

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Doktorski studij Građevinarstvo

Doktorski rad

Učinkovitost kemijskih dodataka za samocijeljenje na otpornost
betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Anita Gojević, mag.ing.aedif.

Osijek, travanj 2024. godine

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering

Doctoral dissertation

Efficiency of self-healing chemical additives on the freeze/thaw
resistance of concrete

Anita Gojević, M. Sc. in Civ. Eng.

Osijek, April, 2024

Prosudbena povjerenstva i bibliografski podaci

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada imenovano na 1. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 13. listopada 2021. godine:

1. Izv. prof. dr. sc. Marijana Hadzima-Nyarko, dipl. ing. građ, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (predsjednica)
2. Prof. dr. sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (članica)
3. Prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur, dipl. ing. građ. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet (članica),

Tema, mentorica i komentor doktorskog rada prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 3. redovitoj sjednici održanoj 8. prosinca 2021. godine.

Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada

Povjerenstvo za obranu doktorskog rada

Doktorski rad sadržava 250 stranica, 223 ilustracije, 73 tablice i 137 citiranih publikacija.

Mentorica doktorskog rada je prof. dr. sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl. ing. građ., Sveučilište Sjever, Odjel za graditeljstvo.

Komentor doktorskog rada je prof. dr. sc. Berislav Marković, dipl. ing. kem., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet za dentalnu medicinu i zdravstvo Osijek.

Istraživanje u okviru doktorskog rada pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

Izjava o akademskoj čestitosti

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je doktorski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem kako nisam prijavila doktorski rad s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Osijek, travanj 2024.

Anita Gojević, mag. ing. aedif.

Predgovor

U svojoj doktorskoj disertaciji bavim se novim, alternativnim načinima poboljšanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Većinu istraživanja provela sam na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek, ali i dio istraživanja na suradničkim institucijama. Ovim putem se zahvaljujem pojedincima s tih institucija koji su svojom dobrom voljom i entuzijazmom pridonijeli kvaliteti ovog rada, i to kako slijedi:

prof. dr. sc. Sandri Juradin s Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu,

prof. dr. sc. Ivani BanjadPečur i izv.prof.dr.sc. Marijani Serdar s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu,

Emiliji Barišić, dipl. inž. građ. iz Ascon instituta d.o.o. te

prof. dr. sc. Ákosu Kukovecz i doc. dr. sc. Imreu Szenti s Interdisciplinarnog centra izvrsnosti Sveučilišta u Szegedu.

Zahvaljujem se i svim kolegama s Građevinskog i arhitektonskog fakulteta u Osijeku na podršci prilikom izrade ove doktorske disertacije, posebno prof. dr. sc. Marijani Hadzima-Nyarko i doc. dr. sc. Marinu Grubišiću za njihovu pomoć pri provedbi ispitivanja na razini konstruktivnog elementa.

Hvala mojoj mentorici prof. dr. sc. Ivanki Netinger Grubeša na ostvarenim suradnjama s brojnim sudionicima tijekom izrade ove doktorske disertacije, na njezinom uloženom trudu, usmjeravanju i strpljenju. Hvala i mojem komentoru prof. dr. sc. Berislavu Markoviću na pomoći u interpretaciji rezultata istraživanja u području kemije.

Zahvaljujem se Osječko-baranjskoj županiji na financijskoj potpori za izradu eksperimentalnog dijela ove doktorske disertacije.

Hvala mojoj obitelji na njihovoj bezuvjetnoj podršci i razumijevanju, a posebno hvala baki Anici.

Bogu hvala na upornosti i strpljenju koje mi je podario.

