PCa (974 cm^{-1}), slika VII-45b. Ova činjenica upućuje na veći stepen polimerizacije C-S-H strukture u slučaju paste P-FA10a, dok u slučaju pasta P-FA15a i P-FA20a dolazi do depolimerizacije C-S-H gela (dolazi do povećanja Ca/Si ili Al/Si odnosa [38]).

Nakon 180 dana hidratacije takođe dolazi do manjeg pomeranja apsorpcione trake prema manjim talasnim brojevima (depolimerizacija C-S-H gela), u slučaju svih pasta koje sadrže FA (973 cm^{-1}) u odnosu na PCa (977 cm^{-1}), što može da se ukaže na nastanak C-A-S-H gela, i to u istoj meri bez obzira na količinu supstitucije PC sa FA, slika VII-45c, gela. Dodatno je uočeno značajno povećanje inteziteta apsorpcione trake (876 cm^{-1}) koja upućuje na prisustvo karbonata, tačnije kalcita [128], kod referentne paste u odnosu na paste sa FA.

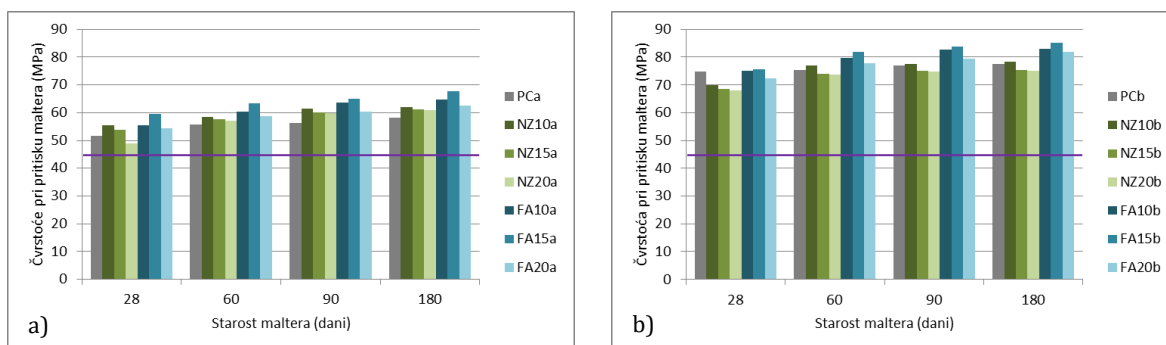
Na osnovu rezultata FTIR analize može se zaključiti da uvođenje FA kao SCM (i) utiče na sastav i strukturu C-S-H faze tokom process hidratacije, (ii) da čak i manje pomeranje apsorpcione trake ka manjim talasnim brojevima može da ukaže na formiranje C-A-S-H gela.

1.3. Komparativna analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera i pasta spravljenih sa NZ i sa FA kao SCM – I faza

1.3.1. Čvrstoća pri pritisku– Komporativna analiza (I faza istraživanja)

Svi malteri iz I faze ispitivanja su ispunili uslov da im je $R_{c,28} \geq 45$ MPa, te sa aspekta čvrstoće pri pritisku spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera u skladu sa standardom EN 1504-3 [23].

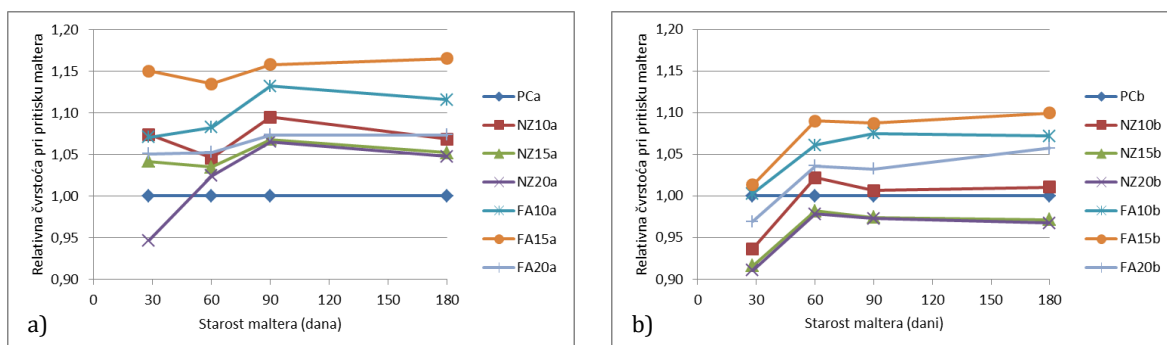
Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-46 i VII-47, može se uočiti da su pri istim starostima srednje vrednosti čvrstoće pri zatezanju maltera koji sadrže istu vrstu i količinu SCM veće u slučaju maltera spravljenih sa nižim vodovezivnim faktorom. Opseg čvrstoća maltera iz I faze ispitivanja starih 28, 60, 90 i 180 dana i spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, iznosi: 48,96-59,48 MPa, 55,78-63,28 MPa, 56,15-65,00 MPa i 58,13-67,71 MPa, respektivno. Za iste starosti maltera samo spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4 opseg čvrstoća iznosi: 68,07-75,73 MPa, 73,59-81,98 MPa, 74,84-83,65 MPa i 74,95-85,16 MPa, respektivno.



Slika VII-46. I faza – Čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Relativne čvrstoće pri pritisku maltera iz I faze ispitivanja spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 prikazane su na slici VII-47a. Na osnovu prikazanih rezultata jasno se može uočiti da je jedino malter FA15a u periodu od 28-180 dana nakon spravljanja imao u proseku za cca 15% veće relativne čvrstoće pri pritisku u odnosu na odgovarajuće referentne maltere, dok je maltera FA10a imao za cca 12% veće relativne čvrstoće, ali samo u periodu između 90 i 180 dana od spravljanja. Relativne čvrstoće pri pritisku preostalih maltera iz I faze ispitivanja spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 se nisu razlikovale za više od 10% u odnosu na referentne vrednosti, odnosno čvrstoće pri pritisku su im ostale u rang referentnih. Pri starosti od 28 dana, jedino je malter NZ20a imao manju relativnu čvrstoću od referentnog maltera, ali za samo 5,34%. U periodu između 60 i 180 dana svi malteri spravljeni sa SCM i vodovezivnom faktorom 0,5 su imali veće relativne čvrstoće u odnosu na odgovarajuće referentne maltere, njihov poredak po prosečnoj čvrstoći pri

pritisku u navedenom periodu je sledeći: FA15a > FA10a > NZ10a ≈ FA20a > NZ15a > NZ20a > PCa.



Slika VII-47. I faza – Relativna čvrstoća pri pritisku maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Relativne čvrstoće pri pritisku maltera iz I faze ispitivanja, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4, se nisu razlikovale za više od 10% u odnosu na referentne vrednosti, odnosno čvrstoće pri pritisku su ostale u rang referentnih, bez obzira na nivo supstitucije PC sa SCM. Međutim, jasno može da se uoči da se dijagrami promene relativne čvrstoće maltera sa SCM u toku vremena sastoje iz dva dela, odnosno da postoji izvestan prirast čvrstoće u periodu između 28 i 60 dana od spravljanja maltera, a da potom praktično nema promene u prirastu čvrstoće između maltera koji sadrže SCM i referentnog maltera. Pri starosti većoj od 60 dana poredak maltera po čvrstoći pri pritisku je sledeći: FA15b > FA10b > FA20b > NZ10b > PCb > NZ15b ≈ NZ20b. U periodu između 60 i 90 dana od spravljanja, malter FA15b je imao za cca 9% veću relativnu čvrstoću od maltera PCb, odnosno jedino je on skoro dostigao graničnih 10% nakon 180 dana (9,95%).

1.3.2. Kapilarno upijanje vode – Komparativna analiza (I faza istraživanja)

Komparativna analiza rezultata merenja kapilarnog upijanja vode maltera sa NZ i FA kao SCM-a, kao i referentnog cementnog maltera, spravljenih sa w/cm od 0,5 i 0,4, starosti 28 i 90 dana obuhvata:

- Kinetiku kapilarnog upijanja vode;
- Regresionu analizu radi određivanja koeficijenta kapilarnog upijanja vode S ;
- Određivanje koeficijenta S po modelu drugog specijalnog slučaja prema standardu EN 13057 [23] ukoliko prethodno nije bilo moguće uspostaviti linearnu zavisnost sa dovoljnom tačnošću, između l i kvadratnog korena iz proteklog vremena od početka ispitivanja;
- Upoređenje izmerenih vrednosti visina podizanja vode po omotaču uzoraka - h ;

- Proveru ispunjenosti kriterijuma za klase reparaturnih maltera prema standardu EN 1504-3 [23] u pogledu kapilarnog upijanja vode, preko koeficijenta kapilarnog upijanja S .

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 8, kao i rezultata ispitivanja datih u poglavlju VI-10.1.2., na slikama VII-38 i VII-43 predstavljena je kinetika kapilarnog upijanja vode maltera sa NZ i sa FA kao SCM kao i referentnog cementnog maltera, spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 i 0,4, starosti 28 i 90 dana. Vrednosti kapilarnog upijanja nakon 24h, za svaku vrstu maltera prikazane su na slici VII-48, dok su relativne vrednosti kapilarnog upijanja maltera prikazane na slici VII-49. Vrednosti koeficijenata kapilarnog upijanja vode S dobijeni linearnom regresionom analizom prikazani su na slici VII-50. Dodatno je izmerena i visina dizanja vode po omotaču uzoraka nakon 2h od početka ispitivanja kapilarnog upijanja vode, a rezultati su prikazani na slici VII-51.

Na osnovu prikazanih dijagrama (slike VII-38 i VII-43) kapilarnog upijanja vode može se zaključiti da na kinetiku upijanja najviše utiče vodovezivni faktor, potom vrsta SCM-a (NZ ili FA, razlika dolazi do izražaja pri starosti maltera od 90 dana), starost maltera u trenutku ispitivanja (posebno kada se koristi FA kao SCM), kao i količina SCM-a.

Generalno, može se uočiti da sa smanjenjem vodovezivnog faktora (sa 0,5 na 0,4) dolazi do značajnog smanjenja kapilarnog upijanja vode, prvenstveno kod referentnog cementnog maltera, a potom i kod maltera sa NZ i sa FA kao SCM, a da sami dijagrami imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja (slike VII-38 i VII-43).

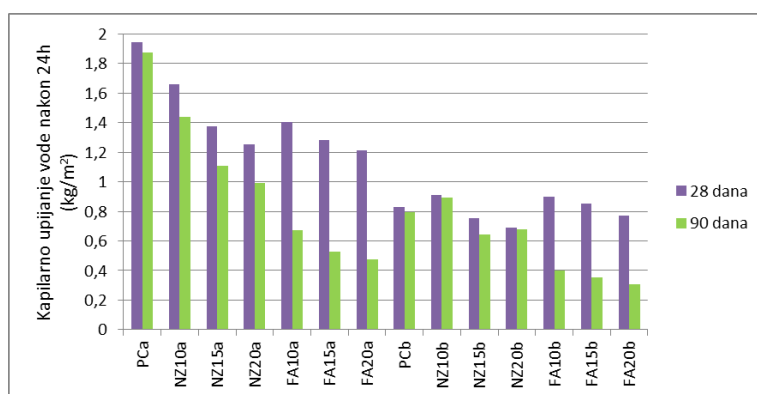
U slučaju maltera koji su spravljeni sa vodovezivnim faktorom 0,5, sa povećanjem udela NZ, odnosno, FA smanjuje se kapilarno upijanje vode. Na osnovu prikazanih dijagrama (slike VII-38 i VII-43) evidentno je da referentni PCa malter ima najveće kapilarno upijanje vode i pri starosti od 28 i od 90 dana.

Takođe može da se uoči da pri povećanju starosti maltera dolazi do smanjenja kapilarnog upijanja vode, prvenstveno kod maltera koji sadrže FA, a potom i maltera sa NZ, dok se kapilarno upijanje najmanje smanjilo u slučaju referentnog cementnog maltera.

U slučaju maltera koji su spravljeni sa vodovezivnim faktorom 0,4, pri starosti od 28 dana najmanje upijanje vode je izmereno kod maltera NZ20b, a nakon 90 dana kod FA20b. Takođe se može uočiti da sa povećanjem udela NZ, odnosno FA, dolazi do smanjenja kapilarnog upijanja vode, izuzev u slučaju maltera NZ15b starog 90 dana, koji je imao manje upijanje od maltera NZ20b iste starosti.

S obzirom da je standardom EN 13057 [45] propisano da se ispitivanje kapilarnog upijanja vode radi na uzorcima starim 28 dana, ti rezultati su detaljnije analizirani. Srednja vrednost kapilarnog upijanja referentnog maltera PCa starog 28 dana iznosi $1,944 \text{ kg/m}^2$, za NZa je u opsegu od $1,251 - 1,661 \text{ kg/m}^2$, a za FAa je od $1,210 - 1,402 \text{ kg/m}^2$, dok je srednja vrednost kapilarnog upijanja referentnog maltera PCb starog 28 dana $0,830 \text{ kg/m}^2$, za NZb je u opsegu od $0,689 - 0,911 \text{ kg/m}^2$, a za FAb je od $0,772 - 0,899 \text{ kg/m}^2$.

Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 24h za svaku vrstu maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana prikazane su na slici VII-48.



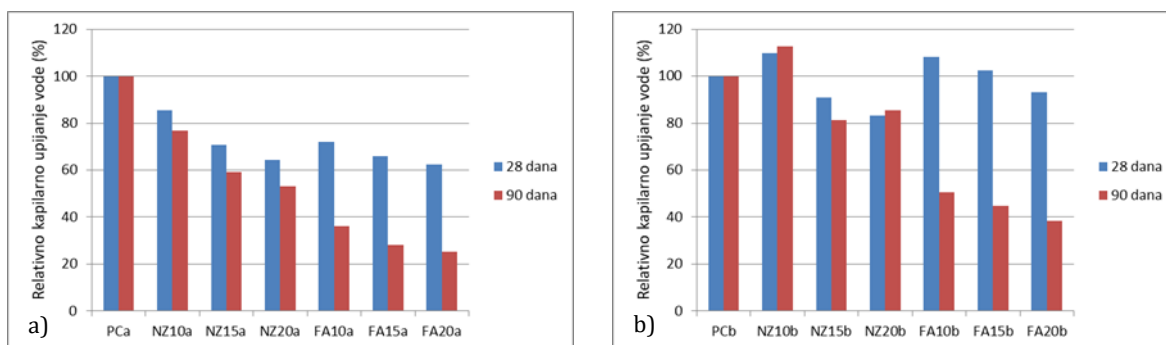
Slika VII-48. I faza – Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 24h za svaku vrstu maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Kod maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, najveće kapilarno upijanje vode je izmereno kod referentnog maltera, pri starosti od 28 i 90 dana. Kapilarno upijanje maltera NZ10a, NZ15a i NZ20a se nakon 90 dana se smanjilo za 13,35%,19,63% i 20,51%, respektivno, u odnosu na rezultate merenja nakon 28 dana, dok je u slučaju maltera FA10a, FA15a i FA20a došlo do značajnijeg smanjenja (51,82%, 59,01% i 60,77%, respektivno). U navedenom periodu došlo je i do smanjenja upijanje vode referentnog maltera PCa, ali samo za 3,71%.

I kod maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4, sa povećanjem starosti (sa 28 na 90 dana) dolazi do smanjenja kapilarnog upijanja vode. U slučaju maltera PCb, kapilarno upijanje je smanjeno za 4,57%. Kapilarno upijanje maltera NZ10b, NZ15b i NZ20b se nakon 90 dana se smanjilo za 2,02%,14,64% i 1,96%, respektivno, u odnosu na rezultate merenja nakon 28 dana, dok je u slučaju maltera FA10b, FA15b i FA20b došlo do značajnijeg smanjenja (55,58%, 58,40% i 60,59%, respektivno) kao što je i u slučaju vodovezivnog faktora od 0,5.

Relativne vrednosti kapilarnog upijanja vode maltera prikazane su na Slici VII-49. U odnosu na kapilarno upijanje vode maltera PCa, izmereno nakon 24h od početka ispitivanja, relativne vrednosti kapilarnog upijanja vode maltera NZ10a, NZ15a i

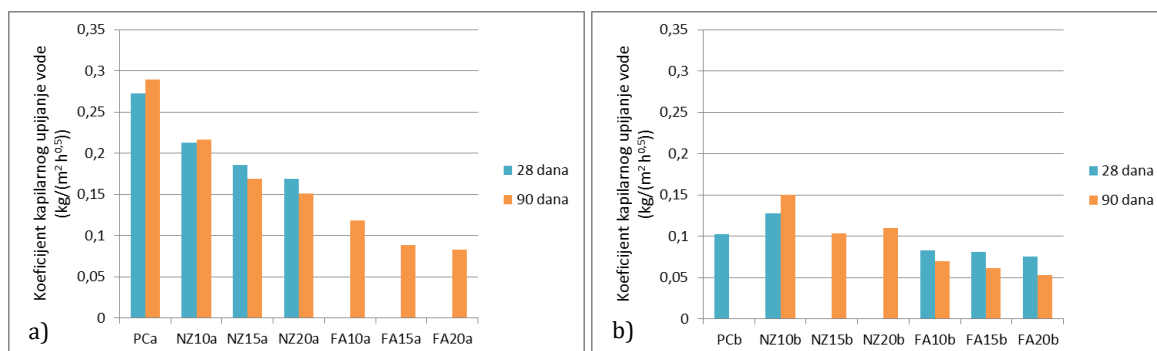
NZ20a starih 28 dana su manje za 14,56%, 29,17% i 35,66%, odnosno za maltere FA10a, FA15a i FA20a 27,89%, 34,15% i 37,77%, a nakon 90 dana su manje za 23,11%, 40,88% i 46,89%, odnosno 63,92%, 71,97% i 74,64%, respektivno. Pri obe starosti maltera referentni PCa malter je imao najveću vrednost relativnog kapilarnog upijanja vode, dok je evidentno da sa povećanjem starosti maltera, kao i udela NZ, a naročito FA, dolazi do opadanja njene vrednosti.



Slika VII-49. I faza – Relativno kapilarno upijanje vode maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$ b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

Pri starosti uzoraka od 28 dana, relativna vrednost kapilarnog upijanja vode maltera NZ10b je povećana za 9,75%, maltera NZ15b i NZ20b je smanjena za 9,22% i 16,91%, dok je za maltere FA10b i FA15b povećana za 8,28% i 2,38%, a za malter FA20b smanjena za 6,90%, respektivno, u odnosu na referentnu vrednost kapilarnog upijanja maltera PCb iste starosti. Kod maltera starih 90 dana, samo je kod maltera NZ10b došlo do povećanja relativnog kapilarnog upijanja vode i to za 12,69%, dok je kod maltera NZ15b i NZ20b došlo do smanjenja za 18,80% i 14,63%, kao i kod maltera FA10b, FA15b i FA20b za 49,60%, 55,37% i 61,55%, respektivno, u odnosu referentni malter PCb iste starosti. Na osnovu prethodno prikazanih rezultata može da se zaključi da pri vodo vezivnom faktoru 0,4, samo u slučaju primene 15% i 20% NZ, i 20% FA kao SCM dolazi do smanjenja relativnog kapilarnog upijanja maltera, dok pri starosti od 90 dana jedno kod maltera sa 10% NZ dolazi do relativnog povećanja kapilarnog upijanja.

Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode u periodu do 24 sata za maltere starosti 28 i 90 dana kod kojih je urađena aproksimacija rezultata linearnom funkcijom, a da pritom faktor korelacije iznosi bar 0,95, prikazane su na slici VII-50. Za maltere FA10a, FA15a, FA20a, NZ15b i NZ20b stare 28 dana, kao i za malter PCb star 90 dana, nije uspostavljena linearna funkcija sa dovoljnom tačnošću, već nelinearna, što prema standardu EN 13057 [45] spada u drugi specijalni slučaj. Samo koeficijenti kapilarnog upijanja vode dobijeni linearnom aproksimacijom (slici VII-50) su analizirani u nastavku, dok su preostali koeficijenti izračunati kako bi se proverilo da li malteri ispunjavaju kriterijume definisane standardom EN 1504-3 [23].



Slika VII-50. I faza – Koeficijenti kapilarnog upijanja vode maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$ b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

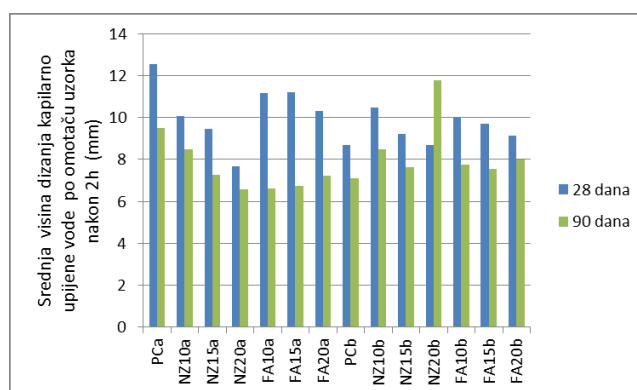
Analizom koeficijenata kapilarnog upijanja vode maltera (slika VII-50), uočeno je sledeće:

- Za maltere PCa, NZ10a, NZ15a, NZ20a, NZ10b, FA10b, FA15b i FA20b koeficijenti kapilarnog upijanja vode su uspešno određeni za obe starosti maltera (28 i 90 dana). U ovim malterima se kapilarno upijanje vode ponaša po linearnom zakonu u posmatranom vremenskom periodu.
- Koeficijenti kapilarnog upijanja su veći kod maltera sa većim vodovezivnim faktorom, što upućuje na njihovu povećanu brzinu upijanja vode u toku ispitivanja koje je trajalo 24h.
- Najveći koeficijent kapilarnog upijanja vode ima malter PCa pri starosti i od 28 i od 90 dana.
- Sa povećanjem udela NZ kao SCM u malterima ($w/cm=0,5$), dolazi do smanjenja koeficijenta kapilarnog upijanja, i pritom su koeficijenti kod maltera starih 90 dana manji u odnosu na korespondentne određene pri starosti maltera od 28 dana, izuzev u slučaju NZ10a kog kojeg je koeficijent ostao u istom rangu.
- Sa povećanjem udela FA kao SCM u malterima ($w/cm=0,5$) starim 90 dana, dolazi do smanjenja koeficijenta kapilarnog upijanja, i pritom su koeficijenti kod navedenih maltera manji od onih kod maltera sa NZ kao SCM pri istom vodo vezivnom faktoru i starosti.
- U slučaju maltera starih 90 dana, koji sadrže NZ kao SCM ($w/cm=0,4$) najveći koeficijent kapilarnog upijanja ima NZ10b, potom NZ20b, a najmanji NZ15b, što je u skladu sa vrednostima prikazanim na slici VII-48.
- Sa povećanjem udela FA kao SCM u malterima ($w/cm=0,4$), takođe dolazi do smanjenja koeficijenta kapilarnog upijanja, i pritom su koeficijenti kod navedenih maltera manji od onih kod maltera sa NZ kao SCM pri istom vodo vezivnom faktoru i starosti.

Na osnovu koeficijenata kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana, prikazanih u Poglavlju VI-10.1.2 (tabele VI-24 i VI-25), svi malteri iz I faze ispitivanja ispunjavaju

kriterijum za klasu R4 konstrukcijskog reparaturnog maltera, s obzirom da su im koeficijenti kapilarnog upijanja $\leq 0,5 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-0,5}$. Navedeni uslov su ispunili i isti malteri pri starosti od 90 dana.

Po preporuci navedenoj u standardu EN 13057 [45], dodatno je analizirano dizanje vode po omotaču uzoraka, a nivoi do kojih se popela voda nakon 2h od početka ispitivanja su obeleženi na osam aksijalnih linija. Za merodavnu vrednost uzeta je prosečna vrednost od osam merenja za svaki uzorak, a za svaku vrstu maltera srednja vrednost dobijena za po tri uzorka. Rezultati su prikazani na slici VII-51.



Slika VII-51. I faza – Srednja visina dizanja kapilarno upijene vode po omotaču uzoraka maltera iz I faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-51 uočeno je sledeće:

- Vodovezivni faktor ima uticaj na visinu dizanja vode po omotaču uzoraka. U slučaju referentnog maltera, sa smanjenjem vodovezivnog faktora smanjuje se visina dizanja vode i nakon 28 dana i nakon 90 dana. Kod maltera sa 10% i 15% NZ vodovezivni faktor nema već uticaja, dok je u slučaju maltera sa 20% NZ sa smanjenjem vodovezivnog faktora došlo do povećanja visine dizanja vode po omotaču uzorka, naročito nakon 90 dana. U slučaju maltera koji sadrže FA, sa smanjenjem vodovezivnog faktora došlo je do smanjenja visine upijanja vode nakon 28 dana, dok se nakon 90 dana javilo blago povećanje.
- Sa povećanjem starosti maltera smanjuje se visina dizanja kapilarno upijene vode po omotaču uzoraka, izuzev u slučaju maltera NZ20b starog 90 dana kod kojeg je došlo do njenog povećanja.
- Najveću visinu dizanja vode po omotaču nakon 28 dana imao je malter PCa, a nakon 90 dana malter NZ20b.
- U slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,5$ starih 28 dana najveća visina dizanja vode zabeležena je kod maltera PCa, potom kog maltera sa FA kao SCM kod kojih se visina smanjuje sa porastom udela FA, dok najmanja visina zabeležena

kod maltera koji sadrže NZ kao SCM, kod kojih takođe opada sa porastom udela NZ.

- U slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,5$ starih 90 dana, sa povećanjem supstitucije PC sa NZ dolazi do smanjenja visine dizanja vode. U slučaju zamene PC sa FA takođe dolazi do smanjenja visine dizanja vode po omotaču u odnosu na vrednosti za PCa s tim da je ona kod maltera FA10a i FA15a u istom rangu, dok je kod maltera FA20a povišena u odnosu na vrednosti dobijene za FA10a i FA15a. Odnosno, u ovom slučaju dolazi do smanjenja visine dizanja vode kod maltera koji sadrže FA kao SCM, ali na nju srazmerno ne utiče količina udela FA.
- U slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,4$ najmanja vrednost dizanja vode po omotaču zabeležena je kod maltera PCb starih 28 i 90 dana, dok je najveća visina dizanja vode zabeležena je kod maltera NZ10b starog 28 dana i NZ20b starog 90 dana.
- U slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,4$ starih 28 dana sa povećanjem udela NZ odnosno FA dolazi do smanjenja visine dizanja vode, a trend smanjenja je sličan za isti procenat zamene PC sa prethodno navedenim SCM.
- U slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,4$ starih 90 dana sa povećanjem udela NZ do 15% dolazi do smanjenja visine dizanja vode, dok se pri nivou supstitucije od 20% javlja značajno povećanje upijanja vode po omotaču uzorka. Pri istoj starosti maltera i za isti vodovezivni faktor, dizanje vode po omotaču uzoraka maltera FA10b je u rangu sa FA15b, dok je kod maltera FA20b izmereno veće upijanje po omotaču.

1.3.3. Mineraloški sastav pasta određen metodom rendgenske-difrakcije (XRD) – Komparativna analiza

Na slikama VII-39 i VII-44 su prikazani rezultati mineraloškog sastava pasta starosti 28, 90 i 180 dana, koje sadrže 0%, 10%, 15% i 20% NZ odnosno FA kao SCM, u vidu XRD dijagrama. Zajedničko za sve paste je da su produkti hidratacije C-S-H gel, $Ca(OH)_2$ u kristalnom obliku-portlandit i etringit. Kod svih pasta kalcijum hemikarbonat i monokarbonat su prisutni za starost 28 dana, a monokarbonat za starost 180 dana. Kod referentne paste i paste koja sadrži 10% NZ, pri starosti 90 dana, potvrđeno je prisustvo kalcijum monokarbonata i kalcijum hemikarbonata. Kod pasta sa FA u svim pastama je prisutan hemikarbonat nakon 28 dana. Za starost 90 dana kalcijum hemikarbonat je prisutan kod paste sa 20% učešća FA. Za starost 180 dana prisutan je samo monokarbonat u referentnoj i pasti sa 20 % učešća FA. Pri svim starostima pasta koje sadrže FA potvrđeno je prisustvo i C-A-S-H gela. Kod pasta koje sadrže NZ prisutni su pikovi koji odgovaraju klinoptilolitu za sve starosti pasta, što ukazuje da je proces hidratacije i dalje u toku.

Na osnovu relativnih odnosa intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu kod pasta koje sadrže NZ i kod onih koje sadrže FA kao SCM, starosti 28 dana, može se zaključiti da je došlo do veće potrošnje portlandita u slučaju pasta koje sadrže FA, dok su intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu u slučaju pasti sa NZ u rangu sa onima kod referentne paste što ukazuje na odloženu pucolansku reakciju NZ. Nakon 90 dana detektovan je veći sadržaj portlandita kod pasti koje sadrže 10% NZ u odnosu na paste koje u istom procentu sadrže FA, dok je sadržaj portlandita kod obe vrste pasti pri nivou zamene PC od 15% ujednačen, što je slučaj i pri nivou zamene od 20%. Nakon 180 dana, intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu su manji u slučaju pasta koje sadrže NZ u odnosu na one koje sadrže FA, pri istim procentima supstitucije PC.

Glavni pik C-S-H gela (2θ : 29,36°) je prisutan za sve starosti svih ispitanih pasta. Za razliku od pasta na bazi FA, ovaj pik je mnogo "uži", odnosno kristaličniji kod pasta koje sadrže NZ, što ukazuje na manju promenu atomskih odnosa u kristalnoj strukturi u odnosu na paste sa FA. Tu se pre svega misli na odnos Al/Si. Veća kristaličnost i uži pik ukazuje da je manja verovatnoća da se formirao C-A-S-H gel kod pasta koje sadrže NZ. Na ovo upućuje i hemijski sastav NZ-a, odnosno manji sadržaj Al₂O₃ oksida u poređenju sa FA.

1.3.4. Strukturne promene pasta određene metodom infracrvene spektriskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR) – Komparativna analiza

U okviru FTIR spektroskopije analizirani su apsorpcioni spektri koji su povezani sa infracrvenim aktivnim grupama Si-O-Al, Si-O, Si-O-Si, H₂O, OH⁻, CO₃⁻² i SO₄²⁻.

Na osnovu FTIR spektara prikazanih na VII-40 i VII-45 može se zaključiti sledeće:

- Položaj apsorpcionih traka koje se vezuju za C-S-H gel (vibracije Si-O-Al, Si-O-Si) se pomera, jer njegova strukturna uređenost varira. Strukturna uređenost ovog gela se menja sa protokom vremena hidratacije, kao i sa strukturnim i hemijskim svojstvima pucolana. NZ, kao pucolanski materijal koji zamenjuje PC, se po hemijskom sastavu razlikuje od FA. Sadržaj silicijum oksida kod NZ je 65,151 % što je znatno više od količine ovog oksida kod FA (45,903 %). S druge strane, sadržaj aluminijum oksida kod NZ je 12,415 % što je manje nego kod FA (21,324 %). Ovi podaci ukazuju da bi u formiranju C-S-H gela, kao najvažnijeg produkta hidratacije, moglo da učestvuje više Si nego kod PC i NZ, a manje aluminijuma nego kod PC i FA.
- Poređenje položaja apsorpcionih traka kod FA i NZ ukazuje da postoji sličnost u pogledu uticaja proteklog vremena hidratacije. Kod obe grupe pasta je karakteristično da nakon 28 dana dolazi do pomeranja apsorpcionih traka od vrednosti dobijene za referentni uzorak (~ 970 cm⁻¹) ka većim vrednostima talasnog broja, odnosno frekvencije, da bi se sa protokom vremena primetilo

vraćanje ka položaju datog pika kod referentnog uzorka. Početno pomeranje ka većim vrednostima ukazuje da proces hidratacije prati proces rastvaranja odgovarajućih faza i oslobađanja Si^{+4} i Al^{+3} jona u porni rastvor i potom njihov ulazak u strukturu pomenutog gela. Takođe se može zaključiti da pored brzine procesa rastvaranja i hemijski sastav ima uticaj na položaj apsorpcionih traka, jer NZ sa većim sadržajem silicijuma ima mnogo veće početno pomeranje ka većim vrednostima talasnog broja nego FA. U okviru svake grupe pasta se zapaža da su najveće promene u grupi FAa za pastu P-FA10a, a u grupi NZa za pastu P-NZ20a.

- Nakon 180 dana položaj apsorpcione trake je takav da ukazuje na veće vrednosti odnosa Si/Al o u NZa pastama, dok kod FAa pasta je najverovatnije veća vrednost odnosa Al/Si .
- Prevoj koji se javlja $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ kod referentnog uzorka i koji se pripisuje T-O-Si (T= Si, Al) vibracijama kod FA pasta se pomera ka nižim vrednostima (1087 cm^{-1}), što je najverovatnije posledica (i) superponiranja pikova koji se odnose na prisustvo mulita i kvarca u FA, kao i (ii) vibracija SO_4^{2-} grupe u sulfatima. Kod NZ pasta sa povećanjem sadržaja NZ-a ovaj prevoj nije tako izražen, Takođe, kod NZ pasta on je nešto uočljiviji nakon 90 i 180 dana hidratacije.
- Prisustvo karbonata u obliku vaterita i kalcita je potvrđeno FTIR spektroskopijom za obe grupe pasti. Kod pasti FA se učešće vaterita smanjuje sa protokom procesa hidratacije, tako da nakon 180 dana hidratacije preovlađuje kalcit. Za razliku od FA kod NZ pasta je dominantan vaterit, naročito nakon 180 dana hidratacije. Pored kalcijum karbonata registrovan je i dolomit.

1.4. Zaključci I faze istraživanja

Svi malteri iz I faze ispitivanja su ispunili uslov da im je $R_{c,28} \geq 45$ MPa, i da im je koeficijent kapilarnog upijanja $\leq 0,5 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-0,5}$, te sa aspekta čvrstoće pri pritisku i kapilarnog upijanja vode spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera u skladu sa standardom EN 1504-3 [23].

Na osnovu rezultata ispitivanja maltera i pasta u okviru I faze istraživanja mogu se izvesti i sledeći zaključci:

Čvrstoća pri pritisku

- Vodovezivni faktor ima najizraženiji uticaj na vrednosti čvrstoće pri pritisku referentnih maltera i maltera spravljenih sa SCM za sve ispitivane starosti. Sa smanjenjem vodovezivnog faktora povećavaju se čvrstoće referentnih maltera prosečno za 37%, maltera sa 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita za 27%, 26% i 29% respektivno i maltera sa 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela za 31%, 28% i 32% respektivno;
- Vrsta i nivo zamene cementa sa SCM takođe nemaju značajnijeg uticaja na čvrstoću pri pritisku za vrednost vodovezivnog faktora 0,5. U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 jedino malter sa 15% elektrofilterskog pepela ima veće čvrstoće u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti za više od 10%. Preostali malteri iz prve faze ispitivanja imaju čvrstoće pri pritisku za sve ispitivane starosti u rangsu sa odgovarajućim vrednostima referentnih maltera;
- Vrsta i nivo zamene cementa sa SCM nema značajnijeg uticaja na čvrstoću pri pritisku u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, s obzirom da su čvrstoće pri pritisku maltera iz prve faze ispitivanja, spravljenih sa ovim vodovezivnim faktorom, u rangsu sa odgovarajućim referentnim vrednostima;
- Čvrstoće pri pritisku maltera koji sadrže prirodni zeolit su manje u odnosu na odgovarajuće čvrstoće maltera sa elektrofilterskim pepelom. Za vrednost vodovezivnog faktora 0,5, smanjenja su cca 3% (za učešće SCM 10%), 9% (za učešće SCM 15%) i 4% (za učešće SCM 20%), a za vrednost vodovezivnog faktora 0,4, smanjenja su cca 6% (za učešće SCM 10%), 10% (za učešće SCM 15%) i 6% (za učešće SCM 20%). Sva smanjenja su u opsegu do 10%.

Navedeni zaključci ukazuju na visoku pucolansku aktivnost oba SCM materijala u malterskim mešavinama, što je u skladu sa rezultatima karakterizacije prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela.

Kapilarno upijanje vode

- Smanjenjem vodovezivnog faktora (sa 0,5 na 0,4) dolazi do značajnog smanjenja kapilarnog upijanja vode, kako referentnog cementnog, tako i maltera spravljenih sa obe vrste SCM. Smanjenje kapilarnog upijanja vode za starost 28 dana iznosi prosečno 57% za referentni malter, 45%, za maltere sa 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita i 36%, 34% i 36% za maltere sa 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela, respektivno. Smanjenje kapilarnog upijanja vode za starost 90 dana iznosi prosečno 58% za referentni malter, 38%, 42% i 32%, za maltere sa 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita, respektivno i 41%, 33% i 36% za maltere sa 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela, respektivno;
- Prirodni zeolit utiče na smanjenje kapilarnog upijanja vode, odnosno sa povećanjem udela prirodnog zeolita smanjuje se kapilarno upijanje vode. Međutim, doprinos smanjenju kapilarnog upijanja zavisi od vrednosti vodovezivnog faktora. Sa povećanjem vodovezivnog faktora, izraženiji je uticaj količine prirodnog zeolita kao SCM na smanjenje kapilarnog upijanja vode. Sa povećanjem učešća prirodnog zeolita u malterima sa vodovezivnim faktorom 0,5, starosti 28 dana, smanjuje se kapilarno upijanje vode u odnosu na referentni malter za 15%, 29% i 36%, za učešća prirodnog zeolita 10%, 15% i 20%, respektivno, a u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, smanjenje kapilarnog upijanja vode je 9% i 17% za učešće 15% i 20%, dok je za učešće prirodnog zeolita od 10% došlo do povećanja upijanja vode od 10%. Sa povećanjem učešća prirodnog zeolita u malterima sa vodovezivnim faktorom 0,5, starosti 90 dana, smanjuje se kapilarno upijanje vode u odnosu na referentni malter za 23%, 41% i 47%, za učešća prirodnog zeolita 10%, 15% i 20%, respektivno, a u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, smanjenje kapilarnog upijanja vode je 19% i 15% za učešće 15% i 20%, dok je za učešće prirodnog zeolita od 10% došlo do povećanja upijanja vode od 13%;
- Elektrofilterski pepeo utiče na smanjenje kapilarnog upijanja vode. Sa povećanjem količine elektrofilterskog pepela smanjuje se kapilarno upijanje. Međutim, efekat smanjenja kapilarnog upijanja prvenstveno zavisi od starosti maltera. Sa povećanjem učešća elektrofilterskog pepela u malterima sa vodovezivnim faktorom 0,5, kapilarno upijanje vode pri starosti od 90 dana u odnosu na odgovarajuće vrednosti kapilarnog upijanja za starost 28 dana se smanjilo 52%, 59% i 61%, za učešća elektrofilterskog pepela 10%, 15% i 20%, respektivno, a u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, smanjenje kapilarnog upijanja vode je 56%, 58,% i 61% za navedena učešća, respektivno;
- Prirodni zeoliti imaju manji doprinos smanjenju kapilarnog upijanja vode sa povećanjem starosti u odnosu na elektrofilterski pepeo. Pri starosti od 28 dana, u grupi maltera sa vodovezivnim faktorom 0,5, malteri sa prirodnim

zeolitom imaju veće kapilarno upijanje u odnosu na maltere sa elektrofilterskim pepelom, a za grupu sa vodovezivnim faktorom 0,4, je izveden suprotan zaključak. Pri starosti maltera od 90 dana, malteri sa prirodnim zeolitom imaju veće kapilarno upijanje u odnosu na maltere sa elektrofilterskim pepelom za obe vrednosti vodovezivnog faktora;

- Ispitivani malteri imaju različitu kinetiku upijanja vode. Referentni malteri sa oba vodovezivna faktora, malteri sa vodovezivnim faktorom 0,5 i prirodnim zeolitom, i malteri sa vodovezivnim faktorom 0,4 i elektrofilterskim pepelom upijaju vodu po linearnom zakonu, dok ostali malteri pokazuju nelinearnu kinetiku upijanja vode.

Kapilarno upijanje vode zavisi od sva tri analizirana paramera. Najveći uticaj na smanjenje kapilarnog upijanja vode kod maltera sa prirodnim zeolitima ima vodovezivni faktor, dok je kod maltera sa elektrofilterskim pepelom dominantan uticaj starosti. Prirodni zeoliti imaju manji doprinos smanjenju kapilarnog upijanja vode sa povećanjem starosti u odnosu na elektrofilterski pepeo.

XRD analiza

- Rezultati XRD analize cementnih pasta koje sadrže prirodni zeolit, odnosno elektrofilterski pepeo kao SCM, starosti 28, 90 i 180 dana su pokazali da su za sve paste zajednički produkti hidratacije C-S-H gel, Ca(OH)_2 u kristalnom obliku – portlandit i etringit;
- Kod svih pasta koje sadrže prirodni zeolit kao SCM javlja se monokarbonat za starosti od 28 i 180 dana, i hemikarbonat za starosti od 28 dana. Njihovo prisustvo se uočava i kod paste koja sadrži 10% prirodnog zeolita pri starosti od 90 dana. Kod svih pasta sa prirodnim zeolitom, za sve starosti, prisutni su pikovi koji odgovaraju klinoptilolitu, što ukazuje da zeolit nije u potpunosti izreagovao. Poređenjem intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu, čija potrošnja je indikator pucolanske reakcije, zaključuje se da tek pri starosti od 180 dana dolazi do značajnijeg smanjenja intenziteta ovog pika u odnosu na vrednost intenziteta pika kod čiste cementne paste odgovarajuće starosti. Kod pasta sa prirodnim zeolitom je veoma izražena karbonatizacija koja se uočava kroz formiranje kalcita za sve starosti, a vaterita pri starosti od 180 dana. Najveći relativni udeo etringita (*delayed ettringite formation*) u svim pastama sa prirodnim zeolitom je uočen za starost 90 dana.
- Kod svih pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo kao SCM javlja se hemikarbonat za starosti od 28 i 90 dana, i monokarbonat samo u slučaju paste koja sadrži 10% elektrofilterskog pepela pri starosti od 180 dana. Kod svih pasta za sve starosti detektovano je i prisustvo neizreagovanog mulita koji potiče iz elektrofilterskog pepela. Kod pasta koje sadrže 15% i 20%

elektrofilterskog pepela dolazi do smanjenja intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu već nakon 28 dana. Do značajnog smanjenja intenziteta ovog pika kod svih pasta sa elektrofilterskim pepelom dolazi nakon 180 dana. Potom, kod svih pasta se uočava formiranje prvenstveno kalcita, a potom i vaterita. Kod svih pasta sa elektrofilterskim pepelom je veoma izraženo prisustvo etringita za sve starosti uzoraka što se prepisuje pojavi *delayed ettringite formation*. Intenzitet pika koji odgovara etringitu (2θ : $9,1^\circ$) se povećao pri starosti od 90 u odnosu na 28 dana, dok pri starosti od 180 dana ostaje isti ili nešto manji u odnosu na intezitet pika pri starosti od 90 dana, Najveći intenzitet ovog pika ima pasta sa 20% elektrofilterskog pepela. Kod pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo potvrđeno je prisustvo i C-A-S-H gela.

Na osnovu relativnih odnosa intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu kod pasta koje sadrže prirodni zeolit i kod onih koje sadrže elektrofilterski pepeo kao parcijalnu zamenu cementa, starosti 28 dana, može da se zaključi da je došlo do veće potrošnje portlandita u slučaju pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo, dok su intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu u slučaju pasta sa prirodnim zeolitom u rangu sa onima kod referentne paste što ukazuje na odloženu pucolansku reakciju prirodnog zeolita. Nakon 90 dana detektovan je veći sadržaj portlandita kod pasta koje sadrže 10% prirodnog zeolita u odnosu na paste koje u istom procentu sadrže elektrofilterski pepeo. Za starost 180 dana, intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu su manji u slučaju pasta koje sadrže prirodni zeolit u odnosu na one koje sadrže elektrofilterski pepeo, pri istim procentima supstitucije cementa. Kod pasta sa elektrofilterskim pepelom se pored C-S-H gela identifikovan je i C-A-S-H gel. Poređenjem intenziteta pikova koji odgovaraju etringitu kod pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo i prirodni zeolit utvrđeno je da je intenzitet pika veći kod pasta sa elektrofilterskim pepelom, za sve starosti.

FTIR spektroskopija

FTIR rezultati ispitanih cementnih pasta koje sadrže prirodni zeolit, odnosno elektrofilterski pepeo kao SCM, starosti 28, 90 i 180 dana, su potvrdili postojanje nekih faza identifikovanih primenom XRD analize, kao i promene koje su nastupile u C-S-H gelu u pogledu odnosa Ca/Si ili Al/Si.

- Paste sa prirodnim zeolitom kao SCM: Asimetrično istezanje CO_3^{2-} grupe iskazano kroz superponiranje dva pika oko 1422 cm^{-1} i pika između $1471\text{--}1482\text{ cm}^{-1}$ koji se pripisuju kristalnim strukturama kalcita i vaterita, vidljivo je za hidrataciju nakon 28 dana da bi nakon 180 dana hidratacije postao dominantan samo pik oko 1480 cm^{-1} koji se pripisuje vateritu. Postojanje apsorpcionih traka na $\sim 2840\text{ cm}^{-1}$ i na $\sim 2520\text{ cm}^{-1}$ ukazuje na prisustvo

dolomita. Na prisustvo portlandita je ukazalo prisustvo apsorpcione trake na $\sim 3642 \text{ cm}^{-1}$ kao posledica istežućih vibracija Ca-OH iz portlandita. Promene nastale u C-S-H gelu u pogledu odnosa Ca/Si i Al/Si su analizirane kroz pomeranje položaja apsorpcionih traka u odnosu na vrednost $\sim 971 \text{ cm}^{-1}$ koja odgovara pastama cementa za starost 28 dana. Nakon 28 dana hidratacije paste koje sadrže 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita postigle su vrednosti 987 cm^{-1} , 991 cm^{-1} i 995 cm^{-1} , respektivno, što je ukazalo na povećanje stepena polimerizacije strukture C-S-H gela sa manjim odnosom Ca/Si. Kod uzoraka starosti 180 dana dolazi do pomeranja date apsorpcione trake prema manjim talasnim brojevima 979 cm^{-1} , 989 cm^{-1} i 981 cm^{-1} za udele 10%, 15% i 20%, respektivno. Vrednost apsorpcionog broja za cementnu pastu je 977 cm^{-1} . Približavanje vrednosti apsorpcionog broja pasta sa zeolitom apsorpcionom broju cementne paste ukazuje najverovatnije na povećanje odnosa Ca/Si, s obzirom da XRD analiza ne ukazuje na formiranje C-A-S-H gela za ovu vrstu pasta. Na položaj apsorpcionog pika je uticala starost pasti i udeo prirodnog zeolita;

- Paste sa elektrofilterskim pepelom kao SCM: Pojava apsorpcione trake na $\sim 1422\text{-}1482 \text{ cm}^{-1}$ ($1429\text{-}1492 \text{ cm}^{-1}$, ν_3 - asimetrično istežanje CO_3^{2-} grupe ukazalo je na prisustvo karbonata, tj. mogu se pripisati superponiranju kristalnih struktura kalcita i vaterita u strukturi pasta sa elektrofilterskim pepelom. Postojanje apsorpcione trake odnosno prevoja (*shoulder*) na $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ može se pripisati prisustvu SO_4^{2-} molekulske vibracije koja može da ukaže na postojanje faze etringita. Na prisustvo portlandita je ukazalo prisustvo apsorpcione trake na $\sim 3642 \text{ cm}^{-1}$ kao posledica istežućih vibracija Ca-OH iz portlandita. Promene nastale u C-S-H gelu nakon 28 dana hidratacije ukazuje na malo pomeranje apsorpcionih vrednosti ka većim vrednostima u odnosu na vrednost cementne paste, $\sim 971 \text{ cm}^{-1}$. Pasta koje sadrže 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela su postigle sledeće vrednosti 977 cm^{-1} , 977 cm^{-1} i 974 cm^{-1} respektivno, što je ukazalo na povećanje stepena polimerizacije strukture C-S-H gela sa manjim odnosom Ca/Si. Do pomeranja apsorpcione trake prema manjim talasnim brojevima, 973 cm^{-1} (depolimerizacija C-S-H gela), dolazi nakon 180 dana hidratacije za sve paste sa elektrofilterskim pepelom u odnosu na vrednost apsorpcionog broja 977 cm^{-1} dobijenu za cementnu pastu, što je ukazalo na mogućnost nastanka C-A-S-H gela. Na položaj apsorpcionog pika je najviše uticala starost pasti;
- Poređenje rezultata FTIR analize pasta sa prirodnim zeolitom i elektrofilterskim pepelom kao SCM ukazuje da su najveće razlike u odnosu Ca/Si i Al/Si u C-S-H gelu. Postoji sličnost u pogledu uticaja starosti pasta na vrednosti apsorpcionih pikova vezanih za položaj C-S-H gela. Za obe grupe pasta je karakteristično da nakon 28 dana dolazi do pomeranja apsorpcionih

traka u odnosu na vrednost dobijenu za referentni uzorak ($\sim 970 \text{ cm}^{-1}$) ka većim vrednostima talasnog broja, da bi se sa protokom vremena primetilo vraćanje ka položaju datog pika kod referentnog uzorka. To ukazuje da za starost 28 dana imamo smanjenje odnosa Ca/Si, a za starost 180 dana povećanje odnosa Ca/Si ili Al/Si. Ovo su sličnosti između pasti na bazi prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela, a razlike su u tome što je povećanje vrednosti apsorpcionih brojeva u odnosu na referentni malter veće kod maltera sa prirodnim zeolitom. Ovo ukazuje da kalcijum kao jonoizmenjivački katjon prirodnog zeolita nije ušao u strukturu C-S-H gela. Pored navedenog ustanovljeno je da pasta koja sadrži 20% prirodnog zeolita i pasta koja sadrži 10% elektrofilterskog pepela su uzrokovale najveće promene adsorpcionih brojeva vezanih za C-S-H gel;

- Nakon 180 dana položaj apsorpcione trake je takav da ukazuje na veće vrednosti odnosa Si/Al u pastama sa prirodnim zeolitom, dok je kod pasta sa elektrofilterskim pepelom najverovatnije veća vrednost odnosa Al/Si;
- Prisustvo karbonata u obliku vaterita i kalcita je potvrđeno FTIR spektroskopijom za obe grupe pasta. Kod pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo se učešće vaterita smanjuje sa protokom procesa hidratacije, tako da nakon 180 dana preovlađuje kalcit. Za razliku od njih, kod pasta koje sadrže prirodni zeolit je dominantan vaterit, naročito nakon 180 dana hidratacije. Pored kalcijum karbonata registrovan je i dolomit.

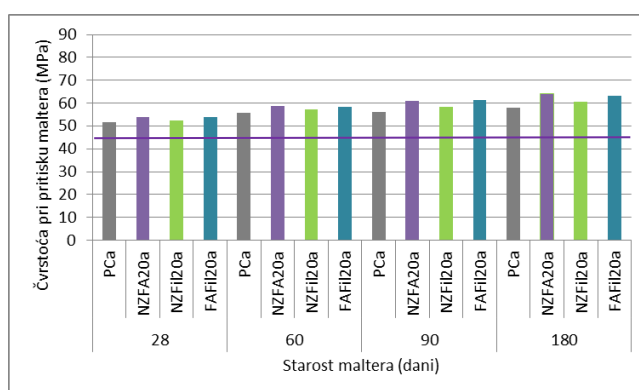
2. II FAZA ISTRAŽIVANJA

2.1. Analiza rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku cementnih maltera kod kojih je 20% PC supstituisano sa mešavinom NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil – II faza

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u Prilogu 7 i srednjih vrednosti čvrstoće pri pritisku maltera datih u poglavlju VI-10.1.1., na slici VII-52 prikazane su srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku maltera kod kojih je 20% PC supstituisano sa mešavinom NZ i FA (10% NZ +10% FA) NZ i filera (10% NZ +10% filera), i FA i filera (10% FA +10% filera). Svi malteri iz II faze ispitivanja su spravljani isključivo sa vodovezivnim faktorom 0,5, a čvrstoće pri pritisku su im ispitane pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana.

S obzirom na dobijene rezultate pri starosti od 28 dana, i malteri iz II faze ispitivanja su ispunili uslov da im je $R_{c,28} \geq 45$ MPa, te prema standardu EN 1504-3 [23] pripadaju klasi R4 konstrukcijskih maltera sa aspekta čvrstoće pri pritisku ispitane u skladu sa standardom EN 12190 [17].