Anita Gojević

Sažetak

Uzroci nastanka pukotina u betonu su različiti, ali bez obzira na njihovo podrijetlo, one uvijek štetno djeluju na trajnost betonskih konstrukcija i znatno utječu na povećavanje troškova njihova održavanja. Ovaj rad razmatra cikluse smrzavanja i odmrzavanja kao jedan od uzroka nastanka pukotina u betonu te pronalazi nove načine za unaprjeđenje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje. Rad se sastoji iz osam poglavlja; šest poglavlja koji prikazuju pregled stanja područja, jednog eksperimentalnog poglavlja na razini materijala, jednog eksperimentalnog poglavlja na razini konstrukcija i zaključka. U eksperimentalnom poglavlju na razini materijala je pripremljeno osam betonskih mješavina od čega šest mješavina uz $v/c=0,35$; referentna mješavina, mješavina s aerantom, dvije mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom (1 % i 3 % na masu cementa) i dvije mješavine sa samostalno pripremljenim mikrokapsulama (jezgra od toluen 2,4-diizocijanata, a opna od parafina) te dvije mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom (1 % i 3 % na masu cementa) uz $v/c=0,45$. Ispitivanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja provedeno je direktnim (ljuštenje i unutarnje oštećenje s i bez soli, faktor razmaka pora) i indirektnim (promjena dinamičkog modula elastičnosti, omjeri tlačne i vlačne čvrstoće te dubine prodora vode nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja) postupcima, a za potrebe interpretacije rezultata određeni su udio pora pojedine veličine živinom porozimetrijom, raspodjela pora i njihova povezanost mikrotomografijom te SEM/EDS analiza na uzorcima tretiranim i netretiranim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, kao i praćenje širine pukotina tijekom procesa samozacjeljivanja na uzorcima tretiranim i netretiranim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Kristalni hidrofilni dodaci su pokazali potencijal u poboljšanju otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Mikrokapsule su se također pokazale korisnim, no manje učinkovitosti nego kristalni hidrofilni dodaci. Na razini konstruktivnih elemenata izrađene su po dvije armiranobetonske grede od svake od po tri mješavine betona; referentna mješavina, mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka i mješavina s 1 % mikrokapsula. Po dvije grede su izložene ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, a po dvije nisu. Na gredama je praćena promjena dinamičkog modula elastičnosti i upijanje vode prilikom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, a nakon toga su grede tretirane i netretirane ciklusima smrzavanja i odmrzavanja opterećivane do sloma, pri čemu im je praćen progib, sekantna krutost, duktilnost i sila pri slomu te su isti stavljani u omjer. Na temelju rezultata je zaključeno i na razini konstruktivnih elemenata da primjena kristalnog hidrofilnog dodatka i mikrokapsula ima potencijala za unaprjeđenje otpornosti armiranobetonskih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

Ključne riječi: trajnost betona, pukotine, ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, kristalni hidrofilni dodaci, mikrokapsule, ljuštenje, faktor razmaka pora, dinamički modul elastičnosti, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, dubina prodora vode, udio pora pojedine veličine, raspodjela pora i njihova povezanost, SEM/EDS analiza, zacjeljivanje pukotina, progib, sekantna krutost, duktilnost, sila pri slomu

Abstract

The causes of cracks in concrete are different, but regardless of their origin, they always have a detrimental effect on the durability of concrete structures and significantly increase their maintenance costs. This paper considers freezing and thawing cycles as one of the causes of cracks in concrete and finds new ways to improve concrete's resistance to freezing and thawing. The paper consists of eight chapters; six chapters showing an overview of the state of the area, one experimental chapter at the level of materials, one experimental chapter at the level of structures and a conclusion. In the experimental section, eight concrete mixtures were prepared at the material level, six were mixtures with $v/c=0,35$; a reference mixture, a mixture with aerant, two mixtures with a crystalline hydrophilic additive (1 % and 3 % by mass of cement) and two mixtures with self-prepared microcapsules (core of toluene 2,4-diisocyanate and a shell of paraffin) and two mixtures with a crystalline hydrophilic additive (1 % and 3 % by mass of cement) with $v/c=0,45$. Testing of concrete resistance to freezing and thawing cycles was carried out by direct (scaling and internal damage with and without salt, pore spacing factor) and indirect procedures (change in dynamic modulus of elasticity, compressive and tensile strength ratios, and depth of water penetration after and before freezing and thawing cycles), and for the purposes of interpreting the results, the proportion of pores of a particular size was determined by mercury porosimetry, the distribution of pores and their connection by microtomography, and SEM/EDS analysis on samples treated and untreated by freezing and thawing cycles, as well as monitoring the width of cracks during the self-healing process on samples treated and untreated with freezing and thawing cycles. Crystalline hydrophilic admixtures have shown potential in improving concrete resistance to freeze-thaw cycles. Microcapsules have also been shown to be useful, but less effective than crystalline hydrophilic admixtures. At the level of structural elements, two reinforced concrete beams were made from each of the three concrete mixes; reference mixture, mixture with 1 % crystalline hydrophilic additive and mixture with 1 % microcapsules. Two of the beams are exposed to freezing and thawing cycles, and two of them are not. The changes in the dynamic modulus of elasticity and water absorption were monitored on the beams during exposure to freezing and thawing cycles, and after that, the beams treated and untreated by freezing and thawing cycles, were loaded until failure, while their deflection, secant stiffness, ductility and ultimate force were monitored and are shown in ratio. Based on the results, it was concluded at the level of structural elements that the application of crystalline hydrophilic additives and microcapsules has the potential to improve the resistance of reinforced concrete elements to freezing and thawing cycles.

Keywords: durability of concrete, cracks, freezing and thawing cycles, crystalline hydrophilic additives, microcapsules, scaling, pore spacing factor, dynamic modulus of elasticity, compressive strength, tensile strength, depth of water penetration, proportion of a particular size pores, distribution of pores and their connection, SEM/EDS analysis, crack healing, deflection, secant stiffness, ductility, ultimate force

Sadržaj

Predgovor	I
Sažetak	III
Abstract	IV
Sadržaj	VI
Popis slika	X
Popis tablica	XX
Popis kratica i simbola	XXIII
1. Pukotine i fenomen zacjeljivanja pukotina u betonu	1
1.1. Pukotine – uzroci nastanka i dopuštene širine	1
1.2. Pukotine kao posljedica smrzavanja i odmrzavanja	4
1.3. Pukotine kao posljedica smrzavanja i odmrzavanja	4
1.3.1. Autogeno zacjeljivanje pukotina	6
1.3.2. Unaprijeđeno autogeno zacjeljivanje pukotina	8
1.3.3. Autonomno zacjeljivanje pukotina	10
1.4. Troškovi održavanja građevina i opravdanost autonomnog zacjeljivanja	10
2. Samocijeljenje betona primjenom bakterija	12
3. Samocijeljenje betona primjenom kristalnih hidrofilnih dodataka	31
4. Samocijeljenje betona primjenom kapsula	63
5. Metode ocjene otpornosti betona i betonskih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	88
5.1. Ocjena otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	88
5.2. Načini poboljšanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	90
5.3. Ocjena otpornosti betonskih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	91
6. Eksperimentalni dio na razini materijala	96
6.1. Materijali	96
6.1.1. Svojstva agregata	96

6.1.2. Svojstva veziva	99
6.1.3. Svojstva dodataka betonu	100
6.1.4. Sastav betonskih mješavina	108
6.1.5. Svojstva svježeg betona	109
6.1.6. Tlačna čvrstoća uzoraka starih 28 dana.....	113
6.2. Direktni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ...	114
6.2.1. Mjerenje temperature u uzorcima/klima komora.....	114
6.2.2. Otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema HRS CEN 12390-9:2016	116
6.2.3. Otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema HRN CEN/TR 15177	123
6.2.4. Otpornost prema normi HRN EN 480-11:2005 - faktor razmaka pora	126
6.3. Indirektni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	127
6.3.1. Promjena dinamičkog modula elastičnosti uslijed smrzavanja i odmrzavanja	128
6.3.2. Promjena tlačne čvrstoće uslijed smrzavanja i odmrzavanja	131
6.3.3. Promjena vlačne čvrstoće savijanjem uslijed smrzavanja i odmrzavanja	133
6.3.4. Promjena dubine prodora vode uslijed smrzavanja i odmrzavanja	135
6.4. Interpretacija rezultata ispitivanja direktnih i indirektnih postupaka	139
6.4.1. Raspodjela pora živinom porozimetrijom	139
6.4.2. SEM/EDS analiza	141
6.4.3. Mikro CT analiza	148
6.4.4. Samocijeljenje pukotina	150