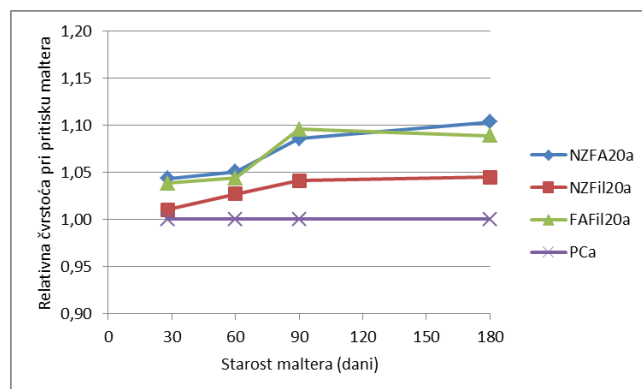
Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-52, jasno se može uočiti da su dobijene veće čvrstoće pri pritisku kod maltera NZFA20a, referentnih SCM maltera sa filerom NZFil20a i FAFil20a u odnosu na referentni cementni malter PCa, pri svim ispitanim starostima maltera. Opseg čvrstoća prethodno navedenih maltera, ispitanih pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana i spravljanih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, iznosi: 51,72-53,96 MPa, 55,78-58,59 MPa, 56,15-61,51 MPa i 58,13-64,12 MPa, respektivno.



Slika VII-52. II faza – Čvrstoće pri pritisku referentnog maltera PCa i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a

Relativne čvrstoće pri pritisku maltera iz II faze ispitivanja, prikazane na slici VII-53, su bile veće od odgovarajućih referentnih u periodu od 28 do 180 dana od njihovog spravljavanja, ali se nisu razlikovale za više od 10% u odnosu na referentne vrednosti,

izuzev u slučaju maltera NZFA20a čija je relativna čvrstoća pri pritisku premašila odgovarajuću referentnu vrednost za 10,31% nakon 180 dana nege. Može se istaći i da je malter FAFil20a u periodu između 90 i 180 dana nakon spravljanja imao za cca 9% veću relativnu čvrstoću u odnosu na referentni malter, te je skoro dostigao graničnih 10%.



Slika VII-53. II faza – Relativna čvrstoća pri pritisku referentnog maltera PCa i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a

Nakon 28, 60, 90 i 180 dana nege, relativne čvrstoće pri pritisku maltera NZFA20a su bile veće od referentnih za 4,33%, 5,04%, 8,53% i 10,31%, u slučaju maltera NZFil20a za 1,01%, 2,71%, 4,08% i 4,48%, i u slučaju maltera FAFil20a za 3,83%, 4,39%, 9,55% i 8,87%, respektivno. Pri starosti od 28 i od 180 dana poredak maltera po čvrstoći pri pritisku je sledeći: NZFA20a ≥ FAFil20a > NZFil20a > PCa.

U tabeli VII-47. su prikazane vrednosti čvrstoće pri pritisku maltera NZFil20a i FAFil20a, kao i maltera iz I faze ispitivanja kod kojih je 10% PC-a supstituisano sa NZ, odnosno sa FA (malteri NZ10a i FA10a), kako bi se na praktičan način proverilo da li se filer (CaCO_3), u ovom konkretnom slučaju ponaša kao inertan materijal, odnosno da li doprinosi povećanju čvrstoće pri pritisku maltera NZFil20a i FAFil20a u toku vremena. S obzirm da se poredе malteri sa istom količinom SCM-a (od 10%) i različitim udelom PC-a (90% kod maltera NZ10a i FA10a, i 80% kod maltera NZFil20a i FAFil20a), očekuje se blago smanjenje čvrstoće pri pritisku maltera NZFil20a i FAFil20a u odnosu na maltere NZ10a i FA10a, respektivno, u slučaju da je filer inetran, ali i zbog manjeg udela PC-a.

Pri svim ispitanim starostima, čvrstoće pri pritisku maltera NZFil20a i FAFil20a su bile manje u odnosu na čvrstoće maltera NZ10a i FA20a, respektivno, što ukazuje na inertnost primenjenog filera.

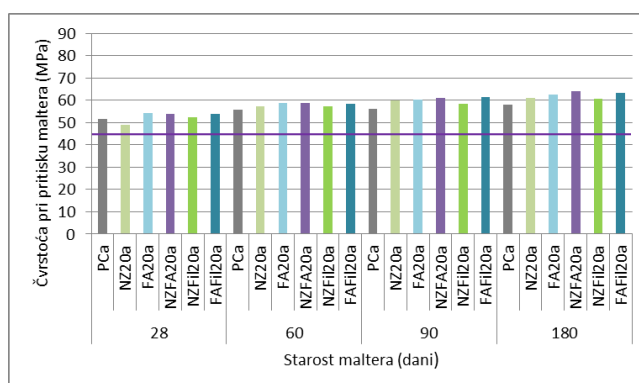
Tabela VII-47. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera NZ10a FA10a, NZFil20a i FAFil20a

Vrsta maltera	Čvrstoća pri pritisku, R_c (MPa)			
	$R_{c,28}$	$R_{c,60}$	$R_{c,90}$	$R_{c,180}$
NZ10a	55,521	58,333	61,458	62,083
FA10a	55,365	60,365	63,542	64,844
NZFil20a	52,240	57,292	58,438	60,729
FAFil20a	53,698	58,229	61,510	63,281

2.2. Komparativna analiza rezultata čvrstoće pri pritisku maltera iz II faze ispitivanja i odgovarajućih maltera iz I faze ispitivanja

U slučaju maltera NZFA20a, kao i referentnih SCM maltera sa filerom NZFil20a i FAFil20a, udeo PC je konstantan (80%), zbog čega se rezultati čvrstoće pri pritisku ovih maltera porede sa čvrstoćom maltera NZ20% i FA20% iz I faze ispitivanja (kod kojih je udeo PC-a takođe 80%).

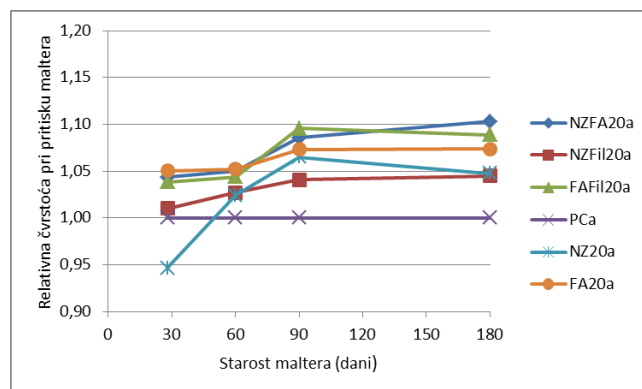
Čvrstoće pri pritisku maltera NZFA20a, referentnih SCM maltera sa filerom NZFil20a i FAFil20a, referentnog maltera PCa, kao i referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a, ispitane nakon 28, 60, 90 i 180 dana nege, prikazane su na slici VII-54. Opseg čvrstoća prethodno navedenih maltera, pri starosti od 28, 60, 90 i 180 dana, iznosi: 48,96-54,33 MPa, 55,78-58,70 MPa, 56,15-61,51 MPa i 58,13-64,12 MPa, respektivno.



Slika VII-54. Čvrstoća pri pritisku referentnog maltera PCa, referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a, i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a

Relativne čvrstoće pri pritisku maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, referentnog maltera PCa, kao i referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a, dobijene nakon 28, 60, 90 i 180 dana nege, prikazane su na slici VII-55. Na osnovu prikazanih rezultata jasno se može uočiti da do starosti od 90 dana postoje razlike u prirastu čvrstoće pri pritisku kod maltera koji sadrže SCM, a nakon tog perioda im je prirast čvrstoće podjednak. Jedino je malter NZFA20a imao veću relativnu čvrstoću pri pritisku za više od 10% u

odnosu na referentni malter, i to isključivo nakon 180 dana nege. Malter FAFil10a je imao za cca 9% veće relativne čvrstoće u odnosu na odgovarajuće referentne, ali samo u periodu između 90 i 180 dana od spravljanja. Relativne čvrstoće pri pritisku preostalih maltera se nisu razlikovale za više od 10% u odnosu na referentne vrednosti, odnosno čvrstoće pri pritisku su im ostale u rangi referentnih.



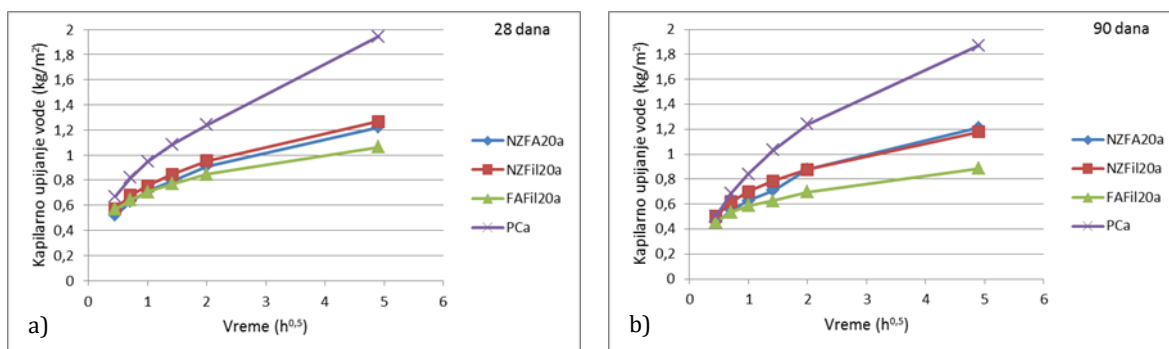
Slika VII-55. Relativna čvrstoća pri pritisku referentnog maltera PCa, referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a, i maltera iz II faze ispitivanja: NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a

Pri starosti od 28 dana poredak po prosečnoj čvrstoći pri pritisku ispitanih je sledeći: FA20a \approx NZFA20a \approx FAFil20a > NZFil20a \approx PCa > NZ20a, dok je nakon 180 dana nege poredak sledeći: NZFA20a > FAFil20a > FA20a > NZ20a \approx NZFil20a > PCa.

2.3. Analiza rezultata ispitivanja kapilarnog upijanja vode cementnih maltera kod kojih je 20% PC supstituisano sa mešavinom NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil – II faza

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 8, kao i rezultata ispitivanja prikazanih u poglavlju VI-10.1.2. na slici VII-56 prikazana je kinetika kapilarnog upijanja vode maltera NZFA20a, referentnih SCM maltera sa filerom NZFil20a i FAFil20a, kao i referentnog cementnog maltera PCa, starosti 28 i 90 dana.

Na osnovu dijagrama prikazanih na slici VII-56 može se zaključiti da na kinetiku kapilarnog upijanja vode, pri istoj količini supstitucije cementa (od ukupno 20%), ima uticaj primenjena kombinacija NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil sa masenim odnosom 1:1, u poređenju sa kinetikom upijanja vode referentnog PCa maltera, a da uticaj ima i starost uzoraka u trenutku ispitivanja.



Slika VII-56. II faza – Kinetika kapilarnog upijanja vode referentnog maltera PCa i maltera iz II faze ispitivanja: a) Starosti 28 dana b) Starosti 90 dana

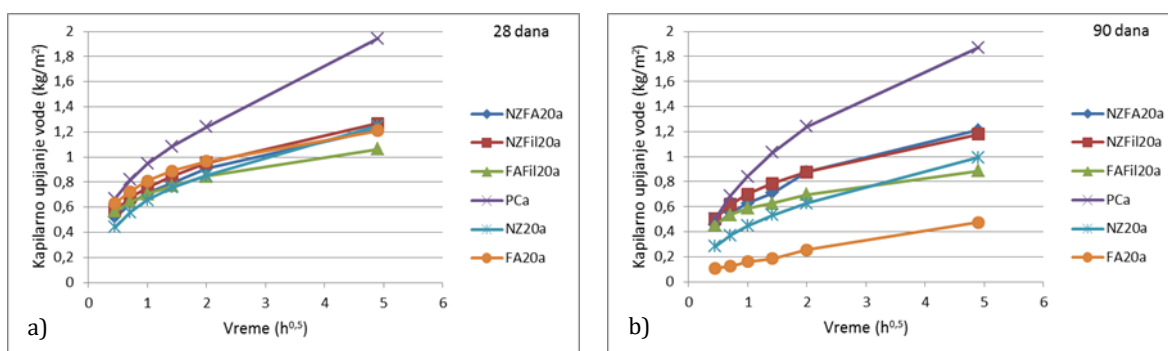
Na osnovu prikazanih dijagrama (slika VII-56) evidentno je da malteri NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, pri starosti od 28 i 90 dana, imaju manje vrednosti kapilarnog upijanja vode, u ispitivanom vremenskom periodu, u odnosu na referentni malter PCa, kao i da im sami dijagrami imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja, što je naročito izraženo u slučaju maltera NZFA20a i NZFil20a. Nakon 24h ispitivanja maltera starosti 28 dana, najveće kapilarno upijanje vode imao je referentni PCa malter, potom malteri NZFil20a i NZFA20a, respektivno (vrednosti su im bliske), dok je malter FAFil20a imao najmanje kapilarno upijanje. Pri starosti od 90 dana, došlo je do smanjenja kapilarnog upijanja vode maltera PCa, NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a za 3,71%, 0,89%, 6,97% i 16,56%, respektivno, u odnosu na odgovarajuće vrednosti upijanja dobijene pri starosti istih maltera od 28 dana. Najveće kapilarno upijanje je i nakon 90 dana hidratacije imao malter PCa, potom malteri NZFA20a i NZFil20a, čije vrednosti su u rangu, dok je najmanje kapilarno upijanje imao malter FAFil20a.

S obzirom da je standardom EN 13057 [45] propisano da se ispitivanje kapilarnog upijanja vode radi na uzorcima starim 28 dana, ti rezultati su detaljnije analizirani. Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode referentnog maltera PCa, kao i maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 28 dana, nakon 24h ispitivanja, iznose 1,944 kg/m², 1,223 kg/m² (-37,10%), 1,267 kg/m² (34,81%) i 1,062 kg/m² (-45,37%).

Na osnovu koeficijenata kapilarnog upijanja vode maltera iz II faze ispitivanja starih 28 dana, prikazanih u tabeli VI-29, malter NZFA20a, kao i njegovih referentni SCM malteri sa filerom (NZFil20a i FAFil20a) ispunjavaju kriterijum za klasu R4 konstrukcijskog reparaturnog maltera, s obzirom da su im koeficijenti kapilarnog upijanja $\leq 0,5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-0,5}$. Navedeni uslov su ispunili i isti malteri pri starosti od 90 dana (tabela VI-30).

2.4. Komparativna analiza rezultata kapilarnog upijanja vode maltera iz II faze ispitivanja i odgovarajućih maltera iz I faze ispitivanja

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 8, kao i rezultata ispitivanja prikazanih u poglavlju VI-10.1.2. na slici VII-57 prikazana je kinetika kapilarnog upijanja vode maltera NZFA20a, referentnih SCM maltera sa filerom NZFil20a i FAFil20a, kao i referentnog maltera PCa i referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a iz I faze ispitivanja, starosti 28 i 90 dana. Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 24h, za svaku vrstu navedenih maltera prikazane su na slici VII-58, dok su relativne vrednosti kapilarnog upijanja maltera prikazane na slici VII-59. Na osnovu regresione analize rezultata kapilarnog upijanja vode u periodu do 24 h, (Prilog 8) određene su vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja. Dobijeni rezultati su prikazani u tabelama VI-29 i VI-30 (Poglavlje VI-10.1.2.). Dodatno je izmerena i visina dizanja vode po omotaču uzoraka nakon 2h od početka ispitivanja kapilarnog upijanja vode, a rezultati su prikazani na slici VII-60.



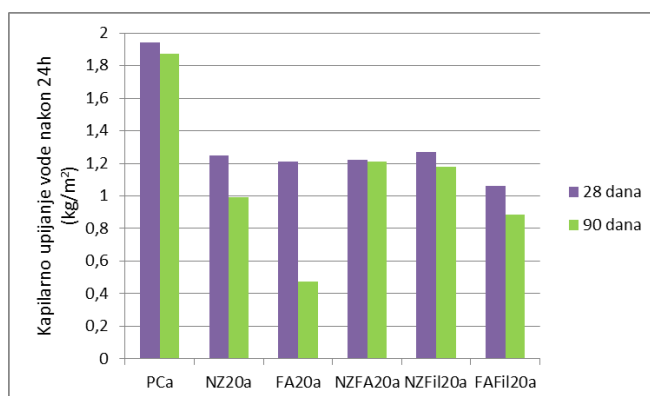
Slika VII-57. Kinetika kapilarnog upijanja vode maltera iz II faze ispitivanja, referentnog maltera PCa i odgovarajućih maltera iz I faze ispitivanja: a) Starosti 28 dana b) Starosti 90 dana

Na osnovu prikazanih dijagrama (slika VII-57) kapilarnog upijanja vode može se zaključiti da na kinetiku kapilarnog upijanja vode, pri istoj količini supstitucije cementa, različito utiče primena samo NZ ili FA, ili kombinacija NZ+FA, NZ+Fil ili FA+Fil sa masenim odnosom 1:1, kao i starost uzoraka u trenutku ispitivanja.

Na osnovu prikazanih dijagrama (slike VII-57 i VII-58) evidentno je da malteri NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, pri starosti od 28 i 90 dana, imaju manje vrednosti kapilarnog upijanja vode (nakon 24h od početka ispitivanja) u odnosu na referentni malter PCa. Pri starosti od 28 dana, kapilarno upijanje vode maltera smanjuje se sledećim redosledom: PCa > NZFil20a ≥ NZ20a ≥ NZFA20a ≥ FA20a > FAFil20a. Dijagrami kapilarnog upijanja vode maltera NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, NZ20a i FA20a imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja u odnosu na referentni PCa malter.

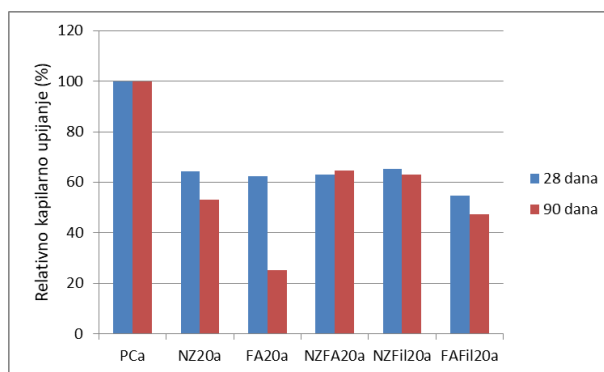
Nakon 90 dana hidratacije, došlo je do smanjenja kapilarnog upijanja vode maltera PCa, NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, NZ20a i FA20a za 3,71%, 0,89%, 6,97%, 16,56%, 20,51% i 60,77%, respektivno, u odnosu na odgovarajuće vrednosti upijanja dobijene pri starosti istih maltera od 28 dana. Pri starosti maltera od 90 dana kapilarno upijanje vode se smanjuje sledećim redosledom: PCa > NZFA20a ≥ NZFil20a > NZ20a > FAFil20a > FA20a. Dijagrami kapilarnog upijanja vode maltera NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, pa čak i NZ20a imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja, za razliku od maltera FA20a sa jedne strane i referentnog maltera PCa sa druge strane.

Ako se posebno analizira malter NZFA20a, s obzirom da je mešavina NZ i FA od posebnog značaja za II fazu ispitivanja, u odnosu na maltere NZFil20a, FAFil20a, NZ20a, FA20a i PCa može jasno da se uoči da je pored sastava mešavine, i starost maltera u trenutku ispitivanja faktor koji utiču na kapilarno upijanje vode. Malter NZFA20a pri starosti od 28 dana, imao je za 2,28%, 3,64% i 58,98% manju vrednost kapilarnog upijanja nakon 24 h ispitivanja od maltera NZ20a, NZFil20a i PCa, a za 1,06% i 13,15% veće upijanje od maltera FA20a i FAFil20a, respektivno. Međutim, pri starosti od 90 dana malter NZFA20a je imao manje kapilarno upijanje vode jedino od maltera PCa, i to za čak 54,45% dok je imao veće kapilarno upijanje vode od maltera NZ20a, FA20a, NZFil20a i FAFil20a za 17,96%, 60,84%, 2,72% i 26,89%, respektivno.



Slika VII-58. Srednje vrednosti kapilarnog upijanja vode nakon 24h za svaku vrstu maltera iz II faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Relativne vrednosti kapilarnog upijanja vode maltera iz II faze ispitivanja, dobijene pri ispitivanju uzoraka starih 28 i 90 dana, prikazane su na slici VII-59. Primena samo jedne vrste SCM u mešavini ima veći uticaj na smanjenje kapilarnog upijanja vode maltera pri starosti od 90 dana u odnosu na 28 dana. Relativno kapilarno upijanje vode maltera NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, NZ20a i FA20a starih 28 dana, je manje za 37,10%, 34,81%, 45,37%, 35,66% i 37,77% u odnosu na relativno upijanje referentnog maltera PCa, dok je kod istih uzoraka starih 90 dana manje za 35,25%, 37,01%, 52,66%, 46,89% i 74,64%, respektivno.

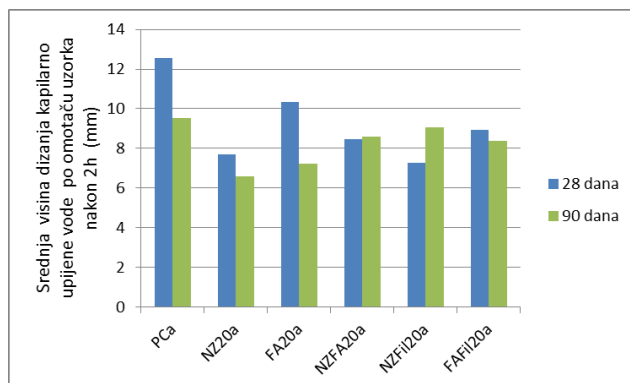


Slika VII-59. Relativno kapilarno upijanje vode maltera iz II faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Samo u slučaju maltera NZFA20a ($R^2=0,9524$) starog 90 dana bilo je moguće odrediti koeficijent kapilarnog upijanja S linearnom aproksimacijom rezultata sa dovoljnom tačnošću, a njegova vrednost iznosi $0,1627 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ (Poglavlje VI-10.1.2., tabela VI-30). Koeficijenti kapilarnog upijanja vode maltera NZFA20a starog 28 dana kao i referentnih SCM maltera sa filerom starih 28 i 90 dana određeni su u skladu sa standardom EN 13057 [45], ali kao drugi specijalni slučaj. S obzirom da su svi koeficijenti kapilarnog upijanja maltera NZFAa, NZFil20a i FAFil20a pri starosti od 28 dana računati prema drugom specijalnom slučaju njihove vrednosti se mogu međusobno uporediti. Najveći koeficijent kapilarnog upijanja S je u navedenom slučaju imao malter NZFil20a, potom NZFA20a, a najmanji FAFil20a.

Na osnovu koeficijenata kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana, prikazanih u tabeli VI-29, malter NZFA20a, kao i njegovih referentni SCM malteri sa filerom (NZFil20a i FAFil20a) ispunjavaju kriterijum za klasu R4 konstrukcijskog reparaturnog maltera, s obzirom da su im koeficijenti kapilarnog upijanja $\leq 0,5 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-0,5}$. Navedeni uslov su ispunili i isti malteri pri starosti od 90 dana.

I u II fazi ispitivanja dodatno je analizirano dizanje vode po omotaču uzoraka maltera, a rezultati su prikazani na slici VII-60.



Slika VII-60. Srednja visina dizanja kapilarno upijene vode po omotaču uzoraka maltera iz II faze ispitivanja, starih 28 i 90 dana

Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-60 uočeno je sledeće:

- Razlika između vrednosti dizanja vode po omotaču uzoraka maltera PCa, NZ20a, FA20a, NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, starih 90 dana je manja u odnosu na razliku dobijenu pri starosti od 28 dana. Ako se zasebno posmatraju malteri iz I faze ispitivanja (PCa, NZ20a i FA20a) u odnosu na maltere iz II faze (NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a), srednja vrednost dizanja vode po omotaču uzorka se više razlikuje kod navedenih maltera iz I faze u odnosu na II fazu, i pri starosti od 28 i od 90 dana.
- Sa povećanjem starosti maltera NZFA20a ne dolazi do promene visine dizanja kapilarno upijene vode po omotaču uzoraka, kod maltera NZFil20a dolazi do povećanja, a kod FAFil20a do smanjenja kao i kod referentnog PCa i SCM referentnih maltera NZ20a i FA20a.
- Najveću visinu dizanja vode po omotaču uzoraka, nakon 28 i 90 dana, imao je malter PCa, a najmanju NZFil20a nakon 28 dana, odnosno NZ20a nakon 90 dana.
- Malter NZFA20a, star 28 dana, je imao manje dizanje vode po omotaču u odnosu na maltera PCa, FA20a i FAFil20a, a veće nego malteri NZ20a i NZFil20a.
- Malter NZFA20a, star 90 dana, je imao manje dizanje vode po omotaču od maltera PCa, NZFil20a, u rangu sa FAFil20a, a veće nego malteri NZ20a i FA20a.

2.5. Analiza rezultata izluživanja elemenata u tragovima iz cementnih maltera kod kojih je 20% PC supstituisano sa mešavinom NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil

U radu su analizirani sledeći elementi iz grupe teških metala: Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba, Sb. Iz navedene grupe, As, Cr i Sb se ponašaju kao oksianjoni, a preostali kao katjoni. Sadržaj elemenata u tragovima i mikroelemenata u PC, NZ, FA i CaCO₃ određen je putem XRF analize primenom *Turbo Quant* metode (izveštaji - Prilog 8; sadržaj mikroelemenata i elemenata u tragovima – Prilog 9, tabela P9-2), Na osnovu rezultata XRF analize utvrđeno je da NZ ima najmanje koncentracije odabranih potencijalno toksičnih elemenata (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba i Sb) u poređenju sa PC i FA, osim u slučaju Pb ($Pb_{FA} > Pb_{NZ} > Pb_{PC}$) i Ba ($Ba_{NZ} > Ba_{FA} > Ba_{PC}$), dok su koncentracije analiziranih elemenata najveće kod FA, izuzev u slučaju Ba.

Velika koncentracija elemenata u tragovima u FA čini ovaj materijal potencijalno opasnim po životnu sredinu. Da li će se navedeni elementi osloboditi u procesu hidratacije maltera na bazi PC i FA i ostati neimobilizovani u strukturi maltera zavisi

od više parametara kao što su: prisustvo etringita, AFm jedinjenja, C-S-H i C-A-S-H gela, i pH vrednost pornog rastvora u malteru.

FA i NZ koji su korišćeni u eksperimentalnom istraživanju imaju određene karakteristike koje idu u prilog mogućnosti imobilizacije nekih elemenata u tragovima u strukturu produkata hidratacije maltera. Na ovu činjenicu upućuju sledeći podaci:

- FA spada u grupu alkalnih pepela na osnovu vrednosti odnosa $Ca/S=1,38$. Alkalnost sredine utiče da rastvorljivost pojedinih teških metala u uslovima hidratacije bude mala ili da opada. Na navedeno ukazuju dijagrami prikazani na slici III-8. Zapaža se da je rastvorljivost minimalna za Cd u opsegu vrednosti pH: 9-12, Zn pH: 8-11,5, Cu pH: 8-11, dok za sledeće elementa rastvorljivost opada za određeni opseg vrednosti pH: As pH:10-12, Sb pH>10, Se pH>11, Cr pH>12;
- XRD analiza je pokazala da kod pasta P-FaA dolazi do odloženog formiranja etringita. Tako pasta P-Fa10a starosti 28 dana sadrži etringita, C-S-H i C-A-S-H gel. Relativni udeo etringita je najveći pri starosti 90 dana, a nakon 180 dana je nešto veći od udela nakon 28 dana. Ovaj podatak može da ukaže na potencijalno povećanu imobilizaciju oksianjona u ovim pastama. Međutim, nakon 180 dana dolazi i do karbonatizacije. U prisustvu CO_3^{2-} jona dolazi do kompeticije sa oksianjonima što može dovesti do smanjenja imobilizacije [37].
- XRD analiza pasta P-NZ10a, ukazuje da takođe dolazi do odloženog formiranja etringita. Relativni udeo se kao i kod P-FaA povećava do 90 dana, a nakon 180 dana se blago smanjuje, iako i dalje ostaje veći nego nakon 28 dana. Pored etringita formira se i C-S-H gel. Prisutni su kalcit i vaterit. Vaterit je naročito prisutan nakon 90 dana. a nakon 180 dana dolazi do intenzivne karbonizacije.
- NZ ima Ca^{2+} kao jonoizmenjivački katjon. NZ sa svojim adsorpcionim i jonoizmenjivačkim sposobnostima može dodatno da pomogne održanju alkalne sredine u sistemu pora, kao i imobilizaciji navedenih elemenata iz FA. S druge strane, adsorpcioni kapacitet NZ zavisi od mnogo faktora u koje spadaju veličina, naelektrisanje i geometrija jona, a koji obuhvataju hidratacioni radijus, entalpiju hidratacije i rastvorljivost katjona. Katjoni sa najmanjim hidratacionim radijusom se najbrže i najviše adsorbuju u poređenju sa većim, jer mogu lakše da prođu kroz mikropore i kanale unutar strukture zeolita.

Na osnovu odnosa rezultata ispitivanja prikazanih u tabelama VI-32 i VI-33 (Poglavljje VI-10.1.3.) ustanovljeno je da je izluživanje odabranih elemenata iz maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, nakon 28 i 180 dana, bilo u dozvoljenim granicama u slučaju svih ispitanih maltera iz II faze ispitivanja, sa aspekta svih odabranih elemenata, osim potencijalno u slučaju Sb. Kod svih ispitanih uzoraka, za obe starosti maltera, zbog tehničkih nedostataka u pogledu mogućnosti preciznijeg merenja koncentracije

izmereno je izluživanje Sb u količini < 1 mg/kg suve materije (ispod granice detekcije), što u ovom slučaju nije dovoljno precizan podatak za klasifikaciju. S obzirom da je granica za neopasne materijale 0,7 mg/kg suve materije, realne vrednosti mogu da spadaju u bilo koju od tri kategorije, tabela VII-48.

Nakon 28 dana hidratacije malteri NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a zadovoljavaju kriterijume za inertan materijal, osim u slučaju Sb (jedna od tri kategorije) i Cd (neopasan).

Tabela VII-48. Klasifikacija maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a sa aspekta izluživanje teških metala pri starosti od 28 i 180 dana

Elementi	Kriterijumi prema Direktivi 2003/33/EC [105]					
	28 dana			180 dana		
	NZFA20a	NZFil20a	FAFil20a	NZFA20a	NZFil20a	FAFil20a
Pb	i	i	i	no	no	no
Cd	no	no	no	i/no	i/no	i/no
Zn	i	i	i	i	i	i
Cu	i	i	i	i	i	i
Ni	i	i	i	no	no	i/no
Cr	i	i	i	i	i	i
Hg	i	i	i	i	i	i
As	i	i	i	i	i	i
Ba	i	i	i	i	no	i
Sb	i/no/o	i/no/o	i/no/o	i/no/o	i/no/o	i/no/o

i – inertan
no – neopasan
o - opasan

U slučaju maltera NZFA20a i NZFil20a, nakon 180 dana hidratacije došlo je do povećanja izluživanja Pb (iz inertnog u neopasni) i Ni (iz inertnog u neopasni), dok je isključivo kod maltera NZFil20a došlo do značajnijeg povećanja izluživanja Ba (iz inertnog u neopasni). U slučaju maltera FAFil20a, nakon 180 dana hidratacije došlo je do značajnijeg povećanja izluživanja Pb (iz inertnog u neopasni).

Rezultati izluživanja odabranih elemenata u tragovima iz maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a ukazuju na sledeće:

Izluživanje nakon 28 dana

Pb - U slučaju maltera NZFA20a ispiranje olova je daleko manje nego što je kod maltera NZFil20a i FAFil20a iako u odnosu na njih ima još jedan, dodatni izvor

elementa u tragovima, što dokazuje da ova vrsta maltera veoma efikasno imobilizira Pb. Ova pojava je uočena za uzorke stare 28 i 180 dana. Kao što je u teorijskom delu istaknuto (Poglavlje V-1.7.) imobilizaciju Pb je teško postići samo sa cementom. Naime, uloga NZ je nesumnjiva u smanjenju izluživanja ovog elementa.

Cu, Cr, Hg, Ba, Sb - Malter NZFA20a koji u sebi sadrži i 10% NZ i 10% FA ima istu vrednost izluživanja navedenih elemenata (ispod granica detekcije) kao i malteri NZFil20a i FAFil20a koji sadrže samo po 10% NZ, odnosno 10% FA, respektivno.

Cd - Malter NZFA20a koji u sebi sadrži i 10% NZ i 10% FA (ukupno 20% SCM) ima praktično istu vrednost izluživanja Cd kao i malteri NZFil20a (koji sadrži samo 10% NZ kao SCM), a za cca 15% veću u odnosu na FAFil20a (koji sadrži samo 10% FA kao SCM).

Zn - Prisustvo NZ uz FA u malteru NZFA20a utiče na smanjenje izluživanja (0,5 mg/kg sm) u odnosu na malter sa 10% FA, FAFil20a, (0,7 mg/kg sm).

Ni - Prisustvo NZ uz FA u malteru NZFA20a utiče na smanjenje izluživanja (0,202 mg/kg sm) u odnosu na malter NZFil20a (0,228 mg/kg sm) i FAFil20a (0,208 mg/kg sm)

As - Prisustvo NZ uz FA u malteru NZFA20a utiče na smanjenje izluživanja (0,057 mg/kg sm) u odnosu na malter NZFil20a (0,083 mg/kg sm) i FAFil20a (0,03 mg/kg sm).

Nakon 28 dana hidratacije utvrđeno je da mešavina od 10% NZ i 10% FA u malteru NZFA20a utiče na smanjenje izluživanja Pb, Zn, Ni u odnosu na malter FAFil20a. Na izluživanje elemenata u tragovima, Cu, Cr, Hg, Ba, Sb, prisustvo NZ pored FA održava vrednosti izluživanja (ispod granica detekcije) u rangu sa onima kod FAFil20a. Malter NZFA20a koji u sebi sadrži i 10% NZ i 10% FA (ukupno 20% SCM) ima praktično istu vrednost izluživanja Cd kao i malteri NZFil20a (koji sadrži samo 10% NZ kao SCM), a za cca 15% veću u odnosu na FAFil20a (koji sadrži samo 10% FA kao SCM), stoga se kombinacija NZ i FA označava kao povoljna sa aspekta izluživanja Cd iz maltera.

Izluživanje nakon 180 dana

Pb - Prisustvo NZ uz FA u malteru NZFA20a efikasno imobilizira Pb u odnosu na maltere NZFil20a i FAFil20a. Kao što se pokazalo pri starosti od 28 dana, gde je prisustvo zeolita kao SCM pospešilo imobilizaciju Pb, to se potvrđuje i kod uzoraka NZFA20a nakon 180 dana. Koncentracije Pb kod FAFil20a i NZFil20a pokazuju da je verovatno proces hidratacije ovih SCM napredovao do starosti 180 dana i da je oslobođena veća količina ovog elementa u odnosu na vrednosti nakon 28 dana. Uzrok ove pojave je oslobađanje Pb iz staklaste faze FA i strukture NZ koja je pretrpela transformaciju u procesu hidratacije.

Cd, Zn, Cu, Hg, Sb - Malter NZFA20a koji u sebi sadrži i 10% NZ i 10% FA ima istu vrednost izluživanja navedenih elemenata (ispod granica detekcije) kao i malteri NZFil20a i FAFil20a koji sadrže samo po 10 % NZ, odnosno 10% FA, respektivno.

Cr - Prisustvo NZ uz FA u malteru NZFA20a dovelo je do većeg izluživanja Cr (0,16, mg/kg sm) u odnosu na malter sa 10% FA, FAFil20a, (0,14 mg/kg sm) ili 10% NZ, NZFil20a (0,13 mg/kg sm), mada razlike nisu značajnije. Međutim, ako se uzme u obzir činjenica da malter NZFA20a sadrži 20% SCM, a preostala dva maltera samo po 10% SCM, primena NZ uz FA se može oceniti povoljno sa aspekta smanjenja izluživanja Cr. Moguće uzroke povećanja koncentracije Cr kao oksianjona, nakon 180 dana u odnosu na 28 dana, verovatno treba tražiti u sledećem činjenicama(i) pad relativnog učešća etringita od 28 do 180 dana i (ii) pojava karbonatizacije. Deo etringita koji je postojao u uzorcima pri starosti od 28 dana se do starosti od 180 dana dekomponovao u procesu hidratacije. Ako je taj deo etringita sadržao CrO_4^{2-} oksianjon on se oslobodio u procesu izluživanja i nakon 180 dana se njegova koncentracija povećala. Drugi razlog koji je mogao dovesti do povećanja koncentracije Cr je kompeticija CO_3^{2-} jona sa oksianjonima za mesto, pre svega u etringitu, što može dovesti do istiskivanja CrO_4^{2-} oksianjona i njegov prelazak u porni rastvor. Ovo u krajnjem ishodu dovodi do povećanja koncentracije pri izluživanju.

Ni- Kao i u slučaju Cr, NZ uz FA u malteru NZFA20a utiče na održavanje nivoa izluživanja (0,64 mg/kg sm), jer je zamenjeno 20% PC, u odnosu na maltere NZFil20a (0,52 mg/kg sm) i FAFil20a (<0,5 mg/kg sm), u kojima je zamenjeno 10% PC sa NZ ili sa FA, respektivno.

As - Prisustvo NZ uz FA u malteru NZFA20a utiče na održavanje izluživanja (0,05 mg/kg sm) na niskom nivou koliko je postignuto i u malterima NZFil20a (< 0,04 mg/kg sm) i FAFil20a (< 0,04 mg/kg sm). Količina izluženog arsena je dovoljno mala da se sva tri uzorka mogu smatrati inertnim, tabela VII-48. Poznato je da veća koncentracija jona kalcijuma imobilize arsen formiranjem slabo rastvornih jedinjenja (Poglavlje V-1.7.). Činjenica da je njegova koncentracija manja kod uzoraka NZFil20a i FAFil20a u odnosu na NZFA20a ukazuje na ulogu kalcijumovog jona iz kalcijum karbonata koji se kao neutralan filer dodavao u prva dva uzorka [37].

Ba – Evidentirano je značajnije povećanje izluživanja Ba kod sva tri uzorka maltera, i to sledećim redosledom: NZFil20a > NZFA20a > FAFil20a, što je u skladu sa sadržajem Ba u samom NZ (3058 mg/kg) i FA (532,9 mg/kg). Dobijeni rezultati, u ovom konkretnom slučaju, ukazuju na prednost korišćenja mešavine NZ i FA kao SCM. Mogući razlozi pojave povećanja koncentracije Ba u uzorcima starim 180 dana u odnosu na uzorke od 28 dana se nalazi u činjenici da je hidratacija NZ kao SCM nakon 180 dana značajno veća nego nakon 28 dana. U procesu hidratacije osnovna rešetka trpi promene, jer se transformiše u produkte hidratacije. Kao rezultat navedenog, joni

Ba koji se nalaze u kristalnoj rešetki se oslobađaju u porni rastvor gde ne nalaze jone SO_4^{2-} , jer bi u suprotnom nastao nerastvorni BaSO_4 , te ne bi došlo do izluživanja Ba. Ba je u pornom rastvoru mogao naići na jone CO_3^{2-} i formirati BaCO_3 . Međutim, tu je prisutan i CaCO_3 (15 mg/l na 25°C) koji ima manju rastvorljivost od Ba (24 mg/l na 25°C). U navedenom slučaju se pri izluživanju oslobađa Ba.

Povećanje izluživanja Pb, Cr, Ni i Ba iz maltera starih 180 dana ukazuje da su procesi hidratacije i pucolanske reakcije napredovali u periodu između od 28 do 180 dana i da se odnosi između produkata hidratacije menjaju, a najverovatnije i pH vrednost pornog rastvora. Na primer, Pb je u FA vezan uglavnom u staklastoj fazi i iz nje se može osloboditi samo u procesu hidratacije kada staklasta faza reaguje sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, usled čega se zbog napredovanja procesa hidratacije oslobađa veća količina Pb nego nakon 28 dana. Na napredovanje procesa hidratacije od 28 do 180 dana ukazuju i vrednosti čvrstoće pri pritisku za analizirane maltera nakon 28 i 180 dana prikazane u tabelama od P7-15 do P7-17.

Nakon 180 dana hidratacije, NZ se pokazao efikasnim u imobilisanju Pb, kao što je bio slučaj i nakon 28 dana. Na izluživanje elemenata u tragovima Cd, Zn, Cu, Hg i Sb prisustvo NZ pored FA održava vrednosti izluživanja (ispod granica detekcije) u rangju sa onima kod FAFil20a. Prisustvo NZ u malteru NZFA20a utiče na održavanje izluživanja Cr u rangju sa malterom FAFil20a, a Ni na prihvatljivom nivou sa aspekta zaštite životne sredine. Ova činjenica bi se mogla pripisati promenjenoj vrednosti pH pornog rastvora, slika III-8. Kada je reč o Cr, njegova rastvorljivost zavisi od oblika u kome se nalazi (u obliku Cr^{3+} ili u obliku oksonijum jona), međutim navedeno nije bilo predmet istraživanja u okviru ove doktorske disertacije. Prisustvo NZ u malteru NZFA20a utiče na održavanje izluživanja Sb na niskom nivou. Interesantno je da se izluživanje Ba povećalo nakon 180 dana. Ba je manje rastvorljiv ukoliko je u obliku sulfata ili karbonata. Povećanje njegove koncentracije ukazuje da su joni sulfata i karbonata potrošeni na reakciju sa drugim katjonima, a da je Ba ostao u rastvorljivom obliku.

Ako se analizira uspešnost imobilizacije elemenata u tragovima i mikroelemenata u malterima koji sadrže FA i/ili NZ kao SCM, može se zaključiti da se dati elementi iz alkalnog FA već dovoljno uspešno imobilizuju u malterima. NZ sa Ca^{2+} kao izmenljivim katjonom koji doprinosi održanju alkalne pH vrednosti pornog rastvora u malterima na bazi FA i NZ, ima svoju ulogu u smanjenju izluživanja prvenstveno Pb i drugih katjona (Cd, Zn, Cu i Hg).

2.6. Zaključci II faze istraživanja

Na osnovu analize rezultata ispitivanja maltera iz II faze ispitivanja izvedeni su sledeći zaključci:

Čvrstoća pri pritisku

- Svi malteri iz II faze ispitivanja (NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a) su pri starosti od 28 dana ispunili uslov da im je $R_{c,28} \geq 45$ MPa, te prema standardu EN 1504-3 [23] pripadaju klasi R4 konstrukcijskih maltera sa aspekta čvrstoće pri pritisku ispitane u skladu sa standardom EN 12190 [17].
- Od ispitanih maltera iz II faze jedino je malter NZFA20a imao za preko 10% veću relativnu čvrstoću pri pritisku u odnosu na referentni malter, i to isključivo nakon 180 dana nege. Relativne čvrstoće pri pritisku referentnih SCM maltera sa filerom NZFil20a i FAFil20a, kao i referentnih SCM maltera NZ20a i FA20a iz I faze, nisu se razlikovale za više od 10% u odnosu na referentne vrednosti, odnosno čvrstoće pri pritisku su im pri svim ispitanim starostima ostale u rangu referentnih.
- Do starosti od 90 dana postoje razlike u prirastu čvrstoće pri pritisku kod maltera NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, NZ20a i FA20a, a nakon tog perioda im je prirast čvrstoće podjednak.

Kapilarno upijanje

- Na osnovu koeficijenata kapilarnog upijanja vode maltera starih 28 dana, dobijenih u skladu sa standardom EN 13057 [45], malter NZFA20a, kao i referentni SCM malteri sa filerom (NZFil20a i FAFil20a) ispunjavaju kriterijum za klasu R4 konstrukcijskog reparaturnog maltera prema standardu EN 1504-3 [23], s obzirom da su im koeficijenti kapilarnog upijanja $\leq 0,5$ kg m⁻²h^{-0.5}. Navedeni uslov su ispunili i isti malteri pri starosti od 90 dana.
- Dijagrami kapilarnog upijanja vode maltera NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, NZ20a i FA20a starih 28 dana imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja u odnosu na referentni PCa malter. Nakon 90 dana hidratacije, dobijeni dijagrami kapilarnog upijanja vode maltera NZFA20a, NZFil20a, FAFil20a, pa čak i referentni SCM malter NZ20a imaju uniformniji tok i bliske vrednosti upijanja, za razliku od referentnog SCM maltera FA20a sa jedne strane i referentnog maltera PCa sa druge strane.
- Primena samo jedne vrste SCM u mešavini ima veći uticaj na smanjenje kapilarnog upijanja vode maltera pri starosti od 90 dana u odnosu na 28 dana.
- Razlika između vrednosti dizanja vode po omotaču uzoraka maltera PCa, NZ20a, FA20a, NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a, starih 90 dana je manja u odnosu na razliku dobijenu pri starosti od 28 dana. Ako se zasebno posmatraju malteri iz I

faze ispitivanja (PCa, NZ20a i FA20a) u odnosu na maltere iz II faze (NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a), srednja vrednost dizanja vode po omotaču uzorka se više razlikuje kod navedenih maltera iz I faze u odnosu na II fazu, i pri starosti od 28 i od 90 dana.

Izluživanje teških metala

- XRF analiza PC, NZ, FA i filera – kalcijum-karbonata u pogledu elemenata Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba i Sb je pokazala da FA ima najveće koncentracije navedenih elemenata izuzev elementa Ba. NZ ima najmanje koncentracije datih elemenata osim u slučaju Pb i Ba.
- Nakon 28 dana hidratacije utvrđeno je da mešavina od 10% NZ i 10% FA u malteru NZFA20a utiče na smanjenje izluživanja Pb, Zn, Ni u odnosu na malter FAFil20a. Na izluživanje elemenata u tragovima, Cu, Cr, Hg, Ba, Sb, prisustvo NZ pored FA održava vrednosti izluživanja (ispod granica detekcije) u rangu sa onima kod FAFil20a. Malter sa hibridnim (mešanim) dodatkom 10% NZ i 10% FA, se pokazao kao povoljan sa aspekta izluživanja Cd.
- Povećanje izluživanja Pb, Cr, Ni i Ba iz maltera starih 180 dana ukazuje da su procesi hidratacije napredovali u periodu između od 28 do 180 dana i da se odnosi između produkata hidratacije menjaju, a najverovatnije i pH vrednost pornog rastvora. Na napredovanje procesa hidratacije od 28 do 180 dana ukazuju i vrednosti čvrstoće pri pritisku za analizirane maltera nakon 28 i 180 dana.
- Nakon 180 dana hidratacije, NZ se pokazao efikasnim u imobilisanju Pb, kao što je bio slučaj i nakon 28 dana. Na izluživanje elemenata u tragovima Cd, Zn, Cu, Hg i Sb prisustvo NZ pored FA održava vrednosti izluživanja (ispod granica detekcije) u rangu sa onima kod FAFil20a. Prisustvo NZ u malteru NZFA20a utiče na održavanje izluživanja Cr i Sb u rangu sa malterom FAFil20a, a Ni na prihvatljivom nivou sa aspekta zaštite životne sredine. Interesantno je da se izluživanje Ba povećalo nakon 180 dana. Ba je manje rastvorljiv ukoliko je u obliku sulfata ili karbonata. Povećanje njegove koncentracije ukazuje da su sulfatni i karbonatni joni potrošeni na reakciju sa drugim katjonima, a da je Ba ostao u rastvorljivom obliku.
- Ako se analizira uspešnost imobilizacije elemenata u tragovima i mikroelemenata u malterima koji sadrže FA i/ili NZ kao SCM, može se zaključiti da se dati elementi iz alkalnog FA već dovoljno uspešno imobilizuju u malterima. NZ sa Ca^{2+} kao izmenljivim katjonom koji doprinosi održanju alkalne pH vrednosti pornog rastvora u malterima na bazi FA i NZ, ima svoju ulogu u smanjenju izluživanja prvenstveno Pb. Mešavina NZ i FA kao SCM se generalno pozitivno pokazala u pogledu smanjenja (Pb, Zn, Ni) ili održavanja (Cu, Cr, Hg,

Ba) na istom nakon 28 dana hidratacije. Za starost od 180 dana, njihova efikasnost je posebno izražena u smanjenju izluživanja Pb, potom Ba, kao i u održavanju niskog nivoa izluživanja za katjone Cd, Zn, Cu, Hg i Ba. Efikasnost imobilizacije oksianjona As je manja.

- Prednost primene NZ, kao SCM u malteru, u procesu imobilizacije je što može na više načina da onemogući izluživanje teških metala (i) održavanjem pH vrednosti pornog rastvora na nivou baznih vrednosti, (ii) imobilizacijom katjona jonskom izmenom, i (iii) formiranjem produkata hidratacije pre svega etringita i C-S-H gela.

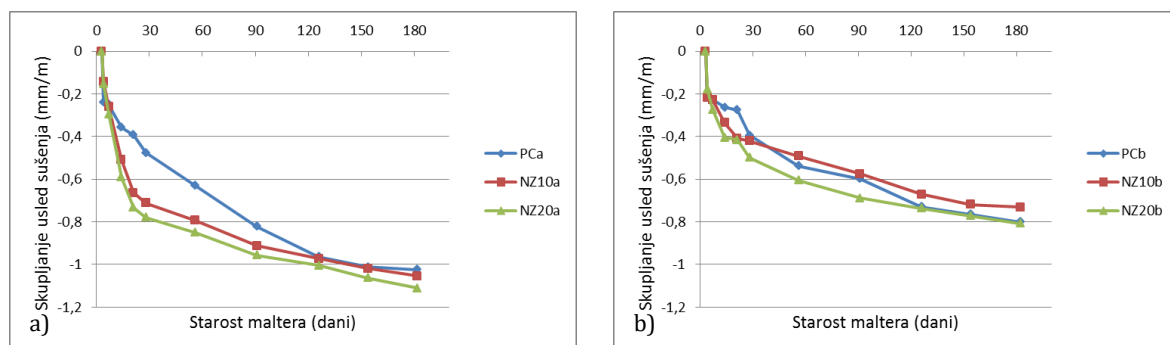
3. III FAZA ISTRAŽIVANJA

3.1. Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera spravljenih sa 0%, 10% i 20% NZ kao SCM – III faza

3.1.1. Skupljanje usled sušenja

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 10, kao i srednjih vrednosti skupljanja usled sušenja maltera prikazanih u tabeli VI-34 na slici VII-61 prikazane su srednje vrednosti skupljanja usled sušenja maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika II-18a) i 0,4 (slika II-18b) pri starosti maltera od 3, 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-61, može se uočiti da su cementno-zeolitni malteri spravljeni sa većim vodovezivnim faktorom, pri starosti između 7 i 182 dana, imali veće skupljanje usled sušenja u poređenju sa malterima spravljenim sa nižim vodovezivnim faktorom. Opseg skupljanja usled sušenja (apsolutne vrednosti) prethodno navedenih maltera, ispitanih pri starosti od 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana i spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, iznosi: 0,14-0,24 mm/m, 0,25-0,30 mm/m, 0,36-0,59 mm/m, 0,39-0,73 mm/m, 0,48-0,78 mm/m, 0,63-0,85 mm/m, 0,82-0,96 mm/m, 0,96-1,00 mm/m, 1,01-1,06 mm/m i 1,02-1,11 mm/m, respektivno. Za iste starosti cementno-zeolitnih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4 opseg skupljanja usled sušenja (apsolutne vrednosti) iznosi: 0,18-0,22 mm/m, 0,23-0,27 mm/m, 0,26-0,40 mm/m, 0,27-0,42 mm/m, 0,39-0,50 mm/m, 0,49-0,61 mm/m, 0,58-0,69 mm/m, 0,67-0,74 mm/m, 0,72-0,77 mm/m i 0,73-0,81 mm/m, respektivno.