6.5. Ocjena učinkovitosti betonskih mješavina po ispitanom svojstvu otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	170
6.6. Procjena troškova pojedine mješavine betona	171
7. Eksperimentalni dio na razini konstrukcijskog elementa	175
7.1. Izmjere armiranobetonskih greda	175
7.2. Sastav i svojstva betona armiranobetonskih greda	175
7.3. Svojstva armaturnog čelika armiranobetonskih greda	181
7.4. Dimenzioniranje armiranobetonskih greda	186
7.5. Izrada armiranobetonskih greda	187
7.6. Otpornost armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	190
7.6.1. Izlaganje armiranobetonskih greda ciklusima smrzavanja i odmrzavanja	190
7.6.2. Promjena dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja	191
7.6.3. Određivanje preostale nosivosti i uporabljivosti armiranobetonskih greda nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja	193
7.6.3.1. Detalji nanošenja opterećenja.....	193
7.6.3.2. Rezultati ispitivanja armiranobetonskih greda	198
7.7. Ocjena učinkovitosti svake pojedine mješavine betona prema ispitanom svojstvu otpornosti betona i armiranobetonskih greda	221
8. Zaključak	224
Bibliografija	234

Popis slika

Slika 1.1. Značajni uzroci propadanja/oštećenja betonskih konstrukcija	1
Slika 1.2. Uobičajeni uzroci pojava pukotina u betonu	2
Slika 1.3. Betonske građevine sklone raspucavanju	2
Slika 1.4. Betonski elementi skloni raspucavanju	3
Slika 1.5. Najčešće metode popravka konstrukcija	5
Slika 1.6. Proces autogenog zacjeljivanja	6
Slika 1.7. Sistematizacija zacjeljivanja pukotina kod betona	8
Slika 1.8. Skica cijeljenja pukotina metodom elektrotaloženja	10
Slika 1.9. Građevine kod kojih bi autonomno cijeljenje pukotina bilo opravdano	11
Slika 2.1. Stvaranje kalcijevog karbonata na staničnoj stijenci bakterije	12
Slika 2.2. Mogući mehanizmi samocijeljenja cementnih materijala	13
Slika 2.3. Tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka cementnog morta s dodanim staničnim stijenrama B. subtilis u koncentraciji od 0,33 mg/ml (1x) ili 3,33 mg/ml (10x)	14
Slika 2.4. Tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka cementnog morta s dodanim umrtvljenim stanicama B. subtilis u koncentraciji od 0,33 mg/ml (1x) ili 33,33 mg/ml (100x)	14
Slika 2.5. Tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka cementnog morta s dodanim živim stanicama B. subtilis u koncentraciji od 0,33 mg/ml (1x) ili 33,33 mg/ml (100x)	15
Slika 2.6. Poroznost uzoraka cementnog morta s ili bez staničnih stijenci B. subtilis od 0,33 mg/ml (x1) koncentracije	15
Slika 2.7. Tlačna čvrstoća betona s i bez bakterija nakon 7, 14 i 28 dana	16
Slika 2.8. Vizualizacija ljekovitog proizvoda nakon 68 dana u vodi za: (a) kontrolni beton (b) beton s bakterijama	17
Slika 2.9. Primjena sredstva za samocijeljenje betona	20
Slika 2.10. Izrada betonskih uzoraka, iniciranje pukotina, ispitivanje vodopropusnosti	22
Slika 2.11. Proces zacjeljivanja pukotine u betonu: kontrolni beton (A), N-B (B), G-B (C), P-B (D), S-B E, H-B (F) i K-B (G)	23
Slika 2.12. Ispitivanje vodopropusnosti	24
Slika 2.13. Najveća zacijeljena širina pukotine tijekom vremena cijeljenja	25
Slika 2.14. Koeficijent propusnosti uzorka tijekom vremena cijeljenja	25
Slika 2.15. Razvoj tlačne čvrstoće ovisno o tehnici ugradnje bakterija	27
Slika 2.16. Zacjeljenje pukotina iniciranim u različitim vremenima	27
Slika 3.1. Tlačna čvrstoća uzoraka	34