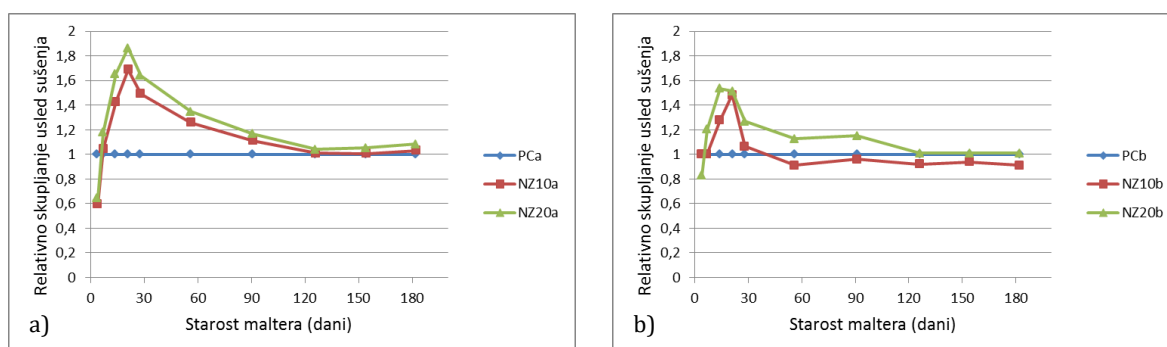


Slika VII-61. III faza – Skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Dijagram promene skupljanja usled sušenja u toku vremena referentnog PCa maltera može da se uspešno aproksimira nelinearnom monotono-rastućom funkcijom koja pokazuje smanjenje prirasta skupljanja za starosti veće od 126 dana. Malteri NZ10a i NZ20a imaju gotovo identične bilinearne funkcije promene skupljanja usled sušenja u toku vremena. Skupljanje usled sušenja maltera NZ10a i NZ20a je intezivno do 21-og

dana (prelomna tačka funkcija), a nakon čega se usporava. Različita kinetika promene skupljanja u toku vremena ispitivanih vrsta maltera se, praktično, gubi pri starostima od 126 dana, tako da se njihove konačne vrednosti skupljanja vrlo malo razlikuju. Na osnovu opisane analize, zaključeno je da zamena dela cementa zeolitom u količini do 20%, ne utiče na veličinu skupljanja maltera, već samo na oblik krive skupljanja. Referentni malter PCb je do 28-og dana imao nelinearnu zavisnost skupljanja usled sušenja i starosti maltera, a nakon tog perioda linearnu. U slučaju maltera NZ10b, skupljanje je prvo bilo nelinearno, ali do 21-og dana, a potom linearno, dok je malter NZ20b imao nelinearnu zavisnost promene skupljanja u toku vremena.

Relativna skupljanja usled sušenja cementno-zeolitnih maltera prikazana su na slici VII-62. Pri starosti od 4 dana cementno-zeolitni malteri (NZ10a i NZ20a) spravljani sa većim vodovezivnim faktorom ($w/cm=0,5$) (slika VII-62a) imali su za 40% i 35% manje relativno skupljanje u odnosu na referentni cementni malter, respektivno. Nakon 7 dana relativno skupljanje maltera koji sadrže 10% i 20% NZ kao SCM je u prvom slučaju dostiglo referentnu vrednost, a u drugom premašilo za 18%, nakon čega se takav trend nastavlja, i pri starosti od 21-og dana relativno skupljanje navedenih maltera premašuje odgovarajuću referentnu vrednost za čak 69%, odnosno 87%. Nakon 21-og dana ta razlika se postepeno smanjuje, odnosno relativno skupljanje cemento-zeolitnih maltera je do starosti maltera od 91-og dana značajno veće u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti. U periodu između 126 i 182 dana od spravljanja navedenih maltera, razlike u relativnom skupljanju usled sušenja su manje od 10% u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti te se smatra da je skupljanje usled sušenja maltera spravljani sa vodovezivnim faktorom 0,5 i sa 10% i 20% NZ kao SCM u navedenom periodu u rangu sa skupljanjem odgovarajućeg referentnog maltera.



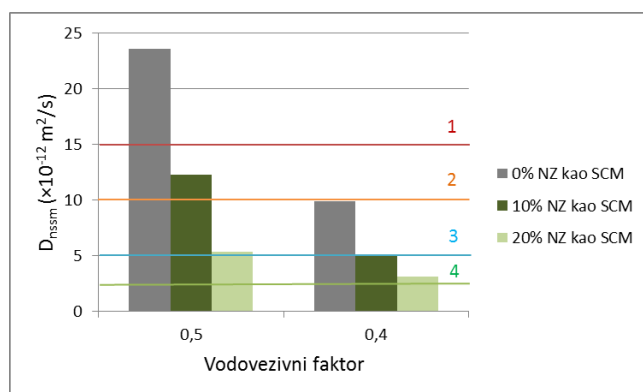
Slika VII-62. III faza – Relativno skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže NZ kao SCM, spravljanih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

U slučaju primene manjeg vodovezivnog faktora ($w/cm=0,4$), relativno skupljanje maltera NZ10b se u toku prvih 7 dana podudara sa skupljanjem odgovarajućeg referentnog maltera (slika VII-62b). U periodu između 7 i 21 dana dolazi do naglog

povećanja relativnog skupljanja maltera NZ10b, i 21-og dana relativno skupljanje mu je veće za čak 48% u odnosu na odgovarajuću referentnu vrednost, nakon čega dolazi do naglog smanjenja razlike u skupljanju između navedenog maltera i referentnog, da bi nakon 28 dana relativno skupljanje maltera bilo u rangu sa odgovarajućim referentnim skupljanjem, nakon čega se čak i spušta ispod referentne vrednosti, ali ne za više od 10%. U slučaju maltera NZ20b, relativno skupljanje usled sušenja maltera pri starosti od 4 dana je za 17% manje u odnosu na odgovarajuću referentnu vrednost, dok je pri starosti od 7 dana za 20% veće. Takav trend se nastavlja do 14-og dana kada je relativno skupljanje ovog maltera za čak 54% veće u odnosu na odgovarajuću referentnu vrednost, nakon 21-og dana smanjuje se na 51%, a nakon 28, 56 i 91 dana na 27%, 13% i 15%, respektivno. Tek u periodu između 126 i 182 dana relativno skupljanje maltera NZ20b je u rangu sa referentnim vrednostima.

3.1.2. Otpornost na prodor hlorida

Na osnovu pojedinačnih rezultata merenja, odnosno sračunatih srednjih vrednosti, visine uzoraka, temperature anolitnog rastvora (Prilog 11, tabela P11-1), dubine prodora hlorida (Prilog 11, tabela P11-2), kao i trajanja testa (24h) i vrednosti primenjenog napona, sračunat je nestacionarni koeficijent migracije za maltere koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 i 0,4, a rezultati su prikazani i na slici VII-63.



Slika VII-63. III faza – Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida i vodovezivnog faktora u slučaju maltera koji sadrže NZ kao SCM (Otpornost na prodor hlorida: 1- smanjena, 2- umerena, 3- povišena, 4- veoma visoka)

Na osnovu klasifikacije betona/maltera u odnosu na otpornost na prodor hlorida, koja je prikazana u tabeli VI-13 i sračunatih vrednosti nestacionarnih koeficijenata migracije hlorida (tabele VI-35 i VI-36), može se ustanoviti da od maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, jedino referentni malter spada u maltere sa smanjenom otpornošću na prodor hlorida, dok malter spravljen sa 10% NZ spada u maltere sa umerenom otpornošću, a malter spravljen sa 20% NZ u kategoriju maltera sa povišenom otpornošću na prodor hlorida. U slučaju maltera spravljenih sa

vodovezivnim faktorom od 0,4, referentni malter spada u kategoriju maltera sa povišenom otpornošću na prodor hlorida, dok malteri koji sadrže 10% i 20% NZ spadaju u maltere sa veoma visokom otpornošću na prodor hlorida.

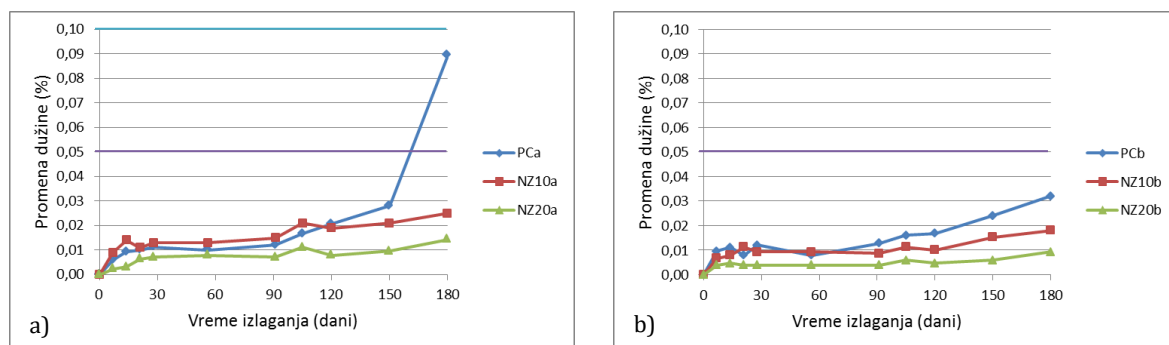
Na osnovu prikazanih rezultata na slici VII-63 može se uočiti da sa smanjenjem vodovezivnog faktora kao i sa povećanjem udela NZ u malterima dolazi do smanjenja nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida, tj. do značajnog povećanja otpornosti cementnog maltera na prodor hlorida. U slučaju maltera PCa, NZ10a i NZ20a D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s) iznosi 23,55, 12,27 (- 48%) i 5,36 (- 77%), a u slučaju maltera PCb, NZ10b i NZ20b D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s) iznosi 9,90, 4,95 (- 50%) i 3,11 (- 69%), respektivno.

3.1.3. Otpornost na dejstvo sulfata

Na osnovu pojedinačnih vrednosti prikazanih u Prilogu 12 i srednjih vrednosti promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) prikazanih u tabeli VI-38, na slici VII-64 prikazane su srednje vrednosti promene dužine (ekspanzije) malterskih uzoraka koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika VII-64a) i 0,4 (slika VII-64b) nakon 0, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 105, 120, 150 i 180 dana izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora.

Nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora, promena dužine epruveta PCa, NZ10a i NZ20a iznosila je 0,09%, 0,03% i 0,01%, dok je promena dužine epruveta PCb, NZ10b i NZ20b iznosila je 0,03%, 0,02% i 0,01%, respektivno. S obzirom na prethodno navedene rezultate, svi malteri spravljeni sa NZ kao SCM su ispunili uslov da im je promena dužine usled dejstva sulfatnog rastvora manja od 0,05 % što ih u skladu sa ACI 318 [1] svrstava u kategoriju maltera sa visokom sulfatnom otpornošću. U slučaju referentnih maltera, cementni malteri spravljeni sa većim vodovezivnim faktorom pripadaju kategoriji maltera sa umerenom sulfatnom otpornošću (promena dužine je između 0,05-0,10%), a sa manjim vodovezivnim faktorom pripadaju kategoriji maltera sa visokom sulfatnom otpornošću (promena dužine je manja od 0,05%).

Na osnovu dijagrama prikazanih na slici VII-64, može se uočiti da sa smanjenjem vodovezivnog faktora dolazi do smanjenja promene dužine epruveta, prvenstveno u slučaju referentnog matera, a potom i maltera koji sadrži 10%, i u manjoj meri maltera koji sadrži sa 20% NZ.



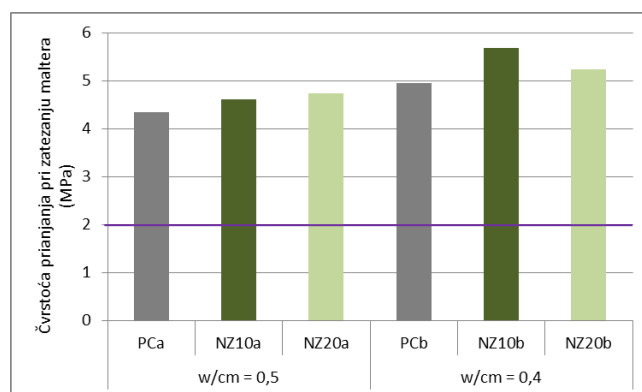
Slika VII-64. III faza – Promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) koji sadrže NZ kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Na promenu dužine epruveta izloženih dejstvu sulfatnog rastvora prvenstveno ima uticaj nivo supstitucije PC sa NZ, a potom vodovezivni faktor. Sama primena NZ, kao i povećanje nivoa supstitucije PC sa NZ, dovodi do značajnog smanjenja ekspanzije malterskih uzoraka izloženih dejstvu sulfatnog rastvora, u odnosu na referentne malterske uzorke, što je u skladu i sa vizulnim stanjem u kojem su epruvete bile nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora, tabele VI-39 i VI-40.

3.1.4. Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda

Ispitivanje prionljivosti maltera, koji sadrže NZ kao SCM, za betonsku podlogu „pull-off“ metodom urađeno je u skladu sa procedurum propisanom standardom EN 1542 [157]. Rezultati merenja su dati po pečatima za svaku vrstu maltera iz III faze ispitivanja (Prilog 13), dok su srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom prikazane u tabeli VI-41. Na osnovu navedenih rezultata, srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju ispitanih maltera su grafički prikazane na slici VII-65.

Kod svih ispitanih maltera sa NZ kao SCM je ustanovljeno da je dominantan lom tipa B, odnosno po malteru.



Slika VII-65. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera koji sadrže NZ kao SCM

U slučaju prethodno navedenih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5, opseg čvrstoće pri zatezanju iznosi od 4,34-4,74 MPa, dok se kod maltera spravljenih sa vodovezivnom faktorom 0,4 kreće od 4,97-5,68 MPa.

S obzirom na dobijene rezultate, svi malteri iz III faze ispitivanja spravljeni sa NZ kao SCM su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta athezije, te prema standardu EN 1504-3 [23] spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera.

3.1.5. Ograničeno skupljanje maltera

3.1.5.1. Vizuelni pregled test-površine

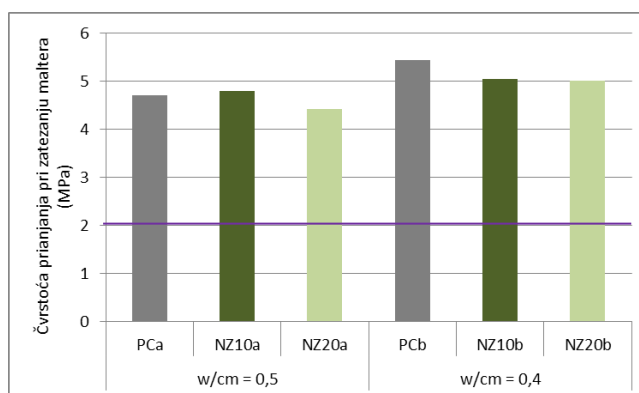
Nakon 28 dana propisane nege uzoraka (tabela VI-12), kao i nakon dodatnih 56 dana skladištenja, urađene su vizuelne provjere stanja test-površina, a njihov izgled je prikazan u Prilogu 14 (tabele P14-1 i P14-2). Na osnovu prikazanog izgleda test-površina može da se zaključi da bez obzira na primenjeni vodovezivni faktor i nivo supstitucije PC sa NZ nije došlo do pojave oštećenja, čak ni površinskog karaktera.

3.1.5.1. Čvrstoća pri zatezanju maltera

Ispitivanje ograničenog skupljanja maltera, koji sadrže NZ kao SCM, nanesenog na betosku podlogu urađeno je prema standardu EN 12617-4 [20].

Rezultati merenja su dati po pečatima (Prilog 14), a srednje vrednosti pri zatezanju maltera sa NZ za dominantni lom su prikazane u tabeli VI-42. Na osnovu navedenih rezultata, na slici VII-66 grafički su prikazane srednje vrednosti pri zatezanju ispitanih maltera.

Kod svih ispitanih maltera sa NZ kao SCM je ustanovljeno da je dominantan lom tipa B, kao i da su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta athezije, te prema standardu EN 1504-3 [23] navedeni malteri spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera.



Slika VII-66. III faza – Ograničeno skupljanje – Čvrstoće pri zatezanju maltera koji sadrže NZ kao SCM

Opseg čvrstoća prijanjanja pri zatezanju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 iznosi od 4,41-4,79 MPa, dok se opseg kreće od 5,01-5,42 kod maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4.

3.1.6. Toplotna kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje

3.1.6.1. Vizuelni pregled test-površine

Prema standardu EN 1504-3 [23] nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićen rastvor soli za odmrzavanje predviđeno je da se prvo uradi vizuelna provera stanja test-površine uzoraka. Na osnovu izgleda test-površina prikazanih u Prilogu 15 (tabele od P15-2 do P15-6) može da se zaključi da ni na jednom uzorku, bez obzira na prisustvo NZ i vrednost vodovezivnog faktora, nisu primećena veća oštećenja u vidu pukotina, ispadanja zrna agregata ili delaminacije maltera, već su oštećenja površinskog karaktera.

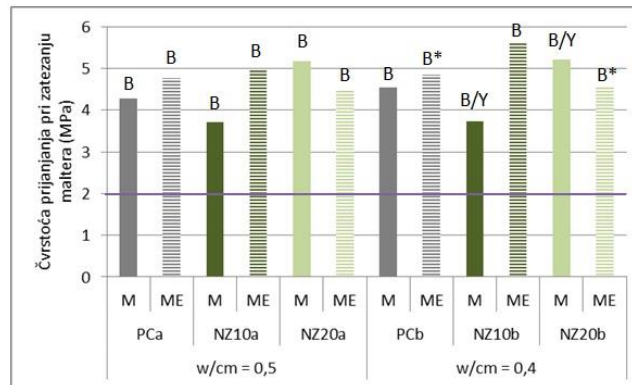
S obzirom da se nisu javile prsline širine $> 0,1$ mm, i da nije došlo do delaminacije, svi uzorci su prošli uslove vizuelne inspekcije prema standardu EN 1504-3 [23].

3.1.6.2. Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju maltera

Rezultati ispitivanja toplotne kompatibilnosti maltera, koji sadrže NZ kao SCM, i betonske podloge prema EN 13687-1 [21] dati su po pečatima za svaku vrstu maltera iz III faze ispitivanja prikazanih u Prilogu 15, dok su srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom prikazane u tabelama VI-43 (etalonski uzorci) i VI-44 (test-uzorci). Na osnovu navedenih rezultata, srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju ispitanih maltera (test-uzorci i njihovi etaloni) grafički su prikazane na slici VII-67.

Svi malteri iz III faze istraživanja spravljeni sa NZ kao SCM su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta ispitane toplote kompatibilnosti, te prema standardu EN 1504-3 [23] spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera.

U slučaju etalonskih i test-uzoraka spravljenih sa NZ kao SCM i vodovezivnim faktorom 0,5, dominantni lom je tipa B (po malteru), kao što je i u slučaju njihovog referentnog maltera. Opseg čvrstoće prijanjanja u slučaju test-uzoraka sa NZ i vodovezivnim faktorom od 0,5 iznosi od 3,71-5,18 MPa, dok se kod njihovih etalona kreće od 4,50-4,97 MPa.



Slika VII-67. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M) koji sadrže NZ kao SCM i njihovih etalona (ME)

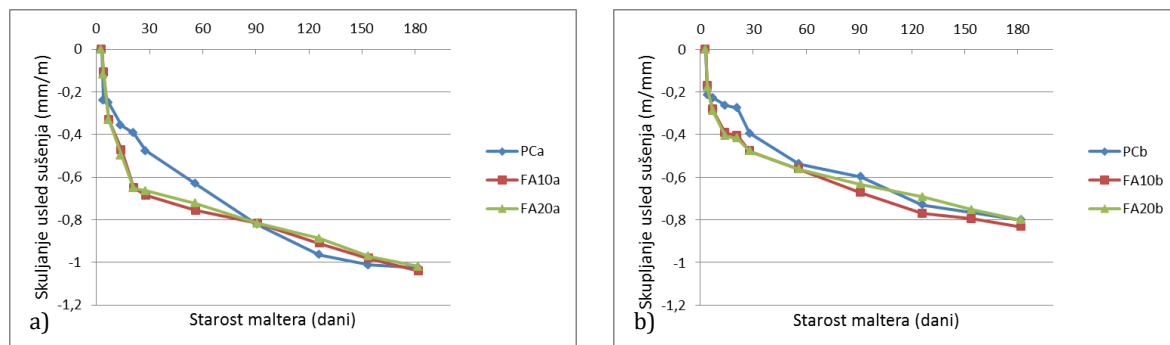
Kod cementno-zeolitnih maltera sa vodovezivnim faktorom od 0,4, test-uzorci imaju dominantan lom tipa B/Y, dok etalonski uzorci imaju tipa B. Opseg čvrstoće prijanjanja maltera sa NZ u prethodno navedenom slučaju kreće se od 3,73-5,21 MPa kod test-uzoraka i od 4,55-5,62 MPa kod etalonskih uzoraka.

3.2. Analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera spravljanih sa 0%, 10% i 20% FA kao SCM – III faza

3.2.1. Skupljanje usled sušenja

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 10, kao i srednjih vrednosti skupljanja usled sušenja maltera prikazanih u tabeli VI-34 na slici VII-68 prikazane su srednje vrednosti skupljanja usled sušenja maltera koji sadrže FA kao SCM spravljanih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika VII-68a) i 0,4 (slika VII-68b) pri starosti maltera od 3, 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-68, može se uočiti da su cementni malteri koji sadrže FA kao SCM i koji su spravljani sa većim vodovezivnim faktorom, pri starosti većoj od 7 dana, imali veće skupljanje usled sušenja u poređenju sa malterima spravljenim sa nižim vodovezivnim faktorom. Opseg skupljanja usled sušenja (apsolutne vrednosti) prethodno navedenih maltera, ispitanih pri starosti od 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana i spravljanih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, iznosi: 0,11-0,24 mm/m, 0,25-0,33 mm/m, 0,36-0,50 mm/m, 0,39-0,65 mm/m, 0,48-0,69 mm/m, 0,63-0,76 mm/m, 0,82-0,82 mm/m, 0,89-0,96 mm/m, 0,97-1,01 mm/m i 1,02-1,04 mm/m, respektivno. Za iste starosti maltera koji sadrže FA kao SCM i spravljanih sa vodovezivnim faktorom 0,4 opseg skupljanja usled sušenja (apsolutne vrednosti) iznosi: 0,17-0,22 mm/m, 0,23-0,29 mm/m, 0,26-0,41 mm/m, 0,27-0,42 mm/m, 0,39-0,48 mm/m, 0,54-0,56 mm/m, 0,60-0,67 mm/m, 0,69-0,77 mm/m, 0,75-0,80 mm/m i 0,80-0,83 mm/m, respektivno.

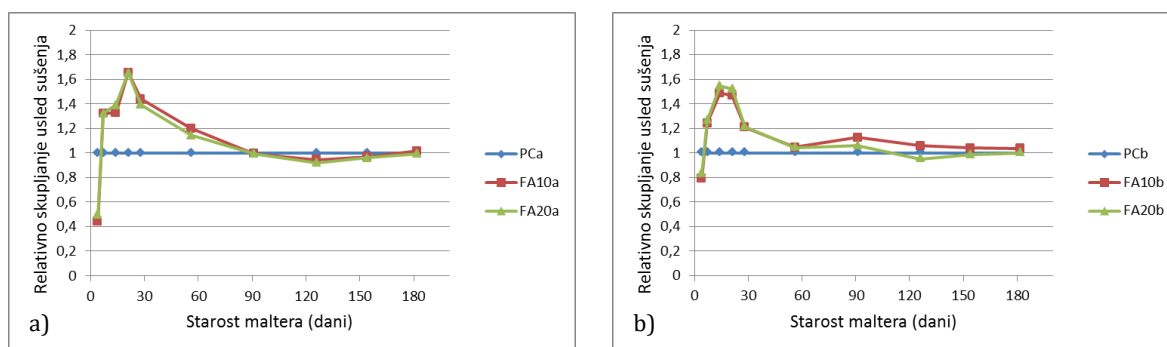


Slika VII-68. III faza – Skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljanih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Dijagram promene skupljanja usled sušenja u toku vremena referentnog PCa maltera može se podeliti u tri dela: prvi je do 28-og dana (nelinearna zavisnost), drugi je od 28-og do 126-og dana (linearna zavisnost) i treći je od 126-og do 182-og dana (linearna zavisnost). U slučaju maltera FA10a i FA20a, skupljanje je prvo bilo nelinearno i intenzivno, do 21-og dana, a potom linearno i umerenije. Referentni malter PCb, kao i malteri FA10b i FA20b, su do 28-og dana imali nelinearnu zavisnost

promene skupljanja usled sušenja maltera u toku vremena, a nakon tog perioda linearnu.

Relativna skupljanja usled sušenja maltera koji sadrže FA kao SCM prikazana su na slici VII-69. Pri starosti od 4 dana malteri FA10a i FA20a (slici VII-69a) imali su za 55% i 50% manje relativno skupljanje u odnosu na referentni cementni malter, respektivno. Nakon 7 dana relativno skupljanje maltera koji sadrže 10% i 20% FA kao SCM je premašilo za 32%, dok je pri starosti od 21-og dana relativno skupljanje navedenih maltera premašuje odgovarajuću referentnu vrednost za čak 65%, odnosno 66%, respektivno. Nakon 21-og dana ta razlika se postepeno smanjuje, ali je relativno skupljanje FA10a i FA20a do starosti maltera od 56-og dana značajno veće u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti. U periodu između 91 i 182 dana od spravljanja navedenih maltera, razlike u relativnom skupljanju usled sušenja su manje od 10% u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti te se smatra da je skupljanje usled sušenja maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 i sa 10% i 20% FA kao SCM u navedenom periodu u rangu sa skupljanjem odgovarajućeg referentnog maltera.

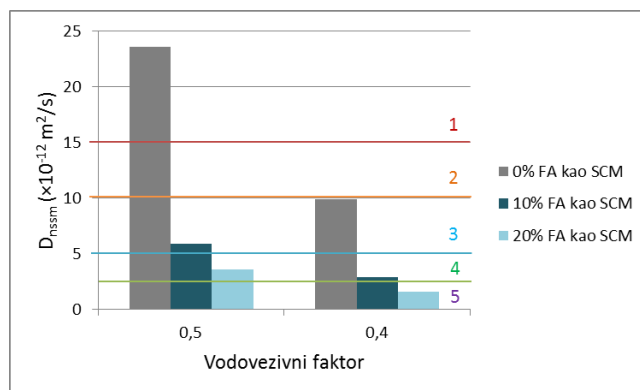


Slika VII-69. III faza – Relativno skupljanje usled sušenja maltera koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

U slučaju primene manjeg vodovezivnog faktora, pri starosti od 4 dana malteri FA10b i FA20b (slici VII-69b) imali su za 20% i 17% manje relativno skupljanje u odnosu na referentni cementni malter, respektivno. Nakon 7 dana relativno skupljanje maltera koji sadrže 10% i 20% FA kao SCM je premašilo za 24% i 26%, dok je pri starosti od 14-og dana relativno skupljanje navedenih maltera premašilo odgovarajuću referentnu vrednost za čak 49%, odnosno 54%, respektivno. Nakon 21-og dana ta razlika se smanjila na 47% i 52%, da bi relativno skupljanje navedenih maltera bilo u rangu sa odgovarajućim referentnim nakon 56 dana. U periodu između 56 i 182 dana od spravljanja navedenih maltera razlike u relativnom skupljanju usled sušenja su manje od 10% u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti te se smatra da su u rangu sa njima, izuzev u slučaju maltera FA10b pri starosti od 91-og dana (bilo je veće za 13% u odnosu na odgovarajuće referentno skupljanje).

3.2.2. Otpornost na prodor hlorida

Na osnovu pojedinačnih rezultata merenja, odnosno sračunatih srednjih vrednosti, visine uzoraka, temperature anolita (Prilog 11, tabela P11-1), dubine prodora hlorida (Prilog 11, tabela P11-2), kao i trajanja testa (24h) i vrednosti primenjenog napona, sračunat je nestacionarni koeficijent migracije za maltere koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 i 0,4, a rezultati su prikazani i na slici VII-70.



Slika VII-70. III faza – Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida i vodovezivnog faktora u slučaju maltera koji sadrže FA kao SCM (Otpornost na prodor hlorida: 1- smanjena, 2- umerena, 3- povišena, 4- veoma visoka, 5- izuzetno visoka)

Na osnovu klasifikacije betona/maltera u odnosu na otpornost na prodor hlorida, koja je prikazana u tabeli VI-13, i sračunatih vrednosti nestacionarnih koeficijenata migracije hlorida, može se ustanoviti da od maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, samo referentni malter spada u kategoriju maltera sa smanjenom otpornošću na prodor hlorida, dok malter sa 10% FA spadaju u kategoriju maltera sa povišenom, a malter sa 20% FA u maltere sa veoma visokom otpornošću na prodor hlorida. U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4, referentni malter spada u kategoriju maltera sa povišenom otpornošću na prodor hlorida, malter koji sadrži 10% FA spada u kategoriju maltera sa veoma visokom otpornošću, dok malter sa 20% FA spada u maltere sa izrazito visokom otpornošću na prodor hlorida.

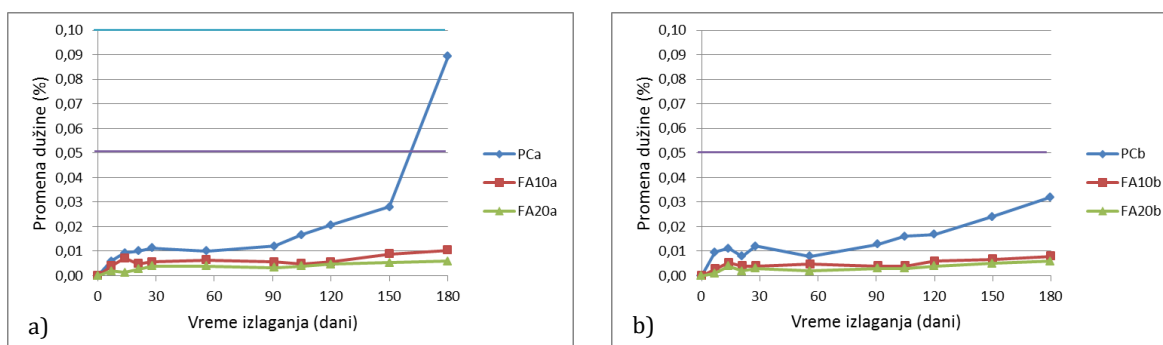
Na osnovu prikazanih rezultata na slici VII-70 može se uočiti da prvenstveno sa povećanjem udela FA, ali i sa smanjenjem vodovezivnog faktora, dolazi do smanjenja nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida u malterima. U slučaju maltera PCa, FA10a i FA20a $D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m²/s) iznosi 23,55, 5,87 (- 75%) i 3,54 (- 85%), a u slučaju maltera PCb, FA10b i FA20b $D_{nssm,sr}$ ($\times 10^{-12}$ m²/s) iznosi 9,90, 2,87 (- 71%) i 1,54 (- 84%), respektivno.

3.2.3. Otpornost na dejstvo sulfata

Na osnovu pojedinačnih vrednosti promene dužine prikazanih u Prilogu 12 i srednjih vrednosti promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) prikazanih u tabeli VI-38, na slici VII-71 prikazane su srednje vrednosti promene dužine (ekspanzije) malterskih uzoraka koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika VII-71a) i 0,4 (slika VII-71b) nakon 0, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 105, 120, 150 i 180 dana izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora.

Nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora, promena dužine epruveta PCa, FA10a i FA20a iznosila je 0,09%, 0,01% i 0,01%, dok je promena dužine epruveta PCb, FA10b i FA20b iznosila je 0,03%, 0,01% i 0,01%, respektivno. S obzirom na prethodno navedene rezultate, svi malteri spravljeni sa FA kao SCM su ispunili uslov da im je promena dužine usled dejstva sulfatnog rastvora manja od 0,05% što ih u skladu sa ACI 318 [1] svrstava u kategoriju maltera sa visokom sulfatnom otpornošću, što je u skladu i sa vizulnim stanjem u kojem su epruvete bile nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora, tabele VI-39 i VI-40.

Na osnovu dijagrama prikazanih na slici VII-71, može se uočiti da dominantnu ulogu u smanjenju promene dužine ima sama primena FA kao SCM (dovodi do smanjenja promene dužine u odnosu na referentne uzorke, i pri manjem i pri većem vodovezivnom faktoru), pri čemu količina supstitucije PC sa FA ima značajniju ulogu u odnosu na vodovezivni faktor, odnosno pri nivou supstitucije od 10%, FA10a ima neznatno veću promenu dužine u odnosu na FA20a, dok pri nivou supstitucije od 20%, promena dužine FA20a je u rang sa FA20b.



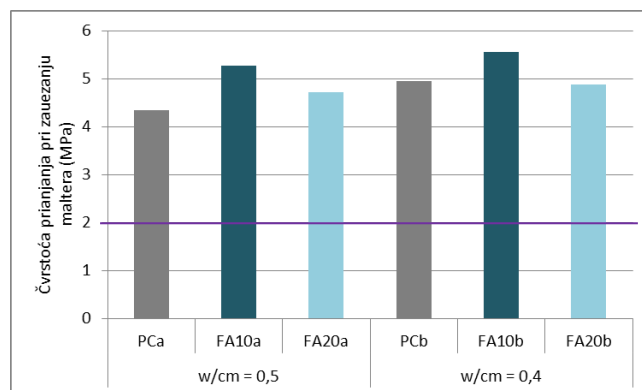
Slika VII-71. III faza – Promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) koji sadrže FA kao SCM, spravljenih sa: a) w/cm=0,5; b) w/cm=0,4

3.2.4. Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda

Ispitivanje prionljivosti maltera, koji sadrže FA kao SCM, za betonsku podlogu „pull-off“ metodom urađeno je u skladu sa procedurom propisanom standardom EN 1542 [157]. Rezultati merenja su dati po pečatima za svaku vrstu maltera iz III faze ispitivanja (Prilog 13), dok su srednje vrednosti prianjanja pri zatezanju maltera za

dominantni lom prikazane u tabeli VI-41. Na osnovu navedenih rezultata, srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju ispitanih maltera su grafički prikazane na slici VII-72.

Kod svih ispitanih maltera sa FA kao SCM je ustanovljeno da je dominantan lom tipa B, odnosno po malteru.



Slika VII-72. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera koji sadrže FA kao SCM

U slučaju prethodno navedenih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5, opseg čvrstoće prijanjanja pri zatezanju iznosi od 4,34-5,27 MPa, dok se kod maltera spravljenih sa vodovezivnom faktorom 0,4 kreće od 4,97-5,55 MPa.

S obzirom na dobijene rezultate, svi malteri iz III faze ispitivanja spravljeni sa NZ kao SCM su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta athezije, te prema standardu EN 1504-3 [23] spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera.

3.2.5. Ograničeno skupljanje maltera

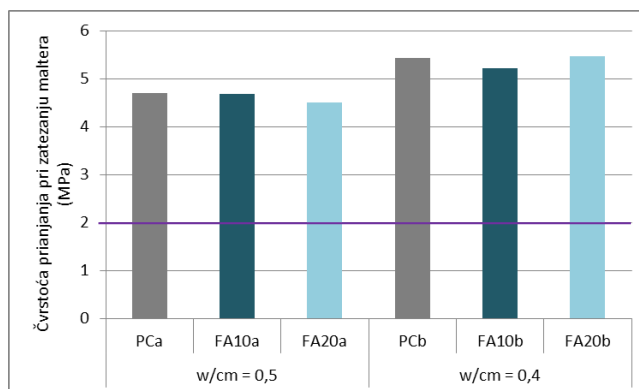
3.2.5.1. Vizuelni pregled test-površine

Nakon 28 dana propisane nege uzoraka (tabela VI-12), kao i nakon dodatnih 56 dana skladištenja, urađene su vizuelne provere stanja test-površina, a njihov izgled je prikazan u Prilogu 14 (tabele P14-1 i P14-2). Na osnovu prikazanog izgleda test-površina može da se zaključi da bez obzira na primenjeni vodovezivni faktor i nivo supstitucije PC sa FA nije došlo do pojave oštećenja, čak ni površinskog karaktera.

3.2.5.2. Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju maltera

Ispitivanje ograničenog skupljanja maltera, koji sadrže FA kao SCM, nanesenog na betosku podlogu urađeno je prema standardu EN 12617-4 [125]. Rezultati merenja su dati po pečatima (Prilog 14), a srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju maltera sa FA za dominantni lom su prikazane u tabeli VI-42. Na osnovu navedenih rezultata, na slici VII-73 grafički su prikazane srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju ispitanih maltera.

Kod svih ispitanih maltera sa FA kao SCM je ustanovljeno da je dominantan lom tipa B, kao i da su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta athezije, te prema standardu EN 1504-3 [23] navedeni malteri spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera.



Slika VII-73. III faza – Ograničeno skupljanje – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera koji sadrže FA kao SCM

Opseg čvrstoća prijanjanja pri zatezanju ispitanih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 iznosi od 4,50-4,70 MPa, dok se opseg kreće od 5,22-5,47 MPa kod maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4.

3.2.6. Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje

3.2.6.1. Vizuelni pregled test-površine

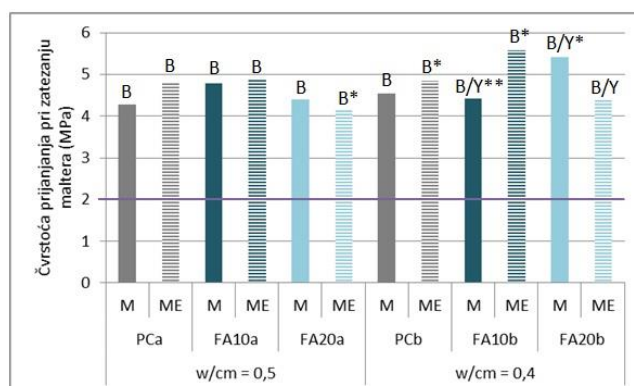
I u slučaju maltera spravljenih sa FA kao SCM nisu primećena veća oštećenja u vidu pukotina, ispadanja zrna agregata ili delaminacije maltera, bez obzira na nivo supstitucije PC sa FA i vrednost vodovezivnog faktora, već su im oštećenja površinskog karaktera. Svi uzorci su prošli uslove vizuelne inspekcije prema standardu EN 1504-3 [23]. U Prilogu 15 (tabela P15-6) prikazan je izgled test-površina uzoraka nakon 50-og ciklusa.

3.2.6.2. Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju maltera

Rezultati ispitivanja toplotne kompatibilnosti maltera, koji sadrže FA kao SCM, i betonske podloge prema EN 13687-1 [21] dati su po pečatima za svaku vrstu maltera iz III faze ispitivanja prikazanih u Prilogu 15, dok su srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantni lom prikazane u tabeli VI-43. Na osnovu navedenih rezultata, srednje vrednosti prijanjanja pri zatezanju ispitanih maltera (test-uzorci i njihovi etaloni) grafički su prikazane na slici VII-74.

Kao i u slučaju malterima iz III faze ispitivanja koji sadrže NZ, i malteri koji sadrže FA kao SCM su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta ispitane toplote

kompatibilnosti, te takođe spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera prema standardu EN 1504-3 [23].



Slika VII-74. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M) koji sadrže FA kao SCM i njihovih etalona (ME)

Kod etalonskih i test-uzoraka spravljenih sa FA kao SCM i vodovezivnim faktorom 0,5, dominantni lom je, takođe, tipa B (po malteru). Čvrstoće prijanjanja se, u slučaju test-uzoraka sa FA i vodocementnim faktorom od 0,5, kreću od 4,28-4,79 MPa, odnosno od 4,17-4,88 MPa kod njihovih etalona.

U slučaju maltera sa vodovezivnim faktorom od 0,4 i koji sadrže FA, test-uzorci imaju dominantan lom tipa B/Y (ahtezioni lom između maltera i lepka), dok etalonski uzorci imaju tipa B. Opseg čvrstoće prijanjanja maltera sa FA u prethodno navedenom slučaju kreće se od 4,42-5,42 MPa kod test-uzoraka i od 4,39-5,57 MPa kod etalonskih uzoraka.

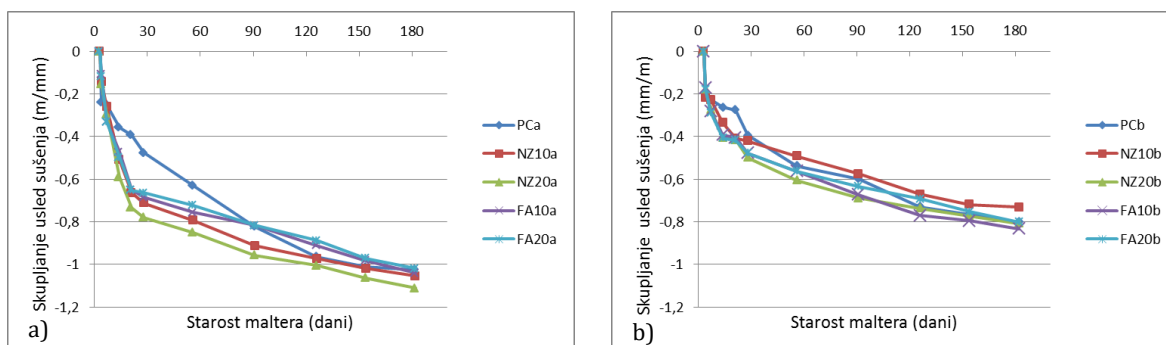
3.3. Komparativna analiza rezultata ispitivanja cementnih maltera spravljenih sa NZ i sa FA kao SCM po svojstvima – III faza

3.3.1. Skupljanje usled sušenja

Na osnovu rezultata merenja prikazanih u prilogu 10, kao i srednjih vrednosti skupljanja usled sušenja maltera prikazanih u tabeli VI-34 na slici VII-75 prikazane su srednje vrednosti skupljanja usled sušenja maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika VII-75a) i 0,4 (slika VII-75b) pri starosti maltera od 3, 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici slika VII-75, može se uočiti da su malteri koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa većim vodovezivnim faktorom, pri starosti većoj od 7 dana, imali veće skupljanje usled sušenja u poređenju sa malterim spravljenim sa nižim vodovezivnim faktorom bez obzira na primenjeni SCM i nivo supstitucije PC sa NZ odnosno FA.

Opseg skupljanja usled sušenja (apsolutne vrednosti) maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM, ispitanih pri starosti od 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 126, 154 i 182 dana i spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, iznosi: 0,11-0,24 mm/m, 0,25-0,33 mm/m, 0,36-0,59 mm/m, 0,39-0,73 mm/m, 0,48-0,78 mm/m, 0,63-0,85 mm/m, 0,82-0,96 mm/m, 0,89-1,00 mm/m, 0,97-1,06 mm/m i 1,02-1,11 mm/m, respektivno. Pri istim starostima, opseg skupljanja usled sušenja (apsolutne vrednosti) maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4 iznosi: 0,17-0,22 mm/m, 0,23-0,29 mm/m, 0,26-0,41 mm/m, 0,27-0,42 mm/m, 0,39-0,50 mm/m, 0,49-0,61 mm/m, 0,58-0,69 mm/m, 0,67-0,77 mm/m, 0,72-0,80 mm/m i 0,73-0,83 mm/m, respektivno.

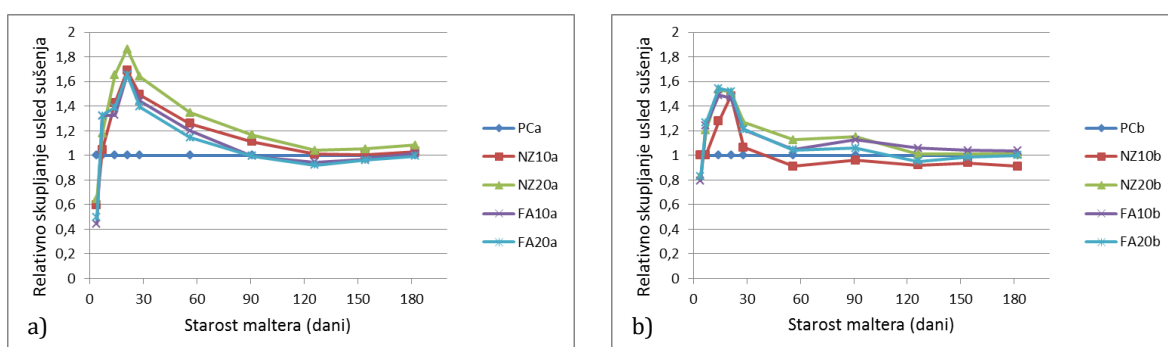


Slika VII-75. III faza – Skupljanje usled sušenja maltera iz III faze ispitivanja, spravljenih sa:
a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

Dijagram promene skupljanja usled sušenja u toku vremena referentnog PCa maltera može se podeliti u tri dela: prvi je do 28-og dana (nelinearna zavisnost), drugi je od 28-og do 126-og dana (linearna zavisnost) i treći je od 126-og do 182-og dana (linearna zavisnost). Malteri NZ10a i NZ20a imaju bilinearne dijagrame promene skupljanja usled sušenja u toku vremena. Skupljanje usled sušenja maltera NZ10a i NZ20a je intenzivno do 21-og dana, odnosno do 14-og dana, respektivno, a nakon čega je umerenije. U slučaju maltera FA10a i FA20a, skupljanje je prvo bilo nelinearno i intenzivno, do 21-og dana, a potom linearno i umerenije. Referentni malter PCb, kao i malteri FA10b i FA20b, su do 28-og dana imali nelinearnu zavisnost promene skupljanja usled sušenja maltera u toku vremena, a nakon tog perioda linearnu. U slučaju maltera NZ10b, skupljanje je prvo bilo nelinearno, ali do 21-og dana, a potom linearno, dok je malter NZ20b imao nelinearnu zavisnost promene skupljanja u toku vremena.

Relativna skupljanja usled sušenja malterakoji sadrže NZ ili FA kao SCM prikazana su na slici VII-76a i VII-76b. Pri starosti od 4 dana malteri NZ10a, NZ20a, FA10a i FA20a spravljeni sa većim vodovezivnim faktorom ($w/cm=0,5$) (slika VII-76a) imali su za 40%, 35%, 55% i 50% manje relativno skupljanje u odnosu na referentni cementni malter, respektivno. Već nakon 7 dana relativno skupljanje maltera je ili u rangu ili je premašilo odgovarajuće referentne vrednosti, da bi pri starosti od 21-og dana

relativno skupljanje navedenih maltera premašilo odgovarajuću referentnu vrednost za maksimalnih 69%, 87%, 65% i 66%, respektivno. Nakon 21-og dana ta razlika se postepeno smanjuje, odnosno relativno skupljanje cemento-zeolitnih maltera je do starosti maltera od 91-og dana značajno veće u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti, dok je u slučaju maltera koji sadrže FA značajno veće do starosti maltera od 56 dana. U periodu između 126 i 182 dana (NZ10a i NZ20a), odnosno 91 i 182 (FA10a i FA20a) dana od spravljanja navedenih maltera, razlike u relativnom skupljanju usled sušenja su manje od 10% u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti te se smatra da je skupljanje usled sušenja maltera spravljeni sa vodovezivnim faktorom 0,5 i sa 10% i 20% NZ il FA kao SCM u navedenom periodu u rangu sa skupljanjem odgovarajućeg referentnog maltera.



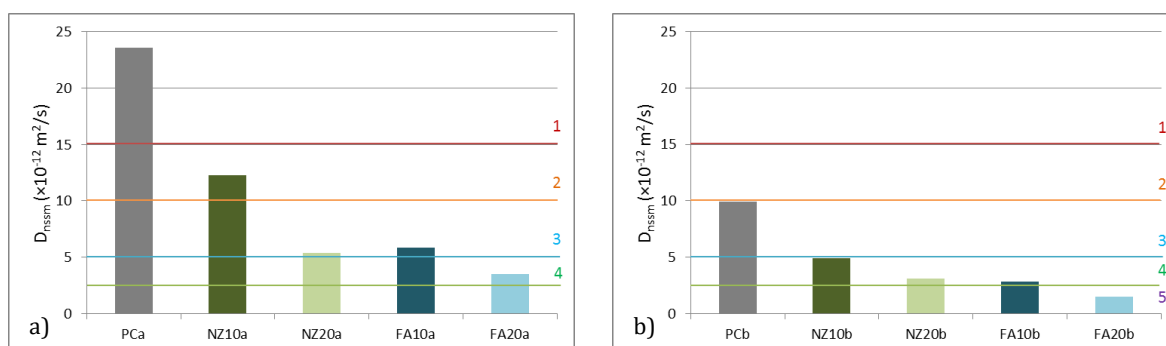
Slika VII-76. III faza – Relativno skupljanje usled sušenja maltera iz III faze ispitivanja, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$

U slučaju primene manjeg vodovezivnog faktora ($w/cm=0,4$), relativno skupljanje maltera NZ10b se u toku prvih 7 dana podudara sa skupljanjem odgovarajućeg referentnog maltera (slika VII-76b). U periodu između 7 i 21 dana dolazi do naglog povećanja relativnog skupljanja maltera NZ10b, i 21-og dana relativno skupljanje mu je veće za maksimalnih 48% u odnosu na odgovarajuću referentnu vrednost, nakon čega dolazi do naglog smanjenja razlike u skupljanju između navedenog maltera i referentnog, da bi nakon 28 dana relativno skupljanje maltera bilo u rangu sa korespondentnim referentnim skupljanjem, nakon čega se čak i spušta ispod referentne vrednosti, ali ne za više od 10%. Pri starosti od 4 dana malteri NZ20b, FA10b i FA20b imali su za 17%, 20% i 17% manje relativno skupljanje u odnosu na referentni cementni malter, respektivno. Nakon 7 dana relativno skupljanje maltera NZ20b, FA10b i FA20b je premašilo za 20%, 24% i 26%, dok je pri starosti od 14 dana relativno skupljanje navedenih maltera premašilo odgovarajuću referentnu vrednost za maksimalnih 54%, 49%, odnosno 54%, respektivno. Nakon 21-og dana ta razlika se smanjuje, da bi relativno skupljanje navedenih maltera bilo u rangu sa odgovarajućim referentnim nakon 126 dana u slučaju maltera NZ20b i 56 dana u slučaju maltera FA20b i FA10b (stim da je relativno skupljanje FA10b pri starosti od

91 dana bilo veće za 13%, a potom je ponovo bilo u rangu sa odgovarajućom referentnom vrednosti).

3.3.2. Otpornost na prodor hlorida

Na osnovu pojedinačnih rezultata merenja, odnosno sračunatih srednjih vrednosti, visine uzoraka, temperature anolitnog rastvora (Prilog 11, tabela P11-1), dubine prodora hlorida (Prilog 11, tabela P11-2), kao i trajanja testa (24h) i vrednosti primenjenog napona, sračunat je nestacionarni koeficijent migracije za maltere koji sadrže NZ, odnosno FA kao SCM, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 (slika VII-77a) i 0,4 (slika VII-77b).



Slika VII-77. III faza – Zavisnost nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida i vodovezivnog faktora u slučaju maltera koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa: a) $w/cm=0,5$; b) $w/cm=0,4$; (Otpornost na prodor hlorida: 1- smanjena, 2- umerena, 3- povišena, 4- veoma visoka, 5- izuzetno visoka)

Na osnovu klasifikacije betona/maltera u odnosu na otpornost na prodor hlorida, koja je prikazana u tabeli VI-13, i sračunatih vrednosti nestacionarnih koeficijenata migracije hlorida, može se ustanoviti da od maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, jedino referentni malter spada u kategoriju maltera sa smanjenom otpornošću na prodor hlorida, malter sa 10% NZ spada u kategoriju maltera sa umerenom otpornošću, malter sa 20% NZ kao i malter sa 10% FA spadaju u kategoriju maltera sa povišenom otpornošću, dok malteri sa 20% FA spada u kategoriju maltera sa veoma visokom otpornošću na prodor hlorida. U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4, referentni malter spada u kategoriju maltera sa povišenom otpornošću na prodor hlorida, malteri koji sadrže 10% i 20% NZ, kao i malter sa 10% FA, spadaju u kategoriju maltera sa veoma visokom otpornošću, dok malter sa 20% FA spada u maltere sa izuzetno visokom otpornošću na prodor hlorida.

U slučaju maltera PCa, NZ10a, NZ20a, FA10a i FA20a D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s) iznosi 23,55, 12,27 (- 48%), 5,36 (- 77%), 5,87 (- 75%) i 3,54 (- 85%), a u slučaju maltera PCb,

NZ10b, NZ20b, FA10b i FA20b D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s) iznosi 9,90, 4,95 (- 50%), 3,11 (- 69%), 2,87 (- 71%) i 1,54 (- 84%), respektivno.

U pogledu kriterijuma za klase izloženosti hloridama prikazanih u tabeli VI-14, malteri NZ20a, FA10a i PCb se mogu koristiti za sanaciju armirano betonskih konstrukcija od kojih se zahteva otpornost na dejstvo XD1, XS1, XD2 i XS2 klasa izloženosti, malteri FA20a, NZ10b, NZ20b, FA10b i FA20b u slučaju XD3 i XS3 klasa izloženosti, dok malteri PCa i NZ10a nisu ispunili zahtevane kriterijume (tabele VI-35 i VI-36).

Na osnovu prethodno navedenih rezultata može se uočiti da sa smanjenjem vodovezivnog faktora i sa povećanjem udela NZ odnosno FA, dolazi do smanjenja nestacionarnog koeficijenta migracije hlorida u malterima.

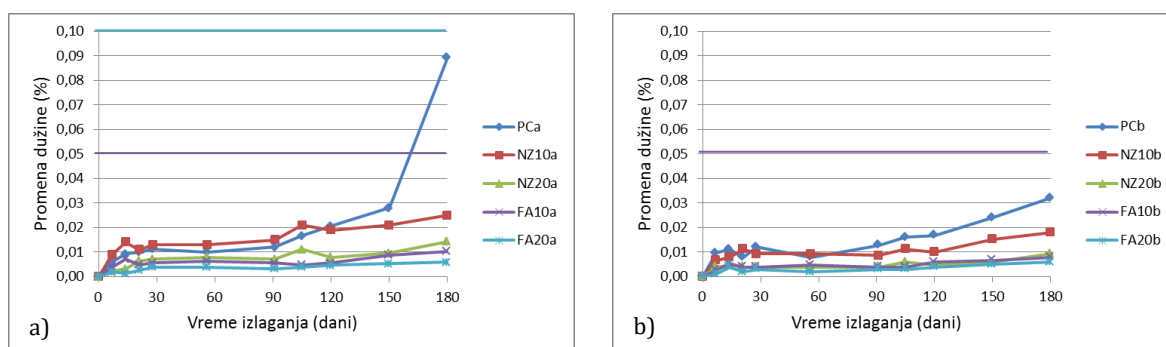
Opšte je poznata činjenica da sa smanjenjem vodovezivnog faktora dolazi do smanjenja poroznosti betona/ maltera/ pasta, što za posledicu ima smanjenje njihove propustljivosti. S druge strane primena SCM kao što su NZ i FA ima višestruko pozitivni uticaj na povećanje otpornosti betona/ maltera/ pasta na prodor hlorida. Naime, kao rezultat procesa hidratacije i pucolanske reakcije nastaju dodatne količine C-S-H gela, kao i C-A-S-H gel, koji popunjavaju šupljine i pore stvarajući materijal sa finijom raspodelom pora, što utiče na smanjenje njegove propustljivosti. Takođe, cementni betoni/ malteri/ paste mogu hemijski (stvaranje Fridelove soli) i fizički da vežu hloridne jone (adsorpcija Cl⁻ od strane C-S-H gela) i time smanje količinu slobodnih hloridnih jona u pornom rastvoru [176]. U slučaju primene SCM kao što su NZ i FA (i) dolazi do stvaranja dodatne količine C-S-H gela, kao i formiranja C-A-S H gela čime se povećava površina koja može da adsorbuje hloridne jone [176], (ii) unosi se veća količina Al₂O₃ koji ubrzava proces prelaska AFm faze u Fridelovu so [110].

3.3.3. Otpornost na dejstvo sulfata

Na osnovu srednjih vrednosti promene dužine malterskih uzoraka (prikazanih u poglavlju 12) usled dejstva sulfatnog rastvora u trajanju od šest meseci urađena je klasifikacija maltera iz III faze ispitivanja. Od ispitanih maltera, jedino referentni malter spravljen sa vodovezivnim faktorom od 0,5 pripada kategoriji maltera sa umerenom sulfatnom otpornošću, dok preostali pripadaju kategoriji maltera sa visokom sulfatnom otpornošću.

Nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora, promena dužine epruveta PCa i NZ10a iznosila je 0,09% i 0,03%, respektivno, dok je promena dužine epruveta NZ20a, FA10a i FA20a iznosila 0,01%. U slučaju maltera spravljenih sa nižim vodovezivnim faktorom, promena dužine epruveta PCb i NZ10b iznosila je 0,03% i 0,02%, respektivno, dok je promena dužine maltera NZ20b, FA10b i FA20b iznosila 0,01%.

Na osnovu prethodno navedenih rezultata kao i dijagrama prikazanih na slici VII-78, može se uočiti da sa smanjenjem vodovezivnog faktora dolazi do smanjenja promene dužine epruveta, prvenstveno u slučaju referentnog matera, a potom i maltera koji sadrži 10% NZ, dok u slučaju maltera koji sadrže 20% NZ kao i 10% i 20% FA vodovezivni faktor nema značajnijeg uticaja na promenu dužine epruveta izloženih dejstvu sulfatnog rastvora.



Slika VII-78. III faza – Promene dužine malterskih uzoraka (epruveta) koji sadrže NZ ili FA kao SCM, spravljenih sa: a) w/cm=0,5; b) w/cm=0,4

Na promenu dužine epruveta izloženih dejstvu sulfatnog rastvora prvenstveno ima uticaj (i) sama supstitucija PC sa SCM (bilo da je u pitanju NZ ili FA) jer dolazi do efekta razblaživanja (*dilution effect*), odnosno smanjuje se količina cementa, a samim tim i količina nastalog portlandita kao produkta hidratacije, dok s druge strane SCM reaguje sa nastalim portlanditom i nastaju dodatne količine C-S-H gela, kao i C-A-S-H gel (samo u slučaju primene FA kao SCM), čime se povećava gustina mikrostrukture paste i smanjuje propustljivost maltera, ali se stvara i film preko aluminatnih faza što ograničava formiranje etringita [29] (ii) vrsta SCM-a kojom se vrši supstitucija (postoji razlika između NZ i FA), (iii) nivo supstitucije PC sa NZ, odnosno FA, (iv) vodovezivni faktor. Sama primena NZ, kao i povećanje nivoa supstitucije PC sa NZ, dovodi do značajnog smanjenja ekspanzije malterskih uzoraka izloženih dejstvu sulfatnog rastvora, u odnosu na referentne malterske uzorke prvenstveno u slučaju većeg vodovezivnog faktora. U slučaju maltera spravljenih sa FA kao SCM može se uočiti da dominantnu ulogu u smanjenju promene dužine ima sama primena FA kao SCM (dovodi do smanjenja promene dužine u odnosu na referentne uzorke i uzorke koji sadrže u istoj količini NZ kao SCM, i pri manjem i pri većem vodovezivnom faktoru), pri čemu količina supstitucije PC sa FA ima značajniju ulogu u odnosu na vodovezivni faktor.

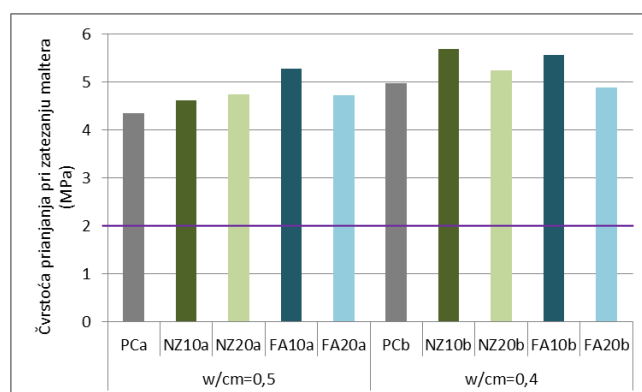
Na osnovu vizuelnog stanja u kojem su epruvete bile nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora (tabele VI-39 i VI-40) može se konstatovati da su u slučaju većeg vodovezivnog faktora epruvete koje sadrže FA bile u boljem stanju u odnosu na

epruvete koje sadrže NZ u istoj količini, dok je u slučaju manjeg vodovezivnog faktora stanje bilo obrnuto, odnosno u boljem stanju su bile epruvete koje sadrže NZ.

3.3.4. Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda

Svi malteri iz III faze ispitivanja su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta athezije, te prema standardu EN 1504-3 [23] spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera. S obzirom da je kod svih ispitanih maltera ustanovljen isti tip dominantnog loma (tip B - po malteru), moguće je direktno porediti dobijene rezultate.

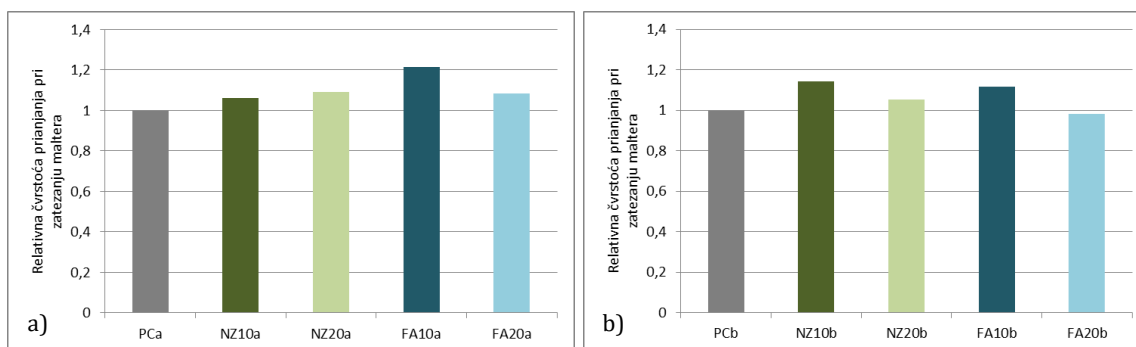
Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-79, može se uočiti da su srednje vrednosti čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera spravljanih sa nižim vodovezivnim faktorom ili u rangu ili su veće u odnosu na odgovarajuće čvrstoće maltera koji su spravljani sa većim vodovezivnim faktorom. Opseg čvrstoće prijanjanja se kreće od 4,34-5,27 MPa kod maltera spravljanih sa $w/cm=0,5$ i od 4,88-5,68 MPa u slučaju maltera spravljanih sa $w/cm=0,4$.



Slika VII-79. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja

Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja su prikazane na slici VII-80. Pri vodovezivnom faktoru od 0,5, nivo supstitucije (od 10% i 20%) PC sa NZ nema uticaj na relativnu čvrstoću prijanjanja (prirast čvrstoće prijanjanja je $\leq 10\%$), dok u slučaju FA ima samo pri nivou supstitucije od 10% (relativna čvrstoća prijanjanja je veća za 21,41% u odnosu na referentnu vrednost).

U slučaju maltera spravljanih sa vodovezivnim faktorom 0,4, vrsta SCM ne utiče na čvrstoću prijanjanja već nivo supstitucije PC sa SCM. Malteri kod koji je 10% PC zamenjeno sa NZ, odnosno sa FA, imali su veće relativne čvrstoće prijanjanja za 14,24% i 11,73%, respektivno, dok su relativne čvrstoće prijanjanja maltera sa 20% NZ, odnosno FA, ostale u rangu referentnih.



Slika VII-80. III faza – Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$; b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

3.3.5. Ograničeno skupljanje maltera

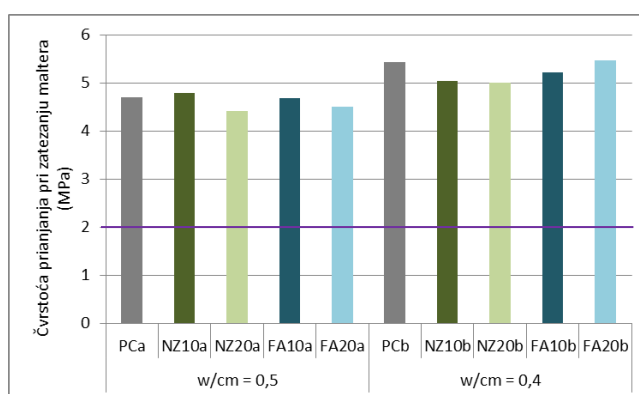
3.3.5.1. Vizuelni pregled test-površine

Na osnovu prikazanog izgleda test-površina (Prilog 14, tabele P14-1 i P14-2) može da se zaključi da bez obzira na primenjeni vodovezivni faktor, vrstu i količinu SCM nije došlo do pojave oštećenja, čak ni površinskog karaktera.

3.3.5.2. Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju maltera

U pogledu ograničenog skupljanja svi malteri iz III faze ispitivanja su ispunili uslov od $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa, tako da pripadaju klasi R4 konstrukcijskih maltera prema standardu EN 1504-3 [23].

Kod svih ispitanih maltera dominantni lom je tipa B (po malteru). Srednje vrednosti čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera za dominantan lom su prikazane na slici VII-81.

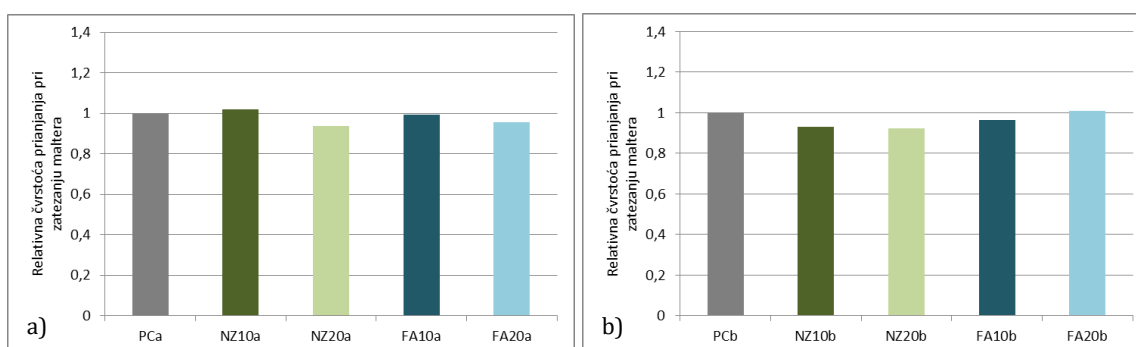


Slika VII-81. III faza – Ograničeno skupljanje – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja

Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti da su srednje vrednosti čvrstoće prijanjanja maltera spravljenih sa nižim vodovezivnim faktorom ($w/cm=0,4$) veće u odnosu na odgovarajuće čvrstoće maltera koji su spravljeni sa većim vodovezivnim

faktorom ($w/cm=0,5$). Opseg čvrstoće prijanjanja se kreće od 4,41-4,79 MPa kod maltera spravljenih sa $w/cm=0,5$ i od 5,01-5,47 MPa u slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,4$.

Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja su prikazane na slici VII-82. Pri vodovezivnom faktoru od 0,5, i nivou supstitucije PC od 10% bilo sa NZ ili sa FA, relativna čvrstoća prijanjanja se nije promenila u odnosu na referentnu vrednost, dok je pri nivou supstitucije PC od 20% sa NZ ili FA evidentno smanjenje, ali ne više od 10% (ostaje u rangi referentne vrednosti).



Slika VII-82. III faza – Ograničeno skupljanje – Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera iz III faze ispitivanja: a) Spravljenih sa $w/cm=0,5$; b) Spravljenih sa $w/cm=0,4$

U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4 i sa 20% FA kao SCM relativna čvrstoća prijanjanja se nije promenila u odnosu na referentnu vrednost, dok je u slučaju maltera NZ10b, NZ20b i FA10b zabeleženo smanjenje čvrstoće, ali ne veće od 10% (u rangi sa referentnom vrednosti).

3.3.6. Termička kompatibilnost – ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje

3.3.6.1. Vizuelni pregled test-površine

Prema standardu EN 1504-3 [23] nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićen rastvor soli za odmrzavanje predviđeno je da se prvo uradi vizuelna provera stanja test-površine uzoraka, a njihov izgled kao i opis dati su u tabelama VII-49 i VII-50, zajedno sa izgledom i opisom test-površina pre izlaganja ciklusima, a navedene su i promene do kojih je došlo u datom periodu.

Tabela VII-49. III faza – Izgled test-površine uzoraka spravljanih sa $w/cm=0,5$ pre i nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1 [21]





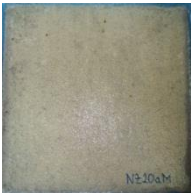

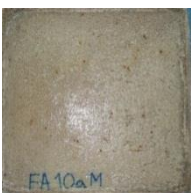






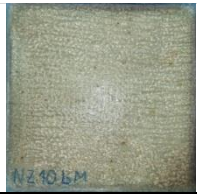






Stanje test-površina pre prvog ciklusa	Stanje test-površina nakon 50 ciklusa	Razlika
<p>PCa</p>  <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka.</p>	 <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka, tačkasto/mrežasto skidanje skrame po celoj površini uzorka.</p>	Došlo je do sitnog tačkastog/mrežastog skidanja skrame po test – površini.
<p>NZ10a</p>  <p>Hrapava površina sa mehurićima, prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka.</p>	 <p>Manje hrapava površina usled sitnog skidanje skrame, prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka.</p>	Došlo je do blagog smanjenja početne hrapavosi površine usled sitnog skidanja skrame.
<p>NZ20a</p>  <p>Površina puna mehurića, smanjena vezivna matrica duž ivica.</p>	 <p>Ujednačeno sitno hrapava površina - umereno skidanje skrame.</p>	Skoro nestali mehurići, skinut površinski sloj vezivne matrice, tako da je ostala sitno hrapava površina.
<p>FA10a</p>  <p>Neujednačena završna obrada površine: mrežaste prsine na levoj – glatkoj polovini, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	 <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini, leva polovina je-sitnije hrapava, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	Došlo je do sitnog skidanja skrame po celoj površini.
<p>FA20a</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini (sitno hrapava) izuzev u centralnom delu i u dva ugla gde je izraženije.</p>	 <p>Umereno skidanje skrame po celoj površini izuzev u centralnom delu gde je izraženije.</p>	Došlo je do sitnog skidanja skrame po celoj površini i izraženije u centralnom delu i u dva ugla.

Tabela VII-50. III faza – Izgled test-površine uzoraka spravljenih sa $w/cm=0,4$ pre i nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1 [21]

Stanje test-površina pre prvog ciklusa	Stanje test-površina nakon 50 ciklusa	Razlika
<p>PCb</p>  <p>Sitno hrapava površina sa mehurićima.</p>	 <p>Sitno hrapava površina, mestimično više skinuta skrama.</p>	Došlo je do sitnog skidanja skrame po celoj površini, a mestimično je više skinuta skrama.
<p>NZ10b</p>  <p>Talasasta površina zbog završne obrade.</p>	 <p>Sitno sidanje skrame, prvenstveno u dubljenjima.</p>	Došlo je do sitnog skidanja skrame, prvenstveno u dubljenjima.
<p>NZ20b</p>  <p>Glatka površina (na 1/4 sitno hrapava) sa mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> naročito uz ivice uzorka.</p>	 <p>Pretežno glatka površina sa mrežastim prslinama, širine <math><0,05\text{mm}</math>, na 1/4 površine je sitno skinuta skrama.</p>	Došlo je do mestimičnog, sitnog skidanja skrame.
<p>FA10b</p>  <p>Gruba završna obrada (na pojedinim mestima se vide zrna agregata) sa izrazito sitnim mehurićima.</p>	 <p>Izrazito hrapava površina, sitno skidanje skrame.</p>	Došlo je do sitnog skidanja skrame.
<p>FA20b</p>  <p>Glatka površina, uz jednu ivicu mestimično hrapava, sa mnogo mehurića.</p>	 <p>Tačkasto skidanje skrame po površini (svetlije nijanse).</p>	Došlo je do tačkastog skidanja skrame.

Na osnovu izgleda test-površina (tabele VII-49 i VII-50) uzoraka može da se zaključiti da ni na jednom uzorku, bez obzira na prisustvo SCM i vrednost vodovezivnog faktora, nisu primećena veća oštećenja u vidu pukotina, ispadanja zrna agregata ili delaminacije maltera. Registrovana oštećenja su površinskog karaktera i zahvataju samo skramu koja se izdvojila na uzorcima prilikom završne obrade. Oštećenja su se manifestovala u vidu skidanja, luskanja skrame tako da pojedina zrna agregata postaju vidljiva, ali je očuvana njihova athezija sa vezivnom matricom. Dubina

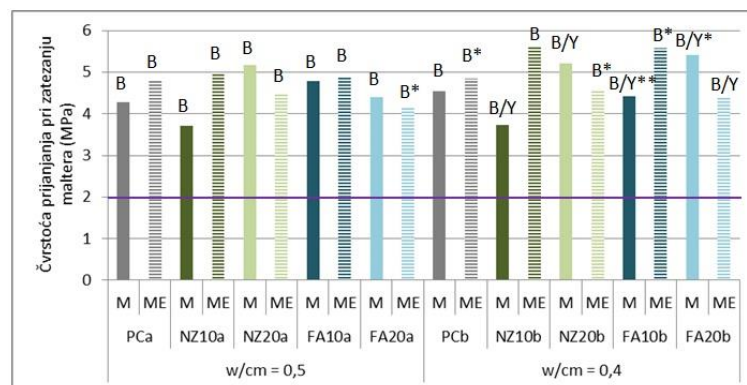
registrovanih oštećenja nije veća od 2 mm. Na osnovu ovakve slike oštećenja konstatovano je da testirana površina kod svih uzoraka nije pretrpela značajnija oštećenja i da se priprema uzoraka za ispitivanje „pull-off“ metodom sastoji od tretiranja predmetne površine žičanim četkama.

Upoređenjem vrste i stepena ispoljenih oštećenja zaključeno je da smanjenje vodovezivnog faktora pozitivno uticalo na stanje test-površine kod svih uzoraka.

S obzirom da se nisu javile prsilene širine > 0,1 mm, i da nije došlo do delaminacije, svi uzorci su prošli uslove vizuelne inspekcije prema standardu EN 1504-3 [23].

3.3.6.2. Čvrstoća prijanjanja pri zatezanju maltera

Uticaj vrste SCM i vodovezivnog faktora na termičku kompatibilnost maltera i betonske podloge nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja sa potapaljem izložene površine u zasićeni rastvor soli za odmrzavanja prikazan je na slici VII-83.



Slika VII-83. III faza – Čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M) i etalona (ME) spravljenih od maltera iz III faze ispitivanja

Na osnovu prikazanih rezultata jasno se može uočiti da su svi malteri iz III faze ispitivanja ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta toplote kompatibilnosti [21], tako da u pogledu ispitane performanse spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera u skladu sa standardom EN 1504-3 [23].

U slučaju test-uzoraka, opseg čvrstoće prijanjanja se kreće od 3,71-5,18 MPa kod maltera spravljenih sa $w/cm=0,5$ i od 3,73-5,42 MPa u slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,4$.

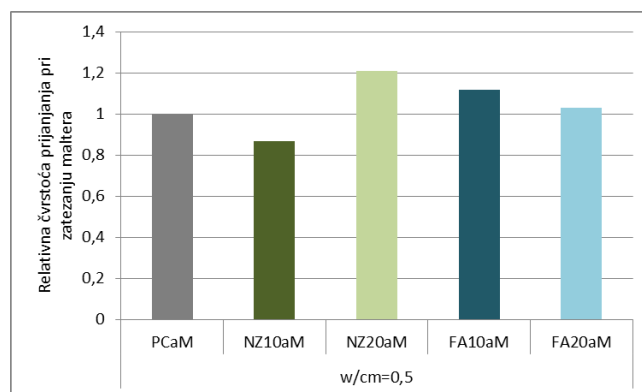
Kod etalonskih uzoraka, čvrstoća prijanjanja se kreće od 4,17-4,97 MPa u slučaju maltera spravljenih sa $w/cm=0,5$, odnosno od 4,39-5,62 MPa kod maltera spravljenih sa $w/cm=0,4$.

U slučaju oba vodovezivna faktora, od test-uzoraka najmanju čvrstoću prijanjanja su imali malteri sa 10% NZ kao SCM, a u slučaju etalona najveće čvrstoće prijanjanja.

U slučaju test-uzoraka spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, i referentni malter i malteri sa SCM imaju isti dominantan tip loma (B), stoga se rezultati mogu direktno porediti. U odnosu na malter PCaM, malter sa 10% NZ (NZ10aM) je imao manju čvrstoću prijanjanja pri zatezanju, dok je maltera sa 20% NZ (NZ20aM) imao veću. Malteri sa 10% i 20% FA su imali veće čvrstoće prijanjanja pri zatezanju od referenog maltera PCaM, stim da je sa povećanjem udela FA došlo do smanjenja čvrstoće.

Kod test-uzoraka spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4, referentni malter i malteri sa SCM nisu imali isti tip dominantnog loma, stoga se ne može uraditi direktno poređenje njihovih čvrstoća prijanjanja pri zatezanju. Međutim, svi malteri sa SCM su, u ovom slučaju, imali dominantni lom tipa B/Y, tako da se mogu međusobno porediti. Sa slike VII-83 jasno se može uočiti da sa povećanjem udela SCM dolazi i do povećanja čvrstoće prijanjanja i da malteri sa NZ kao SCM imaju manje čvrstoće prijanjanja u odnosu na maltere sa FA pri istom nivou supstitucije PC.

S obzirom da svi test-uzorci, koji su spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, imaju isti tip dominantnog loma (B), moguće je odrediti relativne čvrstoće prijanjanja maltera koji sadrže SCM u odnosu na njihov referentni malter. Na osnovu rezultata prikazanih na slici VII-84 jasno se može uočiti da i najmanju i najveću relativnu čvrstoću prijanjanja imaju malteri koji sadrže NZ, odnosno da je kod maltera NZ10aM za 13,40% manja od referentne, dok je u slučaju maltera NZ20aM čak za 21,03% veća.



Slika VII-84. III faza – Relativne čvrstoće prijanjanja pri zatezanju test-uzoraka (M)

Dok je u slučaju maltera koji sadrže NZ, sa povećanjem udela SCM došlo i do relativnog povećanja čvrstoće, kod maltera koji sadrže FA je došlo do smanjenja. Čvrstoća maltera FA10aM je za 11,92% veća od referentne, dok je u slučaju maltera FA20aM u rang u sa referentnom.

4. ZAKLJUČCI III FAZE ISTRAŽIVANJA

Na osnovu rezultata ispitivanja maltera iz III faze istraživanja mogu se izvesti sledeći zaključci po svojstvima:

Skupljanje usled sušenja

NZ i FA kao SCM utiču na veličinu skupljanja. Pri tome, njihov efekat može biti pozitivan ili negativan, što zavisi od sledećih analiziranih parametara:

- Smanjenjem vodovezivnog faktora (sa 0,5 na 0,4) dolazi do značajnog smanjenja skupljanja usled sušenja, kako referentnog cementnog, tako i maltera spravljenih sa obe vrste SCM. Smanjenje skupljanja usled sušenja za starost 28 dana iznosi 19% za referentni malter, 41% i 36%, za maltere sa 10% i 20% NZ, i 30% i 27% za maltere sa 10% i 20% FA, respektivno. Smanjenje skupljanja usled sušenja za starost 182 dana iznosi 22% za referentni malter, 31% i 27%, za maltere sa 10% i 20% NZ, respektivno i 20% i 22% za maltere sa 10% i 20% FA, respektivno;
- Uticaj NZ na skupljanje usled sušenja zavisi od vodovezivnog faktora i starosti. U slučaju vodovezivnog faktora 0,5, malteri sa NZ imaju najveće vrednosti skupljanja za obe karakteristične starosti, uz napomenu da se razlike između vrednosti skupljanja tokom vremena smanjuju. Povećanja skupljanja maltera sa 10% i 20% NZ, u odnosu na referentni malter iznose 48% i 63%, respektivno, za starost od 28 dana, a za starost od 182 dana, povećanja su 4% i 9%, respektivno. U slučaju vodovezivnog faktora 0,4, malteri sa NZ u količinama od 10% i 20%, imaju veće vrednosti skupljanja pri starosti od 28 dana, za 8% odnosno 28%, u odnosu na referentni malter, respektivno. U periodu između 28 i 182 dana, promena vrednosti skupljanja usled sušenja maltera sa NZ se smanjuje, tako da su konačne vrednosti skupljanja iste kod maltera sa 20% NZ, ili čak i manje za 9%, kod maltera sa 10% NZ, u odnosu na referentni malter;
- Uticaj FA na skupljanje usled sušenja takođe zavisi od vodovezivnog faktora i starosti. U slučaju vodovezivnog faktora 0,5, malteri sa FA u količinama od 10% i 20%, imaju veće vrednosti skupljanja pri starosti od 28 dana, za 44% odnosno 38%, u odnosu na referentni malter, respektivno. U periodu između 28 i 182 dana, promena vrednosti skupljanja usled sušenja maltera sa FA se smanjuje, tako da su konačne vrednosti skupljanja u rangu sa vrednostima referentnog maltera. U slučaju vodovezivnog faktora 0,4, malteri sa FA treće faze imaju veće vrednosti skupljanja pri starosti od 28 dana, za 23%, u odnosu na referentni malter, a za starost od 182 dana, konačne vrednosti skupljanja su u rangu sa vrednostima referentnog maltera.

Skupljanje usled sušenja maltera sa NZ, odnosno FA kao SCM, zavisi od sva tri analizirana paramera (vodovezivnog faktora, starosti i vrste SCM). Podjednako značajan uticaj na smanjenje skupljanja usled sušenja maltera sa NZ i FA imaju vodovezivni faktor i starost, dok je uticaj vrste SCM manje izražen. Uticaj količine zamane cementa sa SCM na vrednost skupljanja usled sušenja je vidljiv samo kod primene NZ.

Otpornost na prodor hlorida

Otpornost maltera sa i bez odabranih SCM je urađena upoređivanjem vrednosti koeficijenata migracije hlorida za starost od 28 dana. Zaključeno je da i NZ i FA imaju pozitivan uticaj na povećanje otpornosti na prodor hlorida, jer se koeficijent migracije hlorida značajno smanjuje, naročito sa povećanjem učešća SCM. Navedeni zaključak je potvrđen klasifikacijom otpornosti na prodor hlorida prema kriterijumima *Gjorv*-a [61]. U slučaju maltera sa vodovezivnim faktorom 0,5, referentni malter ima *smanjenu* otpornost na prodor hlorida, sa 10% NZ *umerenu*, sa 20% NZ, kao i sa 10% FA *povišenu*, dok malter sa 20% FA ima *veoma visoku* otpornost na prodor hlorida. Od maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4, samo je referentni imao *povišenu* otpornost na prodor hlorida, dok su preostali ispitani malteri (sa 10% i 20% NZ, kao i FA) imali *izuzetno visoku otpornost* na prodor hlorida.

U pogledu kriterijuma za klase izloženosti na dejstvo hlorida, malteri sa vodovezivnim faktorom 0,5 koji sadrže 20% NZ, odnosno 10% FA su preporučeni za sanaciju armirano betonskih konstrukcija u sredinama sa klasama izloženosti XD1, XS1, XD2 i XS2, a malteri sa vodovezivnim faktorom 0,4 i dodatkom 10% i 20% NZ, odnosno FA se mogu koristiti u sredinama sa najoštrijim klasama izloženosti na dejstvo hlorida, XD3 i XS3.

Doprinos NZ i FA povećanju otpornosti na prodor hlorida je posledica nastanka dodatne količine C-S-H i C-A-S-H gela, koji stvaraju gustu i kompaktnu cementnu matricu i, na taj način smanjenjuju propustljivost maltera i povećavaju površinu koja može da adsorbuje hloridne jone. Dodatno, sa SCM se u malter unosi veća količina Al_2O_3 koji ubrzava proces prelaska AFm faze u Fridelovu so koja, takođe vezuje hloridne jone.

Otpornost na dejstvo sulfata

Na osnovu rezultata delovanja sulfatnog rastvora na maltere iz III faze ispitivanja u trajanju od šest meseci, ustanovljeno je da jedino referentni malter spravljen sa vodovezivnim faktorom od 0,5 pripada kategoriji maltera sa umerenom sulfatnom otpornošću, dok preostali (referentni malter spravljen sa $w/cm=0,5$, kao i malteri spravljeni sa NZ, odnosno FA, u količini od 10% i 20%, u slučajevima primene oba vodovezivna faktora) pripadaju kategoriji maltera sa visokom sulfatnom otpornošću.

Generalno, upotrebom NZ, odnosno FA kao SCM, značajno se povećava otpornost na dejstvo sulfata, bez obzira na vrednost vodovezivnog faktora u variranim granicama. Na promenu dužine epruveta izloženih dejstvu sulfatnog rastvora prvenstveno ima uticaj (i) sama supstitucija PC sa SCM (bilo da je u pitanju NZ ili FA), (ii) vrsta SCM-a kojom se vrši supstitucija (postoji razlika između NZ i FA), (iii) nivo supstitucije PC sa NZ, odnosno FA, (iv) vodovezivni faktor (sa smanjenjem vodovezivnog faktora povećava se otpornost na dejstvo sulfata, i to prvensveno u slučaju referentnog maltera).

Na osnovu vizulenog stanja u kojem su epruvete bile nakon šest meseci izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora može se konstatovati da su u slučaju većeg vodovezivnog faktora epruvete koje sadrže FA bile u boljem stanju u odnosu na epruvete koje sadrže NZ u istoj količini, dok je u slučaju manjeg vodovezivnog faktora stanje bilo obrnuto, odnosno u boljem stanju su bile epruvete koje sadrže NZ.

Prionljivost maltera za betonsku podlogu - „pull-off“ metoda

Svi malteri iz III faze ispitivanja su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta prionljivosti maltera za betonsku podlogu, te u pogledu ispitanog svojstva spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera prema standardu EN 1504-3 [23].

Svi referentni malteri i malteri sa SCM imaju isti dominantan tip loma (B), stoga se rezultati mogu direktno porediti. Smanjenje vodovezivnog faktora ima pozitivan uticaj na čvrstoću prijanjanja maltera iz III faze ispitivanja. Pri vodovezivnom faktoru od 0,5, nivo supstitucije (od 10% i 20%) PC sa NZ nema uticaj na relativnu čvrstoću prijanjanja dok u slučaju FA ima samo pri nivou supstitucije od 10%. U slučaju maltera spravljanih sa vodovezivnim faktorom 0,4, vrsta SCM ne utiče na čvrstoću prijanjanja već nivo supstitucije PC sa SCM. Malteri kod kojih je 10% PC zamenjeno sa NZ, odnosno sa FA, imali su veće relativne čvrstoće prijanjanja u odnosu na referentne, dok su relativne čvrstoće prijanjanja maltera sa 20% NZ, odnosno FA, ostale u rangju referentnih.

Ograničeno skupljanje

Svi malteri iz III faze ispitivanja su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta ograničenog skupljanja, stoga spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera prema standardu EN 1504-3 [23].

Na osnovu stanja test-površina uzoraka koji su bili izloženi ograničenom skupljanju može se zaključiti da bez obzira na primenjeni vodovezivni faktor, vrstu i količinu SCM nije došlo do pojave oštećenja, čak ni površinskog karaktera. Smanjenje vodovezivnog faktora ima pozitivan uticaj na čvrstoću prijanjanja maltera izloženih ograničenom skupljanju.

Svi referentni malteri i malteri sa SCM imaju isti dominantan tip loma (B), stoga se rezultati mogu direktno porediti. U pogledu relativnih čvrstoća prijanjanja ni vrsta i ni nivo supstitucije (od 10% i 20%) PC sa SCM (NZ ili FA) ne utiču na promenu ograničenog skupljanja maltera u odnosu na referentne vrednosti, već samo vodovezivni faktor (pri vodovezivnom faktoru 0,4 dobijene su veće čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera u odnosu na maltera spravljenje sa $w/cm=0,5$).

Termička kompatibilnost – ciklusi smrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje

Svi malteri iz III faze ispitivanja su ispunili uslov da im je $f_{h,sr} \geq 2,00$ MPa sa aspekta ispitane toplotne komaptibilnosti i stoga spadaju u klasu R4 konstrukcijskih maltera prema standardu EN 1504-3 [23].

U slučaju oba vodovezivna faktora, od test-uzoraka najmanju čvrstoću prijanjanja su imali malteri sa 10% NZ kao SCM, a u slučaju etalona najveće čvrstoće prijanjanja.

U slučaju test-uzoraka spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5, i referentni malter i malteri sa SCM imaju isti dominantan tip loma (B), stoga se rezultati mogu direktno porediti. U odnosu na malter PCaM, malter sa 10% NZ (NZ20aM) je imao manju čvrstoću prijanjanja pri zatezanju, dok je maltera sa 20% NZ (NZ20aM) imao veću. Malteri sa 10% i 20% FA su imali veće čvrstoće prijanjanja pri zatezanju od referenog maltera PCaM, stim da je sa povećanjem udela FA došlo do smanjenja čvrstoće.

Kod test-uzoraka spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4, referentni malter i malteri sa SCM nisu imali isti tip dominantnog loma, stoga se ne može uraditi direktno poređenje njihovih čvrstoća prijanjanja pri zatezanju. Međutim, svi malteri sa SCM su, u ovom slučaju, imali dominantni lom tipa B/Y, tako da se mogu međusobno porediti. U slučaju datih maltera sa povećanjem udela SCM dolazi i do povećanja čvrstoće prijanjanja, takođe malteri sa NZ kao SCM imaju manje čvrstoće prijanjanju u odnosu na maltere sa FA pri istom nivou supstitucije PC.

VIII
ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I
PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

1. INDEKS SVOJSTAVA

Radi izvođenja konačnih zaključaka o upotrebljivosti prirodnog zeolita kao SCM u reparaturnim malterima, urađeno je kvantitativno vrednovanje svih ispitivanih svojstava istovremeno, korišćenjem koncepta indeksa svojstava [99] u slučaju maltera koji sadrže 0%, 10% i 20% prirodnog zeolita, odnosno elektrofilterskog pepela, spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 i 0,4.

Primenom koncepta indeksa svojstava mehaničkim karakteristikama i svojstvima trajnosti materijala mogu se dodeliti numeričke vrednosti. Ove vrednosti mogu da posluže kao kvantitativno sredstvo za donošenje konačnih odluka o optimalnoj količini zamene cementa sa SCM u reparaturnim malterima. Ukoliko su vrednosti indeksa svojstava SCM reparaturnih maltera veće od 1,0, onda oni imaju bolje performanse u odnosu na referentni malter kojem je dodeljena vrednost 1,0, dok u suprotnom imaju inferiornije predmetno svojstvo.

Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku, kapilarnog upijanja vode, skupljanja usled sušenja, otpornosti na prodor hlorida, otpornosti na dejstvo sulfata, prionljivosti maltera za betonsku podlogu, ograničenog skupljanja i termičke kompatibilnosti – ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje, sračunati su indeksi svojstava za svaku vrstu ispitanog maltera, a izračunate su i sume datih indeksa posebno za svaki reparaturni malter.

Prvo su indeksi svojstava sračunati u okviru istog vodovezivnog faktora, gde je vrednost 1,0 dodeljena svojstvima referentnih maltera. Potom su sračunati indeksi svojstava za ispitane maltere spravljene sa oba vodovezivna faktora, a vrednost 1,0 je dodeljena svojstvima referentnog maltera spravljenog sa vodovezivnim faktorom od 0,5.

U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 (slika VIII-1, tabela VIII-1), najveće sume indeksa svojstava su imali malteri sa 20% i sa 10% elektrofilterskog pepela, respektivno. Njima blisku vrednost je imao i malter sa 20% prirodnog zeolita, potom sa 10% prirodnog zeolita, a najmanju je imao referentni malter.

Od maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4 (slika VIII-2, tabela VIII-2), najveću sumu indeksa svojstava je imao malter sa 20% elektrofilterskog pepela, potom sa 20% prirodnog zeolita, pa 10% elektrofilterskog pepela, odnosno zeolita, a najmanju sumu je i u ovom slučaju imao referentni malter.

Tabela VIII-1. Pojedinačne vrednosti i sume indeksa svojstava za reparaturne maltere spravljene sa vodovezivnim faktorom od 0,5

Svojstvo maltera	Starost uzoraka (dani)	PCa	NZ10a	NZ20a	FA10a	FA20a
Čvrstoća pri pritisku	28	1	1,07	0,95	1,07	1,05
Kapilarno upijanje vode	28	1	1,15	1,36	1,28	1,38
Skupljanje usled sušenja	182	1	0,97	0,92	0,98	1,01
Otpornost na prodor hlorida	28	1	1,48	1,77	1,75	1,85
Otpornost na dejstvo sulfata	180 od početka izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora	1	1,72	1,84	1,88	1,93
Prionljivost maltera za betonsku podlogu – „pull-off“ metoda	28	1	1,06	1,09	1,21	1,08
Ograničeno skupljanje	28 +56 dana	1	1,02	0,94	0,99	0,96
Termička kompatibilnost	28 + 50 ciklusa	1	0,87	1,21	1,12	1,03
Sume:		8	9,34	10,08	10,28	10,29

Slika VIII-1. Dijagram indeksa svojstava reparaturnih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,5

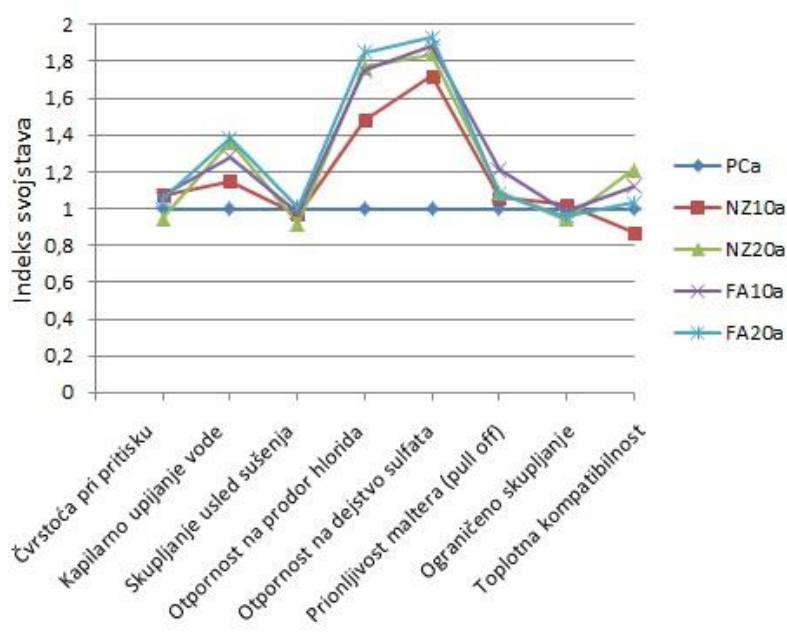
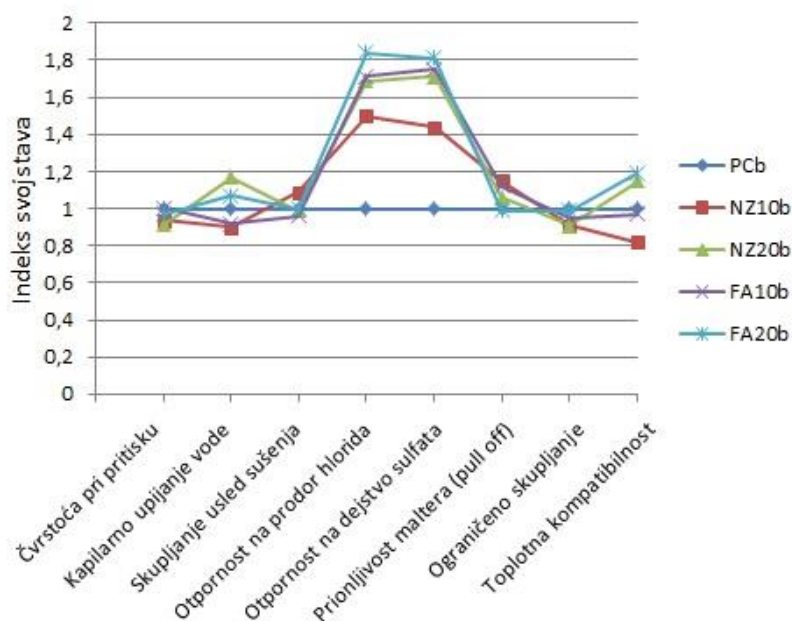


Tabela VIII-2. Pojedinačne vrednosti i sume indeksa svojstava za reparaturne maltere spravljene sa vodovezivnim faktorom od 0,4

Svojstvo maltera	Starost uzoraka (dani)	PCb	NZ10b	NZ20b	FA10b	FA20b
Čvrstoća pri pritisku	28	1	0,94	0,91	1,00	0,97
Kapilarno upijanje vode	28	1	0,90	1,17	0,92	1,07
Skupljanje usled sušenja	182	1	1,09	0,99	0,96	1,00
Otpornost na prodor hlorida	28	1	1,50	1,69	1,71	1,84
Otpornost na dejstvo sulfata	180 od početka izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora	1	1,44	1,71	1,75	1,81
Prionljivost maltera za betonsku podlogu	28	1	1,15	1,06	1,12	0,99
Ograničeno skupljanje	28 +56 dana	1	0,91	0,91	0,95	0,99
Termička kompatibilnost	28 + 50 ciklusa	1	0,82	1,15	0,97	1,19
Sume:		8	8,75	9,59	9,38	9,86

Slika VIII-2. Dijagram indeksa svojstava reparaturnih maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4



Kada se uporede sume indeksa svojstava svih navedenih maltera u odnosu na referentni malter spravljen sa vodovezivnim faktorom od 0,5 (slika VIII-3, tabela VIII-3) može da se uoči sledeće:

- da su sume indeksa svojstava veće u slučaju maltera spravljenih sa manjim vodovezivnim faktorom;
- da su najveće sume indeksa svojstava imali malteri spravljeni sa vodovezivnim faktorom od 0,4 koji sadrže 20% elektrofilterskog pepela, odnosno 20% prirodnog zeolita, respektivno, a da je najmanju sumu imao referentni malter spravljen sa vodovezivnim faktorom od 0,5;
- da su malteri spravljeni sa vodovezivnim faktorom od 0,4 koji sadrže 0% i 20% elektrofilterskog pepela, imali najveće indekse svojstva sa aspekta čvrstoće pri pritisku;
- da je malter spravljeni sa vodovezivnim faktorom od 0,4 koji sadrže 20% prirodnog zeolita imao najveći indeks svojstva sa aspekta kapilarnog upijanja vode;
- da je malter spravljeni sa vodovezivnim faktorom od 0,4 koji sadrže 10% prirodnog zeolita imao najveći indeks svojstva sa aspekta skupljanja usled sušenja i prionljivosti maltera za betonsku podlogu;
- da je malter spravljeni sa vodovezivnim faktorom od 0,4 koji sadrže 20% elektrofilterskog pepela imao najveći indeks svojstva sa aspekta otpornosti na prodor hlorida, otpornosti na dejstvo sulfata (u istom rangu kao i malter sa 20% elektrofilterskog pepela spravljen sa većim vodovezivnim faktorom) i termičke kompatibilnosti;
- da je referentni malter spravljeni sa vodovezivnim faktorom od 0,4 imao najveći indeks svojstva i sa aspekta ograničenog skupljanja;
- da su generalno indeksi svojstava ili u rangu sa referentnim ili su veći, izuzev u slučaju indeksa svojstava maltera koji sadrže 10% prirodnog zeolita, sa aspekta termičke kompatibilnosti, bez obzira na primenjeni vodovezivni faktor.

Na osnovu prikazane analize, primenom koncepta indeksa svojstava, zaključuje se da optimalni nivo zamene cementa prirodnom zeolitom, odnosno elektrofilterskim pepelom kao SCM u reparaturnim malterima, iznosi 20%, bez obzira na primenjeni vodovezivni faktor (0,5 ili 0,4). Ovu činjenicu potvrđuje i ispunjenost kriterijuma (prema EN 1504-3 [23], ACI 318 [1] i klasifikacija prema Gjørv-u [61]) za navedene reparaturne maltere, tabela VIII-4.

Slika VIII-3. Dijagram indeksa svojstava reparaturnih maltera spravljanih sa vodovezivnim faktorom od 0,5 i 0,4

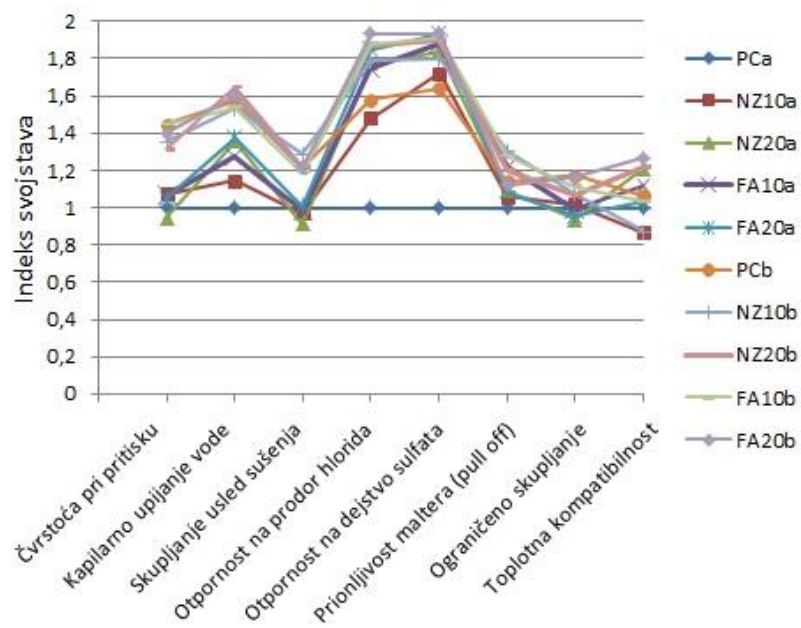


Tabela VIII-3. Pojedinačne vrednosti i sume indeksa svojstava za reparaturne maltere spravljene sa vodovezivnim faktorom od 0,5 i 0,4

Svojstvo maltera	PCa	NZ10a	NZ20a	FA10a	FA20a	PCb	NZ10b	NZ20b	FA10b	FA20b
Čvrstoća pri pritisku	1	1,07	0,95	1,07	1,05	1,45	1,35	1,32	1,45	1,40
Kapilarno upijanje vode	1	1,15	1,36	1,28	1,38	1,57	1,53	1,65	1,54	1,60
Skupljanje usled sušenja	1	0,97	0,92	0,98	1,01	1,22	1,29	1,21	1,19	1,22
Otpornost na prodor hlorida	1	1,48	1,77	1,75	1,85	1,58	1,79	1,87	1,88	1,93
Otpornost na dejstvo sulfata	1	1,72	1,84	1,88	1,93	1,64	1,80	1,90	1,91	1,93
Prionljivost maltera za betonsku podlogu – „pull-off“ metoda	1	1,06	1,09	1,21	1,08	1,14	1,31	1,20	1,28	1,12
Ograničeno skupljanje	1	1,02	0,94	0,99	0,96	1,17	1,07	1,06	1,11	1,16
Termička kompatibilnost	1	0,87	1,21	1,12	1,03	1,06	0,87	1,22	1,03	1,27
Sume:	8	9,33	10,07	10,30	10,29	10,83	11,01	11,42	11,38	11,64

Tabela VIII-4. Ispunjenost kriterijuma za reparaturne maltere

Svojstvo maltera	Standard	PCa	NZ10a	NZ20a	FA10a	FA20a	PCb	NZ10b	NZ20b	FA10b	FA20b
Čvrstoća pri pritisku	EN 12190 [17]	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4
Kapilarno upijanje vode	EN 13057 [45]	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4
Otpornost na prodor hlorida	NT BUILD 492 [129], kriterijum prema Gjordv-u [61]	Smanjena	Umerena	Povišena	Povišena	Veoma visoka	Povišena	Veoma visoka	Veoma visoka	Veoma visoka	Izuzetno visoka
Otpornost na dejstvo sulfata	ASTM C 1012 [7], kriterijum u skladu sa ACI 318 [1]	Umerena	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka	Visoka
Prionljivost maltera za betonsku podlogu – „pull-off“ metoda	EN 1542 [157]	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4
Ograničeno skupljanje	EN 12617-4 [20]	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4
Termička kompatibilnost	EN 13687-1 [21]	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4	R4

2. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

S obzirom na kompleksnost analize rezultata iz I, II i III faze istraživanja izveden je veći broj zaključaka sa aspekta uticaja variranih parametara na svojstva koja su odabrana za ocenu mogućnosti primene prirodnog zeolita kao SCM u reparaturnim malterima za sanaciju betonskih konstrukcija. Zaključci su grupisani po analiziranim svojstvima i po fazama istraživanja.

Na osnovu karakterizacije materijala utvrđeno je da zeolitski tuf sadrži klinoptilolit kao glavni mineral, dok elektrofilterski pepeo spada u silikatne pepele. U pogledu klase pucolanske aktivnosti, prirodni zeolit spada u klasu 10, a elektrofilterski pepeo u klasu 15 pucolanskih materijala. Indeksi aktivnosti prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela iznose 92,85% i 125,29%, respektivno, pri starosti maltera od 28 dana, i 102,93% i 130,94%, respektivno, pri starosti maltera od 90 dana.

Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku maltera iz prve faze (malteri spravljani sa vodovezivnim faktorom 0.5 i 0.4, koji sadrže 0%, 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita, odnosno elektrofilterskog pepela) i druge faze ispitivanja (malteri spravljani sa vodovezivnim faktorom 0.5, koji sadrže 10% prirodnog zeolita + 10% elektrofilterskog pepela, 10% prirodnog zeolita + 10% filera i 10% elektrofilterskog pepela + 10% filera) utvrđeno je da navedeni malteri pripadaju konstrukcijskim reparaturnim malterima najviše klase (R4) u skladu sa standardom EN 1504-3.

Sa aspekta kapilarnog upijanja vode, svi malteri iz prve i druge faze ispitivanja ispunjavaju kriterijum za klasu R4 konstrukcijskog reparaturnog maltera prema standardu EN 1504-3 s obzirom da su im koeficijenti kapilarnog upijanja $\leq 0,5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-0,5}$.