Slika 3.2. Raspodjela pora pojedine veličine u uzorcima	35
Slika 3.3. Raspodjela pora pojedine veličine uzoraka nakon 100 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja	36
Slika 3.4. Gubitak mase uzoraka tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja	36
Slika 3.5. Gubitak tlačne čvrstoće uzoraka tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja	37
Slika 3.6. Raspodjela promjera pora nakon njegovanja smrzavanih uzoraka u vodi	38
Slika 3.7. Tlačna čvrstoća uzoraka i njezin oporavak nakon njegovanja smrzavanih uzoraka u vodi .	38
Slika 3.8. Samocijeljenje površinskih pukotina uzoraka	39
Slika 3.9. Proces iniciranja pukotina	40
Slika 3.10. Bočno brtvljenje uzorka Sikadurrom	41
Slika 3.11. Uređaj za mjerenje protoka vode (a) i njegovi dijelovi: manometar (b), brtveni prsten (c), pomoćna konstrukcija (d), pripremljeni uzorak (e)	41
Slika 3.12. Režimi njege uzoraka: kontinuirana uronjenost u vodu (a), kontakt s vodom (b), klima komora (c) i laboratorijski prostor (d)	42
Slika 3.13. Stopa zacjeljenja kod referentnog betona i CA betona u četiri režima vlažnosti: kontinuirana uronjenost u vodu (a), kontakt s vodom (b), klima komora (c) i laboratorijski prostor (d)	43
Slika 3.14. Prosječna stopa cijeljenja za svaku skupinu izloženosti betona (W.I. – uronjenost u vodi, W.C. – kontakt s vodom, H.C. – klima komora, A.E. – laboratorijski prostor)	43
Slika 3.15. Priprema za ispitivanje protoka vode i iniciranje pukotina	45
Slika 3.16. Količina samocijelećeg produkta po površini pukotine	45
Slika 3.17. Smanjenje brzine protoka vode mjereno testom protoka vode	46
Slika 3.18. Proces prije pucanja betonskog uzorka	47
Slika 3.19. Tlačna čvrstoća CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege	48
Slika 3.20. Tlačna čvrstoća CCA betona s pukotinama iniciranim u 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege	48
Slika 3.21. Postotak oporavka tlačne čvrstoće CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. i 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege	49
Slika 3.22. Vlačna čvrstoća cijepanjem CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege	49
Slika 3.23. Vlačna čvrstoća cijepanjem CCA betona s pukotinama iniciranim u 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege	50
Slika 3.24. Postotak oporavka vlačne čvrstoće cijepanjem CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. i 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege	50