Ostali zaključci **prve faze** istraživanja izvedeni su na osnovu analiza rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku i kapilarnog upijanja vode maltera, XRD analize i FTIR spektroskopije pasta:

Čvrstoća pri pritisku

- Vodovezivni faktor ima najizraženiji uticaj na vrednosti čvrstoće pri pritisku referentnih maltera i maltera spravljanih sa SCM za sve ispitivane starosti. Sa smanjenjem vodovezivnog faktora povećavaju se čvrstoće referentnih maltera prosečno za 37%, maltera sa 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita za 27%, 26% i 29% respektivno i maltera sa 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela za 31%, 28% i 32% respektivno;
- Vrsta i nivo zamene cementa sa SCM takođe nemaju značajnijeg uticaja na čvrstoću pri pritisku za vrednost vodovezivnog faktora 0,5. U slučaju maltera

spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 jedino malter sa 15% elektrofilterskog pepela ima veće čvrstoće u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti za više od 10%. Preostali malteri iz prve faze ispitivanja imaju čvrstoće pri pritisku za sve ispitivane starosti u rangui sa odgovarajućim vrednostima referentnih maltera;

- Vrsta i nivo zamene cementa sa SCM nema značajnijeg uticaja na čvrstoću pri pritisku u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, s obzirom da su čvrstoće pri pritisku maltera iz prve faze ispitivanja, spravljenih sa ovim vodovezivnim faktorom, u rangui sa odgovarajućim referentnim vrednostima;
- Čvrstoće pri pritisku maltera koji sadrže prirodni zeolit su manje u odnosu na odgovarajuće čvrstoće maltera sa elektrofilterskim pepelom. Za vrednost vodovezivnog faktora 0,5, smanjenja su cca 3% (za učešće SCM 10%), 9% (za učešće SCM 15%) i 4% (za učešće SCM 20%), a za vrednost vodovezivnog faktora 0,4, smanjenja su cca 6% (za učešće SCM 10%), 10% (za učešće SCM 15%) i 6% (za učešće SCM 20%). Sva smanjenja su u opsegu do 10%.

Navedeni zaključci ukazuju na visoku pucolansku aktivnost oba SCM materijala u malterskim mešavinama, što je u skladu sa rezultatima karakterizacije prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela.

Kapilarno upijanje vode

- Smanjenjem vodovezivnog faktora (sa 0,5 na 0,4) dolazi do značajnog smanjenja kapilarnog upijanja vode, kako referentnog cementnog, tako i maltera spravljenih sa obe vrste SCM. Smanjenje kapilarnog upijanja vode za starost 28 dana iznosi prosečno 57% za referentni malter, 45%, za maltere sa 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita i 36%, 34% i 36% za maltere sa 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela, respektivno. Smanjenje kapilarnog upijanja vode za starost 90 dana iznosi prosečno 58% za referentni malter, 38%, 42% i 32%, za maltere sa 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita, respektivno i 41%, 33% i 36% za maltere sa 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela, respektivno;
- Prirodni zeolit utiče na smanjenje kapilarnog upijanja vode, odnosno sa povećanjem udela prirodnog zeolita smanjuje se kapilarno upijanje vode. Međutim, doprinos smanjenju kapilarnog upijanja zavisi od vrednosti vodovezivnog faktora. Sa povećanjem vodovezivnog faktora, izraženiji je uticaj količine prirodnog zeolita kao SCM na smanjenje kapilarnog upijanja vode. Sa povećanjem učešća prirodnog zeolita u malterima sa vodovezivnim faktorom 0,5, starosti 28 dana, smanjuje se kapilarno upijanje vode u odnosu na referentni malter za 15%, 29% i 36%, za učešća prirodnog zeolita 10%, 15% i 20%, respektivno, a u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, smanjenje kapilarnog upijanja vode je 9% i 17% za učešće 15% i 20%, dok je za učešće prirodnog

zeolita od 10% došlo do povećanja upijanja vode od 10%. Sa povećanjem učešća prirodnog zeolita u malterima sa vodovezivnim faktorom 0,5, starosti 90 dana, smanjuje se kapilarno upijanje vode u odnosu na referentni malter za 23%, 41% i 47%, za učešća prirodnog zeolita 10%, 15% i 20%, respektivno, a u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, smanjenje kapilarnog upijanja vode je 19% i 15% za učešće 15% i 20%, dok je za učešće prirodnog zeolita od 10% došlo do povećanja upijanja vode od 13%;

- Elektrofilterski pepeo utiče na smanjenje kapilarnog upijanja vode. Sa povećanjem količine elektrofilterskog pepela smanjuje se kapilarno upijanje. Međutim, efekat smanjenja kapilarnog upijanja prvenstveno zavisi od starosti maltera. Sa povećanjem učešća elektrofilterskog pepela u malterima sa vodovezivnim faktorom 0,5, kapilarno upijanje vode pri starosti od 90 dana u odnosu na odgovarajuće vrednosti kapilarnog upijanja za starost 28 dana se smanjilo 52%, 59% i 61%, za učešća elektrofilterskog pepela 10%, 15% i 20%, respektivno, a u slučaju vodovezivnog faktora 0,4, smanjenje kapilarnog upijanja vode je 56%, 58,% i 61% za navedena učešća, respektivno;
- Prirodni zeoliti imaju manji doprinos smanjenju kapilarnog upijanja vode sa povećanjem starosti u odnosu na elektrofilterski pepeo. Pri starosti od 28 dana, u grupi maltera sa vodovezivnim faktorom 0,5, malteri sa prirodnim zeolitom imaju veće kapilarno upijanje u odnosu na maltere sa elektrofilterskim pepelom, a za grupu sa vodovezivnim faktorom 0,4, je izveden suprotan zaključak. Pri starosti maltera od 90 dana, malteri sa prirodnim zeolitom imaju veće kapilarno upijanje u odnosu na maltere sa elektrofilterskim pepelom za obe vrednosti vodovezivnog faktora;
- Ispitivani malteri imaju različitu kinetiku upijanja vode. Referentni malteri sa oba vodovezivna faktora, malteri sa vodovezivnim faktorom 0,5 i prirodnim zeolitom, i malteri sa vodovezivnim faktorom 0,4 i elektrofilterskim pepelom upijaju vodu po linearnom zakonu, dok ostali malteri pokazuju nelinearnu kinetiku upijanja vode.

Kapilarno upijanje vode zavisi od sva tri analizirana paramera. Najveći uticaj na smanjenje kapilarnog upijanja vode kod maltera sa prirodnim zeolitima ima vodovezivni faktor, dok je kod maltera sa elektrofilterskim pepelom dominantan uticaj starosti. Prirodni zeoliti imaju manji doprinos smanjenju kapilarnog upijanja vode sa povećanjem starosti u odnosu na elektrofilterski pepeo.

XRD analiza

- Rezultati XRD analize cementnih pasta koje sadrže prirodni zeolit, odnosno elektrofilterski pepeo kao SCM, starosti 28, 90 i 180 dana su pokazali da su za

sve paste zajednički produkti hidratacije C-S-H gel, Ca(OH)_2 u kristalnom obliku – portlandit i etringit;

- Kod svih pasta koje sadrže prirodni zeolit kao SCM javlja se monokarbonat za starosti od 28 i 180 dana, i hemikarbonat za starosti od 28 dana. Njihovo prisustvo se uočava i kod paste koja sadrži 10% prirodnog zeolita pri starosti od 90 dana. Kod svih pasta sa prirodnim zeolitom, za sve starosti, prisutni su pikovi koji odgovaraju klinoptilolitu, što ukazuje da zeolit nije u potpunosti izreagovao. Poređenjem intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu, čija potrošnja je indikator pucolanske reakcije, zaključuje se da tek pri starosti od 180 dana dolazi do značajnijeg smanjenja intenziteta ovog pika u odnosu na vrednost intenziteta pika kod čiste cementne paste odgovarajuće starosti. Kod pasta sa prirodnim zeolitom je veoma izražena karbonatizacija koja se uočava kroz formiranje kalcita za sve starosti, a vaterita pri starosti od 180 dana. Najveći relativni udeo etringita (*delayed ettringite formation*) u svim pastama sa prirodnim zeolitom je uočen za starost 90 dana.
- Kod svih pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo kao SCM javlja se hemikarbonat za starosti od 28 i 90 dana, i monokarbonat samo u slučaju paste koja sadrži 10% elektrofilterskog pepela pri starosti od 180 dana. Kod svih pasta za sve starosti detektovano je i prisustvo neizreagovanog mulita koji potiče iz elektrofilterskog pepela. Kod pasta koje sadrže 15% i 20% elektrofilterskog pepela dolazi do smanjenja intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu već nakon 28 dana. Do značajnog smanjenja intenziteta ovog pika kod svih pasta sa elektrofilterskim pepelom dolazi nakon 180 dana. Potom, kod svih pasta se uočava formiranje prvenstveno kalcita, a potom i vaterita. Kod svih pasta sa elektrofilterskim pepelom je veoma izraženo prisustvo etringita za sve starosti uzoraka što se prepisuje pojavi *delayed ettringite formation*. Intenzitet pika koji odgovara etringitu (2 Theta: 9.1) se povećao pri starosti od 90 u odnosu na 28 dana, dok pri starosti od 180 dana ostaje isti ili nešto manji u odnosu na intenzitet pika pri starosti od 90 dana, Najveći intenzitet ovog pika ima pasta sa 20% elektrofilterskog pepela. Kod pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo potvrđeno je prisustvo i C-A-S-H gela.

Na osnovu relativnih odnosa intenziteta pikova koji odgovaraju portlanditu kod pasta koje sadrže prirodni zeolit i kod onih koje sadrže elektrofilterski pepeo kao parcijalnu zamenu cementa, starosti 28 dana, može da se zaključi da je došlo do veće potrošnje portlandita u slučaju pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo, dok su intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu u slučaju pasta sa prirodnim zeolitom u rangu sa onima kod referentne paste što ukazuje na odloženu pucolansku reakciju prirodnog zeolita. Nakon 90 dana detektovan je veći sadržaj portlandita kod pasta koje sadrže 10% prirodnog zeolita u odnosu na paste koje u istom procentu sadrže

elektrofilterski pepeo. Za starost 180 dana, intenziteti pikova koji odgovaraju portlanditu su manji u slučaju pasta koje sadrže prirodni zeolit u odnosu na one koje sadrže elektrofilterski pepeo, pri istim procentima supstitucije cementa. Kod pasta sa elektrofilterskim pepelom se pored C-S-H gela identifikovan je i C-A-S-H gel. Poređenjem intenziteta pikova koji odgovaraju etringitu kod pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo i prirodni zeolit utvrđeno je da je intenzitet pika veći kod pasta sa elektrofilterskim pepelom, za sve starosti.

FTIR spektroskopija

FTIR rezultati ispitanih cementnih pasta koje sadrže prirodni zeolit, odnosno elektrofilterski pepeo kao SCM, starosti 28, 90 i 180 dana, su potvrdili postojanje nekih faza identifikovanih primenom XRD analize, kao i promene koje su nastupile u C-S-H gelu u pogledu odnosa Ca/Si ili Al/Si.

- Paste sa prirodnim zeolitom kao SCM: Asimetrično istezanje CO_3^{2-} grupe iskazano kroz superponiranje dva pika oko 1422 cm^{-1} i pika između $1471\text{--}1482 \text{ cm}^{-1}$ koji se pripisuju kristalnim strukturama kalcita i vaterita, vidljivo je za hidrataciju nakon 28 dana da bi nakon 180 dana hidratacije postao dominantan samo pik oko 1480 cm^{-1} koji se pripisuje vateritu. Postojanje apsorpcionih traka na $\sim 2840 \text{ cm}^{-1}$ i na $\sim 2520 \text{ cm}^{-1}$ ukazuje na prisustvo dolomita. Na prisustvo portlandita je ukazalo prisustvo apsorpcione trake na $\sim 3642 \text{ cm}^{-1}$ kao posledica istežućih vibracija Ca-OH iz portlandita. Promene nastale u C-S-H gelu u pogledu odnosa Ca/Si i Al/Si su analizirane kroz pomeranje položaja apsorpcionih traka u odnosu na vrednost $\sim 971 \text{ cm}^{-1}$ koja odgovara pastama cementa za starost 28 dana. Nakon 28 dana hidratacije paste koje sadrže 10%, 15% i 20% prirodnog zeolita postigle su vrednost 987 cm^{-1} , 991 cm^{-1} i 995 cm^{-1} , respektivno, što je ukazalo na povećanje stepena polimerizacije strukture C-S-H gela sa manjim odnosom Ca/Si. Kod uzoraka starosti 180 dana dolazi do pomeranja date apsorpcione trake prema manjim talasnim brojevima 979 cm^{-1} , 989 cm^{-1} i 981 cm^{-1} za udele 10%, 15% i 20%, respektivno. Vrednost apsorpcionog broja za cementnu pastu je 977 cm^{-1} . Približavanje vrednosti apsorpcionog broja pasta sa zeolitom apsorpcionom broju cementne paste ukazuje najverovatnije na povećanje odnosa Ca/Si, s obzirom da XRD analiza ne ukazuje na formiranje C-A-S-H gela za ovu vrstu pasta. Na položaj apsorpcionog pika je uticala starost pasti i udeo prirodnog zeolita;
- Paste sa elektrofilterskim pepelom kao SCM: Pojava apsorpcione trake na $\sim 1422\text{--}1482 \text{ cm}^{-1}$ ($1429\text{--}1492 \text{ cm}^{-1}$, ν_3 - asimetrično istezanje CO_3^{2-} grupe ukazalo je na prisustvo karbonata, tj. mogu se pripisati superponiranju kristalnih struktura kalcita i vaterita u strukturi pasta sa elektrofilterskim

pepelom. Postojanje apsorpcione trake odnosno prevoja (*shoulder*) na $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ može se pripisati prisustvu SO_4^{2-} molekulske vibracije koja može da ukaže na postojanje faze etringita. Na prisustvo portlandita je ukazalo prisustvo apsorpcione trake na $\sim 3642 \text{ cm}^{-1}$ kao posledica istežućih vibracija Ca-OH iz portlandita. Promene nastale u C-S-H gelu nakon 28 dana hidratacije ukazuje na malo pomeranje apsorpcionih vrednosti ka većim vrednostima u odnosu na vrednost cementne paste, $\sim 971 \text{ cm}^{-1}$. Pasta koje sadrže 10%, 15% i 20% elektrofilterskog pepela su postigle sledeće vrednosti 977 cm^{-1} , 977 cm^{-1} i 974 cm^{-1} respektivno, što je ukazalo na povećanje stepena polimerizacije strukture C-S-H gela sa manjim odnosom Ca/Si. Do pomeranja apsorpcione trake prema manjim talasnim brojevima, 973 cm^{-1} (depolimerizacija C-S-H gela), dolazi nakon 180 dana hidratacije za sve paste sa elektrofilterskim pepelom u odnosu na vrednost apsorpcionog broja 977 cm^{-1} dobijenu za cementnu pastu, što je ukazalo na mogućnost nastanka C-A-S-H gela. Na položaj apsorpcionog pika je najviše uticala starost pasti;

- Poređenje rezultata FTIR analize pasta sa prirodnim zeolitom i elektrofilterskim pepelom kao SCM ukazuje da su najveće razlike u odnosu Ca/Si i Al/Si u C-S-H gelu. Postoji sličnost u pogledu uticaja starosti pasta na vrednosti apsorpcionih pikova vezanih za položaj C-S-H gela. Za obe grupe pasta je karakteristično da nakon 28 dana dolazi do pomeranja apsorpcionih traka u odnosu na vrednost dobijenu za referentni uzorak ($\sim 970 \text{ cm}^{-1}$) ka većim vrednostima talasnog broja, da bi se sa protokom vremena primetilo vraćanje ka položaju datog pika kod referentnog uzorka. To ukazuje da za starost 28 dana imamo smanjenje odnosa Ca/Si, a za starost 180 dana povećanje odnosa Ca/Si ili Al/Si. Ovo su sličnosti između pasti na bazi prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela, a razlike su u tome što je povećanje vrednosti apsorpcionih brojeva u odnosu na referentni malter veće kod maltera sa prirodnim zeolitom. Ovo ukazuje da kalcijum kao jonoizmenjivački katjon prirodnog zeolita nije ušao u strukturu C-S-H gela. Pored navedenog ustanovljeno je da pasta koja sadrži 20% prirodnog zeolita i pasta koja sadrži 10% elektrofilterskog pepela su uzrokovale najveće promene adsorpcionih brojeva vezanih za C-S-H gel;
- Nakon 180 dana položaj apsorpcione trake je takav da ukazuje na veće vrednosti odnosa Si/Al u pastama sa prirodnim zeolitom, dok je kod pasta sa elektrofilterskim pepelom najverovatnije veća vrednost odnosa Al/Si;
- Prisustvo karbonata u obliku vaterita i kalcita je potvrđeno FTIR spektroskopijom za obe grupe pasta. Kod pasta koje sadrže elektrofilterski pepeo se učešće vaterita smanjuje sa protokom procesa hidratacije, tako da nakon 180 dana preovlađuje kalcit. Za razliku od njih, kod pasta koje sadrže

prirodni zeolit je dominantan vaterit, naročito nakon 180 dana hidratacije. Pored kalcijum karbonata registrovan je i dolomit.

Pored klasifikacije maltera iz **druge faze** istraživanja u pogledu ispunjavanja uslova za određenu klasu reparaturnog maltera sa aspekta čvrstoće pri pritisku i kapilarnog upijanja vode, izvedeni su dodatni zaključci za navedena svojstva, kao i zaključci o izluživanju teških metala iz maltera koji sadrže 10% prirodnog zeolita + 10% elektrofilterskog pepela, maltera sa 10% prirodnog zeolita + 10% filera i maltera sa 10% elektrofilterskog pepela + 10% filera.

Čvrstoća pri pritisku

- Kombinacija zamene cementa sa mešanim dodacima u količini od 20% (prirodni zeolit + elektrofilterski pepeo, prirodni zeolit + filer, i elektrofilterski pepeo + filer) nema značajnijeg uticaja na čvrstoću pri pritisku s obzirom da su njihove čvrstoće u rangu sa odgovarajućim referentnim vrednostima;
- Malteri koji sadrže odabrane kombinacije dodataka prirodnog zeolita, elektrofilterskog pepela i filera, imaju veće čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentni malter za sve ispitivane starosti.

Kapilarno upijanje

- Malteri koji sadrže odabrane kombinacije dodataka prirodnog zeolita, elektrofilterskog pepela i filera, imaju manje kapilarno upijanje vode za obe analizirane starosti u odnosu na referentni malter;
- Najmanje vrednosti kapilarnog upijanja su dobijene za kombinaciju elektrofilterskog pepela i filera.

Izluživanje teških metala

- XRF analiza portland cementa, prirodnog zeolita, elektrofilterskog pepela i filera – kalcijum-karbonata u pogledu elemenata Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, As, Ba i Sb je pokazala da elektrofilterski pepeo ima najveće koncentracije navedenih elemenata izuzev elementa Ba. Prirodni zeolit ima najmanje koncentracije datih elemenata osim elemenata Pb i Ba;
- Ispitivanje efikasnosti imobilizacije teških metala u malterima sa 10% prirodnog zeolita i 10% elektrofilterskog pepela, 10% prirodnog zeolita i 10% filera, kao i 10% elektrofilterskog pepela i 10% filera, pokazala je da za starost od 28 dana svi navedeni malteri zadovoljavaju kriterijume za inertan materijal, osim u pogledu elemenata Sb (nedefinisana kategorija) i Cd (neopasan);
- Starost uzoraka ima značajan uticaj na izluživanje teških metala. Do značajnijeg povećanja izluživanja Pb (iz inertnog u neopasni) i Ni (iz inertnog u

neopasni) iz maltera je došlo za starost 180 dana kod svih vrsta maltera. Malter sa prirodnim zeolitom i filerom je imao promenu kategorije izluživanja iz inertnog u neopasni za element Ba;

- Malteri koji sadrže 10% prirodnog zeolita + 10% elektrofilterskog pepela su se pokazali kao veoma efikasni za imobilizaciju/održavanje koncentracije katjona na niskom nivou kada su u pitanju elementi Pb, Zn, Ni/ Cu, Cr, Hg, Ba, respektivno, pri starosti od 28 dana. Za starost 180 dana njihova efikasnost je posebna izražena u smanjenju izluživanja Pb, potom Ba kao i u održavanju niskog nivoa izluživanja katjona Cd, Zn, Cu, Hg i Ba. Efikasnost imobilizacije oksianjona As je manja;
- Prednost prirodnog zeolita kao SCM u procesu imobilizacije je što može višestruko da imobilizuje teške elemente (i) obrazovanjem produkata hidratacije, pre svega etringita i C-S-H gela, (ii) održavanjem pH vrednosti pornog rastvora u oblasti baznih vrednosti, i (iii) imobilizacija katjona jonskom izmenom.

Zaključci **treće faze** istraživanja su izvedeni na osnovu rezultata ispitivanja maltera koji sadrže 0%, 10% i 20% prirodnog zeolita, odnosno elektrofilterskog pepela, u kojima je variran vodovezivni faktor u iznosu od 0,5 i 0,4. Analizirana su sledeća svojstva, koja su odabrana u skladu sa EN 1504-3: prionljivost maltera za betonsku podlogu, ograničeno skupljanje maltera i termička kompatibilnost maltera i betonske podloge (ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za sprečavanje stvaranja leda). Zaključeno je da svi malteri iz treće faze ispunjavaju kriterijume za konstrukcijske reparaturne maltere najviše klase (R4) u skladu sa standardom EN 1504-3 za navedena svojstva. Ispunjavanjem kriterijuma za ispitivanu termičku kompatibilnost, smatra se da su malteri iz treće faze istovremeno ispunili i uslove kvaliteta za istu klasu reparaturnog maltera u pogledu termičke kompatibilnosti (toplotni šok) i termičke kompatibilnosti (toplotni ciklusi u suvim uslovima) i da se za njih ne zahteva određivanje koeficijenta linearnog termičkog izduženja.

Ostali zaključci **treće faze** istraživanja izvedeni su na osnovu analiza rezultata ispitivanja prionljivosti maltera za betonsku podlogu, ograničenog skupljanja maltera, termičke kompatibilnost maltera i betonske podloge (ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za sprečavanje stvaranja leda), skupljanja usled sušenja, otpornosti na prodor hlorida i otpornosti na dejstvo sulfata.

Slobodno skupljanje usled sušenja

Prirodni zeolit i elektrofilterski pepeo kao SCM utiču na veličinu skupljanja. Pri tome, njihov efekat može biti pozitivan ili negativan, što zavisi od sledećih analiziranih parametara:

- Smanjenjem vodovezivnog faktora (sa 0,5 na 0,4) dolazi do značajnog smanjenja skupljanja usled sušenja, kako referentnog cementnog, tako i maltera spravljenih sa obe vrste SCM. Smanjenje skupljanja usled sušenja za starost 28 dana iznosi 19% za referentni malter, 41% i 36%, za maltere sa 10% i 20% prirodnog zeolita i 30% i 27% za maltere sa 10% i 20% elektrofilterskog pepela, respektivno. Smanjenje skupljanja usled sušenja za starost 182 dana iznosi 22% za referentni malter, 31% i 27%, za maltere sa 10% i 20% prirodnog zeolita, respektivno i 20% i 22% za maltere sa 10% i 20% elektrofilterskog pepela, respektivno;
- Uticaj prirodnog zeolita na skupljanje usled sušenja zavisi od vodovezivnog faktora i starosti. U slučaju vodovezivnog faktora 0,5, malteri sa prirodnim zeolitom imaju najveće vrednosti skupljanja za obe karakteristične starosti, uz napomenu da se razlike između vrednosti skupljanja tokom vremena smanjuju. Povećanja skupljanja maltera sa 10% i 20% prirodnog zeolita, u odnosu na referentni malter iznose 48% i 63%, respektivno, za starost od 28 dana, a za starost od 182 dana, povećanja su 4% i 9%, respektivno. U slučaju vodovezivnog faktora 0,4, malteri sa prirodnim zeolitom u količinama od 10% i 20%, imaju veće vrednosti skupljanja pri starosti od 28 dana, za 8% odnosno 28%, u odnosu na referentni malter, respektivno. U periodu između 28 i 182 dana, promena vrednosti skupljanja usled sušenja maltera sa prirodnim zeolitom se smanjuje, tako da su konačne vrednosti skupljanja iste kod maltera sa 20% prirodnog zeolita, ili čak i manje za 9%, kod maltera sa 10% prirodnog zeolita, u odnosu na referentni malter;
- Uticaj elektrofilterskog pepela na skupljanje usled sušenja takođe zavisi od vodovezivnog faktora i starosti. U slučaju vodovezivnog faktora 0,5, malteri sa elektrofilterskim pepelom u količinama od 10% i 20%, imaju veće vrednosti skupljanja pri starosti od 28 dana, za 44% odnosno 38%, u odnosu na referentni malter, respektivno. U periodu između 28 i 182 dana, promena vrednosti skupljanja usled sušenja maltera sa elektrofilterskim pepelom se smanjuje, tako da su konačne vrednosti skupljanja u rangu sa vrednostima referentnog maltera. U slučaju vodovezivnog faktora 0,4, malteri sa elektrofilterskim pepelom treće faze imaju veće vrednosti skupljanja pri starosti od 28 dana, za 23%, u odnosu na referentni malter, a za starost od 182

dana, konačne vrednosti skupljanja su u rangu sa vrednostima referentnog maltera.

Skupljanje usled sušenja maltera sa prirodnim zeolitom, odnosno elektrofilterskim pepelom kao SCM, zavisi od sva tri analizirana paramera (vodovezivnog faktora, starosti i vrste SCM). Podjednako značajan uticaj na smanjenje skupljanja usled sušenja maltera sa prirodnim zeolitom i elektrofilterskim pepelom imaju vodovezivni faktor i starost, dok je uticaj vrste SCM manje izražen. Uticaj količine zamane cementa sa SCM na vrednost skupljanja usled sušenja je vidljiv samo kod primene prirodnog zeolita.

Otpornost na prodor hlorida

Otpornost maltera sa i bez odabranih SCM je urađena upoređivanjem vrednosti koeficijenta migracije hlorida za starost od 28 dana. Zaključeno je da i prirodni zeolit i elektrofilterski pepeo imaju pozitivan uticaj na povećanje otpornosti na prodor hlorida, jer se koeficijent migracije hlorida značajno smanjuje, naročito sa povećanjem učešća SCM. Navedeni zaključak je potvrđen klasifikacijom otpornosti na prodor hlorida prema kriterijumima *Gjorv-a*. U slučaju maltera sa vodovezivnim faktorom 0,5, referentni malter ima *smanjenu* otpornost na prodor hlorida, sa 10% prirodnog zeolita *umerenu*, sa 20% prirodnog zeolita, kao i sa 10% elektrofilterskog pepela *povišenu*, dok malter sa 20% elektrofilterskog pepela ima *veoma visoku* otpornost na prodor hlorida. Od maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4, samo je referentni imao *povišenu* otpornost na prodor hlorida, dok su preostali ispitani malteri (sa 10% i 20% prirodnog zeolita, kao i elektrofilterskog pepela) imali *izuzetno visoku otpornost* na prodor hlorida.

U pogledu kriterijuma za klase izloženosti na dejstvo hlorida, malteri sa vodovezivnim faktorom 0,5 koji sadrže 20% prirodnog zeolita, odnosno 10% elektrofilterskog pepela su preporučeni za sanaciju armirano betonskih konstrukcija u sredinama sa klasama izloženosti XD1, XS1, XD2 i XS2, a malteri sa vodovezivnim faktorom 0,4 i dodatkom 10% i 20% prirodnog zeolita, odnosno elektrofilterskog pepela se mogu koristiti u sredinama sa najoštrijim klasama izloženosti na dejstvo hlorida, XD3 i XS3.

Doprinos prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela povećanju otpornosti na prodor hlorida je posledica nastanka dodatne količine C-S-H i C-A-S-H gela, koji stvaraju gustu i kompaktnu cementnu matricu i, na taj način smanjenjuju propustljivost maltera i povećavaju površinu koja može da adsorbuje hloridne jone. Dodatno, sa SCM se u malter unosi veća količina Al_2O_3 koji ubrzava proces prelaska AFm faze u Fridelovu so koja, takođe vezuje hloridne jone.

Otpornost na dejstvo sulfata

Otpornost na dejstvo sulfata je određena merenjem promene dužine epruveta u periodu od 6 meseci.

Generalno, upotrebom prirodnog zeolita, odnosno elektrofilterskog pepela kao SCM, značajno se povećava otpornost na dejstvo sulfata, bez obzira na vrednost vodovezivnog faktora u variranim granicama. Na promenu dužine epruveta izloženih dejstvu sulfatnog rastvora prvenstveno ima uticaj (i) sama supstitucija cementa sa SCM, (ii) vrsta SCM kojom se vrši supstitucija (postoji razlika između prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela), (iii) nivo supstitucije cementa sa prirodnim zeolitom, odnosno elektrofilterskim pepelom, (iv) vodovezivni faktor (sa smanjenjem vodovezivnog faktora povećava se otpornost na dejstvo sulfata, i to prvenstveno u slučaju referentnog cementnog maltera).

Navedeni zaključci su potvrđeni klasifikacijom otpornosti na dejstvo sulfata prema kriterijumima iz ACI 318-08, na osnovu kojih referentni malter spravljen sa vodovezivnim faktorom 0,5 ima *umerenu* otpornost, dok su ostali malteri imali *visoku* otpornost na dejstvo sulfata.

Prionljivost maltera za betonsku podlogu

- Najmanje vrednosti kapilarnog upijanja su dobijene za kombinaciju elektrofilterskog pepela i filera;
- Prilikom ispitivanja prionljivosti maltera za betonsku podlogu, svi malteri treće faze su imali kohezioni tip loma po malteru (tip B), što ukazuje na činjenicu da je čvrstoća prijanjanja veća od čvrstoće na zatezanje maltera, međutim u standardu EN 1542 se za ovakav tip loma, dobijen rezultat proglašava za čvrstoću prijanjanja maltera. Ovakav zaključak je omogućio dalju analizu dobijenih rezultata sa aspekta čvrstoće prijanjanja maltera pri zatezanju;
- Smanjenje vodovezivnog faktora ima pozitivan uticaj na čvrstoću prijanjanja maltera iz treće faze ispitivanja. Sa smanjenjem vodovezivnog faktora povećavaju se čvrstoće prijanjanja referentnih maltera prosečno za 14%, maltera sa 10% i 20% prirodnog zeolita za 23% i 10% respektivno i maltera sa 10% i 20% elektrofilterskog pepela za 5% i 4% respektivno;
- Prirodni zeolit i elektrofilterski pepeo generalno utiču na povećanje čvrstoće prijanjanja maltera, ali efekat ovog povećanja zavisi od vodovezivnog faktora. U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,4, vrsta SCM ne utiče na čvrstoću prijanjanja već nivo supstitucije cementa sa SCM. Malteri kod kojih je 10% cementa zamenjeno sa elektrofilterskim pepelom, odnosno sa prirodnim zeolitom, imaju veće čvrstoće prijanjanja u odnosu na referentne u

rangu 12% do 14%, respektivno, dok su čvrstoće prijanjanja maltera sa 20% prirodnog zeolita, odnosno elektrofilterskog pepela, ostale u rangu referentnih. U slučaju maltera spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5 jedino malter sa 10% elektrofilterskog pepela ima veće čvrstoće prijanjanja u odnosu na odgovarajuće referentne vrednosti za više od 20%. Preostali malteri iz treće faze imaju čvrstoće prijanjanja u rangu sa čvrstoćom referentnog maltera.

Ograničeno skupljanje

- Prilikom ispitivanja ograničenog skupljanja maltera, preko prionljivosti maltera za betonsku podlogu, svi malteri treće faze su imali kohezioni tip loma po malteru (tip B);
- Smanjenje vodovezivnog faktora ima pozitivan uticaj na vrednost prijanjanja maltera pri ograničenom skupljanju. Sa smanjenjem vodovezivnog faktora povećavaju se čvrstoće prijanjanja referentnih maltera prosečno za 15%, maltera sa 10% i 20% prirodnog zeolita za 5% i 14% respektivno i maltera sa 10% i 20% elektrofilterskog pepela za 12% i 22%, respektivno;
- Vrsta i nivo supstitucije (od 10% i 20%) cementa sa prirodnim zeolitom i elektrofilterskim pepelom ne utiču na vrednost ograničenog skupljanja maltera u okviru svakog od variranih vodovezivnih faktora.

Termička kompatibilnost maltera i betonske podloge (ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje)

Na osnovu izgleda test-površina uzoraka nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja zaključeno je:

- da ni na jednom uzorku nisu primećena veća oštećenja u vidu pukotina, ispadanja zrna agregata ili delaminacije maltera, bez obzira na prisustvo SCM i vrednost vodovezivnog faktora, i
- da smanjenje vodovezivnog faktora pozitivno utiče na stanje test-površina.

Prilikom ispitivanja termičke kompatibilnosti maltera, preko prionljivosti maltera za betonsku podlogu, zaključeno je da tip loma zavisi od vodovezivnog faktora. U slučaju test-uzoraka spravljenih sa vodovezivnim faktorom 0,5, i referentni malter i malteri sa SCM imaju kohezioni lom po malteru (tip B), stoga se rezultati čvrstoća prijanjanja mogu direktno porediti. Zaključeno je da najveću čvrstoću prijanjanja ima malter sa 20% prirodnog zeolita kao SCM i da je predmetna čvrstoća veća od referentne za 21%. Kod test-uzoraka spravljenih sa vodovezivnim faktorom od 0,4, referentni malter i malteri sa SCM nisu imali isti tip dominantnog loma, pa se dobijeni rezultati ne mogu direktno porediti.

Indeks svojstava

Radi izvođenja konačnih zaključaka o upotrebljivosti prirodnog zeolita kao SCM u reparaturnim malterima, urađeno je vrednovanje svih ispitivanih svojstava istovremeno, korišćenjem koncepta indeksa svojstava (*performance index*). U slučaju maltera spravljениh sa vodovezivnim faktorom od 0,5, najveće sume indeksa svojstava su imali malteri sa 10% i sa 20% elektrofilterskog pepela, njima blisku vrednost je imao i malter sa 20% prirodnog zeolita, dok je najmanju imao referentni malter. Od maltera spravljениh sa vodovezivnim faktorom od 0,4, najveću sumu indeksa svojstava imali su malteri kod kojih je supstituisano 20% cementa sa elektrofilterskim pepelom, odnosno prirodnim zeolitom, a potom i malteri sa 10% elektrofilterskog pepela, odnosno 10% prirodnog zeolita, respektivno.

Kada se uporede sume indeksa svojstava svih navedenih maltera u odnosu na referentni malter spravljени sa vodovezivnim faktorom od 0,5 može da se uoči sledeće:

- da su sume indeksa svojstava veće u slučaju maltera spravljениh sa manjim vodovezivnim faktorom;
- da su najveće sume indeksa svojstava imali malteri spravljени sa vodovezivnim faktorom od 0,4 koji sadrže 20% elektrofilterskog pepela, odnosno 20% prirodnog zeolita, a da je najmanju sumu imao referentni malter spravljени sa vodovezivnim faktorom od 0,5.
- optimalno učešće prirodnog zeolita u reparaturnim malterima iznosi 20%, a isto toliko iznosi i optimalno učešće elektrofilterskog pepela.

3. NAUČNI DOPRINOS

Detaljnou analizou dosadašnjih istraživanja primene prirodnog zeolita kao parcijalne zamene cementa u pastama, malterima i betonima zaključeno je da je ova naučna oblast nedovoljno istražena, a naročito primena prirodnog zeolita u reparaturnim cementnim malterima, tako da su istraživanja sa ovom tematikom visoko cenjena i u naučnoj i u stručnoj javnosti.

Naučni doprinos ove doktorske disertacije se prvenstveno vidi kroz ispunjenje postavljenih hipoteza, odnosno utvrđeno je da se:

- može odrediti optimalna količina prirodnog zeolita za zamenu dela Portland cementa primenom indeksa svojstava, a na osnovu vrednovanja relevantnih fizičkih i mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti prema kriterijumima za reparaturne maltere definisanim u EN 1504-3, ACI 318-08 i klasifikaciji prema Gjorv-u.
- zamenom dela cementa prirodnim zeolitom u količini do 20% poboljšava trajnost reparaturnih maltera kroz postizanje zahtevanih otpornosti na prodor hlorida i dejstvo sulfata.
- primenom hibridnih mineralnih dodataka, koji su dobijeni mešanjem zeolita kao prirodnog materijala i elektrofilterskog pepela kao opasnog otpada u čvrstom stanju, za zamenu dela cementa u reparaturnim malterima, smanjuje izluživanje nekih katjona teških metala iz elektrofilterskog pepela.

4. PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Od posebnog značaja su dalja eksperimentalna istraživanja u cilju ocene reparaturnog maltera koji sadrže optimalnu količinu prirodnog zeolita kao SCM sa aspekta ispunjenosti preostalih kriterijuma za konstrukcijske reparaturne maltere prema EN 1504-3, kao što su modul elastičnosti i otpornost na habanje. Potrebno je uraditi i komparativnu analizu dobijenih rezultata sa onima kod kojih bi se koristio elektrofilterski pepeo u istoj količini.

Kada je reč o reparaturnim malterima koji sadrže mešani dodatak (prirodni zeolit i elektrofilterski pepeo) potrebno je nastaviti ocenu materijala prema propisanim zahtevima za konstrukcijske reparaturne maltere prema EN 1504-3, s obzirom da (i) je utvrđeno da u pogledu čvrstoće pri pritisku i kapilarnog upijanja vode već spadaju u najvišu klasu R4 reparaturnih maltera, i (ii) da se kombinacija prirodnog zeolita i elektrofilterskog pepela kao SCM u cementnom malteru pokazala kao povoljna sa aspekta zaštite životne sredine.

U sklopu daljih eksperimentalnih istraživanja, od interesa je ispitivanje mineraloškog sastava i strukturnih promena u uzorcima reparaturnih maltera koji sadrže prirodni zeolit i/ili elektrofilterski pepeo kao SCM u količini od 20%, pre i nakon izlaganja uzoraka dejstvu sulfata, prodoru hlorida i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje (ispitivanje termičke kompatibilnosti reparaturnog maltera i betonske podloge). kao i dovođenje dobijenih rezultata u vezu sa rezultatima ispitivanja reparaturnih maltera na dejstvo sulfata, otpornost na prodor hlorida i navedene termičke kompatibilnosti, i to sa aspekta korišćenog/ih SCM, kao i količine supstitucije cementa sa datim SCM i primenjenog vodovezivnog faktora.

IX
LITERATURA

Literatura:

- [1] ACI 318 building Code 2008 str 61, tabela 4.5.1
- [2] ACI Committee 232.2R-96: Use of Fly Ash in Concrete.
- [3] Ahmadi, B., Shekarchi, M.: Use of natural zeolite as supplementary cementitious material, *Cement & Concrete Composites* 32, 2010, 134-141.
- [4] Akcil, A., Erust, C., Ozdemiroglu, S., Fonti, V., Beolchini, F.: A review of approaches and techniques used in aquatic contaminated sediments: Metal removal and stabilization by chemical and biotechnological processes. *J. Clean. Prod.* 86, 2015, 24-36.
- [5] Andersen, M.D., Jakobsen, H.J., Skibsted, J.: Characterization of white Portland cement hydration and the C-S-H structure in the presence of sodium aluminate by ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR spectroscopy. *Cement and Concrete Research* 34, 2004, 857-868.
- [6] Andersen, M.D., Jakobsen, H.J., Skibsted, J.: Incorporation of aluminum in the calcium silicate hydrate (C-S-H) of hydrated Portland cements: A high-field ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR investigation. *Inorganic Chemistry* 42, 2003, 2280-2287.
- [7] ASTM C 1012-04: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.
- [8] ASTM C 1202-12: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- [9] ASTM C 618:2005 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [10] Baščarević, Z., Komljenović, M., Petrašinović-Stojkanović, Lj., Jovanović, N., Rosić, A., Ršumović, M.: Ispitivanje svojstava elektrofilterskog pepela termoelektrana u cilju njegove upotrebe kao sekundarne sirovine za proizvodnju Portland-cementnog klinkera. *Hemijska industrija* 60 (9-10), 2006, 245-252.
- [11] BAW-Merkblatt – Chlorideindringwiderstand von Beton (2012)
- [12] Behfarnia, K., Jon-nesari, H., Mosharaf, A.: The bond between repair materials and concrete substrate in marine environment. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* 6(4), 2005, 267-272.
- [13] Benyahia, A., Ghrici, M.: Behaviour of self compacting repair mortars based on natural pozzolana in hot climate. *Advances in Concrete Construction* 6, 2018, 285-296.
- [14] Bilim C.: Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material, *Construction and Building Materials* 25, 2011, 3175-3180.
- [15] Bonen, D., Sarker: The present state-of-the-art of immobilization of hazardous L. The present state-of-the-art of immobilization of hazardous heavy metals in cement-based materials. *Advances in Cement and Concrete, Proceedings of an Engineering Foundation Conference*, edited by Michel W. Grutzeck and Shondeep L. Sarker, American Society of Civil Engineers, New York, 1994, 481-498.

- [16] Breck, D. W., Eversole, W. G., Milton, R. M., Reed T. B., Thomas, T. L.: PHYSICAL AND INORGANIC CHEMISTRY: Crystalline Zeolites. I. The Properties of a New Synthetic Zeolite, Type A. *Journal of the American Chemical Society* 78(23), 1956, 5963-5972.
- [17] BS EN 12190:1999 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of compressive strength of repair mortar.
- [18] BS EN 12390-3:2001 - Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [19] BS EN 12457-2:2002 - Characterisation of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reduction).
- [20] BS EN 12617-4:2002 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Part 4: Determination of shrinkage and expansion.
- [21] BS EN 13687-1:2002 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of thermal compatibility - Part 1: Freeze-thaw cycling with de-icing salt immersion.
- [22] BS EN 1504-10:2003 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions - Requirements - Quality control and evaluation of conformity - Part 10: Site application of products and systems and quality control of the works.
- [23] BS EN 1504-3:2005 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair.
- [24] BS EN 1766:2000 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Reference concretes for testing.
- [25] BS EN 196-6:2010 - Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness.
- [26] BS EN 450-1:2012 - Fly ash for concrete Definition, specifications and conformity criteria.
- [27] BS EN 451-2:1995 - Method of testing fly ash - Part 2: Determination of fineness by wet sieving.
- [28] BS ISO 29581-2:2010 - Cement - Test methods - Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence.
- [29] Bulatović, V.: Sulfatna otpornost betona na bazi recikliranog agregata. Doktorska disertacija, Departman za Građevinarstvo i geodeziju, Fakultat tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi sad, 2017.
- [30] Capolat et al.: Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production, *Cement and Concrete Research* 34, 2004, 731-735.
- [31] Caputo D. et al.: Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure, *Cement and Concrete Composites* 30, 2008, 455-462.

- [32] Chan, S.Y.N., Ji, X.: Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes, *Cement & Concrete Composites* 21, 1999, 293-300.
- [33] Chandler, J.A., Eighmy, T.T., Hartlen, J., Hjelmar O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., van der Sloot, H.A., Vehlow, J.: *Studies in Environmental Science 67: Municipal solid waste incinerator residues*, 1st Edition, Elsevier Science B.V., 1997, Amsterdam, Netherlands, pp. 377.
- [34] Chang, H.B., Choi, Y.C.: Accelerated performance evaluation of repair mortars for concrete sewer pipes subjected to sulfuric acid attack. *Journal of Materials Research and Technology* 9(6), 2020, 13635-13645.
- [35] Choudhary, H.K., Anupama, A.V., Kumar, R., Panzi, M.E., Matteppanavar, S., Sherikar, B.N., Sahoo, B.: Observation of phase transformations in cement during hydration, *Construction and Building Materials* 101, 2015, 122–129.
- [36] Chrysochoou, M., Dermatas, D.: Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: Literature review and experimental study. *Journal of Hazardous Materials* 136, 2006, 20–33.
- [37] Cornelis, G., Johnson, C.A., Van Gerven, T., Vandecasteele, C.: Leaching mechanisms of oxyanionic metalloid and metal species in alkaline solid wastes: A review. *Applied Geochemistry* 23, 2008, 955–976.
- [38] del Bosque, I.F.S, Martínez-Ramírez, S., Blanco-Varela, M.T.: FTIR study of the effect of temperature and nanosilica on the nanostructure of C–S–H gel formed by hydrating tricalcium silicate, *Construction and Building Materials* 52, 15 February 2014, 314-323.
- [39] Diamond, S.: The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer, *Cement and Concrete Composites* 26, 2004, 919-933.
- [40] Donatello, S. et al.: Durability of very high volume fly ash cement pastes and mortars in aggressive solutions, *Cement & Concrete Composites* 38, 2013, 12-20.
- [41] Dragaš, J., Marinković, S., Ignjatović, I., Tošić, N.: Properties of high-volume fly ash concrete and its role in sustainable development, *Contemporary achievements in civil engineering 2014*, Subotica, 2014, 849-858.
- [42] Elaborat o proceni stanja i sanaciono rešenje noseće AB konstrukcijelamele B1 Urgentno-dijagnostičkog centra u Novom Sadu (E-031-35/3-2021). Elaborat uradio: Departman za građevinarstvo i geodeziju, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, mart 2021.
- [43] Elsen, J., Snellings, R., Mertens, G.: Portland cement and other calcareous hydraulic binders: History, production and mineralogy. *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, 2011 DOI: 10.1180/EMU-notes.9.11
- [44] EN 13055:2017 - Lightweight aggregates.
- [45] EN 13057:2002 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance of capillary absorption.
- [46] EN 13263-1:2010 - Silica fume for concrete - Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria.

- [47] EN 13412:2002. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of modulus of elasticity in compression.
- [48] EN 13584:2003 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of creep in compression for repair products.
- [49] EN 1504-1:2005 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 1: Definitions.
- [50] EN 1504-2:2004 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation. of conformity - Part 2: Surface protection systems for concrete.
- [51] EN 1504-5:2013. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation. of conformity - Part 5: Concrete injection.
- [52] EN 1504-9:2008 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 9: General principles for the use of products and systems.
- [53] EN 15167-1:2010 - Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria.
- [54] EN 196-3:2016 - Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness.
- [55] EN 450-2:2010 - Fly ash for concrete - Part 2: Conformity evaluation.
- [56] EN 451-1:2003 - Method of testing fly ash - Part 1: Determination of free calcium oxide content.
- [57] EN 933-10:2001 - Tests for geometrical properties of aggregates - Part 10: Assessment of fines - Grading of fillers (air-jet sieving).
- [58] Fathi, A.R.: Barium solidification/stabilization of legacy fly ash, Master Thesis, University of Akron, USA, 2018, pp. 8-9.
- [59] Gao, W., Ni, W., Zhang, Y., Li, Y., Shi, T., Li, Z.: Investigation into the semi-dynamic leaching characteristics of arsenic and antimony from solidified/stabilized tailings using metallurgical slag-based binders. *Journal of Hazardous Materials* 381, 2020, 120992.
- [60] Giergiczny, Z., Król, A.: Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. *Journal of Hazardous Materials* 160, 2008, 247–255.
- [61] Gjørv, O.E. 1996. "Performance and serviceability of concrete structures in the marine environment." *Symposium on Concrete for Marine Structures.*
- [62] Glasser, F.P.: Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. *J. Hazard. Mater.* 52, 1997, 151-170.
- [63] Gougar, M.L.D., Scheetz, B.E., Roy, D.M.: Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization: A review. *Waste Management* 16, 1996, 295–303.

- [64] Horgnies, M., Willieme, P., Gabet, O.: Influence of the surface properties of concrete on the adhesion of coating: Characterization of the interface by peel test and FT-IR spectroscopy. *Progress in Organic Coatings* 72, 2011, 360-379.
- [65] <http://en.wikipedia.org/wiki/Clinoptilolite>, nov. 2014.
- [66] <http://en.wikipedia.org/wiki/Heulandite>, nov. 2014.
- [67] <http://wsoweb.ladwp.com/Aqueduct/historyoflaa/altar.htm>, okt. 2014.
- [68] <http://www.dakotamatrix.com/products/9882/phillipsite#!prettyPhoto>, nov. 2014.
- [69] http://www.everyscience.com/Chemistry/Inorganic/Solid_State/g.1238.php, sept. 2014.
- [70] <http://www.iza-online.org/natural/Datasheets/Clinoptilolite/clinoptilolite.htm>, okt. 2014.
- [71] <http://www.medscape.com/viewarticle/781576>, nov. 2014.
- [72] <http://www.slideshare.net/anadosen/upotreba-elektrofilterskog-pepla-i-sljake-proizvedenih-iz-termoenergetskih-postrojenja-ljljiana-tanasijevi>, okt. 2016.
- [73] <http://www.vaseljenska.com/ekonomija/fruska-gora-eksploataciju-ceka-700-000-tona-zeolita/>, sept. 2016.
- [74] https://en.wikipedia.org/wiki/Hungry_Horse_Dam#/media/File:Hngryh2.jpg, okt. 2016.
- [75] <https://hr.delachieve.com/leteci-pepeo-opis-sastav-gost-ocjene-i-posebnu-primjenu/>, maj 2021.
- [76] <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf>, str. 38, april 2017.
- [77] <https://www.awpainting.com/2019/01/22/an-introduction-to-commercial-sandblasting/>, maj 2021.
- [78] https://www.concretenetwork.com/concrete/demolition/chipping_hammer.htm, maj 2021.
- [79] <https://www.concreterepairsite.co.uk/SystemsNProducts.html>, maj 2021.
- [80] <https://www.falch.com/en/applications/application/hydrodemolition>, maj 2021.
- [81] <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/8793/820/otpad-iz-termoelektrana-za-ekoloski-prihvatljiviji-beton-bez-cementa>, maj 2021.
- [82] https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/primena_elektrofilterskog_pepela_u_putograd_nji_g2g09_projekat.pdf, maj 2021.
- [83] <https://www.vanguardconcretecoating.com/diamond-grinding.htm>, maj 2021.
- [84] <https://zeokop.co.rs/galerija/>, sept. 2020.

- [85] Hussein, O.H.: Composite cement systems for encapsulation of barium sulphate scale from oil industry and application as high density support matrix, PhD thesis, Department of Materials Science and Engineering University of Sheffield November 2013.
- [86] Iyer, R.: The surface chemistry of leaching coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 93, 2002, 321–329.
- [87] Izquierdo, M., Querol, X.: Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology* 94, 2012, 54–66.
- [88] Jana, D.: A new look to an old pozzolan: Clinoptilolite – A promising pozzolan in concrete, Proceedings of Twenty-nine Conference on Cement Mycroscopy Quebec City, PQ, Canada, 20-24. may 2007, 168-179.
- [89] Janotka I., Krajči, L.: Sulphate resistance and passivation ability of the mortar made from pozzolan cement with zeolite, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 94, No. 1, 2008, 7–14.
- [90] Jevtić, D., Zakić, D., Savić, A., Radević, A.: I predavanje iz predmeta Građevinski materijali 1, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2013.
- [91] Jeyageetha C.J., Kumar, S.P.: Study of SEM/EDXS and FTIR for Fly Ash to Determine the Chemical Changes of Ash in Marine Environment, *International Journal of Science and Research*, Volume 5 Issue 7, July 2016, pp. 1688-1693.
- [92] Jones, G.C., Jackson, B.: *Infrared Transmission Spectra of Carbonate Minerals*. Publisher:Springer Netherlands,1993.
- [93] Juengera, M.C.G., Snellings, R., Bernal, S.A.: Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research* 122, 2019, 257–273.
- [94] Kapeluszna, E., Kotwica, Ł., Rózycka, A., Gołek, Ł.: Incorporation of Al in C-A-S-H gels with various Ca/Si and Al/Si ratio: Microstructural and structural characteristics with DTA/TG, XRD, FTIR and TEM analysis, *Construction and Building Materials* 155, 2017, 643–653.
- [95] Karakurt C., Bayazit, Y.: Freeze-Thaw Resistance of Normal and High Strength Concretes Produced with Fly Ash and Silica Fume. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2015, Article ID 830984, 8 pages.
- [96] Karakurt, C., Topcu I.B.: 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* 25, 2011, 1789-1795.
- [97] Kašić, V.D., Simić, V., Životić, D., Radosavljević-Mihajlović, A.S., Stojanović, J.N.: Mineraloška i kristalohemijska svojstva minerala HEU-tipa iz ležišta zeolitskih tufova Srbije. *Hem. Ind.* 71 (1), 2017, 49–60.
- [98] Katalog: Reparacija i zaštita armiranog betona – Sika u skladu sa Evropskim standardom EN 1504, 1-51, Sika d.o.o., Srbija. www.sika.rs
- [99] Kayali, O., Ahmed, M.S.: Assessment of high volume replacement fly ash concrete – Concept of performance index. *Construction and Building Materials* 39, 2013, 71–76.

- [100] Knutsson, A.: Freeze/Thaw Durability of Concrete with Fly Ash. Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010, pp 1.
- [101] Krolo, P., Krstulović, R., Dabić, P., Bubić, A.: Hidration and Leaching of the Cement – Zeolite Composite. *Ceramics – Silikáty* 49 (3), 2005, 213-219.
- [102] Kumarathasan, P., McCarthy, G.J., Hassett, D.J., Pflughoeft-Hassett, D.F.: Oxyanion Substituted Ettringites: Synthesis and Characterization; and their Potential Role In Immobilization of As, B, Cr, Se and V. *MRS Online Proceedings Library*, Vol. 178, 1989, 83–104.
- [103] Kwasny, J., Basheer, P.A.M., Russell, M.I.: CO₂ Sequestration in Cement-Based Materials During Mixing Process Using Carbonated Water and Gaseous CO₂, 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, 24–26 July 2014, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 72-79.
- [104] L'Hôpital, E., Lothenbach, B., Le Saout, G., Kulik, D., Scrivener, K.: Incorporation of aluminium in calcium-silicate-hydrates, *Cement and Concrete Research* 75, 2015, 91-103.
- [105] Landfill directive 2003/33/EC: Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC. *Official Journal of the European Communities*, L 11/27-49.
- [106] Li, H., Shi, A., Mingyi Li, Zhang, X: Effect of pH, Temperature, Dissolved Oxygen, and Flow Rate of Overlying Water on Heavy Metals Release from Storm Sewer Sediments. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Chemistry* 2013, Article ID 434012, 11 pages.
- [107] Li, X.D., Poon, C.S., Sun, H., Lo, I.M.C., Kirk, D.W.: Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials* 82, 2001, 215–230.
- [108] Li, Z.: Drying shrinkage prediction of paste containing meta-kaolin and ultrafine fly ash for developing ultra-high performance concrete, *Materials Today Communications* 6, 2016, 74–80.
- [109] Litina, C., Al-Tabbaa, A.: First generation microcapsule-based self-healing cementitious construction repair materials. *Construction and Building Materials* 255, 2020, 119389, 1-14.
- [110] Liu, J., Liu, J., Huang, Z., Zhu, J., Liu, W., Zhang, W.: Effect of Fly Ash as Cement Replacement on Chloride Diffusion, Chloride Binding Capacity, and Micro-Properties of Concrete in a Water Soaking Environment. *Applied Sciences* 10(18), 2020, 6271.
- [111] Lodeiro, I.G., Macphee, D.E., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A.: Effect of alkalis on fresh C–S–H gels. FTIR analysis. *Cement and Concrete Research* 39, 2009, 147–153.
- [112] Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D.: Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research* 41, 2011, 1244-1256.
- [113] Madandoust R. et al.: Concrete made with zeolite and metakaolin: A comparison on the strength and durability properties, *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, Vol.14, No. 4, 2013, 533-543.

- [114] Malešev, M., Radonjanin, V., Šupić, S.: Malteri. XV predavanje iz predmeta - Materijali u građevinarstvu 2., Departman za građevinarstvo i geodeziju, Univerzitet u Novom Sadu, 2020/2021.
- [115] Malešev, M., Radonjanin, V.: Leteći pepeo (fly ash) kao mineralni dodatak u betonskim kompozitima. Šesto predavanje iz predmeta – Savremeni kompoziti na bazi poljoprivrednog, industrijskog i građevinskog otpada. Departman za građevinarstvo i geodeziju, Univerzitet u Novom Sadu, 2020/2021.
- [116] Massazza, F.: Pozzolana and pozzolanic cements. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Hewlett PC (ed) Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001, 471-636.
- [117] Mehta, P.K. Natural pozzolans: Supplementary cementing materials for concrete. CANMET Special Publication 86,1987, 1-33.
- [118] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.: Concrete-Microstructure, Properties and Materials, third edition, McGraw-Hill, 2006.
- [119] Mertens, G. et al.: Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity, Cement and Concrete Research 39, No. 3, 2009, 233-240.
- [120] Milović. T., Šešlija, M., Šupić, S., Vukoslavčević, S: Influence of natural zeolite on some properties of mortar/concrete, International conference contemporary achievements in civil engineering 2015, 24. april 2015, Subotica, Srbija, 61-66.
- [121] Min, Z., Reardon, E.J.: Chromate and selenate hydrocalumite solid solutions and their applications in waste treatment. Science in China Series C: Life Sciences, 2004, Supp. No.1, 165-173.
- [122] Momayez, A., Ehsani, M.R., Ramezani pour, A.A., Rajaie, H.: Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. Cement and Concrete Research 35, 2005, 748-757.
- [123] Mozgawa, W. 2000. The influence of some heavy metals cations on the FTIR spectra of zeolites. Journal of Molecular Structure 555, 299-304.
- [124] Mozgawa, W. 2001. The relation between structure and vibrational spectra of natural zeolites. Journal of Molecular Structure 596, 129-137
- [125] Mulimbayan F.M. et al.: Thermal analysis of Philippine natural zeolites, Zeolite 2014 – 9th International Conference on the Occurrence, Properties and Utilization of Natural Zeolites, Belgrade, Serbia, 2014, 163-164.
- [126] Munkhjargal D. et al.: Removal of ammonium ion from aqueous solution by natural zeolite, Zeolite 2014 – 9th International Conference on the Occurrence, Properties and Utilization of Natural Zeolites, Belgrade, Serbia, 2014, 165-166.
- [127] Najimi, M. et al.: An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, Construction and Building Materials 35, 2012, 1023-1033.

- [128] Nebel, H., Neumann, M., Mayer, C., Epple, M.: On the Structure of Amorphous Calcium Carbonates - A Detailed Study by Solid-State NMR Spectroscopy. *Inorganic Chemistry* 47, 2008, 7874-7879.
- [129] NT BUILD 492:1999-11. Concrete, mortar and cement based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.
- [130] Ortega, A.I., Pellicer, T.M., Calderón, P.A., Adam, H.M.: Axially loaded RC columns repaired on one side with cement-based mortars. *Construction and Building Materials* 177, 2018, 1-9.
- [131] PECH: Trace-element geochemistry of coal resource development related to environmental quality and health. Washington, DC: National Academy Press, 1980, pp.153.
- [132] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S.: A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, *Construction and Building Materials* 13, 1999, 427-432.
- [133] prEN 12620:2002 - Aggregates for concrete.
- [134] Qian, J., You, C., Wang, Q., Wang, H., Jia, X.: A method for assessing bond performance of cement-based repair materials. *Construction and Building Materials* 68, 2014, 307-313.
- [135] Querol, X., Umaña, J.C., Alastuey, A., Ayora, C., Lopez-Soler, A., Plana, F.: Extraction of soluble major and trace elements from fly ash in open and closed leaching systems. *Fuel* 80, 2001, 801-813.
- [136] Radeka, M. et al.: Pozzolanic activity of natural zeolite from one Serbian deposit, XXVI International symposium on researching and application of contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures – Vrnjačka Banja, 29-31. oktobar 2014, 191-201.
- [137] Radeka, M., Milović, T., Malešev, M., Radonjanin, V., Laban, M.: Hydration process and compressive strength of cement pastes containing natural zeolite, *Building Materials and Structures* 59, No. 2, 2016, 29-45.
- [138] Radonjanin, V., Malešev, M.: Analiza svojstava „gotovih“ reparaturnih maltera sa aspekta njihove primene pri sanaciji AB konstrukcija, *Materijali i konstrukcije* 47, 2004, 14-28.
- [139] Radonjanin, V., Malešev, M.: Tehnički uslovi i izbor materijala za sanaciju oštećenog betona, I predavanje iz predmeta *Sanacija betonskih konstrukcija*, FTN, Univerzitet u Novom Sadu, 2020.
- [140] Radonjanin, V., Malešev, M.: Tehnički uslovi i izbor materijala za sanaciju oštećenog betona – Osnovna svojstva, II predavanje iz predmeta *Sanacija betonskih konstrukcija*, FTN, Univerzitet u Novom Sadu, 2020.
- [141] Ranjbar, M.M. et al.: Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete, *Construction and Building Materials* 47, 2013, 806-813.
- [142] Repair of Concrete Structures to EN 1504 - A guide for renovation of concrete structures – repair materials and systems according to the EN 1504 series. Danish Standards Association, Elsevier Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2004, ISBN 0 7506 6222 0

- [143] Rha, C.Y., Kang, S.K., Kim, C.E.: Investigation of the stability of hardened slag paste for the stabilization/ solidification of wastes containing heavy metal ions. *Journal of Hazardous Materials* 73, 2000, 255-267.
- [144] Richardson, I.G.: The calcium silicate hydrates, *Cement and Concrete Research* 38, 2008, 137-158.
- [145] Sabet, F.A. et al.: Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash, *Construction and Building Materials* 44, 2013, 175-184.
- [146] Saraswathy, V., Song, H.-W.: Evaluation of Cementitious Repair Mortars for Corrosion Resistance. *Portugaliae Electrochimica Acta* 26(5), 2008, 417-432.
- [147] Savremeni materijali i postupci sanacije građevinskih objekata, izdavači: Udruženje inženjera građevinarstva, geotehnike, arhitekture i urbanista "Izgradnja", kao i Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, 2013, 1-18. ISBN 978-86-82307-21-1
- [148] Shi, J., Liu, B., Qin, J., Jiang, J., Wu, X., Tan, J.: Experimental study of performance of repair mortar: Evaluation of in-situ tests and correlation analysis. *Journal of Building Engineering* 31, 2020, 101325.
- [149] Shon, C.-S., Kim, Y.-S.: Evaluation of West Texas natural zeolite as an alternative of ASTM Class F fly ash, *Construction and Building Materials* 47, 2013, 389-396.
- [150] Simić, V. et al.: Zeolite deposits and occurrences in Serbia - an overview. *Zeolite 2014 - 9th International conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites*, Belgrade, Serbia, 8-13 jun 2014, 217-218.
- [151] Snellings, R., Mertens, G., Elsen, J.: Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 74, 2012, 211-278.
- [152] SRPS B.B8.032:1980 - Ispitivanje prirodnog kamena - Određivanje zapreminske mase sa porama i šupljinama, zapreminske mase bez pora i šupljina i koeficijenta zapreminske mase i poroznosti.
- [153] SRPS B.C1.018:2001 - Nemetalne mineralne sirovine - Pucolanski materijali - Sastojci za proizvodnju cementa - Klasifikacija, tehnički uslovi i metode ispitivanja.
- [154] SRPS B.C8.024:1964 - Određivanje specifične površine portland-cementa.
- [155] SRPS B.C8.029:1979 - Cement - Skupljanje cementnog maltera usled sušenja.
- [156] SRPS EN 12878:2009 - Pigments for the colouring of building materials based on cement and/or lime - Specifications and methods of test.
- [157] SRPS EN 1542:2010 - Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija - Metode ispitivanja - Merenje prionljivosti "pull-off" metodom.
- [158] SRPS EN 196-1:2008 - Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće.
- [159] SRPS EN 196-2: Metode ispitivanja cementa - Deo 2: Hemijska analiza cementa.

- [160] SRPS EN 196-3:2007 - Metode ispitivanja cementa - Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine.
- [161] SRPS EN 197-1:2010 - Cement - Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente.
- [162] SRPS EN 206-1:2011 - Beton - Deo 1: Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost.
- [163] SRPS U.M1.016:1992 - Beton - Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza.
- [164] SRPS U.M1.206:2013 - Beton - Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost - Pravila za primenu standarda SRPS EN 206-1.
- [165] Sun, G.K., Young, J.F., Kirkpatrick, R.J.: The role of Al in C-S-H: NMR, XRD, and compositional results for precipitated samples. *Cement and Concrete Research* 36, 2006, 18-29.
- [166] Swaine, D.J.: Trace elements in coal. Butterworth&Co., UK, 1990, 2-4. ISBN 0-408-03309-6
- [167] Tadić, G. et al.: Upotreba elektrofilterskog pepela u izgradnji saobraćajnica. *Journal of Engineering & Processing Management* 7, No. 1, 2015, 125-139.
- [168] Tang, L., 1996. Chloride Transport in Concrete-Measurement and Prediction. Chalmers University of Technology, Sweden (Doctor Thesis).
- [169] Tatomirović, T., Radeka, M.: Zeolite as pozzolanic material, XXVI International symposium on researching and application of contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures – Vrnjačka Banja, 29-31. oktobar 2014, 215-224.
- [170] Taylor, H.F.W: Nanostructure of C-S-H: current status. *Adv. Cem. Based. Mater.*, 1, 1993, 38-46.
- [171] Terzić, A., Mijatović, N., Miličić, Lj., Radojević, Z.: Svojstva i performanse maltera sa dodatkom primarnih i sekundarnih mineralnih sirovina u cilju zamene cementnog veziva. *Tehnika – Novi materijani* 27, 2018, 470-476.
- [172] Terzić, A., Pavlović, Lj., Miličić, Lj.: Prevention of electrofilter ash toxic leaching by embedding in composite materials. *Zaštita materijala* 54, 2013, broj 2, 117-123.
- [173] Tishmack, J.K., Olek, J., Diamond, S.: Characterization of High-Calcium Fly Ashes and Their Potential Influence on Ettringite Formation in Cementitious Systems. *Cement Concrete and Aggregates* 21(1), 1999, 82-91.
- [174] U.S: EPA, Federal Register, 52(155): 29999, August 12, 1987.
- [175] Ucaroglu, S., Talinli, I.: Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by solidification/stabilization. *Journal of Environmental Management* 105, 2012, 131-137.
- [176] Ultrasonic Detection of Chloride Ions and Chloride Binding in Portland Cement Pastes. Ramirez-Ortiz, A.E., Castellanos, F., Cano-Barrita, P.F. de J.: *International Journal of Concrete Structures and Materials* 21(1), 2018, unpagged.

- [177] USEPA, Federal Register, Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), 40 CFR. 50, 406 (1986).
- [178] Uysal, M., Akyuncu, V.: Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes, *Construction and Building Materials* 34, 2012, 170–178.
- [179] Valipour M.: Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Construction and Building Materials* 41, 2013, 879-888.
- [180] Varzaneh, A.S., Naderi, M.: Determination of Mechanical Properties of Repair Mortars using in situ Methods under Different Curings. *EUREKA: Physics and Engineering* 2, 2020, 1-18.
- [181] Vejmelkova, E. sa koaut.: Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability and hygrothermal performance, *Cement & Concrete Composites* 55, 2015, 259–267.
- [182] Vojnović, D., Križak, D. Maksimović, M.: Jablanica 1 – perspective zeolite deposit. *Zeolite 2014 – 9th International conference on the occurrence, properties and utilization of natural zeolites*, Belgrade, Serbia, 8-13 jun 2014, 235-236.
- [183] Vyšvaril, M., Bayer, P.: Immobilization of heavy metals in natural zeolite-blended cement pastes, *Procedia Engineering* 151, 2016, 162-169.
- [184] Wang, B., Gupta, R.: Analyzing bond-deterioration during freeze-thaw exposure in cement-based repairs using non-destructive methods. *Cement and Concrete Composites* 115, 2021, 103830, 1-15.
- [185] Ward, C.R., Dubikova, M., French, D., Jankowski, J., Li, Z., Groves, S., Riley, K.: Leaching Characteristics of long-stored fly ashes, *Technology assessment report* 48
- [186] Xiao, Y., Oorsprong, M., Yang, Y., Voncken, J.H.L.: Vitrification of bottom ash from a municipal solid waste incinerator. *Waste Manag.* 28, 2008, 1020-1026.
- [187] Yazdi, M.A., Dejager, E., Debraekeleer, M., Gruyaert, E., Kim Van Tittelboom, K.V., De Belie, N.: Bond strength between concrete and repair mortar and its relation with concrete removal techniques and substrate composition. *Construction and Building Materials* 230, 2020, 116900.
- [188] Ylmén, R., Jäglid, U., Steenari, B-M., Panas, I: Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques. *Cement and Concrete Research* 39, 2009, 433-439.
- [189] Yu, Q., Nagataki, S., Lin, J., Saeki, T., Hisada, M.: The Leachability of Heavy Metals in hardened fly ash cement and cement-solidified fly ash. *Cement and Concrete Research* 35, 2005, 1056– 1063.
- [190] Zendelska, A., Golomeova, M., Jakupi, Š., Lisičkov, K., Kuvendžiev, S., Marinkovski, M.: Characterization and Application of Clinoptilolite for Removal of Heavy Metal Ions from Water Resources. *Geologica Macedonica* 32(1), 2018, 21–32.

- [191] Zuo, S., Xiao, J., Yuan, Q.: Comparative study on the new-old mortar interface deterioration after wet-dry cycles and heat-cool cycles. *Construction and Building Materials* 244, 2020, 118374.

X
PRILOZI

PRILOG 1

Određivanje fizičkih i mehaničkih svojstava Portland cementa

U eksperimentalnom istraživanju korišćen je CEM I 42,5R. Rezultati ispitivanja fizičkih svojstava navedenog cementa su prikazani u tabeli P1-1, a mehaničkih u tabeli P1-2.

Tabela P1-1. Fizička svojstva PC

Ispitano svojstvo	CEM I 42,5R
Finoća mliva (<i>Air-jet</i> metoda prosejavanja) (%)	4,9
Specifična površina (cm ² /g)	4188,6
Specifična masa (g/cm ³)	3,126
Standardna konzistencija (%)	29,0
Početak vezivanja (min)	241
Kraj vezivanja (min)	348
Stalnost zapremine (<i>Le Chatelier</i>) (mm)	0,5

Tabela P1-2. Mehanička svojstva PC

Vrsta cementa	Čvrstoća pri pritisku (MPa)		Čvrstoća na zatezanje pri savijanju (MPa)	
	2 dana	28 dana	2 dana	28 dana
CEM I 42,5R	26,35	50,26	5,38	8,84

PRILOG 2

Određivanje hemijskog sastava PC, NZ i FA primenom XRF analize

U nastavku su priloženi izveštaji XRF analize u vezi sa ispitivanjem hemijskog sastava PC primenom metode za cimente, kao i PC, NZ i FA, ali i filera – kalcijum karbonata primenom *Turbo Quant* metode (jer uključuje i mikroelemente i elemente u tragovima).

Sample Name	CEM I Lafarge eusen (1)	Dilution Material	HWC
Method	Cement (A) (100%)	Sample Mass	5.0000
Sample Folder	Tiana I Milan	Dilution Mass	1.0000
Sample Type	Pressed Tablet	Dilution Factor	0.8333
Sample Status	A X A A X X X X	Measurement Date	2/10/2020 1:50 PM
Operator	Admin User	Evaluation Date	2/10/2020 1:50 PM

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Element	Concentration	Abs. Error
11 Na ₂ O Sodium oxide	0.325 %	0.015
12 MgO Magnesium oxide	2.816 %	0.009
13 Al ₂ O ₃ Aluminium oxide	5.218 %	0.007
14 SiO ₂ Silicon dioxide	21.88 %	0.01
15 P ₂ O ₅ Phosphorus pentoxide	0.1485 %	0.0008
16 SO ₃ Sulfur trioxide	3.548 %	0.002
17 Cl Chlorine	0.02345 %	0.00006
19 K ₂ O Potassium oxide	0.7822 %	0.0012
20 CaO Calcium oxide	62.03 %	0.01
22 TiO ₂ Titanium dioxide	0.2360 %	0.0007
23 V ₂ O ₅ Vanadium pentoxide	-	-
24 Cr ₂ O ₃ Chromium(III) oxide	0.01968 %	0.00021
25 Mn ₂ O ₃ Manganese(III) oxide	0.09285 %	0.00028
26 Fe ₂ O ₃ Iron(III) oxide	2.705 %	0.005
30 ZnO Zinc oxide	0.05449 %	0.00031
38 SrO Strontium oxide	0.1031 %	0.0002
56 BaO Barium oxide	0.03962 %	0.00006
Sum of concentration	100.01 %	

Sample Name	CEM I TQ Powder	Dilution Material	-
Method	TQ Powders and Liquids (A)	Sample Mass	5.0000
Sample Folder	August 2019	Dilution Mass	-
Sample Type	Powder	Dilution Factor	-
Sample Status	AAAA XXXX	Measurement Date	8/5/2019 12:42 PM
Operator	Admin User	Evaluation Date	8/5/2019 12:42 PM

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Element	Concentration	Abs. Error
11 Na ₂ O Sodium oxide	< 0.0027 %	-
12 MgO Magnesium oxide	6.15 %	0.19
13 Al ₂ O ₃ Aluminium oxide	6.084 %	0.032
14 SiO ₂ Silicon dioxide	24.02 %	0.03
15 P ₂ O ₅ Phosphorus pentoxide	0.0957 %	0.0015
16 SO ₂ Sulfur trioxide	6.255 %	0.007
17 Cl Chlorine	0.01671 %	0.00013
19 K ₂ O Potassium oxide	0.7697 %	0.0018
20 CaO Calcium oxide	57.28 %	0.01
22 Ti Titanium	1231 µg/g	5
23 V Vanadium	57.2 µg/g	2.1
24 Cr Chromium	57.5 µg/g	1.5
25 MnO Manganese(II) oxide	894.6 µg/g	1.2
26 Fe ₂ O ₃ Iron(III) oxide	1.014 %	0.003
27 Co Cobalt	< 7.1 µg/g	-
28 Ni Nickel	50.2 µg/g	1.4
29 Cu Copper	52.4 µg/g	0.9
30 Zn Zinc	112.4 µg/g	0.9
31 Ga Gallium	6.2 µg/g	0.3
32 Ge Germanium	0.6 µg/g	0.2
33 As Arsenic	8.6 µg/g	0.3
34 Se Selenium	1.7 µg/g	0.2
35 Br Bromine	1.5 µg/g	0.1
37 Rb Rubidium	28.4 µg/g	0.2
38 Sr Strontium	1061 µg/g	1
39 Y Yttrium	12.1 µg/g	0.2
40 Zr Zirconium	50.3 µg/g	0.5
41 Nb Niobium	4.1 µg/g	0.2
42 Mo Molybdenum	4.0 µg/g	0.1
44 Ru Ruthenium	< 0.2 µg/g	-
45 Rh Rhodium	0.0 µg/g	0.0
46 Pd Palladium	< 0.2 µg/g	-
47 Ag Silver	< 0.2 µg/g	-
48 Cd Cadmium	< 0.2 µg/g	-
49 In Indium	< 0.3 µg/g	-
50 Sn Tin	4.1 µg/g	0.7
51 Sb Antimony	5.7 µg/g	0.7
52 Te Tellurium	< 2.4 µg/g	-
53 I Iodine	< 0.6 µg/g	-
55 Cs Cesium	< 5.7 µg/g	-
56 Ba Barium	357.9 µg/g	5.1

57	La	Lanthanum	< 0.14	µg/g	-
58	Ce	Cerium	29.3	µg/g	4.6
72	Hf	Hafnium	< 0.7	µg/g	-
73	Ta	Tantalum	< 0.8	µg/g	-
74	W	Tungsten	2.0	µg/g	0.3
79	Au	Gold	< 0.2	µg/g	-
80	Hg	Mercury	< 0.2	µg/g	-
81	Tl	Thallium	< 0.2	µg/g	-
82	Pb	Lead	10.3	µg/g	0.5
83	Bi	Bismuth	< 0.3	µg/g	-
90	Th	Thorium	0.8	µg/g	0.1
92	U	Uranium	< 0.8	µg/g	-
Sum of concentration			102.88 %		

Sample Name	Zeolit za dr	Dilution Material	HWC
Method	TQ Pellets and Solids (A)	Sample Mass	5.0000
Sample Folder	February 2021	Dilution Mass	1.0000
Sample Type	Pressed Tablet	Dilution Factor	0.8333
Sample Status	AAAAXXX	Measurement Date	2/25/2021 11:48 AM
Operator	Admin User	Evaluation Date	2/25/2021 11:48 AM

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Element	Concentration	Abs. Error
11 Na ₂ O Sodium oxide	1.069 %	0.019
12 MgO Magnesium oxide	2.925 %	0.012
13 Al ₂ O ₃ Aluminium oxide	13.49 %	0.01
14 SiO ₂ Silicon dioxide	70.79 %	0.02
15 P ₂ O ₅ Phosphorus pentoxide	0.1104 %	0.0009
16 SO ₃ Sulfur trioxide	0.02395 %	0.00027
17 Cl Chlorine	0.00582 %	0.00005
19 K ₂ O Potassium oxide	1.298 %	0.002
20 CaO Calcium oxide	4.525 %	0.002
21 Sc Scandium	-	-
22 Ti Titanium	1795 µg/g	4
23 V Vanadium	41.9 µg/g	1.6
24 Cr Chromium	17.0 µg/g	0.8
25 MnO Manganese(II) oxide	385.0 µg/g	1.3
26 Fe ₂ O ₃ Iron(III) oxide	2.863 %	0.003
27 Co Cobalt	< 1.0 µg/g	-
28 Ni Nickel	24.5 µg/g	0.7
29 Cu Copper	29.5 µg/g	0.6
30 Zn Zinc	50.8 µg/g	0.5
31 Ga Gallium	17.8 µg/g	0.3
32 Ge Germanium	0.8 µg/g	0.2
33 As Arsenic	1.4 µg/g	0.2
34 Se Selenium	< 0.1 µg/g	-
35 Br Bromine	0.6 µg/g	0.1
37 Rb Rubidium	40.5 µg/g	0.2
38 Sr Strontium	1093 µg/g	1
39 Y Yttrium	20.7 µg/g	0.2
40 Zr Zirconium	120.6 µg/g	0.5
41 Nb Niobium	12.1 µg/g	0.2
42 Mo Molybdenum	0.8 µg/g	0.2
44 Ru Ruthenium	< 0.2 µg/g	-
45 Rh Rhodium	0.0 µg/g	0.0
46 Pd Palladium	< 0.5 µg/g	-
47 Ag Silver	< 0.2 µg/g	-
48 Cd Cadmium	< 0.2 µg/g	-
49 In Indium	< 0.3 µg/g	-
50 Sn Tin	3.7 µg/g	0.7
51 Sb Antimony	< 0.4 µg/g	-
52 Te Tellurium	2.1 µg/g	0.6
53 I Iodine	10.9 µg/g	1.2
55 Cs Cesium	16.8 µg/g	2.2
56 Ba Barium	3058 µg/g	9

57	La	Lanthanum	18.6	µg/g	3.1
58	Ce	Cerium	52.3	µg/g	7.0
59	Pr	Praseodymium	-		-
60	Nd	Neodymium	-		-
62	Sm	Samarium	-		-
70	Yb	Ytterbium	-		-
72	Hf	Hafnium	2.5	µg/g	0.5
73	Ta	Tantalum	3.4	µg/g	1.5
74	W	Tungsten	2.7	µg/g	0.6
79	Au	Gold	< 0.2	µg/g	-
80	Hg	Mercury	< 0.1	µg/g	-
81	Tl	Thallium	0.4	µg/g	0.2
82	Pb	Lead	25.0	µg/g	0.4
83	Bi	Bismuth	0.6	µg/g	0.2
90	Th	Thorium	15.4	µg/g	0.2
92	U	Uranium	4.1	µg/g	0.2
Sum of concentration			97.79 %		

Sample Name	Leleci pepao Tiana	Dilution Material	HWC
Method	TQ Pellets and Solids (A)	Sample Mass	5.0000
Sample Folder	February 2021	Dilution Mass	1.0000
Sample Type	Pressed Tablet	Dilution Factor	0.8333
Sample Status	AAAAAXXX	Measurement Date	2/25/2021 11:59 AM
Operator	Admin User	Evaluation Date	2/25/2021 11:59 AM

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval.

Element	Concentration	Abs. Error
11 Na ₂ O Sodium oxide	0.281 %	0.012
12 MgO Magnesium oxide	3.252 %	0.013
13 Al ₂ O ₃ Aluminium oxide	21.09 %	0.02
14 SiO ₂ Silicon dioxide	45.40 %	0.02
15 P ₂ O ₅ Phosphorus pentoxide	0.06509 %	0.00085
16 SO ₃ Sulfur trioxide	6.638 %	0.004
17 Cl Chlorine	< 0.00015 %	-
19 K ₂ O Potassium oxide	1.349 %	0.002
20 CaO Calcium oxide	9.154 %	0.004
21 Sc Scandium	-	-
22 Ti Titanium	4913 µg/g	6
23 V Vanadium	268.0 µg/g	2.3
24 Cr Chromium	293.6 µg/g	1.5
25 MnO Manganese(II) oxide	1036 µg/g	2
26 Fe ₂ O ₃ Iron(III) oxide	8.297 %	0.005
27 Co Cobalt	< 11 µg/g	-
28 Ni Nickel	314.1 µg/g	1.9
29 Cu Copper	130.5 µg/g	1.2
30 Zn Zinc	591.6 µg/g	1.8
31 Ga Gallium	84.3 µg/g	0.7
32 Ge Germanium	26.7 µg/g	0.4
33 As Arsenic	1516 µg/g	2
34 Se Selenium	87.3 µg/g	0.5
35 Br Bromine	8.5 µg/g	0.5
37 Rb Rubidium	97.0 µg/g	0.3
38 Sr Strontium	452.3 µg/g	0.6
39 Y Yttrium	43.3 µg/g	0.3
40 Zr Zirconium	112.7 µg/g	0.4
41 Nb Niobium	16.7 µg/g	0.3
42 Mo Molybdenum	45.2 µg/g	0.4
44 Ru Ruthenium	0.3 µg/g	0.2
45 Rh Rhodium	0.0 µg/g	0.0
46 Pd Palladium	< 0.2 µg/g	-
47 Ag Silver	< 0.2 µg/g	-
48 Cd Cadmium	3.2 µg/g	0.4
49 In Indium	< 0.3 µg/g	-
50 Sn Tin	38.5 µg/g	1.0
51 Sb Antimony	28.1 µg/g	1.0
52 Te Tellurium	< 0.5 µg/g	-
53 I Iodine	< 0.6 µg/g	-
55 Cs Cesium	6.9 µg/g	1.3
56 Ba Barium	532.9 µg/g	5.9

57	La	Lanthanum	18.6	µg/g	2.9
58	Ce	Cerium	56.0	µg/g	6.6
59	Pr	Praseodymium	-		-
60	Nd	Neodymium	-		-
62	Sm	Samarium	-		-
70	Yb	Ytterbium	-		-
72	Hf	Hafnium	< 3.6	µg/g	-
73	Ta	Tantalum	7.8	µg/g	2.9
74	W	Tungsten	24.3	µg/g	1.6
79	Au	Gold	< 0.2	µg/g	-
80	Hg	Mercury	7.3	µg/g	0.7
81	Tl	Thallium	< 0.2	µg/g	-
82	Pb	Lead	198.3	µg/g	4.8
83	Bi	Bismuth	19.3	µg/g	1.0
90	Th	Thorium	21.9	µg/g	0.5
92	U	Uranium	16.3	µg/g	0.4
Sum of concentration			96.63 %		

Sample Name **CaCO3 Jelen Do Tiana** Dilution Material -
 Method **TQ Powders and Liquids (A)** Sample Mass **2.0000**
 Sample Folder **Tiana I Milan** Dilution Mass -
 Sample Type **Powder** Dilution Factor -
 Sample Status **AAAAXXXX** Measurement Date **7/2/2021 2:18 PM**
 Operator **Admin User** Evaluation Date **7/2/2021 2:18 PM**

Results

The error is the statistical error with 1 sigma confidence interval

Element	Concentration	Abc. Error
11 Na ₂ O Sodium oxide	< 0.0027 %	-
12 MgO Magnesium oxide	3.20 %	0.11
13 Al ₂ O ₃ Aluminium oxide	0.3281 %	0.0069
14 SiO ₂ Silicon dioxide	0.1946 %	0.0026
15 P ₂ O ₅ Phosphorus pentoxide	< 0.00062 %	-
16 SO ₂ Sulfur trioxide	< 0.00025 %	-
17 Cl Chlorine	< 0.00007 %	-
19 K ₂ O Potassium oxide	< 0.00051 %	-
20 CaO Calcium oxide	45.91 %	0.01
22 Ti Titanium	13.8 µg/g	1.1
23 V Vanadium	2.7 µg/g	0.8
24 Cr Chromium	9.3 µg/g	0.9
25 MnO Manganese(II) oxide	35.8 µg/g	1.5
26 Fe ₂ O ₃ Iron(III) oxide	0.05103 %	0.00031
27 Co Cobalt	< 1.0 µg/g	-
28 Ni Nickel	< 1.9 µg/g	-
29 Cu Copper	1.7 µg/g	0.4
30 Zn Zinc	2.6 µg/g	0.3
31 Ga Gallium	1.2 µg/g	0.2
32 Ge Germanium	< 0.3 µg/g	-
33 As Arsenic	0.5 µg/g	0.1
34 Se Selenium	0.2 µg/g	0.1
35 Br Bromine	< 0.2 µg/g	-
37 Rb Rubidium	0.2 µg/g	0.1
38 Sr Strontium	114.9 µg/g	0.3
39 Y Yttrium	0.6 µg/g	0.1
40 Zr Zirconium	1.3 µg/g	0.2
41 Nb Niobium	0.6 µg/g	0.2
42 Mo Molybdenum	0.5 µg/g	0.2
44 Ru Ruthenium	0.3 µg/g	0.1
45 Rh Rhodium	0.0 µg/g	0.0
46 Pd Palladium	< 0.2 µg/g	-
47 Ag Silver	< 0.2 µg/g	-
48 Cd Cadmium	< 0.2 µg/g	-
49 In Indium	< 0.3 µg/g	-
50 Sn Tin	1.9 µg/g	0.8
51 Sb Antimony	3.4 µg/g	0.7
52 Te Tellurium	4.1 µg/g	0.8
53 I Iodine	< 2.8 µg/g	-
55 Cs Cesium	< 0.5 µg/g	-
56 Ba Barium	10.8 µg/g	3.6

57	La	Lanthanum	< 1.5	µg/g	-
58	Ce	Cerium	< 1.5	µg/g	-
72	Hf	Hafnium	< 0.5	µg/g	-
73	Ta	Tantalum	< 0.8	µg/g	-
74	W	Tungsten	1.3	µg/g	0.6
79	Au	Gold	< 0.2	µg/g	-
80	Hg	Mercury	< 0.5	µg/g	-
81	Tl	Thallium	< 0.2	µg/g	-
82	Pb	Lead	0.4	µg/g	0.2
83	Bi	Bismuth	< 0.3	µg/g	-
90	Th	Thorium	< 0.3	µg/g	-
92	U	Uranium	< 0.3	µg/g	-
Sum of concentration			49.80 %		

PRILOG 3

Određivanje klase pucolanske aktivnosti NZ i FA

Ispitivanje klase pucolanske aktivnosti NZ i FA urađeno je u skladu sa standardom SRPS B.C1.018. Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u tabeli P3-1, NZ pripada klasi 10, a FA klasi 15 pucolanskih materijala.

Tabela P3-1. Klasa pucolanske aktivnosti NZ i FA

Vrsta SCM	m (kg)	P _s (kg)	f _{zs} (MPa)	f _{zs, min} (MPa)	KLASA	P _p (kN)	f _p (MPa)	f _{p, min} (MPa)	KLASA
NZ	0,527	3,635	4,50			16,5	10,31		
						17,0	10,62		
	0,526	6,505	4,34	4,34	<u>15</u>	16,5	10,31	10,00	<u>10</u>
						16,0	10,00		
	0,522	3,700	4,58			17,0	10,62		
						18,0	11,25		
FA	0,524	3,248	4,02			36,5	22,81		
						34,0	21,50		
	0,531	3,805	4,81	4,02	<u>15</u>	36,0	22,50	21,50	<u>15</u>
						37,5	23,44		
	0,531	3,365	4,16			36,5	22,81		
						38,5	24,06		

PRILOG 4

Određivanje indeksa aktivnosti NZ i FA

Određivanje indeksa aktivnosti NZ i FA urađeno je u skladu sa standardom EN 450-1, dok su rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku (u skladu sa EN 196-1) referentnog maltera, maltera sa 25% NZ kao SCM i maltera sa 25% FA kao SCM pri starosti od 28 dana prikazani u tabeli P4-1, a pri starosti od 90 dana u tabeli P4-2.

Tabela P4-1. Indeksi aktivnosti NZ i FA pri starosti od 28 dana

Vrsta SCM	m (kg)	P_p (kN)	f_p (MPa)	$f_{p,sr}$ (MPa)	Indeks aktivnosti nakon 28 dana (%)
PC	0,571	80,0	81,0	50,313	50,260
	0,577	80,0	81,0	50,313	
	0,565	80,0	80,5	50,156	
NZ	0,580	74,5	72,5	45,938	46,667
	0,577	74,0	76,0	46,875	
	0,578	76,5	74,5	47,188	
FA	0,571	100,0	103,5	63,594	62,969
	0,584	97,5	95,0	60,156	
	0,590	103,5	105,0	65,156	

Tabela P4-2. Indeksi aktivnosti NZ i FA pri starosti od 90 dana

Vrsta SCM	m (kg)	P _p (kN)	f _p (MPa)	f _{p,sr} (MPa)	Indeks aktivnosti nakon 90 dana (%)
PC	0,558	90	86	55,000	55,208
	0,567	86	85	53,438	
	0,556	91	92	57,188	
NZ	0,576	80,5	86,0	52,031	<u>102,93</u>
	0,582	100,00	98,5	62,031	
	0,572	89,5	91,0	56,406	
FA	0,582	114,5	114,5	71,563	<u>130,94</u>
	0,585	113,0	114,0	70,938	
	0,579	116,0	122,0	74,375	

PRILOG 5

Referentni beton za ispitivanje (prema EN 1766)

Čvrstoća pri pritisku referentnog betona (tabela P5-1) koji se koristi za izradu podloga je sračunata prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

gde su:

- f_c – čvrstoća pri pritisku (MPa)
- F – sila loma (N)
- $A_c = 22500 \text{ mm}^2$ – površina ploča ili pomoćnih ploča, odnosno površina poprečnog preseka uzorka na kojeg deluje sila pritiska (150 mm × 150 mm)

Tabela P5-1. Čvrstoća pri pritisku referentnog betona (kocke ivice 150 mm)











Starost (dani)	Oznaka	m (kg)	F (kN)	f_c (MPa)	$f_{c,sr}$ (MPa)
28	1	7,805	1418,4	63,040	67,948
	2	7,886	1590,4	70,684	
	3	7,830	1577,7	70,120	

Prema standardu SRPS EN 1542 u sistemu beton-lepak-pečat mogući su sledeći vidovi loma:

- A – kohezivni lom u betonskoj podlozi;
- A/Y – athezivni lom po kontaktu betonske podloge i lepka;
- Y – kohezivni lom u lepku;
- Y/Z – athezivni lom po kontaktu lepka i pečata.

Rezultati merenja čvrstoće na zatezanje betonske podloge „pull-off“ metodom prikazani su u tabeli P5-2

Tabela P5-2. Rezultati merenja čvrstoće na zatezanje betonske podloge „pull-off“ metodom

Referentna betonska podloga – uzorak br. 1				Referentna betonska podloga – uzorak br. 2			
Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
Pečat br. 1 	100% po betonu	A	5,18	Pečat br. 1 	100% po betonu	A	6,18
Pečat br. 2 	85% po betonu + 15% po kontaktu pečata i lepka	Y/Z	5,33	Pečat br. 2 	100% po betonu	A	5,51
Pečat br. 3 	100% po betonu	A	6,37	Pečat br. 3 	100% po betonu	A	5,28
Pečat br. 4 	100% po betonu	A	5,38	Pečat br. 4 	100% po betonu	A	6,21
Pečat br. 5 	100% po betonu	A	6,33	Pečat br. 5 	100% po betonu	A	6,19

PRILOG 6

Određivanje zapreminske mase očvrsllog, vodom zasićenog maltera starosti 28 dana

Zapreminska masa očvrsllog, vodom zasićenog maltera je izračunata prema izrazu:

$$\gamma_{m,ws} = \frac{m_{m,ws}}{V_m}$$

gde su:

- $m_{m,ws}$ – masa vodom zasićenog očvrsllog maltera (kg)
- V_m – zapremina uzorka (m³)
- $\gamma_{m,ws}$ – zapreminska masa vodom zasićenog maltera (kg/m³)

I FAZA

Tabela P6-1. Zapreminska masa očvrsljih, vodom zasićenih maltera, w/cm=0,5

Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)
PCa_1	0,57446	2189	
PCa_2	0,57365	2160	2176
PCa_3	0,56927	2178	
NZ10a_1	0,56737	2185	
NZ10a_2	0,58173	2153	2192
NZ10a_3	0,57644	2237	
NZ15a_1	0,57660	2153	
NZ15a_2	0,57008	2129	2153
NZ15a_3	0,56424	2176	
NZ20a_1	0,57417	2174	
NZ20a_2	0,57958	2172	2168
NZ20a_3	0,57035	2157	
FA10a_1	0,57837	2191	
FA10a_2	0,57804	2187	2179
FA10a_3	0,58154	2160	
FA15a_1	0,56208	2189	
FA15a_2	0,56618	2146	2165
FA15a_3	0,56203	2158	
FA20a_1	0,56734	2145	
FA20a_2	0,56556	2135	2137
FA20a_3	0,56494	2132	

Tabela P6-2. Zapreminska masa očvrsljih, vodom zasićenih maltera, $w/cm=0,4$

Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)
PCb_1	0,57693	2223	
PCb_2	0,57789	2168	2192
PCb_3	0,58058	2185	
NZ10b_1	0,57254	2131	
NZ10b_2	0,57255	2171	2170
NZ10b_3	0,57473	2207	
NZ15b_1	0,57083	2191	
NZ15b_2	0,57079	2179	2179
NZ15b_3	0,56695	2168	
NZ20b_1	0,56639	2159	
NZ20b_2	0,57293	2165	2166
NZ20b_3	0,57057	2175	
FA10b_1	0,58133	2219	
FA10b_2	0,57904	2209	2212
FA10b_3	0,58273	2207	
FA15b_1	0,5744	2196	
FA15b_2	0,58429	2226	2213
FA15b_3	0,58156	2217	
FA20b_1	0,58275	2182	
FA20b_2	0,58135	2178	2180
FA20b_3	0,58144	2181	

II FAZA

Tabela P6-3. Zapreminska masa očvrsljih, vodom zasićenih maltera koji sadrže NZ+FA, NZ+Fil i FA+Fil kao SCM, $w/cm=0,5$

Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)
NZFA20a_1	0,56624	2159	
NZFA20a_2	0,56815	2154	2157
NZFA20a_3	0,56519	2160	
NZFil20a_1	0,58531	2103	
NZFil20a_2	0,57128	2101	2097
NZFil20a_3	0,57658	2089	
FAFil20a_1	0,55655	2117	
FAFil20a_2	0,57185	2148	2141
FAFil20a_3	0,57034	2159	

PRILOG 7

Određivanje čvrstoće pri pritisku (prema EN 12190)

Čvrstoća pri pritisku je sračunata prema izrazu:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

gde su:

- R_c – čvrstoća pri pritisku (MPa)
- F_c – sila loma (N)
- $A = 1600 \text{ mm}^2$ – površina ploča ili pomoćnih ploča (40 mm × 40 mm)

I FAZA

A. Malteri spravljani sa $w/cm=0,5$

Tabela P7-1. Čvrstoća pri pritisku maltera PCa

Starost(dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	PCa_1	0,57446	2189		59,5	90,0	46,719	
	PCa_2	0,57365	2160	2176	84,0	86,5	53,281	51,719
	PCa_3	0,56927	2178		87,5	89,0	55,156	
60	PCa_4	0,57425	2122		84,0	94,5	55,781	
	PCa_5	0,57161	2149	2138	88,5	90,0	55,781	55,781
	PCa_6	0,57502	2143		91,0	87,5	55,781	
90	PCa_7	0,57764	2215		90,5	94,0	57,656	
	PCa_8	0,57126	2178	2197	90,0	85,5	54,844	56,146
	PCa_9	0,56991	2197		93,0	86,0	55,938	
180	PCa_10	0,57918	2211		97,5	89,5	58,438	
	PCa_11	0,58311	2224	2197	89,0	95,5	57,656	58,125
	PCa_12	0,57566	2157		96,5	90,0	58,281	

Tabela P7-2. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ10a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZ10a_1	0,56737	2185		90,5	89,0	56,094	
	NZ10a_2	0,58173	2153	2192	88,0	88,0	55,000	55,521
	NZ10a_3	0,57644	2237		89,0	88,5	55,469	
60	NZ10a_4	0,57532	2194		88,0	96,5	57,656	
	NZ10a_5	0,58158	2186	2184	92,5	90,5	57,188	58,333
	NZ10a_6	0,57608	2174		96,0	96,5	60,156	
90	NZ10a_7	0,57594	2137		96,0	98,5	60,781	
	NZ10a_8	0,57470	2152	2142	95,0	105,0	62,500	61,458
	NZ10a_9	0,57590	2137		98,0	97,5	61,094	
180	NZ10a_10	0,58232	2178		99,0	96,5	61,094	
	NZ10a_11	0,58035	2163	2173	98,5	102,5	62,813	62,083
	NZ10a_12	0,57770	2178		102,5	97,0	62,344	

Tabela P7-3. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ15a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZ15a_1	0,57660	2153		89,0	81,5	53,281	
	NZ15a_2	0,57008	2129	2153	80,0	85,5	51,719	53,854
	NZ15a_3	0,56424	2176		91,0	90,0	56,563	
60	NZ15a_4	0,58006	2179		94,5	91,5	58,125	
	NZ15a_5	0,58175	2147	2163	92,0	92,5	57,656	57,708
	NZ15a_6	0,57858	2165		92,5	91,0	57,344	
90	NZ15a_7	0,57303	2182		96,5	98,5	60,938	
	NZ15a_8	0,57317	2121	2148	95,5	92,0	58,594	59,948
	NZ15a_9	0,57460	2142		96,0	97,0	60,313	
180	NZ15a_10	0,57887	2172		99,0	97,0	61,250	
	NZ15a_11	0,57860	2160	2168	98,0	98,5	61,406	61,146
	NZ15a_12	0,57714	2171		96,5	98,0	60,781	

Tabela P7-4. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ20a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZ20a_1	0,57417	2174		80,0	81,0	50,313	
	NZ20a_2	0,57958	2172	2168	75,0	74,5	46,719	48,958
	NZ20a_3	0,57035	2157		76,5	83,0	49,844	
60	NZ20a_4	0,58143	2166		94,0	91,0	57,813	
	NZ20a_5	0,58461	2176	2174	91,5	93,0	57,656	57,135
	NZ20a_6	0,57495	2178		97,5	81,5	55,938	
90	NZ20a_7	0,58606	2206		92,5	95,0	58,594	
	NZ20a_8	0,59171	2172	2187	98,0	93,5	59,844	59,792
	NZ20a_9	0,58540	2184		95,5	99,5	60,938	
180	NZ20a_10	0,57768	2178		99,0	97,0	61,250	
	NZ20a_11	0,58620	2174	2182	97,0	98,5	61,094	60,885
	NZ20a_12	0,58333	2194		95,0	98,0	60,313	

Tabela P7-5. Čvrstoća pri pritisku maltera FA10a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	FA10a_1	0,57837	2191		89,5	87,5	55,313	
	FA10a_2	0,57804	2187	2179	91,0	87,0	55,625	55,365
	FA10a_3	0,58154	2160		88,0	88,5	55,156	
60	FA10a_4	0,57527	2182		97,0	95,5	60,156	
	FA10a_5	0,57492	2161	2179	96,0	94,5	59,531	60,365
	FA10a_6	0,57747	2193		98,5	98,0	61,406	
90	FA10a_7	0,58428	2216		101,0	102,5	63,594	
	FA10a_8	0,57891	2184	2201	101,5	98,5	62,500	63,542
	FA10a_9	0,57355	2202		102,0	104,5	64,531	
180	FA10a_10	0,58189	2207		102,5	109,5	66,250	
	FA10a_11	0,57886	2188	2192	98,0	102,5	62,656	64,844
	FA10a_12	0,58346	2180		98,0	112,0	65,625	

Tabela P7-6. Čvrstoća pri pritisku maltera FA15a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	FA15a_1	0,56208	2189		97,0	94,0	59,688	
	FA15a_2	0,56618	2146	2165	94,0	96,0	59,375	59,479
	FA15a_3	0,56203	2158		98,0	92,0	59,375	
60	FA15a_4	0,56381	2158		109,5	101,0	65,781	
	FA15a_5	0,55801	2123	2135	107,0	82,5	59,219	63,281
	FA15a_6	0,55869	2125		100,5	107,0	64,844	
90	FA15a_7	0,56372	2130		103,5	101,0	63,906	
	FA15a_8	0,56476	2119	2147	105,0	107,0	66,250	65,000
	FA15a_9	0,57047	2191		105,5	102,0	64,844	
180	FA15a_10	0,55608	2111		112,0	111,5	69,844	
	FA15a_11	0,56246	2112	2118	113,0	101,0	66,875	67,708
	FA15a_12	0,56479	2129		103,0	109,5	66,406	

Tabela P7-7. Čvrstoća pri pritisku maltera FA20a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	FA20a_1	0,56734	2145		88,0	89,5	55,469	
	FA20a_2	0,56556	2135	2137	86,5	87,5	54,390	54,328
	FA20a_3	0,56494	2132		85,5	84,5	53,125	
60	FA20a_4	0,55839	2123		92,0	93,5	57,969	
	FA20a_5	0,56170	2128	2135	95,5	93,5	59,063	58,698
	FA20a_6	0,56092	2154		97,0	92,0	59,063	
90	FA20a_7	0,56513	2125		98,0	101,5	62,344	
	FA20a_8	0,56138	2118	2120	106,0	95,0	62,813	60,260
	FA20a_9	0,55850	2118		90,0	88,0	55,625	
180	FA20a_10	0,54895	2100		102,0	103,0	64,063	
	FA20a_11	0,56041	2096	2101	98,0	102,5	62,656	62,396
	FA20a_12	0,56294	2108		97,5	96,0	60,469	

B. Malteri spravljani sa $w/cm=0,4$

Tabela P7-8. Čvrstoća pri pritisku maltera PCb

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	PCb_1	0,57693	2223		119,0	121,0	75,000	
	PCb_2	0,57789	2168	2192	117,5	123,0	75,156	74,740
	PCb_3	0,58058	2185		116,0	121,0	74,063	
60	PCb_4	0,59860	2245		123,0	120,0	75,938	
	PCb_5	0,59277	2239	2233	122,0	115,0	74,063	75,208
	PCb_6	0,59128	2217		122,0	120,0	75,625	
90	PCb_7	0,58497	2225		121,0	125,0	76,875	
	PCb_8	0,58070	2201	2218	124,5	121,5	76,875	76,927
	PCb_9	0,58446	2229		124,5	122,0	77,031	
180	PCb_10	0,58891	2227		124,0	120,5	76,406	
	PCb_11	0,58512	2222	2224	125,5	125,0	78,281	77,448
	PCb_12	0,58735	2222		122,0	126,5	77,656	

Tabela P7-9. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ10b

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZ10b_1	0,57254	2131		109,5	118,0	71,094	
	NZ10b_2	0,57255	2171	2170	114,0	111,5	70,469	70,000
	NZ10b_3	0,57473	2207		108,0	111,0	68,438	
60	NZ10b_4	0,56996	2187		124,0	125,5	77,969	
	NZ10b_5	0,56908	2165	2161	112,5	121,0	72,969	76,875
	NZ10b_6	0,55844	2131		123,0	132,0	79,688	
90	NZ10b_7	0,56813	2163		123,0	120,5	76,094	
	NZ10b_8	0,56442	2188	2180	122,0	126,0	77,500	77,448
	NZ10b_9	0,56914	2190		127,5	124,5	78,750	
180	NZ10b_10	0,57493	2160		127,0	125,5	78,906	
	NZ10b_11	0,56789	2092	2129	126,5	124,0	78,281	78,281
	NZ10b_12	0,56102	2134		120,0	128,5	77,656	

Tabela P7-10. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ15b

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZ15b_1	0,57083	2191		111,5	105,5	67,813	
	NZ15b_2	0,57079	2179	2179	110,5	105,0	67,344	68,490
	NZ15b_3	0,56695	2168		112,0	113,0	70,313	
60	NZ15b_4	0,57617	2174		118,0	117,0	73,438	
	NZ15b_5	0,57069	2160	2166	118,5	116,0	73,281	73,854
	NZ15b_6	0,57018	2165		121,0	118,5	74,844	
90	NZ15b_7	0,57089	2176		119,5	122,5	75,625	
	NZ15b_8	0,56997	2148	2171	123,0	114,5	74,219	74,948
	NZ15b_9	0,57677	2188		121,0	119,0	75,000	
180	NZ15b_10	0,56568	2149		119,5	120,0	74,844	
	NZ15b_11	0,56882	2157	2159	116,5	119,0	73,594	75,260
	NZ15b_12	0,57086	2169		124,0	123,5	77,344	