Slika 3.25. Početna apsorpcija za betonske uzorke s i bez CA za različite periode njege i različite vodocementne omjere	54
Slika 3.26. Pregled opće metodologije rada autora Lauch i dr.	55
Slika 3.27. Cijeljenje betonskih mješavina: a) u vodi, b) kontinuiranom protoku vode, c) mokro/suhim ciklusima i okolnom zraku za kontrolnu mješavinu i d) na otvorenom	56
Slika 3.28. Makroskopske slike zacjeljivanja dijelova pukotina za SAP uzorke izložene u zatvorenom (uranjanje u vodu i mokro/suho) i na otvorenom	57
Slika 4.1. Mehanizam djelovanja kapsula u procesu samocijeljenja (a) pukotina prije samocijeljenja, (b) pukotina nakon samocijeljenja	63
Slika 4.2. Tlačna čvrstoća uzoraka betona u vremenu	64
Slika 4.3. Vlačna čvrstoća cijepanjem uzoraka betona u vremenu	64
Slika 4.4. Električna otpornost uzoraka betona u vremenu	65
Slika 4.5. Vlačna čvrstoća cijepanjem uzoraka betona nakon samocijeljenja	65
Slika 4.6. Kapilarno upijanje vode uzoraka betona nakon samocijeljenja	66
Slika 4.7. Izgled pukotina tijekom postupka samocijeljenja	66
Slika 4.8. Ilustracija strukture kapsula	67
Slika 4.9. Vlačne čvrstoće savijanjem mortova	70
Slika 4.10. Tlačne čvrstoće mortova	70
Slika 4.11. Moduli elastičnosti mortova	70
Slika 4.12. Ispitivanje upijanja vode mortova	71
Slika 4.13. Koeficijenti redukcije upijanja vode mortova sa SS01 kapsulama (a) i SS02 kapsulama (b)	71
Slika 4.14. Vlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula	72
Slika 4.15. Tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula	72
Slika 4.16. Koeficijent prodora klorida uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula	73
Slika 4.17. Relativna tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula pri njezi na sobnoj temperaturi	73
Slika 4.18. Relativna tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula pri njezi 10 minuta u mikrovalnoj, a potom na sobnoj temperaturi	74
Slika 4.19. Relativna tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula pri njezi 10 minuta u mikrovalnoj, a potom na sobnoj temperaturi/vlažnoj komori	74
Slika 4.20. Vlačna čvrstoća savijanjem uzoraka	75
Slika 4.21. Tlačna čvrstoća uzoraka	76
Slika 4.22. Koeficijent prodora klorida	76

Slika 4.23. Normalizirane učinkovitosti cijeljenja pojedinih mješavina u: a) vodi, b) otopini zasićenoj Ca(OH)_2	77
Slika 4.24. Tri različite vrste kapsula (A: tip A: dvostruka kapsula paralelnog stila; B: tip B: dvostruka kapsula u kontaktu s tijelom; C: tip C: koncentrična kapsula)	81
Slika 4.25. Izrada greda s kapsulama: a) pričvršćivanje kapsula od poliuretana na žičanu mrežu, b) kapsule od poliuretana na mreži, c) raspored armature u oplati	83
Slika 4.26. Postupak iniciranja pukotina na gredama	83
Slika 4.27. Koeficijent cijeljenja pukotina određene širine	84
Slika 4.28. Razni površinski tretmani primijenjeni na PMMA kapsule	85
Slika 4.29. Prosječna apsorpcija vode kao funkcija kvadratnog korijena vremena (a) i koeficijenta apsorpcije (b) za svaku od serija	86
Slika 5.1. Temperaturne promjene u jednom ciklusu smrzavanja/odmrzavanja	91
Slika 5.2. Uređaj za prethodno opterećivanje greda uz istodobno smrzavanje / odmrzavanje	93
Slika 5.3. Shema opterećivanja greda na savijanje u dvije točke	93
Slika 5.4. Shematski prikaz prethodnog opterećivanja greda uz istodobno smrzavanje/odmrzavanje	94
Slika 6.1. Frakcija agregata korištene za izradu betonskih mješavina	96
Slika 6.2. Krivulje prosijavanja frakcija, ciljana i stvarna kumulativna krivulja agregata	98
Slika 6.3. Priprema uzoraka za ispitivanje specifične površine	98
Slika 6.4. Priprema uzoraka za ispitivanje i uređaj za određivanje specifične površine BET metodom	99
Slika 6.5. Superplastifikator Visco Crete 5380 I	100
Slika 6.6. Izgled kristalnog hidrofilnog dodatka	100
Slika 6.7. Postupak proizvodnje mikrokapsula	102
Slika 6.8. Optički mikroskop	103
Slika 6.9. Izgled mikrokapsula pod optičkim mikroskopom	103
Slika 6.10. FTIR spektrofotometar	104
Slika 6.11. FTIR analiza parafina	104
Slika 6.12. FTIR analiza mikrokapsula	105
Slika 6.13. Struktura TDI-a	105
Slika 6.14. TGA/DSC uređaj	106
Slika 6.15. TGA/DSC analiza parafina	106
Slika 6.16. TGA/DSC analiza mikrokapsula	107
Slika 6.17. Izgled mikrokapsula	108