Tabela P7-11. Čvrstoća pri pritisku maltera NZ20b

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZ20b_1	0,56639	2159		111,0	110,0	69,063	
	NZ20b_2	0,57293	2165	2166	106,5	107,0	66,719	68,073
	NZ20b_3	0,57057	2175		101,5	117,5	68,438	
60	NZ20b_4	0,56180	2128		119,0	117,5	73,906	
	NZ20b_5	0,56125	2140	2137	116,0	118,5	73,281	73,594
	NZ20b_6	0,56165	2142		117,5	118,0	73,594	
90	NZ20b_7	0,56254	2147		122,0	117,0	74,688	
	NZ20b_8	0,56162	2127	2138	121,5	120,5	75,625	74,844
	NZ20b_9	0,56562	2140		118,0	119,5	74,219	
180	NZ20b_10	0,56401	2156		125,0	123,0	77,500	
	NZ20b_11	0,56253	2133	2142	121,0	115,5	73,906	74,948
	NZ20b_12	0,56387	2138		114,5	120,5	73,438	

Tabela P7-12. Čvrstoća pri pritisku maltera FA10b

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	FA10b_1	0,58133	2219		121,0	121,0	75,625	
	FA10b_2	0,57904	2209	2212	122,5	114,0	73,920	74,953
	FA10b_3	0,58273	2207		119,0	122,0	75,313	
60	FA10b_4	0,58761	2250		125,5	130,0	79,844	
	FA10b_5	0,59090	2235	2239	126,5	128,5	79,688	79,792
	FA10b_6	0,59142	2232		129,0	126,5	79,844	
90	FA10b_7	0,58290	2219		132,5	131,0	82,344	
	FA10b_8	0,58067	2213	2215	140,0	126,5	83,281	82,708
	FA10b_9	0,58061	2214		128,5	135,5	82,500	
180	FA10b_10	0,58100	2210		132,0	133,0	82,813	
	FA10b_11	0,57482	2220	2226	128,0	136,0	82,500	83,021
	FA10b_12	0,58888	2247		138,0	130,0	83,750	

Tabela P7-13. Čvrstoća pri pritisku maltera FA15b

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	FA15b_1	0,57440	2196		122,0	119,0	75,313	
	FA15b_2	0,58429	2226	2213	122,0	120,0	75,625	75,729
	FA15b_3	0,58156	2217		118,0	126,0	76,250	
60	FA15b_4	0,57950	2211		131,0	123,0	79,375	
	FA15b_5	0,58165	2209	2207	132,5	135,0	83,594	81,979
	FA15b_6	0,57722	2202		139,0	126,5	82,969	
90	FA15b_7	0,57736	2208		133,0	134,5	83,594	
	FA15b_8	0,57291	2188	2203	136,0	129,5	82,969	83,646
	FA15b_9	0,58763	2214		137,5	132,5	84,375	
180	FA15b_10	0,57253	2234		132,0	137,5	84,219	
	FA15b_11	0,58318	2253	2246	136,5	138,0	85,781	85,156
	FA15b_12	0,58306	2251		140,5	133,0	85,469	

Tabela P7-14. Čvrstoća pri pritisku maltera FA20b

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	FA20b_1	0,58275	2182		117,5	115,0	72,656	
	FA20b_2	0,58135	2178	2180	119,0	111,5	72,031	72,448
	FA20b_3	0,58144	2181		114,0	118,5	72,656	
60	FA20b_4	0,57880	2213		126,0	126,5	78,906	
	FA20b_5	0,57910	2220	2221	122,5	124,0	77,031	77,917
	FA20b_6	0,58028	2230		126,5	122,5	77,813	
90	FA20b_7	0,57258	2205		132,0	131,5	82,344	
	FA20b_8	0,56854	2203	2206	127,0	123,5	78,281	79,427
	FA20b_9	0,56252	2210		126,5	122,0	77,656	
180	FA20b_10	0,57309	2197		134,5	128,5	82,188	
	FA20b_11	0,57899	2184	2192	127,0	132,5	81,094	81,875
	FA20b_12	0,57485	2196		130,5	133,0	82,344	

II FAZA

Tabela P7-15. Čvrstoća pri pritisku maltera NZFA20a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZFA20a_1	0,56624	2159		87,0	86,5	54,219	
	NZFA20a_2	0,56815	2154	2157	85,0	87,5	53,906	53,958
	NZFA20a_3	0,56519	2160		87,0	85,0	53,750	
60	NZFA20a_4	0,56838	2137		82,0	99,0	56,563	
	NZFA20a_5	0,57167	2104	2119	100,0	88,0	58,750	58,594
	NZFA20a_6	0,56761	2117		97,0	96,5	60,469	
90	NZFA20a_7	0,56426	2115		97,0	98,0	60,938	
	NZFA20a_8	0,58067	2117	2125	95,5	99,0	60,781	60,938
	NZFA20a_9	0,56856	2144		101,0	94,5	61,094	
180	NZFA20a_10	0,56137	2175		105,0	102,0	64,688	
	NZFA20a_11	0,56533	2159	2161	103,5	101,0	63,906	64,115
	NZFA20a_12	0,56565	2148		104,0	100,0	63,750	

Tabela P7-16. Čvrstoća pri pritisku maltera NZFil20a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	NZFil20a_1	0,58531	2103		87,0	88,0	54,688	
	NZFil20a_2	0,57128	2101	2097	83,5	82,5	51,875	52,240
	NZFil20a_3	0,57658	2089		82,0	78,5	50,156	
60	NZFil20a_4	0,57093	2154		92,5	93,0	57,969	
	NZFil20a_5	0,58207	2143	2154	85,0	91,0	55,000	57,292
	NZFil20a_6	0,57187	2165		94,5	94,0	58,906	
90	NZFil20a_7	0,57393	2148		95,0	92,0	58,438	
	NZFil20a_8	0,57042	2151	2151	89,0	93,0	56,875	58,438
	NZFil20a_9	0,56342	2156		96,0	96,0	60,000	
180	NZFil20a_10	0,57075	2150		96,0	97,5	60,469	
	NZFil20a_11	0,57488	2140	2146	98,0	94,0	60,000	60,729
	NZFil20a_12	0,56905	2146		100,0	97,5	61,719	

Tabela P7-17. Čvrstoća pri pritisku maltera FAFil20a

Starost (dani)	Oznaka maltera	$m_{m,ws}$ (kg)	$\gamma_{m,ws}$ (kg/m ³)	$\gamma_{m,ws,sr}$ (kg/m ³)	F_c (kN)		R_c (MPa)	$R_{c,sr}$ (MPa)
28	FAFil20a_1	0,55655	2117		85,0	85,5	53,281	
	FAFil20a_2	0,57185	2148	2141	83,0	87,5	53,281	53,698
	FAFil20a_3	0,57034	2159		85,0	89,5	54,531	
60	FAFil20a_4	0,58129	2122		84,5	96,5	56,563	
	FAFil20a_5	0,57491	2129	2130	104,5	81,5	58,125	58,229
	FAFil20a_6	0,58410	2140		106,0	86,0	60,000	
90	FAFil20a_7	0,58141	2148		98,0	99,0	61,563	
	FAFil20a_8	0,58079	2160	2161	103,0	95,0	61,875	61,510
	FAFil20a_9	0,58063	2176		101,5	94,0	61,094	
180	FAFil20a_10	0,58246	2135		103,0	101,0	63,750	
	FAFil20a_11	0,57581	2121	2123	101,0	101,0	63,125	63,281
	FAFil20a_12	0,56566	2113		99,5	102,0	62,969	

PRILOG 8

Određivanje kapilarnog upijanja vode (EN 13057:2002)

I FAZA

Tabela P8-1. Dimenzije uzoraka PCa, NZ10a, NZ15a, NZ20a, FA10a, FA15a i FA20a starih 28 dana za određivanje kapilarnog upijanja vode i njihova kontaktna površina

Oznaka maltera	Dimenzije uzorka				Površina uzorka koja je u kontaktu sa vodom (m ²)
	Ø ₁ (mm)	Ø ₂ (mm)	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	
M-PCa_1	98,74	99,04	23,72	23,46	0,007680591
M-PCa_2	98,93	98,62	24,67	23,59	0,007662738
M-PCa_3	98,88	98,68	23,72	23,62	0,007663513
M-NZ10a_1	98,82	98,70	25,47	24,13	0,007660411
M-NZ10a_2	98,61	98,81	25,01	25,30	0,007652656
M-NZ10a_3	98,57	98,77	24,68	24,76	0,007646455
M-NZ15a_1	98,74	98,67	24,75	24,99	0,007651881
M-NZ15a_2	98,80	98,42	24,74	25,16	0,007637158
M-NZ15a_3	98,66	98,70	25,66	25,41	0,007648005
M-NZ20a_1	98,76	98,60	25,17	25,27	0,007648005
M-NZ20a_2	98,84	98,72	24,64	25,14	0,007663513
M-NZ20a_3	98,60	98,84	25,43	25,40	0,007654207
M-FA10a_1	98,74	98,68	25,19	25,49	0,007652656
M-FA10a_2	98,53	98,83	25,38	24,38	0,007648005
M-FA10a_3	98,88	98,71	25,21	24,75	0,007665841
M-FA15a_1	98,61	98,63	25,54	24,69	0,007638707
M-FA15a_2	98,68	98,42	25,70	24,89	0,007627867
M-FA15a_3	98,65	98,53	25,62	24,79	0,007633286
M-FA20a_1	98,70	98,77	25,41	25,04	0,007656533
M-FA20a_2	98,55	98,66	24,76	25,29	0,007636384
M-FA20a_3	98,75	98,70	24,69	24,50	0,007654982

Tabela P8-2. Dimenzije uzoraka PCb, NZ10b, NZ15b, NZ20b, FA10b, FA15b i FA20b starih 28 dana za određivanje kapilarnog upijanja vode i njihova kontaktna površina

Oznaka maltera	Dimenzije uzorka				Površina uzorka koja je u kontaktu sa vodom (m ²)
	Ø ₁ (mm)	Ø ₂ (mm)	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	
M-PCb_1	98,72	98,76	24,82	24,23	0,007657308
M-PCb_2	98,41	98,88	24,84	24,85	0,007642581
M-PCb_3	98,83	98,66	24,74	24,32	0,007658084
M-NZ10b_1	98,62	98,33	25,70	26,05	0,007616262
M-NZ10b_2	98,57	98,66	26,32	25,66	0,007637933
M-NZ10b_3	98,82	98,57	25,55	25,58	0,007650330
M-NZ15b_1	98,73	98,65	25,45	25,57	0,007649555
M-NZ15b_2	98,62	98,85	25,18	25,97	0,007656533
M-NZ15b_3	98,26	98,90	25,16	25,32	0,007632512
M-NZ20b_1	98,69	98,79	25,43	25,13	0,007657308
M-NZ20b_2	98,85	98,61	25,44	25,71	0,007655757
M-NZ20b_3	98,69	98,65	25,06	25,15	0,007646455
M-FA10b_1	98,68	99,01	24,02	23,60	0,007673602
M-FA10b_2	98,70	98,71	24,48	23,69	0,007651881
M-FA10b_3	98,81	98,57	23,82	23,73	0,007649555
M-FA15b_1	98,63	98,90	24,24	24,33	0,007661186
M-FA15b_2	98,67	98,79	24,04	24,11	0,007655757
M-FA15b_3	98,63	98,90	24,21	24,06	0,007661186
M-FA20b_1	99,00	98,80	24,26	24,01	0,007682144
M-FA20b_2	98,60	98,96	24,68	24,04	0,007663513
M-FA20b_3	98,65	98,67	24,47	24,50	0,007644905

A. Uzorci stari 28 dana

A.1. Malteri spravljeni sa w/cm=0,5

Tabela P8-3. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka PCa, NZ10a, NZ15a, NZ20a, FA10a, FA15a i FA20a starih 28 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Oznaka maltera	Visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)								h _{sr} (mm)
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	
PCa_1	12,34	12,54	13,07	12,52	12,73	12,26	13,56	12,69	
PCa_2	11,96	12,57	14,02	12,85	12,41	12,01	13,01	11,30	12,56
PCa_3	12,49	12,71	13,04	11,79	12,44	11,75	13,03	12,28	
NZ10a_1	11,78	10,68	10,52	10,34	9,40	8,72	8,90	11,14	
NZ10a_2	9,33	10,07	10,54	11,41	10,19	10,41	10,24	9,86	10,08
NZ10a_3	9,64	9,76	11,03	10,59	10,08	8,58	9,40	9,24	
NZ15a_1	9,16	8,46	9,20	11,41	9,88	9,02	10,09	9,90	
NZ15a_2	9,38	8,96	9,72	10,86	10,50	9,46	8,57	9,76	9,44
NZ15a_3	7,86	8,94	9,26	9,20	9,61	8,98	9,63	8,85	
NZ20a_1	7,79	7,50	8,28	8,62	9,38	7,30	9,42	8,85	
NZ20a_2	8,70	7,47	8,55	10,28	8,08	8,45	8,71	9,05	7,69
NZ20a_3	6,54	7,05	6,17	5,92	5,58	5,15	6,54	5,29	
FA10a_1	10,92	9,30	10,75	10,72	11,41	11,40	11,22	10,62	
FA10a_2	12,24	11,01	10,77	11,45	10,88	10,87	10,86	11,59	11,17
FA10a_3	10,88	12,08	11,26	10,53	11,77	12,12	11,74	11,73	
FA15a_1	11,32	11,02	9,74	10,87	10,19	10,10	10,08	11,77	
FA15a_2	11,40	11,07	12,21	12,99	11,58	10,86	11,64	12,52	11,21
FA15a_3	11,36	11,05	10,98	11,93	10,89	10,48	10,86	12,15	
FA20a_1	10,82	10,91	10,90	10,48	10,46	10,45	9,42	10,42	
FA20a_2	10,55	9,81	9,45	9,10	10,06	10,20	10,80	10,60	10,32
FA20a_3	9,45	10,86	11,44	10,26	10,29	10,28	11,04	9,54	

Tabela P8-4. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCa starog 28 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
PCa_1	377,10	382,27	383,41	384,44	385,40	386,55	392,12	5,17	6,31	7,34	8,30	9,45	15,02
PCa_2	382,18	387,37	388,48	389,37	390,48	391,63	396,80	5,19	6,30	7,19	8,30	9,45	14,62
PCa_3	377,28	382,34	383,51	384,54	385,64	386,91	392,36	5,06	6,23	7,26	8,36	9,63	15,08

Tabela P8-5. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10a, NZ15a i NZ20a starih 28 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZ10a_1	390,12	395,32	396,31	397,19	397,98	398,81	402,51	5,20	6,19	7,07	7,86	8,69	12,39
NZ10a_2	388,80	394,05	395,02	395,88	396,82	397,71	401,90	5,25	6,22	7,08	8,02	8,91	13,10
NZ10a_3	389,12	393,63	394,72	395,65	396,61	397,55	401,76	4,51	5,60	6,53	7,49	8,43	12,64
NZ15a_1	387,82	391,50	392,44	393,19	394,02	394,84	398,20	3,68	4,62	5,37	6,20	7,02	10,38
NZ15a_2	388,48	392,22	393,21	394,10	394,78	395,59	399,06	3,74	4,73	5,62	6,30	7,11	10,58
NZ15a_3	394,76	398,54	399,54	400,28	401,15	401,87	405,38	3,78	4,78	5,52	6,39	7,11	10,62
NZ20a_1	389,93	393,32	394,23	394,90	395,68	396,37	399,34	3,39	4,30	4,97	5,75	6,44	9,41
NZ20a_2	388,18	391,59	392,50	393,27	394,02	394,76	397,81	3,41	4,32	5,09	5,84	6,58	9,63
NZ20a_3	388,82	392,16	393,08	393,88	394,65	395,39	398,50	3,34	4,26	5,06	5,83	6,57	9,68

Tabela P8-6. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10a, FA15a i FA20a starih 28 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)							Masa upijene vode (g)						
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h	
FA10a_1	392,08	396,41	397,39	398,24	399,06	399,88	402,44	4,33	5,31	6,16	6,98	7,80	10,36	
FA10a_2	390,95	395,40	396,44	397,31	398,17	399,07	401,84	4,45	5,49	6,36	7,22	8,12	10,89	
FA10a_3	390,48	394,71	395,76	396,69	397,59	398,56	401,42	4,23	5,28	6,21	7,11	8,08	10,94	
FA15a_1	391,99	396,50	397,27	397,99	398,67	399,39	401,47	4,51	5,28	6,00	6,68	7,40	9,48	
FA15a_2	390,89	396,25	396,96	397,69	398,24	398,93	400,95	5,36	6,07	6,80	7,35	8,04	10,06	
FA15a_3	391,44	396,38	397,12	397,84	398,46	399,16	401,21	4,94	5,68	6,40	7,02	7,72	9,77	
FA20a_1	390,95	395,70	396,41	397,04	397,61	398,20	399,99	4,75	5,46	6,09	6,66	7,25	9,04	
FA20a_2	391,27	396,15	396,84	397,51	398,10	398,60	400,45	4,88	5,57	6,24	6,83	7,33	9,18	
FA20a_3	391,89	396,79	397,52	398,14	398,82	399,44	401,43	4,90	5,63	6,25	6,93	7,55	9,54	

A.2. Malteri spravljeni sa $w/cm=0,4$

Tabela P8-7. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzorka PCb, NZ10b, NZ15b, NZ20b, FA10b, FA15b i FA20b starih 28 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Oznaka maltera	Visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)								h_{sr} (mm)
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	
PCb_1	8,05	9,09	8,79	8,53	7,64	8,20	8,42	8,23	
PCb_2	8,48	8,43	9,10	10,01	9,70	7,33	9,01	8,22	8,70
PCb_3	8,17	8,25	9,26	10,41	9,81	9,26	8,20	8,23	
NZ10b_1	9,59	10,02	11,13	12,60	10,21	9,92	10,85	10,13	
NZ10b_2	9,00	9,01	10,05	12,01	11,49	10,66	9,42	8,31	10,48
NZ10b_3	10,54	10,45	12,10	11,15	10,94	10,53	10,50	10,91	
NZ15b_1	8,72	9,16	8,46	8,71	8,34	8,66	9,11	8,62	
NZ15b_2	8,17	11,30	9,03	10,07	9,66	9,64	9,38	8,78	9,22
NZ15b_3	9,04	10,22	10,28	10,68	9,71	7,99	8,70	8,76	
NZ20b_1	9,08	9,75	8,39	8,67	7,50	8,19	8,32	7,36	
NZ20b_2	8,30	7,99	10,13	8,27	8,96	9,20	10,75	8,51	8,70
NZ20b_3	8,97	8,69	7,38	8,53	7,97	8,50	9,49	9,92	
FA10b_1	9,49	8,30	8,73	10,24	10,86	11,34	9,68	10,39	
FA10b_2	8,90	8,12	9,02	10,28	10,90	14,02	11,11	10,01	9,98
FA10b_3	9,04	8,94	9,32	9,93	10,32	11,11	10,39	9,19	
FA15b_1	9,36	8,34	9,52	10,73	9,92	9,02	10,15	10,10	
FA15b_2	9,03	8,53	6,54	8,61	9,68	11,46	10,83	10,66	9,71
FA15b_3	10,25	9,69	8,75	9,75	10,5	10,51	11,11	10,04	
FA20b_1	8,92	7,82	8,28	9,29	9,75	11,36	9,29	9,84	
FA20b_2	8,47	7,91	8,92	8,25	8,63	10,00	10,10	9,16	9,12
FA20b_3	8,95	8,11	8,22	9,73	9,96	10,51	9,32	8,18	

Tabela P8-8. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCb starog 28 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
PCb_1	396,00	398,66	399,07	399,51	399,94	400,49	402,23	2,66	3,07	3,51	3,94	4,49	6,23
PCb_2	397,59	400,13	400,62	401,02	401,43	402,00	403,90	2,54	3,03	3,43	3,84	4,41	6,31
PCb_3	396,45	399,32	399,74	400,12	400,56	401,13	402,96	2,87	3,29	3,67	4,11	4,68	6,51

Tabela P8-9. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10b, NZ15b i NZ20b starih 28 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZ10b_1	396,59	399,06	399,48	399,91	400,48	401,15	403,33	2,47	2,89	3,32	3,89	4,56	6,74
NZ10b_2	395,91	398,35	398,98	399,40	400,05	400,75	403,00	2,44	3,07	3,49	4,14	4,84	7,09
NZ10b_3	395,48	397,77	398,39	398,91	399,53	400,26	402,51	2,29	2,91	3,43	4,05	4,78	7,03
NZ15b_1	396,84	399,02	399,51	399,86	400,40	400,93	402,57	2,18	2,67	3,02	3,56	4,09	5,73
NZ15b_2	396,26	398,55	399,03	399,45	399,97	400,50	402,12	2,29	2,77	3,19	3,71	4,24	5,86
NZ15b_3	397,63	399,69	400,19	400,57	401,11	401,70	403,32	2,06	2,56	2,94	3,48	4,07	5,69
NZ20b_1	397,96	399,80	400,30	400,68	401,18	401,69	403,16	1,84	2,34	2,72	3,22	3,73	5,20
NZ20b_2	398,06	400,03	400,49	400,82	401,34	401,84	403,33	1,97	2,43	2,76	3,28	3,78	5,27
NZ20b_3	398,76	400,67	401,17	401,52	402,03	402,56	404,12	1,91	2,41	2,76	3,27	3,81	5,36

Tabela P8-10. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10b, FA15b i FA20b starih 28 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
FA10b_1	399,05	402,17	402,63	402,91	403,14	403,63	404,94	3,12	3,58	3,86	4,09	4,58	5,89
FA10b_2	399,29	403,12	403,68	403,98	404,29	404,79	406,29	3,83	4,39	4,69	5,00	5,50	7,00
FA10b_3	398,14	402,65	403,16	403,54	403,85	404,33	405,89	4,51	5,02	5,40	5,71	6,19	7,75
FA15b_1	399,73	403,34	403,83	404,11	404,41	404,90	406,28	3,61	4,10	4,38	4,68	5,17	6,55
FA15b_2	399,50	403,18	403,61	403,90	404,16	404,67	405,99	3,68	4,11	4,40	4,66	5,17	6,49
FA15b_3	399,47	402,84	403,28	403,67	403,97	404,47	405,95	3,37	3,81	4,20	4,50	5,00	6,48
FA20b_1	398,81	402,04	402,43	402,78	403,01	403,47	404,79	3,23	3,62	3,97	4,20	4,66	5,98
FA20b_2	399,31	402,33	402,75	403,06	403,37	403,79	405,24	3,02	3,44	3,75	4,06	4,48	5,93
FA20b_3	400,61	403,82	404,24	404,51	404,82	405,27	406,46	3,21	3,63	3,90	4,21	4,66	5,85

B. Uzorci stari 90 dana

B.1. Malteri spravljeni sa $w/cm=0,5$

Tabela P8-11. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka PCa, NZ10a, NZ15a, NZ20a, FA10a, FA15a i FA20a starih 90 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Oznaka maltera	Visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)								h_{sr} (mm)
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	
PCa_1	9,92	9,92	9,23	9,96	9,54	9,72	9,99	9,68	
PCa_2	8,67	10,15	9,12	10,39	9,02	8,58	9,92	9,93	9,51
PCa_3	8,33	9,40	9,76	8,16	9,54	9,24	9,98	10,15	
NZ10a_1	8,46	8,00	7,40	8,60	6,49	7,49	7,70	8,83	
NZ10a_2	7,66	9,83	8,22	7,60	7,74	8,39	8,31	8,32	8,47
NZ10a_3	11,47	9,51	9,29	8,65	8,68	7,85	8,82	10,07	
NZ15a_1	8,45	6,87	6,52	7,11	7,46	7,03	6,90	8,96	
NZ15a_2	7,04	6,66	6,69	6,41	6,68	7,51	7,80	9,30	7,28
NZ15a_3	7,75	7,65	7,60	7,39	7,21	5,52	6,85	7,39	
NZ20a_1	6,25	6,84	7,04	6,70	6,31	8,76	6,55	7,86	
NZ20a_2	6,77	8,39	7,64	6,66	6,41	5,78	5,48	7,13	6,58
NZ20a_3	5,64	6,32	6,03	6,75	5,13	5,43	6,68	5,32	
FA10a_1	8,01	6,82	4,17	7,05	6,18	7,47	7,39	6,26	
FA10a_2	6,75	7,03	5,29	6,58	5,92	4,99	6,43	6,16	6,61
FA10a_3	7,07	7,37	7,38	6,50	6,64	8,19	7,05	5,96	
FA15a_1	7,99	10,21	8,19	7,93	5,75	5,93	5,63	6,25	
FA15a_2	5,18	5,29	6,11	9,68	5,63	5,22	6,52	6,48	6,75
FA15a_3	6,59	7,75	7,15	8,81	5,69	5,58	6,08	6,37	
FA20a_1	7,25	8,63	8,27	7,30	6,28	5,98	7,53	6,57	
FA20a_2	6,89	6,61	7,14	10,20	5,07	8,56	7,13	7,62	7,23
FA20a_3	9,73	10,30	6,97	4,87	6,33	4,95	5,30	8,09	

Tabela P8-12. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCa starog 90 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
PCa_1	378,22	382,17	383,56	384,33	386,18	387,75	392,62	3,95	5,34	6,11	7,96	9,53	14,40
PCa_2	383,28	387,17	388,55	389,86	391,07	392,62	397,61	3,89	5,27	6,58	7,79	9,34	14,33
PCa_3	378,22	381,97	383,45	384,87	386,21	387,87	392,55	3,75	5,23	6,65	7,99	9,65	14,33

Tabela P8-13. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10a, NZ15a i NZ20a starih 90 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZ10a_1	392,5	396,01	397,11	398,04	398,89	399,90	403,29	3,51	4,61	5,54	6,39	7,40	10,79
NZ10a_2	392,12	394,91	395,96	396,93	397,88	399,01	402,94	2,79	3,84	4,81	5,76	6,89	10,82
NZ10a_3	391,46	394,48	395,65	396,71	397,73	398,92	402,89	3,02	4,19	5,25	6,27	7,46	11,43
NZ15a_1	390,65	392,93	393,73	394,44	395,14	395,98	398,89	2,28	3,08	3,79	4,49	5,33	8,24
NZ15a_2	391,22	393,59	394,38	395,14	395,88	396,71	399,78	2,37	3,16	3,92	4,66	5,49	8,56
NZ15a_3	397,55	399,95	400,76	401,44	402,19	403,03	406,13	2,40	3,21	3,89	4,64	5,48	8,58
NZ20a_1	393,00	395,17	395,80	396,43	397,05	397,73	400,50	2,17	2,80	3,43	4,05	4,73	7,50
NZ20a_2	391,33	393,48	394,14	394,74	395,34	396,05	398,82	2,15	2,81	3,41	4,01	4,72	7,49
NZ20a_3	391,78	393,95	394,66	395,23	395,93	396,71	399,62	2,17	2,88	3,45	4,15	4,93	7,84

Tabela P8-14. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10a, FA15a i FA20a starih 90 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)							Masa upijene vode (g)						
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h	
FA10a_1	399,10	400,17	400,57	400,91	401,43	401,99	404,18	1,07	1,47	1,81	2,33	2,89	5,08	
FA10a_2	398,22	399,26	399,67	400,09	400,64	401,28	403,52	1,04	1,45	1,87	2,42	3,06	5,30	
FA10a_3	397,88	398,76	399,16	399,54	400,03	400,75	403,01	0,88	1,28	1,66	2,15	2,87	5,13	
FA15a_1	399,45	400,42	400,60	400,81	401,09	401,61	403,47	0,97	1,15	1,36	1,64	2,16	4,02	
FA15a_2	398,75	399,74	400,01	400,24	400,51	401,00	402,74	0,99	1,26	1,49	1,76	2,25	3,99	
FA15a_3	399,10	400,08	400,31	400,53	400,80	401,31	403,11	0,98	1,21	1,43	1,70	2,21	4,01	
FA20a_1	398,72	399,68	399,75	399,99	400,17	400,67	402,33	0,96	1,03	1,27	1,45	1,95	3,61	
FA20a_2	399,25	400,05	400,20	400,50	400,71	401,29	403,02	0,80	0,95	1,25	1,46	2,04	3,77	
FA20a_3	400,22	400,99	401,11	401,39	401,57	402,08	403,73	0,77	0,89	1,17	1,35	1,86	3,51	

B.2. Malteri spravljani sa $w/cm=0,4$

Tabela P8-15. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzorka PCb, NZ10b, NZ15b, NZ20b, FA10b, FA15b i FA20b starih 90 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Oznaka maltera	Visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)								h_{sr} (mm)
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	
PCb_1	8,05	9,09	8,79	8,53	7,64	8,20	8,42	8,23	
PCb_2	8,48	8,43	9,10	10,01	9,70	7,33	9,01	8,22	8,70
PCb_3	8,17	8,25	9,26	10,41	9,81	9,26	8,20	8,23	
NZ10b_1	9,59	10,02	11,13	12,60	10,21	9,92	10,85	10,13	
NZ10b_2	9,00	9,01	10,05	12,01	11,49	10,66	9,42	8,31	10,48
NZ10b_3	10,54	10,45	12,10	11,15	10,94	10,53	10,50	10,91	
NZ15b_1	8,72	9,16	8,46	8,71	8,34	8,66	9,11	8,62	
NZ15b_2	8,17	11,30	9,03	10,07	9,66	9,64	9,38	8,78	9,22
NZ15b_3	9,04	10,22	10,28	10,68	9,71	7,99	8,70	8,76	
NZ20b_1	9,08	9,75	8,39	8,67	7,50	8,19	8,32	7,36	
NZ20b_2	8,30	7,99	10,13	8,27	8,96	9,20	10,75	8,51	8,70
NZ20b_3	8,97	8,69	7,38	8,53	7,97	8,50	9,49	9,92	
FA10b_1	9,49	8,30	8,73	10,24	10,86	11,34	9,68	10,39	
FA10b_2	8,90	8,12	9,02	10,28	10,90	14,02	11,11	10,01	9,98
FA10b_3	9,04	8,94	9,32	9,93	10,32	11,11	10,39	9,19	
FA15b_1	9,36	8,34	9,52	10,73	9,92	9,02	10,15	10,10	
FA15b_2	9,03	8,53	6,54	8,61	9,68	11,46	10,83	10,66	9,71
FA15b_3	10,25	9,69	8,75	9,75	10,5	10,51	11,11	10,04	
FA20b_1	8,92	7,82	8,28	9,29	9,75	11,36	9,29	9,84	
FA20b_2	8,47	7,91	8,92	8,25	8,63	10,00	10,10	9,16	9,12
FA20b_3	8,95	8,11	8,22	9,73	9,96	10,51	9,32	8,18	

Tabela P8-16. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera PCb starog 90 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
PCb_1	397,84	399,27	400,01	400,57	401,28	401,76	403,87	1,43	2,17	2,73	3,44	3,92	6,03
PCb_2	399,36	400,61	401,32	401,91	402,69	403,16	405,36	1,25	1,96	2,55	3,33	3,80	6,00
PCb_3	398,55	399,88	400,64	401,23	402,02	402,50	404,70	1,33	2,09	2,68	3,47	3,95	6,15

Tabela P8-17. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZ10b, NZ15b i NZ20b starih 90 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZ10b_1	398,07	399,58	400,20	400,73	401,39	401,72	404,39	1,51	2,13	2,66	3,32	3,65	6,32
NZ10b_2	397,23	398,90	399,57	400,14	400,95	401,40	404,53	1,67	2,34	2,91	3,72	4,17	7,30
NZ10b_3	397,22	398,34	398,94	399,45	400,30	400,82	404,04	1,12	1,72	2,23	3,08	3,6	6,82
NZ15b_1	398,80	400,08	400,50	400,83	401,26	401,58	403,75	1,28	1,70	2,03	2,46	2,78	4,95
NZ15b_2	398,14	399,44	399,93	400,30	400,75	401,09	403,21	1,30	1,79	2,16	2,61	2,95	5,07
NZ15b_3	399,56	400,59	401,06	401,41	401,88	402,19	404,29	1,03	1,50	1,85	2,32	2,63	4,73
NZ20b_1	399,75	401,05	401,50	401,84	402,28	402,62	404,73	1,30	1,75	2,09	2,53	2,87	4,98
NZ20b_2	399,80	401,06	401,44	401,90	402,34	402,71	404,73	1,26	1,64	2,10	2,54	2,91	4,93
NZ20b_3	400,64	401,82	402,26	402,70	403,28	403,57	406,25	1,18	1,62	2,06	2,64	2,93	5,61

Tabela P8-18. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera FA10b, FA15b i FA20b starih 90 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)							Masa upijene vode (g)						
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h	
FA10b_1	403,12	403,78	404,02	404,39	404,61	404,89	406,06	0,66	0,90	1,27	1,49	1,77	2,94	
FA10b_2	404,38	404,94	405,18	405,53	405,75	406,04	407,45	0,56	0,80	1,15	1,37	1,66	3,07	
FA10b_3	404,26	404,77	404,97	405,18	405,52	405,80	407,42	0,51	0,71	0,92	1,26	1,54	3,16	
FA15b_1	404,88	405,53	405,66	405,87	406,13	406,34	407,71	0,65	0,78	0,99	1,25	1,46	2,83	
FA15b_2	404,87	405,45	405,58	405,71	405,99	406,17	407,54	0,58	0,71	0,84	1,12	1,30	2,67	
FA15b_3	404,67	405,24	405,29	405,43	405,70	405,86	407,29	0,57	0,62	0,76	1,03	1,19	2,62	
FA20b_1	403,85	404,41	404,57	404,70	404,87	405,04	406,28	0,56	0,72	0,85	1,02	1,19	2,43	
FA20b_2	404,43	404,86	405,04	405,13	405,28	405,49	406,79	0,43	0,61	0,70	0,85	1,06	2,36	
FA20b_3	406,01	406,46	406,56	406,70	406,85	406,99	408,22	0,45	0,55	0,69	0,84	0,98	2,21	

II FAZA

Tabela P8-19. Dimenzije uzoraka NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a za određivanje kapilarnog upijanja vode i njihova kontaktna površina

Oznaka maltera	Dimenzije uzorka				Površina uzorka koja je u kontaktu sa vodom (m ²)
	Ø ₁ (mm)	Ø ₂ (mm)	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	
M-NZFA20a_1	98,61	98,87	25,31	25,57	0,007657308
M-NZFA20a_2	98,87	98,82	25,63	25,01	0,007673602
M-NZFA20a_3	98,90	98,72	25,63	25,45	0,007668169
M-NZFil20a_1	98,80	98,59	24,82	25,35	0,007650330
M-NZFil20a_2	98,94	98,64	25,31	25,13	0,007665065
M-NZFil20a_3	98,73	98,74	25,24	25,86	0,007656533
M-FAFil20a_1	98,85	98,89	25,22	24,94	0,007677485
M-FAFil20a_2	98,56	98,72	25,80	25,51	0,007641806
M-FAFil20a_3	98,71	98,68	24,43	24,94	0,007650330

A. Uzorci stari 28 dana

Tabela P8-20. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzoraka NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 28 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Oznaka maltera	Visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)								h _{sr} (mm)
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	
NZFA20a_1	7,23	8,87	10,31	7,28	7,48	5,27	8,09	8,04	
NZFA20a_2	8,50	9,23	8,61	9,42	9,10	9,51	8,80	8,20	8,48
NZFA20a_3	9,13	8,95	8,63	8,6	8,51	8,67	8,73	8,47	
NZFil20a_1	9,47	9,19	10,16	8,53	9,11	9,67	9,22	9,34	
NZFil20a_2	5,73	7,70	6,35	5,64	5,13	5,73	8,01	8,35	7,26
NZFil20a_3	4,48	5,99	4,74	7,40	5,73	4,53	6,98	7,17	
FAFil20a_1	8,67	9,61	8,45	9,04	9,07	7,68	8,45	8,90	
FAFil20a_2	9,07	8,51	7,87	8,73	7,77	8,15	8,82	9,30	8,95
FAFil20a_3	10,14	9,03	9,46	10,38	10,12	8,63	9,84	9,14	

Tabela P8-21. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 28 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZFA20a_1	392,74	396,75	397,61	398,32	398,96	399,88	402,26	4,01	4,87	5,58	6,22	7,14	9,52
NZFA20a_2	391,86	395,91	396,72	397,30	397,88	398,78	401,17	4,05	4,86	5,44	6,02	6,92	9,31
NZFA20a_3	391,26	395,20	396,00	396,62	397,27	398,13	400,55	3,94	4,74	5,36	6,01	6,87	9,29
NZFil20a_1	393,50	397,92	398,74	399,30	400,03	400,82	403,28	4,42	5,24	5,80	6,53	7,32	9,78
NZFil20a_2	394,44	398,66	399,46	400,05	400,75	401,51	403,92	4,22	5,02	5,61	6,31	7,07	9,48
NZFil20a_3	394,37	398,84	399,68	400,28	400,97	401,86	404,22	4,47	5,31	5,91	6,60	7,49	9,85
FAFil20a_1	396,46	400,69	401,24	401,72	402,21	402,78	404,38	4,23	4,78	5,26	5,75	6,32	7,92
FAFil20a_2	398,59	402,74	403,38	403,86	404,38	404,97	406,63	4,15	4,79	5,27	5,79	6,38	8,04
FAFil20a_3	394,35	399,03	399,56	400,06	400,54	401,07	402,78	4,68	5,21	5,71	6,19	6,72	8,43

B. Uzorci stari 90 dana

Tabela P8-22. Podaci o visini dizanja vode po omotaču uzorka NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 90 dana nakon 2h izlaganja kapilarnom upijanju vode

Oznaka maltera	Visina dizanja vode po omotaču uzorka nakon 2h (mm)								h _{sr} (mm)
	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h ₇	h ₈	
NZFA20a_1	12,08	9,44	11,64	9,27	9,10	9,44	8,31	9,56	
NZFA20a_2	11,08	9,84	8,35	7,79	8,01	5,50	6,04	6,39	8,61
NZFA20a_3	6,65	10,25	7,56	9,23	10,08	5,47	8,59	6,85	
NZFil20a_1	9,16	8,24	7,72	9,02	9,83	10,20	9,77	9,63	
NZFil20a_2	8,44	7,99	9,32	8,72	9,12	9,30	9,35	8,22	9,06
NZFil20a_3	9,65	9,94	9,15	8,45	8,63	9,49	9,09	9,04	
FAFil20a_1	8,63	8,89	8,34	8,65	7,91	8,38	8,15	8,30	
FAFil20a_2	8,59	8,30	8,05	7,48	6,98	7,57	8,32	7,98	8,36
FAFil20a_3	9,48	9,36	9,51	8,46	8,01	8,25	8,17	8,85	

Tabela P8-23. Podaci o kapilarnom upijanju vode maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a starih 90 dana

Oznaka maltera	Masa uzorka (g)				Masa upijene vode (g)								
	0'	12'	30'	1h	2h	4h	24h	12'	30'	1h	2h	4h	24h
NZFA20a_1	394,81	398,34	399,11	399,68	400,33	401,23	403,97	3,53	4,30	4,87	5,52	6,42	9,16
NZFA20a_2	393,97	397,37	398,07	398,65	399,25	400,13	402,97	3,40	4,10	4,68	5,28	6,16	9,00
NZFA20a_3	393,37	396,87	397,61	398,24	398,91	400,98	403,08	3,50	4,24	4,87	5,54	7,61	9,71
NZFil20a_1	394,73	398,65	399,46	400,07	400,69	401,41	403,78	3,92	4,73	5,34	5,96	6,68	9,05
NZFil20a_2	395,70	399,52	400,36	400,97	401,60	402,28	404,51	3,82	4,66	5,27	5,90	6,58	8,81
NZFil20a_3	395,76	399,63	400,56	401,22	401,92	402,62	404,98	3,87	4,80	5,46	6,16	6,86	9,22
FAFil20a_1	398,16	401,55	402,12	402,54	402,86	403,34	404,75	3,39	3,96	4,38	4,70	5,18	6,59
FAFil20a_2	400,41	403,70	404,34	404,78	405,06	405,64	407,07	3,29	3,93	4,37	4,65	5,23	6,66
FAFil20a_3	396,16	399,94	400,55	400,93	401,24	401,78	403,26	3,78	4,39	4,77	5,08	5,62	7,10

PRILOG 9

Izluživanje elemenata u tragovima

Tabela P9-1. Rezultati ispitivanja izluživanja elemenata u tragovima iz maltera NZFA20a, NZFil20a i FAFil20a pri starosti od 28 i 180 dana kao i kriterijumi za ocenu opasnosti po životnu sredinu

Teški metali	Sadržaj u EP ekstraktu L/S= 10 l/1 kg* (mg/kg sm**)						Kriterijumi prema Direktivi 2003/33/EC		
	28 dana			180 dana			Otpad/material:		
	NZFA20a	NZFil20a	FAFil20a	NZFA20a	NZFil20a	FAFil20a	inertan	neopasan	opasan
Olovo, Pb	0,043	0,469	0,466	1,9	2,7	4,9	0,5	10	50
Kadmijum, Cd	0,1	0,099	0,086	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,04	1	5
Cink, Zn	0,5	0,4	0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	4	50	200
Bakar, Cu	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	2	50	100
Nikl, Ni	0,202	0,228	0,209	0,64	0,52	< 0,5	0,4	10	40
Hrom, Cr	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,16	0,13	0,14	0,5	10	70
Živa, Hg	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	0,01	0,2	2
Arsen, As	0,057	0,083	< 0,03	0,05	< 0,04	< 0,04	0,5	2	25
Barijum, Ba	< 1	< 1	< 1	15,9	24,8	12,5	20	100	300
Antimon, Sb	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,06	0,7	5

L/S* - odnos tečno - čvrsto
sm** - suva materija

Tabela P9-2. Rezultati ispitivanja prisustva mikroelemenata i elemenata u tragovima u PC, NZ, FA i CaCO₃

Sadržaj elemenata u tragovima i mikroelemenata (µg/g)				
Elementi	Podaci iz izveštaja prikazanih u Prilogu 2 (TQ metoda)			
	PC	NZ	FA	Filer (CaCO₃)
Olovo, Pb	10,3	25,0	198,3	0,4
Kadmijum, Cd	< 0,2	< 0,2	3,2	< 0,2
Cink, Zn	112,4	50,8	591,6	2,6
Bakar, Cu	52,4	29,5	130,5	1,7
Nikl, Ni	50,2	24,5	314,1	< 1,9
Hrom, Cr	57,5	17,0	293,6	9,3
Živa, Hg	< 0,2	< 0,1	7,3	< 0,5
Arsen, As	8,6	1,4	1516	0,5
Barijum, Ba	357,9	3058	532,9	19,8
Antimon, Sb	5,7	< 0,4	28,1	3,4

PRILOG 10

Skupljanje usled sušenja

III FAZA ispitivanja

Tabela P10-1. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera PCa

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	15,000	14,995	14,985	14,990	14,990	14,980	14,975	14,975	14,980	14,980
139,29	PCa_1	15,550	15,525	15,520	15,495	15,495	15,480	15,455	15,420	15,400	15,395	15,400
140,08	PCa_2	15,570	15,540	15,530	15,505	15,505	15,495	15,460	15,430	15,410	15,410	15,405
140,66	PCa_3	16,330	16,300	16,295	16,270	16,270	16,260	16,225	16,195	16,175	16,170	16,170

Tabela P10-2. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ10a

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,995	14,995	14,995	14,990	14,990	14,990	14,980	14,980	14,980	14,980
139,90	NZ10a_1	16,240	16,215	16,200	16,165	16,140	16,135	16,120	16,095	16,085	16,080	16,075
140,85	NZ10a_2	17,290	17,275	17,260	17,220	17,195	17,185	17,175	17,150	17,140	17,135	17,130
141,15	NZ10a_3	17,510	17,490	17,470	17,440	17,410	17,405	17,395	17,365	17,360	17,350	17,345

Tabela P10-3. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ20a

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,995	14,995	14,995	14,990	14,990	14,990	14,980	14,980	14,980	14,980
140,49	NZ20a_1	16,270	16,250	16,230	16,190	16,160	16,155	16,145	16,120	16,115	16,105	16,095
141,40	NZ20a_2	17,180	17,155	17,140	17,095	17,070	17,060	17,055	17,030	17,020	17,015	17,005
141,20	NZ20a_3	16,145	16,125	16,100	16,060	16,040	16,035	16,020	15,995	15,990	15,980	15,980

Tabela P10-4. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA10a

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,990	14,995	14,990	14,990	14,985	15,000	14,975	14,975	14,975	14,975
141,04	FA10a_1	17,395	17,375	17,350	17,325	17,300	17,290	17,295	17,260	17,250	17,240	17,230
140,10	FA10a_2	16,345	16,325	16,300	16,275	16,250	16,240	16,245	16,210	16,195	16,185	16,180
141,74	FA10a_3	17,070	17,050	17,020	16,995	16,970	16,960	16,965	16,935	16,920	16,910	16,900

Tabela P10-5. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA20a

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,990	14,995	14,990	14,990	14,990	14,985	14,975	14,975	14,975	14,975
140,56	FA20a_1	17,210	17,185	17,160	17,130	17,110	17,105	17,090	17,070	17,060	17,050	17,045
141,51	FA20a_2	17,640	17,615	17,590	17,560	17,540	17,540	17,525	17,505	17,495	17,485	17,480
140,24	FA20a_3	16,780	16,765	16,740	16,715	16,690	16,690	16,680	16,650	16,640	16,625	16,615

Tabela P10-6. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera PCb

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,995	15,000	14,985	14,990	14,990	14,990	14,975	14,980	14,980	14,980
139,29	PCb_1	15,865	15,835	15,840	15,820	15,830	15,805	15,780	15,765	15,750	15,745	15,740
139,18	PCb_2	15,990	15,960	15,960	15,940	15,940	15,930	15,910	15,885	15,870	15,865	15,860
139,86	PCb_3	16,250	16,220	16,225	16,205	16,205	16,190	16,175	16,145	16,135	16,130	16,125

Tabela P10-7. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ10b

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,990	15,000	14,990	14,985	14,990	14,980	14,975	14,975	14,980	14,975
138,93	NZ10b_1	15,040	15,005	15,010	14,990	14,975	14,975	14,955	14,940	14,925	14,925	14,915
138,67	NZ10b_2	14,650	14,615	14,625	14,600	14,585	14,590	14,570	14,550	14,540	14,535	14,530
139,49	NZ10b_3	14,780	14,745	14,755	14,725	14,710	14,715	14,695	14,680	14,665	14,665	14,660

Tabela P10-8. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera NZ20b

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,995	14,990	14,985	14,990	14,990	14,985	14,980	14,970	14,975	14,975
140,57	NZ20b_1	16,225	16,200	16,180	16,160	16,165	16,150	16,130	16,115	16,100	16,100	16,095
139,76	NZ20b_2	15,950	15,920	15,900	15,875	15,880	15,870	15,845	15,830	15,810	15,810	15,805
140,76	NZ20b_3	16,630	16,610	16,595	16,570	16,570	16,560	16,545	16,525	16,510	16,510	16,505

Tabela P10-9. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA10b

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,995	14,990	14,985	14,990	14,990	14,985	14,980	14,975	14,975	14,980
136,64	FA10b_1	12,660	12,635	12,620	12,600	12,600	12,590	12,575	12,555	12,540	12,530	12,530
136,18	FA10b_2	12,410	12,390	12,365	12,345	12,350	12,340	12,320	12,300	12,280	12,280	12,280
135,59	FA10b_3	12,055	12,030	12,010	11,990	11,995	11,985	11,970	11,950	11,930	11,930	11,930

Tabela P10-10. Podaci o skupljanju usled sušenja maltera FA20b

Lg (mm)	Oznaka	Očitane vrednosti sa deformetra (mm)										
		Vreme (dani)										
		3	4	7	14	21	28	56	91	126	154	182
	Etalon	14,995	14,995	14,990	14,990	14,985	14,990	14,985	14,975	14,970	14,975	14,975
138,53	FA20b_1	14,210	14,185	14,165	14,150	14,140	14,140	14,120	14,100	14,085	14,080	14,075
138,79	FA20b_2	14,205	14,185	14,165	14,150	14,145	14,140	14,125	14,110	14,095	14,090	14,080
141,01	FA20b_3	16,100	16,070	16,050	16,030	16,025	16,020	16,005	15,980	15,970	15,970	15,965

PRILOG 11

Otpornost na prodor hlorida

III FAZA ispitivanja

U tabeli P11-1 su prikazani rezultati merenja prečnika, kao i visine cilindričnih uzoraka maltera kojima je ispitana otpornost na prodor hlorida, kao i prosečna visina uzoraka maltera po mešavini L (mm). Takođe je prikazana izmerena vrednost temperature anolitnog rastvora na početku T_1 (°C) i na kraju ispitivanja T_2 (°C) svakog uzorka, kao i prosečna temperatura anolitnog rastvora za svaku maltersku mešavinu T (°C). U tabeli P11-2 su prikazani rezultati merenja dubine prodora hlorida u cilindrični uzorak x_{d1-7} (mm), kao i njihova srednja vrednost po ispitanom uzorku $x_{d,sr}$ (mm).

Tabela P11-1. Pojedinačne vrednosti prečnika i visine uzorka, prosečna vrednost visine uzoraka po mešavini maltera (L), temperatura anolitnog rastvora na početku (T₁) i po isteku 24h od početka eksperimenta (T₂) za svaki ispitanu uzorak, kao i srednja vrednost temperature anolitnog rastvora (T) po malterskoj mešavini

Oznaka maltera	prečnik (mm)	visina (mm)	L (mm)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T (°C)
PCa_1	98,89	48,09		21,5	24,9	
PCa_2	98,75	48,10	48,1	21,5	24,9	23,2
PCa_3	98,79	48,12		21,6	25,0	
NZ10a_1	97,53	48,17		21,1	24,5	
NZ10a_2	97,53	49,32	48,5	21,2	24,6	22,9
NZ10a_3	98,73	48,02		21,2	24,7	
NZ20a_1	98,04	48,10		20,9	23,6	
NZ20a_2	96,77	48,52	48,3	20,9	23,6	22,2
NZ20a_3	98,78	48,17		21,0	23,4	
FA10a_1	99,29	49,25		21,0	23,8	
FA10a_2	97,25	50,76	49,9	21,1	23,9	22,4
FA10a_3	98,60	49,72		21,0	23,7	
FA20a_1	99,88	50,85		21,1	22,7	
FA20a_2	99,50	50,53	50,7	21,1	22,9	21,9
FA20a_3	99,67	50,74		21,0	22,5	
PCb_1	99,52	48,81		21,1	24,1	
PCb_2	100,44	49,16	49,0	21,1	24,4	22,7
PCb_3	99,87	48,98		21,1	24,3	
NZ10b_1	98,79	49,36		20,9	23,1	
NZ10b_2	98,76	50,35	49,7	21,0	23,3	22,0
NZ10b_3	98,74	49,38		21,0	22,9	
NZ20b_1	98,86	49,56		20,9	21,5	
NZ20b_2	98,18	49,17	49,1	20,9	21,3	21,2
NZ20b_3	98,22	48,64		20,9	21,6	
FA10b_1	98,71	48,88		20,6	22,8	
FA10b_2	99,01	48,83	48,9	20,6	22,7	21,7
FA10b_3	98,89	48,86		20,7	22,9	
FA20b_1	98,88	49,35		20,9	21,1	
FA20b_2	98,92	49,34	49,3	21,0	21,2	21,1
FA20b_3	98,80	49,33		21,0	21,1	

Tabela P11-2. Dubina prodora hlorida, pojedinačne vrednosti (x_{d1-7}) i srednja vrednost po uzorku ($x_{d,sr}$)

Oznaka maltera	Dubina prodora hlorida x_d (mm)							
	x_{d6}	x_{d4}	x_{d2}	x_{d1}	x_{d3}	x_{d5}	x_{d7}	$x_{d,sr}$
PCa_1	26,19	26,96	28,19	28,18	25,36	26,43	27,10	26,92
PCa_2	20,72	22,96	21,74	22,16	22,00	21,18	20,10	21,55
PCa_3	27,54	26,73	28,09	29,39	29,84	28,76	26,85	28,17
NZ10a_1	18,47	18,23	17,28	18,66	17,78	18,66	17,37	18,06
NZ10a_2	16,65	17,82	18,32	18,06	18,23	17,37	17,74	17,74
NZ10a_3	19,04	19,86	19,37	20,06	18,24	18,24	19,49	19,19
NZ20a_1	13,21	10,24	12,01	11,31	12,51	11,01	12,50	11,83
NZ20a_2	13,98	13,07	13,03	13,15	11,99	12,26	14,37	13,12
NZ20a_3	12,48	12,61	11,86	12,38	10,56	12,80	14,33	12,43
FA10a_1	9,76	9,44	11,18	11,99	10,77	13,44	12,09	11,24
FA10a_2	14,04	11,42	10,76	12,64	11,70	10,03	10,32	11,56
FA10a_3	10,82	11,95	9,67	10,74	10,91	11,24	10,57	10,84
FA20a_1	8,01	8,23	7,89	8,06	8,13	9,39	9,97	8,53
FA20a_2	8,44	8,22	8,22	8,11	7,89	8,28	7,55	8,10
FA20a_3	7,91	8,53	7,92	7,65	7,71	8,47	8,34	8,08
PCb_1	15,57	15,25	16,48	16,16	15,03	14,58	15,57	15,52
PCb_2	15,66	14,83	14,44	15,14	15,39	15,66	15,65	15,25
PCb_3	16,40	16,87	15,97	13,09	11,51	11,97	13,15	14,14
NZ10b_1	11,31	11,13	10,74	11,13	10,06	10,08	9,70	10,59
NZ10b_2	10,72	12,49	10,97	11,53	11,66	12,32	11,58	11,61
NZ10b_3	11,26	11,91	11,95	11,63	11,77	12,31	11,52	11,76
NZ20b_1	7,95	7,63	7,26	6,99	7,60	8,11	8,21	7,68
NZ20b_2	7,36	9,12	7,26	6,41	6,96	7,06	7,72	7,41
NZ20b_3	8,08	7,42	8,52	7,69	6,76	7,35	6,68	7,50
FA10b_1	7,28	7,42	7,44	6,30	5,40	6,93	7,12	6,84
FA10b_2	7,95	7,06	7,61	6,48	5,65	7,02	8,24	7,14
FA10b_3	7,43	6,35	7,34	6,57	7,46	8,11	6,51	7,11
FA20b_1	5,98	4,79	5,57	5,16	6,06	4,39	3,98	5,13
FA20b_2	4,09	2,91	3,61	4,85	5,16	5,92	5,41	4,56
FA20b_3	4,71	5,31	8,69	5,83	5,66	4,82	4,19	5,60

PRILOG 12

Otpornost na dejstvo sulfata

III FAZA ispitivanja

U tabelama P12-1, P12-2, P12-3 i P12-4 su prikazani rezultati promene dužine po epruveti nakon 0, 7, 14, 21, 28, 56, 91, 105, 120, 150 i 180 dana izlaganja dejstvu sulfatnog rastvora.

Tabela P12-1. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera PCa, NZ10a i NZ20a usled dejstva sulfata

Vrsta maltera	Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera iz III faze ispitivanja usled dejstva sulfata (%)										
	Vreme koje je proteklo od početka izlaganja epruveta dejstvu sulfatnog rastvora (dani)										
	0	7	14	21	28	56	91	105	120	150	180
PCa_1	0,000	0,008	0,008	0,012	0,016	0,012	0,016	0,024	0,028	0,032	0,092
PCa_2	0,000	0,004	0,012	0,012	0,008	0,008	0,008	0,012	0,016	0,024	0,084
PCa_3	0,000	0,008	0,012	0,012	0,004	0,004	0,004	0,012	0,016	0,020	0,084
PCa_4	0,000	0,004	0,008	0,008	0,016	0,016	0,016	0,016	0,020	0,028	0,088
PCa_5	0,000	0,008	0,008	0,008	0,016	0,012	0,016	0,024	0,028	0,032	0,096
PCa_6	0,000	0,004	0,008	0,008	0,008	0,008	0,012	0,012	0,016	0,032	0,092
NZ10a_1	0,000	0,008	0,012	0,008	0,012	0,008	0,008	0,012	0,012	0,016	0,020
NZ10a_2	0,000	0,008	0,012	0,012	0,012	0,016	0,020	0,032	0,024	0,024	0,028
NZ10a_3	0,000	0,008	0,016	0,012	0,012	0,012	0,012	0,020	0,016	0,016	0,020
NZ10a_4	0,000	0,012	0,016	0,012	0,016	0,016	0,020	0,020	0,024	0,028	0,032
NZ20a_1	0,000	0,000	0,004	0,004	0,008	0,004	0,004	0,012	0,008	0,008	0,012
NZ20a_2	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,008	0,008	0,012	0,008	0,012	0,012
NZ20a_4	0,000	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008	0,008	0,012	0,008	0,008	0,016
NZ20a_5	0,000	0,004	0,004	0,012	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,016
NZ20a_6	0,000	0,004	0,004	0,008	0,008	0,012	0,008	0,012	0,008	0,012	0,016

Tabela P12-2. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera FA10a i FA20a usled dejstva sulfata

Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera iz III faze ispitivanja usled dejstva sulfata (%)											
Vrsta maltera	Vreme koje je proteklo od početka izlaganja epruveta dejstvu sulfatnog rastvora (dani)										
	0	7	14	21	28	56	91	105	120	150	180
FA10a_1	0,000	0,004	0,008	0,004	0,008	0,008	0,008	0,004	0,008	0,008	0,012
FA10a_2	0,000	0,004	0,008	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008
FA10a_3	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008
FA10a_4	0,000	0,004	0,008	0,004	0,004	0,008	0,004	0,004	0,004	0,008	0,012
FA10a_5	0,000	0,004	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,012	0,012
FA20a_1	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000	0,004	0,004	0,004
FA20a_2	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008
FA20a_2	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
FA20a_4	0,000	0,004	0,000	0,000	0,004	0,004	0,000	0,004	0,004	0,004	0,008
FA20a_5	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
FA20a_6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004

Tabela P12-3. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera PCb, NZ10b i NZ20b usled dejstva sulfata

Vrsta maltera	Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera iz III faze ispitivanja usled dejstva sulfata (%)										
	Vreme koje je proteklo od početka izlaganja epruveta dejstvu sulfatnog rastvora (dani)										
	0	7	14	21	28	56	91	105	120	150	180
PCb_1	0,000	0,012	0,012	0,008	0,012	0,008	0,012	0,016	0,020	0,024	0,028
PCb_2	0,000	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,016	0,020	0,020	0,024	0,032
PCb_3	0,000	0,008	0,008	0,008	0,012	0,008	0,016	0,016	0,016	0,020	0,040
PCb_4	0,000	0,012	0,016	0,008	0,016	0,008	0,016	0,016	0,020	0,032	0,032
PCb_6	0,000	0,004	0,008	0,004	0,008	0,004	0,004	0,012	0,008	0,020	0,028
NZ10b_1	0,000	0,004	0,004	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,012	0,016
NZ10b_2	0,000	0,008	0,008	0,012	0,012	0,012	0,008	0,012	0,012	0,012	0,020
NZ10b_3	0,000	0,008	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,016	0,012	0,020	0,024
NZ10b_4	0,000	0,004	0,008	0,012	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,016	0,016
NZ10b_5	0,000	0,008	0,008	0,012	0,008	0,008	0,008	0,012	0,008	0,012	0,012
NZ10b_6	0,000	0,008	0,008	0,012	0,008	0,008	0,008	0,012	0,012	0,020	0,020
NZ20b_1	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008
NZ20b_2	0,000	0,004	0,008	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,004	0,004	0,008
NZ20b_3	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,012
NZ20b_4	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008	0,012
NZ20b_5	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,004	0,004	0,008
NZ20b_6	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,004	0,004	0,008

Tabela P12-4. Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera FA10b i FA20b usled dejstva sulfata

Pojedinačne vrednosti ekspanzije maltera iz III faze ispitivanja usled dejstva sulfata (%)											
Vrsta maltera	Vreme koje je proteklo od početka izlaganja epruveta dejstvu sulfatnog rastvora (dani)										
	0	7	14	21	28	56	91	105	120	150	180
FA10b_1	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,004	0,004	0,008	0,004	0,008
FA10b_2	0,000	0,004	0,008	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008
FA10b_3	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,004
FA10b_4	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008
FA10b_5	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,004	0,008
FA10b_6	0,000	0,004	0,008	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008	0,012
FA20b_1	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004
FA20b_2	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,008	0,008
FA20b_2	0,000	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,000	0,004	0,004
FA20b_4	0,000	0,000	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,008

PRILOG 13

Određivanje prionljivosti maltera „pull-off“ metodom

U tabelama od P13-1 do P13-5 prikazani su izgledi pečata, dat je opis loma, određen je tip loma, a prikazana je i vrednost čvrstoće prianjanja pri zatezanju maltera – f_h (MPa) za svaki pečat.

III FAZA

Tabela P13-1. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCaPO i PCbPO „pull-off“ metodom











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
PCaPO				PCbPO			
Pečat br. 1 	90% po malteru +10% po skrami	B	5,06	Pečat br. 6 	100% po malteru	B	5,06
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	4,57	Pečat br. 7 	80% po malteru + 10% po skrami + 10% po kontaktu pečata i lepka	Y/Z*	5,01
Pečat br. 3 	90% po malteru +10% po skrami	B	3,24	Pečat br. 8 	50% po malteru + 50% po skrami	B	4,53
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	4,33	Pečat br. 9 	75% po kontaktu pečata i lepka + 20% po malteru + 5% po skrami	Y/Z	2,52
Pečat br. 5 	100% po malteru	B	4,52	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,27

Tabela P13-2. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10aPO i NZ10bPO „pull-off“ metodom











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ10aPO				NZ10bPO			
Pečat br. 1 	100% po malteru	B	4,93	Pečat br. 6 	100% po malteru	B	5,35
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	4,81	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	5,67
Pečat br. 3 	90% po malteru +10% po skrami	B	4,10	Pečat br. 8 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,81
Pečat br. 4 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,11	Pečat br. 9 	100% po kontaktu pečata i lepka	Y/Z	2,52
Pečat br. 5 	100% po malteru	B	5,06	Pečat br. 10 	100% po malteru	B	5,87

Tabela P13-3. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20aPO i NZ20bPO „pull-off“ metodom











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ20aPO				NZ20bPO			
Pečat br. 1 	100% po malteru	B	4,96	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,83
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	4,68	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	5,01
Pečat br. 3 	100% po malteru	B	4,69	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	4,85
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	4,48	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	5,22
Pečat br. 5 	100% po malteru	B	4,90	Pečat br. 10 	97% po malteru + 3% po kontaktu pečata i lepka	B	4,85

Tabela P13-4. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10aPO i FA10bPO „pull-off“ metodom

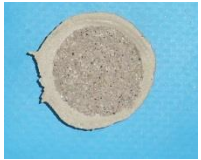



















Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA10aPO				FA10bPO			
Pečat br. 1 	100% po malteru	B	5,17	Pečat br. 6 	100% po malteru	B	5,30
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	5,29	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	5,81
Pečat br. 3 	100% po malteru	B	5,21	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	5,06
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	5,52	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	5,79
Pečat br. 5 	100% po malteru	B	5,18	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,79

Tabela P13-5. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20aPO i FA20bPO „pull-off“ metodom

Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA20aPO				FA20bPO			
Pečat br. 1 	100% po malteru	B	4,82	Pečat br. 6 	100% po malteru	B	4,61
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	4,89	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	4,99
Pečat br. 3 	100% po malteru	B	4,23	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	4,97
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	4,53	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	4,80
Pečat br. 5 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,09	Pečat br. 10 	100% po malteru	B	5,03

PRILOG 14

Određivanje prionljivosti („pull-off“ metodom) maltera za betonsku podlogu koji je bio izložen ograničenom skupljanju

U tabeli P14-1 prikazano je stanje test-površine uzoraka spravljenih sa $w/cm=0,5$, nakon nege u vodi iz vodovoda i nakon dodatnih 56 dana skladištenja, dok je u tabeli P14-2 prikazano stanje test-površine uzoraka spravljenih sa $w/cm=0,4$, nakon nege u vodi iz vodovoda i nakon dodatnih 56 dana skladištenja.

U tabelama od P14-3 do P14-12 su prikazani izgledi pečata, dat je opis loma, određen je tip loma, a prikazana je i vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera – f_h (MPa) za svaki pečat.

III FAZA

Vizuelni pregled uzoraka

Tabela P14-1. Izgled test-površine uzoraka spravljenih sa $w/cm=0,5$, nakon nege u vodi iz vodovoda i nakon dodatnih 56 dana skladištenja

Stanje test-površina nakon vađenja uzoraka iz vode (pri starosti od 28 dana)	Stanje test-površina uzoraka nakon 56 dana skladištenja (pri starosti od 84 dana)
PCa	
 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
NZ10a	
 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
NZ20a	
 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
FA10a	
 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
FA20a	
 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>

Tabela P14-2. Izgled test-površine uzoraka spravljenih sa $w/cm=0,4$, nakon nege u vodi iz vodovoda i nakon dodatnih 56 dana skladištenja

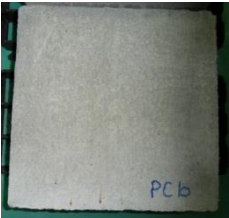
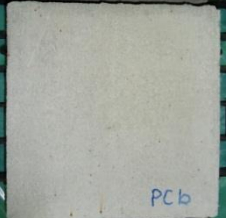
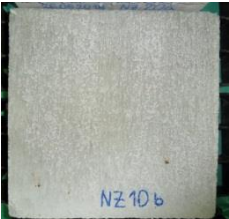


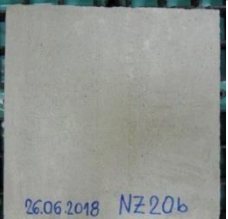




Stanje test-površina nakon vađenja uzoraka iz vode (pri starosti od 28 dana)	Stanje test-površina uzoraka nakon 56 dana skladištenja
<p>PCa</p>  <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
<p>NZ10a</p>  <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
<p>NZ20a</p>  <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
<p>FA10a</p>  <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>
<p>FA20a</p>  <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>	 <p>Test-površina je bez oštećenja.</p>

Tabela P14-3. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCa „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
PCa: Pečat br. 1 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,97	Pečat br. 6 	100% po malteru	B	4,55
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	4,70	Pečat br. 7 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,72
Pečat br. 3 	100% po malteru	B	4,53	Pečat br. 8 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,64
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	4,47	Pečat br. 9 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,72
Pečat br. 5 	100% po malteru	B	4,66	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,07

Tabela P14-4. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCb „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
PCb: Pečat br. 1 	90% po malteru + 10% po skrami	B	5,34	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,39
Pečat br. 2 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,05	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	6,22
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,42	Pečat br. 8 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,46
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	5,02	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	5,09
Pečat br. 5 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,64	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,60

Tabela P14-5. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ10a: Pečat br. 1 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,02	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,56
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	4,43	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	4,70
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,19	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	4,47
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	4,99	Pečat br. 9 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,70
Pečat br. 5 	100% po malteru	B	5,13	Pečat br. 10 	100% po malteru	B	7,73

Tabela P14-6. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ10b: Pečat br. 1 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,49	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,19
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	5,13	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	4,98
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,21	Pečat br. 8 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,17
Pečat br. 4 	90% po malteru + 10% po skrami	B	5,03	Pečat br. 9 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,89
Pečat br. 5 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,18	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,15

Tabela P14-7. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ20a: Pečat br. 1 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,02	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,48
Pečat br. 2 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,57	Pečat br. 7 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,45
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,27	Pečat br. 8 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,59
Pečat br. 4 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,35	Pečat br. 9 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,52
Pečat br. 5 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,44	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,44

Tabela P14-8. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ20b: Pečat br. 1 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.81	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5.11
Pečat br. 2 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5.07	Pečat br. 7 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.88
Pečat br. 3 	100% po malteru	B	4.76	Pečat br. 8 	90% po malteru + 10% po skrami	B	5.10
Pečat br. 4 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.78	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	4.98
Pečat br. 5 	90% po malteru + 10% po skrami	B	5.23	Pečat br. 10 	100% po malteru	B	5.36

Tabela P14-9. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA10a: Pečat br. 1 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.98	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.49
Pečat br. 2 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.72	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	4.77
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.60	Pečat br. 8 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.82
Pečat br. 4 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.57	Pečat br. 9 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4.44
Pečat br. 5 	100% po malteru	B	4.62	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.73

Tabela P14-10. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA10b: Pečat br. 1 	100% po malteru	B	5.07	Pečat br. 6 	100% po malteru	B	5.21
Pečat br. 2 	100% po malteru	B	5.14	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	4.90
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5.80	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	5.06
Pečat br. 4 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5.36	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	5.31
Pečat br. 5 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5.23	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5.14

Tabela P14-11. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20a „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju





















Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA20a: Pečat br. 1 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.37	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.53
Pečat br. 2 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.51	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	4.53
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.53	Pečat br. 8 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.47
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	4.51	Pečat br. 9 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.33
Pečat br. 5 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.53	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.69

Tabela P14-12. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20b „pull-off“ metodom nakon izlaganja ograničenom skupljanju

Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA20b: Pečat br. 1 	100% po malteru	B	6.17	Pečat br. 6 	85% po malteru + 5% po skrami + 10% po kontaktu pečata i lepka – nedozvoljeni lom	Y/Z*	6.00
Pečat br. 2 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.97	Pečat br. 7 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4.82
Pečat br. 3 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5.13	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	4.84
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	5.89	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	5.85
Pečat br. 5 	90% po malteru + 10% po skrami	B	5.35	Pečat br. 10 	95% po malteru + 5% po skrami	B	6.25

PRILOG 15

Određivanje prionljivosti maltera nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje

U tabeli P15-1 prikazano je stanje površine uzoraka pre početka ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1, dok je u tabelama od P15-2 do P15-6 prikazano stanje površine uzoraka nakon svakih 10 ciklusa.

U tabelama od P15-7 do P15-16 su prikazani izgledi pečata, dat je opis loma, određen je tip loma, a prikazana je i vrednost čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera – f_h (MPa) za svaki pečat. Prvo su dati rezultati ispitivanja etalonskih uzoraka, a potom i test-uzoraka.

III FAZA

Tabela P15-1. Izgled površine uzoraka pre početka ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

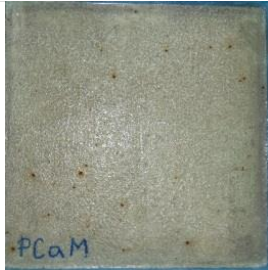


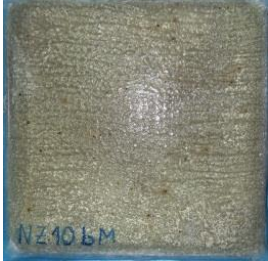
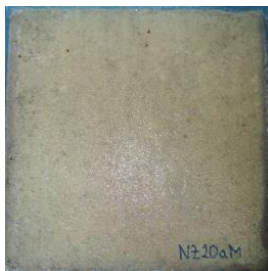
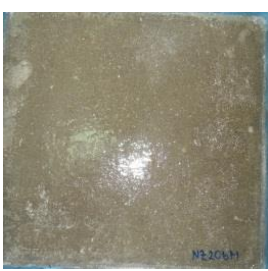


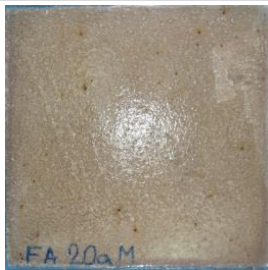

Izgled površine uzoraka pre početka ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1	
Malteri spravljeni sa w/cm=0,5	Malteri spravljeni sa w/cm=0,4
<p>PCa</p>  <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka.</p>	<p>PCb</p>  <p>Sitno hrapava površina sa mehurićima.</p>
<p>NZ10a</p>  <p>Hrapava površina (naročito u uglovima i duž ivica) sa mehurićima, prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka.</p>	<p>NZ10b</p>  <p>Talasasta površina zbog završne obrade.</p>
<p>NZ20a</p>  <p>Površina puna mehurića, smanjena vezivna matrica duž ivica.</p>	<p>NZ20b</p>  <p>Glatka površina (na 1/4 sitno hrapava) sa mrežastih prslina, širine <0,05mm naročito uz ivice uzorka.</p>
<p>FA10a</p>  <p>Neujednačena završna obrada površine: mrežaste prsine na levoj-glatkoj polovini, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	<p>FA10b</p>  <p>Gruba završna obrada (na pojedinim mestima se vide zrna agregata) sa izrazito sitnim mehurićima.</p>
<p>FA20a</p>  <p>Glatka površina sa mnogo mehurića.</p>	<p>FA20b</p>  <p>Glatka površina, uz jednu ivicu mestimično hrapava, sa mnogo mehurića.</p>

Tabela P15-2. Izgled površine uzoraka nakon 10 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

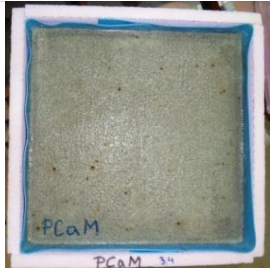
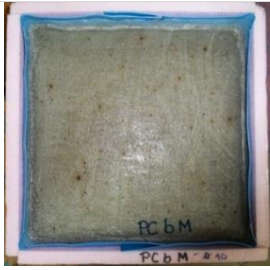
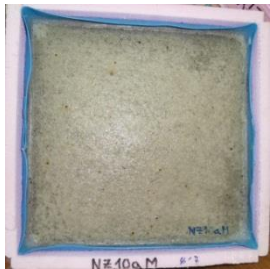
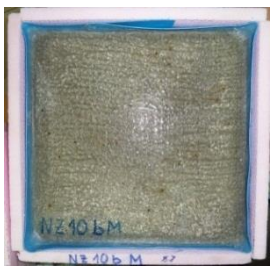
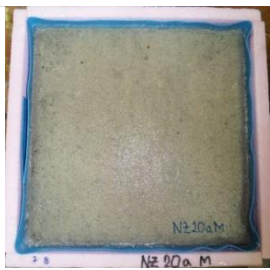
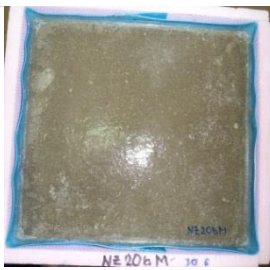
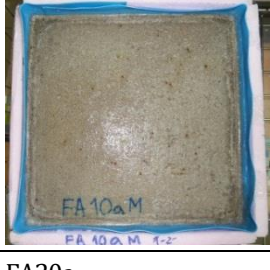


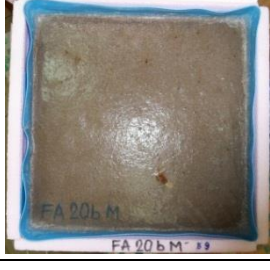
Izgled površine uzoraka nakon 10 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1	
Malteri spravljeni sa w/cm=0,5	Malteri spravljeni sa w/cm=0,4
<p>PCa</p>  <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka, sredina isprsakala sa sitnim skidanjem skrame.</p>	<p>PCb</p>  <p>Sitno hrapava površina sa mehurićima.</p>
<p>NZ10a</p>  <p>Hrapava površina (naročito u uglovima i duž ivica) sa mehurićima, prisustvo mrežastih prslina, širine <0,05mm uz ivice uzorka.</p>	<p>NZ10b</p>  <p>Talasasta površina.</p>
<p>NZ20a</p>  <p>Hrapava površina sa mehurićima.</p>	<p>NZ20b</p>  <p>Glatka površina (na 1/4 sitno hrapava) sa mrežastih prslina, širine <0,05mm naročito uz ivice uzorka.</p>
<p>FA10a</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini, mrežaste prsine na levoj-glatkoj polovini, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	<p>FA10b</p>  <p>Izrazito hrapava površina.</p>
<p>FA20a</p>  <p>Glatka površina sa mnogo mehurića.</p>	<p>FA20b</p>  <p>Glatka površina, uz jednu ivicu mestimično hrapava, sa mnogo mehurića.</p>

Tabela P15-3. Izgled površine uzoraka nakon 20 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

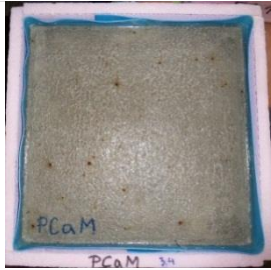

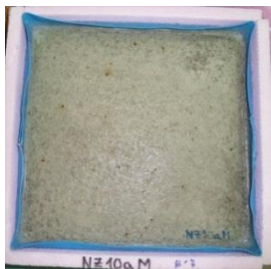
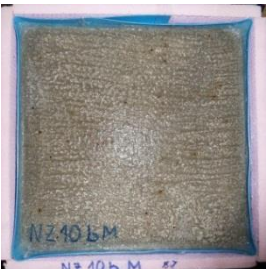
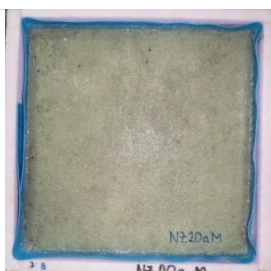
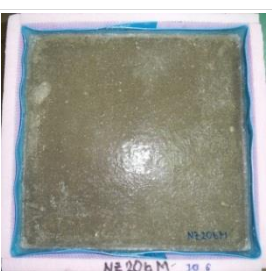
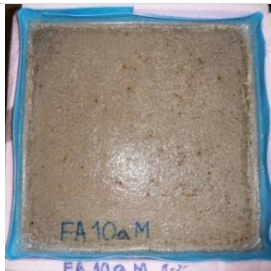
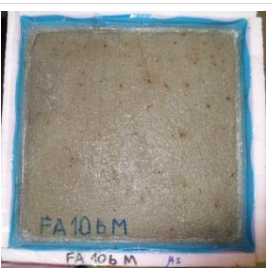


Izgled površine uzoraka nakon 20 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1	
Malteri spravljeni sa w/cm=0,5	Malteri spravljeni sa w/cm=0,4
<p>PCa</p>  <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka, sredina isprsakala sa mestimičnim tačkastim-kružnim skidanjem skrame.</p>	<p>PCb</p>  <p>Sitno hrapava površina, mestimično veće skidanje skrame.</p>
<p>NZ10a</p>  <p>Gruba površina (naročito u uglovima i duž ivica) sa mehurićima, prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka.</p>	<p>NZ10b</p>  <p>Talasasta površina, u udubljenjima sitno sidanje skrame.</p>
<p>NZ20a</p>  <p>Ujednačeno gruba površina sa manje mehurića.</p>	<p>NZ20b</p>  <p>Pretežno glatka površina (mestimično sitno hrapava) sa mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> naročito uz ivice uzorka.</p>
<p>FA10a</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini, mrežaste prsine na levoj-glatkoj polovini, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	<p>FA10b</p>  <p>Izrazito hrapava površina.</p>
<p>FA20a</p>  <p>Glatka površina sa mnogo mehurića, u centralnom delu je mestimično došlo do sitnog skidanja skrame.</p>	<p>FA20b</p>  <p>Glatka površina, mestimično tačkasto skidanje skrame (svetlije nijanse).</p>

Tabela P15-4. Izgled površine uzoraka nakon 30 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

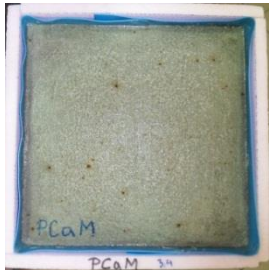
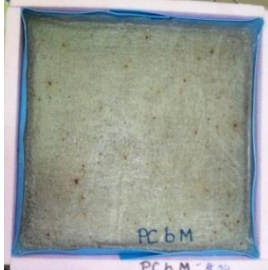
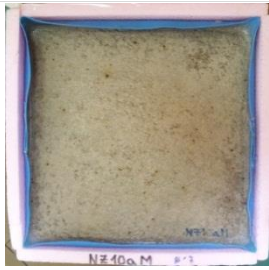
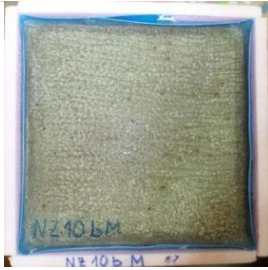
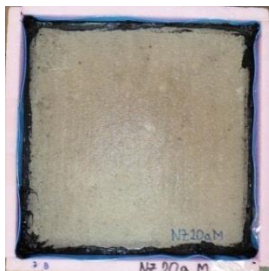

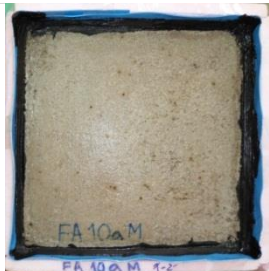
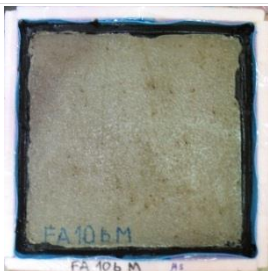

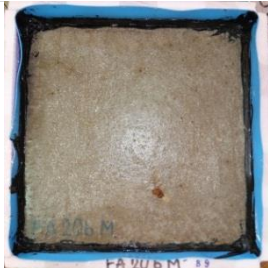
Izgled površine uzoraka nakon 30 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1	
Malteri spravljeni sa w/cm=0,5	Malteri spravljeni sa w/cm=0,4
<p>PCa</p>  <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka, sredina isprskala sa mestimičnim tačkastim-kružnim skidanjem skrame.</p>	<p>PCb</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini, mestimično veće skidanje skrame (u uglu).</p>
<p>NZ10a</p>  <p>Manje hrapava površina (sitno skidanje skrame) sa mehurićima, prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka.</p>	<p>NZ10b</p>  <p>Talasasta površina, sitno skidanje skrame.</p>
<p>NZ20a</p>  <p>Sitno hrapava površina sa manje mehurića.</p>	<p>NZ20b</p>  <p>Pretežno glatka površina sa mestimičnim (tačkastim) skidanjem skrame, mrežaste prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> naročito uz ivice uzorka.</p>
<p>FA10a</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini, mrežaste prsine na levojsitnije hrapavoj polovini, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	<p>FA10b</p>  <p>Izrazito hrapava površina, sitno skidanje skrame.</p>
<p>FA20a</p>  <p>Glatka površina sa mnogo mehurića, sem u centralnom delu i u dva ugla gde je mestimično skinuta skrama.</p>	<p>FA20b</p>  <p>Pretežno glatka površina, mestimično, tačkasto skidanje skrame (svetlije nijanse).</p>

Tabela P15-5. Izgled površine uzoraka nakon 40 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

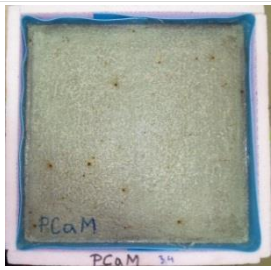
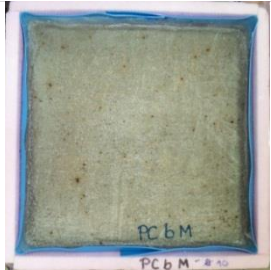
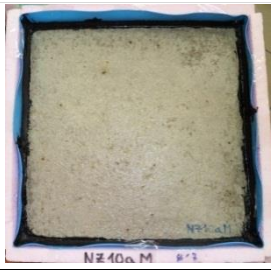
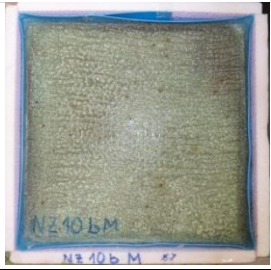
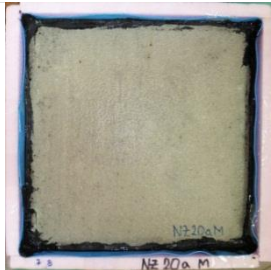
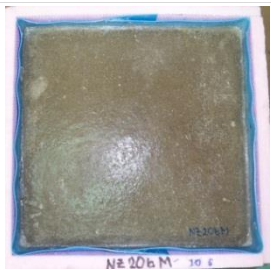


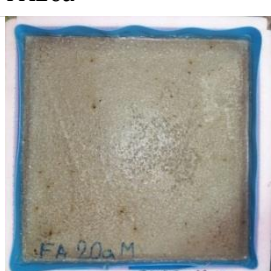

Izgled površine uzoraka nakon 40 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1	
Malteri spravljeni sa w/cm=0,5	Malteri spravljeni sa w/cm=0,4
<p>PCa</p>  <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka, tačkasto/mrežasto skidanje skidanjem skrame po celoj površini uzorka.</p>	<p>PCb</p>  <p>Sitno hrapava površina, mestimično veće skidanje skrame.</p>
<p>NZ10a</p>  <p>Manje hrapava površina (sitno skidanje skrame) sa mehurićima, prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka.</p>	<p>NZ10b</p>  <p>Talasasta površina, sitno sidanje skrame(izraženiije na jednoj polovini površine).</p>
<p>NZ20a</p>  <p>Umereno skidanje skrame - sitno hrapava površina sa manje mehurića.</p>	<p>NZ20b</p>  <p>Pretežno glatka površina, na 1/3 površine je sitno skinuta skrama, mrežaste prsline, širine <math><0,05\text{mm}</math> naročito uz ivice uzorka.</p>
<p>FA10a</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini, leva polovina je-sitnije hrapava, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	<p>FA10b</p>  <p>Izrazito hrapava površina, sitno skidanje skrame.</p>
<p>FA20a</p>  <p>Glatka površina sa mnogo mehurića, sem u centralnom delu i u dva ugla gde je mestimično skinuta skrama.</p>	<p>FA20b</p>  <p>Mestimično, tačkasto skidanje skrame (svetlije nijanse).</p>

Tabela P15-6. Izgled površine uzoraka nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1

Izgled površine uzoraka nakon 50 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja prema EN 13687-1	
Malteri spravljeni sa w/cm=0,5	Malteri spravljeni sa w/cm=0,4
<p>PCa</p>  <p>Prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka, tačkasto/mrežasto skidanje skrame po celoj površini uzorka.</p>	<p>PCb</p>  <p>Sitno hrapava površina, mestimično više skinuta skrama.</p>
<p>NZ10a</p>  <p>Manje hrapava površina usled sitnog skidanje skrame, prisustvo mrežastih prslina, širine <math><0,05\text{mm}</math> uz ivice uzorka.</p>	<p>NZ10b</p>  <p>Sitno sidanje skrame, prvenstveno u dubljenjima.</p>
<p>NZ20a</p>  <p>Ujednačeno sitno hrapava površina - umereno skidanje skrame.</p>	<p>NZ20b</p>  <p>Pretežno glatka površina sa mrežastim prslinama, širine <math><0,05\text{mm}</math>, na 1/4 površine je sitno skinuta skrama.</p>
<p>FA10a</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini, leva polovina je sitnije hrapava, dok je desna polovina grubo hrapava.</p>	<p>FA10b</p>  <p>Izrazito hrapava površina, sitno skidanje skrame.</p>
<p>FA20a</p>  <p>Sitno skidanje skrame po celoj površini (sitno hrapava) izuzev u centralnom delu i u dva ugla gde je izraženije.</p>	<p>FA20b</p>  <p>Tačkasto skidanje skrame po površini (svetlije nijanse).</p>

Tabela P15-7. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka PCaME i PCbME








Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
PCaME				PCbME			
Pečat br. 1 	100% po malteru	B	5,10	Pečat br. 6 	40% po malteru +60% po skrami	B*	4,92
Pečat br. 2 	80% po malteru +20% po skrami	B	4,81	Pečat br. 7 	10% po malteru +90% po skrami	B*	5,01
Pečat br. 3 	90% po malteru +10% po skrami	B	4,73	Pečat br. 8 	15% po malteru +85% po skrami	B*	4,88
Pečat br. 4 	30% po malteru +70% po skrami	B*	4,40	Pečat br. 9 	10% po malteru +90% po skrami	B*	4,56
Pečat br. 5 	95% po malteru +5% po skrami	B	4,88	Pečat br. 10 	20% po malteru +80% po skrami	B*	4,86

Tabela P15-8. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka NZ10aME i NZ10bME


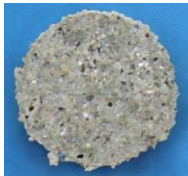







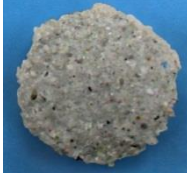
Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ10aME				NZ10bME			
Pečat br. 1 	100% po malteru	B	4,90	Pečat br. 6 	95% po malteru +5% po skrami	B	5,66
Pečat br. 2 	95% po malteru +5% po skrami	B	5,06	Pečat br. 7 	70% po malteru +30% po skrami	B	6,03
Pečat br. 3 	95% po malteru +5% po skrami	B	4,81	Pečat br. 8 	85% po malteru + 15% po skrami	B	5,59
Pečat br. 4 	60% po malteru + 40% po skrami	B	4,93	Pečat br. 9 	95% po malteru +5% po skrami	B	5,25
Pečat br. 5 	75% po malteru + 25% po skrami	B	5,17	Pečat br. 10 	100% po malteru	B	5,55

Tabela P15-9. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka NZ20aME i NZ20bME











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ20aME				NZ20bME			
Pečat br. 1 	90% po malteru +10% po skrami	B	4,44	Pečat br. 6 	20% po malteru + 80% po skrami	B*	4,57
Pečat br. 2 	95% po malteru +5% po skrami	B	4,82	Pečat br. 7 	30% po malteru + 70% po skrami	B*	4,69
Pečat br. 3 	95% po malteru +5% po skrami	B	4,55	Pečat br. 8 	70% po malteru + 30% po skrami	B	4,59
Pečat br. 4 	95% po malteru +5% po skrami	B	4,53	Pečat br. 9 	40% po malteru + 60% po skrami	B*	4,44
Pečat br. 5 	95% po malteru +5% po skrami	B	4,15	Pečat br. 10 	20% po malteru + 80% po skrami	B*	4,44

Tabela P15-10. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka FA10aME i FA10bME








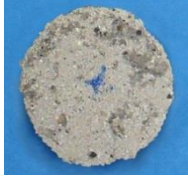


Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA10aME				FA10bME			
Pečat br. 1 	90% po malteru +10% po skrami	B	5,27	Pečat br. 6 	15% po malteru +85% po skrami	B*	5,85
Pečat br. 2 	80% po malteru +20% po skrami	B	4,98	Pečat br. 7 	5% po malteru +95% po skrami	B*	5,07
Pečat br. 3 	80% po malteru +20% po skrami	B	4,62	Pečat br. 8 	30% po malteru +70% po skrami	B*	5,87
Pečat br. 4 	75% po malteru +25% po skrami	B	4,69	Pečat br. 9 	20% po malteru +80% po skrami	B*	5,34
Pečat br. 5 	80% po malteru +20% po skrami	B	4,82	Pečat br. 10 	40% po malteru + 60% po skrami	B*	5,72

Tabela P15-11. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera „pull-off“ metodom kod etalonskih uzoraka FA20aME i FA20bME











Pečat	Opis loma	Tip lom	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA20aME				FA20bME			
Pečat br. 1 	10% po malteru +90% po skrami	B*	4,35	Pečat br. 6 	3% po malteru + 7% po skrami + 90% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,45
Pečat br. 2 	5% po malteru +95% po skrami	B*	4,18	Pečat br. 7 	5% po malteru + 10% po skrami + 85% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,37
Pečat br. 3 	10% po malteru +90% po skrami	B*	3,92	Pečat br. 8 	10% po malteru + 10% po skrami + 80% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,44
Pečat br. 4 	15% po malteru +85% po skrami	B*	4,19	Pečat br. 9 	5% po malteru + 10% po skrami + 85% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,40
Pečat br. 5 	25% po malteru + 75% po skrami	B*	4,22	Pečat br. 10 	15% po malteru + 85% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,28

Tabela P15-12. Rezultati merjenja čvrstoće prianjanja pri zatezanju maltera PCaM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rasturu) i odmrazavanja (u vodi)


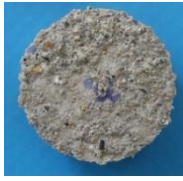








Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
PCaM: Pečat br. 1 	80% po malteru + 20% po skrami	B	4,27	Pečat br. 6 	75% po malteru + 25% po skrami	B	4,31
Pečat br. 2 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,41	Pečat br. 7 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,14
Pečat br. 3 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,23	Pečat br. 8 	85% po malteru + 15% po skrami	B	4,27
Pečat br. 4 	100% po malteru	B	4,37	Pečat br. 9 	100% po malteru	B	4,24
Pečat br. 5 	70% po malteru + 20% po skrami + 10% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,20	Pečat br. 10 	60% po malteru + 30% po skrami + 10% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	3,83

Tabela P15-13. Rezultati merjenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera PCbM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
PCbM: Pečat br. 1 	75% po malteru + 25% po skrami	B	4,77	Pečat br. 6 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,55
Pečat br. 2 	75% po malteru + 25% po skrami	B	4,77	Pečat br. 7 	50% po malteru + 25% po skrami + 25% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,52
Pečat br. 3 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,61	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	4,52
Pečat br. 4 	85% po malteru + 15% po skrami	B	4,39	Pečat br. 9 	40% po malteru + 50% po skrami + 10% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,16
Pečat br. 5 	70% po malteru + 30% po skrami	B	4,22	Pečat br. 10 	75% po malteru + 15% po skrami + 10% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,27

Tabela P15-14. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rasturu) i odmrazavanja (u vodi)

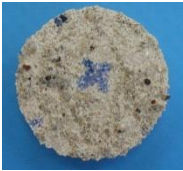









Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ10aM: Pečat br. 1 	50% po malteru + 40% po skrami + 10% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	3,24	Pečat br. 6 	85% po malteru + 15% po skrami	B	3,22
Pečat br. 2 	60% po malteru + 30% po skrami + 10% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	3,92	Pečat br. 7 	75% po malteru + 25% po skrami	B	3,74
Pečat br. 3 	60% po malteru + 40% po skrami	B	3,65	Pečat br. 8 	85% po malteru + 15% po skrami	B	3,40
Pečat br. 4 	85% po malteru + 15% po skrami	B	4,03	Pečat br. 9 	50% po malteru + 40% po skrami + 10% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	3,50
Pečat br. 5 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,20	Pečat br. 10 	35% po malteru + 45% po skrami + 20% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	3,37

Tabela P15-15. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ10bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ10bM: Pečat br. 1 	10% po malteru + 5% po skrami + 85% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,58	Pečat br. 6 	10% po malteru + 5% po skrami + 85% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,53
Pečat br. 2 	12% po malteru + 3% po skrami + 85% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,70	Pečat br. 7 	2% po malteru + 3% po skrami + 95% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,16
Pečat br. 3 	5% po malteru + 15% po skrami + 80% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,23	Pečat br. 8 	10% po malteru + 5% po skrami + 85% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,77
Pečat br. 4 	15% po malteru + 5% po skrami + 80% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,71	Pečat br. 9 	5% po malteru + 5% po skrami + 90% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,28
Pečat br. 5 	5% po malteru + 5% po skrami + 90% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,57	Pečat br. 10 	15% po malteru + 15% po skrami + 70% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	3,77

Tabela P15-16. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ20aM: Pečat br. 1 	20% po malteru + 75% po skrami + 5% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	4,47	Pečat br. 6 	80% po malteru + 20% po skrami	B	5,42
Pečat br. 2 	50% po malteru + 50% po skrami	B	4,69	Pečat br. 7 	70% po malteru + 30% po skrami	B	5,58
Pečat br. 3 	30% po malteru + 70% po skrami	B	5,01	Pečat br. 8 	35% po malteru + 60% po skrami + 5% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	4,38
Pečat br. 4 	35% po malteru + 65% po skrami	B	4,80	Pečat br. 9 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,59
Pečat br. 5 	30% po malteru + 60% po skrami + 10% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	4,31	Pečat br. 10 	40% po malteru + 30% po skrami + 30% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	4,31

Tabela P15-17. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera NZ20bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)











Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
NZ20bM: Pečat br. 1 	20% po skrami + 80% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,25	Pečat br. 6 	1% po malteru + 9% po skrami + 90% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,38
Pečat br. 2 	2% po malteru + 70% po skrami + 28% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	5,95	Pečat br. 7 	30% po skrami + 70% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	6,04
Pečat br. 3 	30% po skrami + 70% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,93	Pečat br. 8 	15% po malteru + 5% po skrami + 80% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	5,98
Pečat br. 4 	25% po malteru + 50% po skrami + 25% po kontaktu lepka i maltera	B/Y* (B)	5,31	Pečat br. 9 	25% po skrami + 75% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	5,76
Pečat br. 5 	15% po malteru + 45% po skrami + 40% po kontaktu lepka i maltera	B/Y*	4,77	Pečat br. 10 	20% po skrami + 80% po kontaktu lepka i maltera	B/Y	4,74

Tabela P15-18. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)


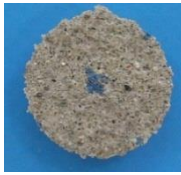


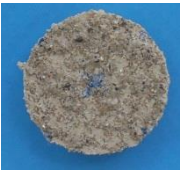


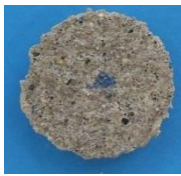


Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA10aM: Pečat br. 1 	80% po malteru + 20% po skrami	B	4,64	Pečat br. 6 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,52
Pečat br. 2 	80% po malteru + 20% po skrami	B	4,99	Pečat br. 7 	100% po malteru	B	4,88
Pečat br. 3 	75% po malteru + 25% po skrami	B	4,62	Pečat br. 8 	100% po malteru	B	5,07
Pečat br. 4 	80% po malteru + 20% po skrami	B	4,65	Pečat br. 9 	95% po malteru + 5% po skrami	B	5,18
Pečat br. 5 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,86	Pečat br. 10 	90% po malteru + 10% po skrami	B	4,51

Tabela P15-19. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA10bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)


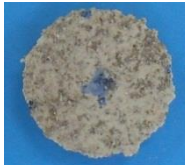



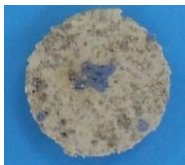



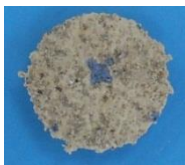
Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA10bM: Pečat br. 1 	40% po malteru + 30% po skrami + 30% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,32	Pečat br. 6 	40% po malteru + 30% po skrami + 30% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,56
Pečat br. 2 	40% po malteru + 30% po skrami + 30% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	3,77	Pečat br. 7 	60% po malteru + 15% po skrami + 25% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	5,11
Pečat br. 3 	60% po malteru + 20% po skrami + 20% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	3,92	Pečat br. 8 	30% po malteru + 30% po skrami + 40% po kontaktu lepka I maltera	B/Y*	4,03
Pečat br. 4 	40% po malteru + 30% po skrami + 30% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	3,94	Pečat br. 9 	60% po malteru + 20% po skrami + 20% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,52
Pečat br. 5 	40% po malteru + 20% po skrami + 40% po kontaktu lepka I maltera	B/Y*	3,69	Pečat br. 10 	50% po malteru + 25% po skrami + 25% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,25

Tabela P15-20. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20aM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)


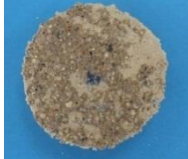




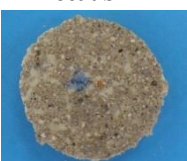













Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA20aM: Pečat br. 1 	50% po malteru + 30% po skrami + 20% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	3,87	Pečat br. 6 	60% po malteru + 20% po skrami + 20% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,49
Pečat br. 2 	45% po malteru + 20% po skrami + 35% po kontaktu lepka I maltera	B/Y*	4,07	Pečat br. 7 	80% po malteru + 20% po skrami	B	4,28
Pečat br. 3 	80% po malteru + 20% po skrami	B	4,32	Pečat br. 8 	95% po malteru + 5% po skrami	B	4,22
Pečat br. 4 	80% po malteru + 20% po skrami	B	4,62	Pečat br. 9 	85% po malteru + 15% po skrami	B	4,77
Pečat br. 5 	70% po malteru + 30% po skrami	B	4,22	Pečat br. 10 	60% po malteru + 25% po skrami + 15% po kontaktu lepka I maltera	B/Y* (B)	4,11

Tabela P15-21. Rezultati merenja čvrstoće prijanjanja pri zatezanju maltera FA20bM „pull-off“ metodom nakon izlaganja uzoraka ciklusima zamrzavanja (u NaCl zasićenom rastoru) i odmrazavanja (u vodi)

Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)	Pečat	Opis loma	Tip loma	f_h (MPa)
FA20bM: Pečat br. 1 	10% po malteru + 40% po skrami + 50% po kontaktu lepka i maltera	B/Y*	5.94	Pečat br. 6 	10% po malteru + 30% po skrami + 55% po kontaktu lepka i maltera + 5% po kontaktu pečata i skrame – nedozvoljeni lom	B/Y*	4.49
Pečat br. 2 	5% po malteru + 30% po skrami + 65% po kontaktu lepka i maltera	B/Y*	6.18	Pečat br. 7 	10% po malteru + 35% po skrami + 55% po kontaktu lepka i maltera	B/Y*	5.04
Pečat br. 3 	10% po malteru + 50% po skrami + 40% po kontaktu lepka i maltera	B/Y*	5.87	Pečat br. 8 	5% po malteru + 35% po skrami + 60% po kontaktu lepka I maltera	B/Y*	4.36
Pečat br. 4 	5% po malteru + 40% po skrami + 55% po kontaktu lepka I maltera	B/Y*	5.61	Pečat br. 9 	10% po malteru + 35% po skrami + 55% po kontaktu lepka I maltera	B/Y*	4.77
Pečat br. 5 	10% po malteru + 45% po skrami + 45% po kontaktu lepka I maltera	B/Y*	5.64	Pečat br. 10 	5% po malteru + 20% po skrami + 75% po kontaktu lepka I maltera	B/Y	5.35

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Утицај примене природног зеолита на трајност репаратурних цементних малтера
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
а) Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство и геодезију, Универзитет у Новом Саду б) Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду в) Лабораторија за кристалографију, Рударско-Геолошки факултет, Универзитет у Београду д) Институт заштите на раду, Нови Сад
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање је реализовано у оквиру пројекта које је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала у бетонским композитима, са оценом утицаја на животну средину, у циљу промоције одрживог грађевинарства у Србији – ТР 36017“, као и пројекта „Иновативна научна и уметничка истраживања из домена делатности Факултета техничких наука“.
1. Опис података
<p>1.1 Врста студије</p> <p>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</p> <p>Докторска дисертација.</p> <p><u>Предмет истраживања пројекта ТР 36017 су бетонски композити на бази индустријског, грађевинског и другог отпадног материјала. Кроз теоријска и експериментална истраживања утврђује се могућност замене природног агрегата у бетону коришћењем рециклираних домаћих отпадних материјала и замене дела цемента индустријским отпадом, секундарним и другим минералним материјалима.</u></p>

1.2 Врсте података

а) квантитативни

б) квалитативни

1.3. Начин прикупљања података

а) анкете, упитници, тестови

б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи

в) генотипови: навести врсту _____

г) административни подаци: навести врсту _____

д) узорци ткива: навести врсту _____

ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____

е) текст, навести врсту _____

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати сопствена експериментална истраживања _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Еxcel фајл, датотека _____ .xls _____

б) SPSS фајл, датотека _____

в) PDF фајл, датотека _____ .pdf _____

г) Текст фајл, датотека _____

д) JPG фајл, датотека _____ JPEG _____

е) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли _____ 3 _____

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) _____ Велики број _____

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) _____
- б) _____
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као ____ - _____

Напомене: ____ поновљање испитивања није резултат грешке већ чињенице да се одређивано својство материјала мења кроз време испитивања

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) *Да*

б) *Не*

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип _ На малтерима: одређивање чврстоће при притиску, капиларно упијања воде, скупљање услед сушења, отпорност на продор хлорида, отпорност на дејство сулфата и излуживање тешких метала. На пастама: XRD анализа и FTIR спектроскопија. На малтерима уграђеним на бетонску подлогу: чврстоћа приањања при затезању малтера *pull-off* методом, ограничено скупљање и термичка компатибилност – циклуси смрзавања и одмрзавања са потапањем у засићени раствор соли за одмрзавање. _____

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип _____

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Хидраулична преса капацитета 150 kN, ED-XRF спектрометар (*Spectro Xepos*), уређај за спектралну анализу (*Thermo-Nicolet Nexus 670 FTIR spectrometer*), уређај за рендгеноструктурну анализу (*Philips PW 1710*), уређај за вакумирање, сушница, пећ, клима-комора, вага, деформетар, аутоматска мешалица, калупи, потресни сто, уређај за *pull-off* (*Dyna Haftprüfer Pull-off Tester*,

Z16 proceq).

2.2 Квалитет података и стандарди

EN 12190, EN 196-1, EN 13057, SRPS B.C8.029, NT BUILD 492, ASTM C 1012, EN 1542, EN 12617-4, EN 13687-1, EN 12457-2.

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? _____
 - б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не
 - в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података
- _____

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Подаци у овом раду су резултат различитих експеримената. Квалитет, тј. поузданост добијених података се обезбеђује бирањем одговарајућег броја узорака тако да се при обради резултата могу применити статистичке методе. Расипање резултата у односу на одређену вредност се аналитички процењује након чега се резултат прихвата или одбацује. Поступак рада у сваком експерименту је или дефинисан одговарајућим стандардом/техничком регулативом или релевантном стручном литературом.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података је подразумевала физичку проверу (задатак докторанда), док је анализа такође била задатак докторанда, али је праћена и усмеравана од стране два ментора. Након тога су подаци уношени у матрицу.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса _____ <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf> _____

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- a) **Да**
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? **Да Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? **Да Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Тиана Миловић, tiana.milovic@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Тиана Миловић, tiana.milovic@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Тиана Миловић, tiana.milovic@uns.ac.rs