Slika 6.18. Određivanje konzistencije betona slijeganjem	109
Slika 6.19. Određivanje udjela pora u betonu	109
Slika 6.20. Određivanje gustoće svježeg betona	110
Slika 6.21. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona	113
Slika 6.22. Kocke betona s ugrađenim termoparovima	115
Slika 6.23. Termoparovi iz kocaka betona u klima komori spojeni na uređaj za prikupljanje podataka	115
Slika 6.24. Rezultati ispitivanja temperature u kockama betona tijekom izloženosti ciklusima smrzavanja/odmrzavanja	116
Slika 6.25. Plohe betona za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja	117
Slika 6.26. Plohe betona pripremljeni za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja	117
Slika 6.27. Uzorci betona u komori za smrzavanje i odmrzavanje	118
Slika 6.28. Ispitivanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja-ljuštenje	118
Slika 6.29. Rezultati ispitivanja gubitaka mase ljuštenjem uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli	119
Slika 6.30. Rezultati ispitivanja količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli	120
Slika 6.31. Rezultati ispitivanja gubitaka mase ljuštenjem uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli	121
Slika 6.32. Rezultati ispitivanja količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli	122
Slika 6.33. Ispitivanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema normi-unutarnja oštećenja	123
Slika 6.34. Rezultati ispitivanja unutarnjih oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli	124
Slika 6.35. Rezultati ispitivanja unutarnjih oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli	125
Slika 6.36. Pripremljeni uzorci za ispitivanje faktora razmaka pora	126
Slika 6.37. Uređaj za određivanje faktora razmaka pora – Rapid Air 457	126
Slika 6.38. Komora za ispitivanje kocaka i prizmi betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	127
Slika 6.39. Kocke i prizme u komori za ispitivanje betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	128
Slika 6.40. Rezultati ispitivanja relativnog dinamičkog modula elastičnosti betonskih kocki svih mješavina tijekom 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja	129

Slika 6.41. Omjer dinamičkog modula elastičnosti betonskih kocki svih mješavina prije i nakon 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja	129
Slika 6.42. Rezultati ispitivanja relativnog dinamičkog modula elastičnosti betonskih kocki svih mješavina tijekom 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja	130
Slika 6.43. Omjer dinamičkog modula elastičnosti betonskih prizmi svih mješavina prije i nakon 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja	131
Slika 6.44. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja	132
Slika 6.45. Omjer tlačne čvrstoće betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja	133
Slika 6.46. Ispitivanje vlačne čvrstoće betona savijanjem	134
Slika 6.47. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja	134
Slika 6.48. Omjer vlačne čvrstoće savijanjem betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja	135
Slika 6.49. Ispitivanje kocaka betona na prodor vode pod tlakom	136
Slika 6.50. Uzorci nakon ispitivanja prodora vode pod tlakom	137
Slika 6.51. Dubina prodora vode svih mješavina prije i nakon smrzavanja	137
Slika 6.52. Omjer dubine prodora vode pod tlakom svih mješavina nakon i prije smrzavanja	138
Slika 6.53. Grafički prikaz poroznosti prema veličini pora	139
Slika 6.54. Logaritamski prikaz volumena pora u odnosu na veličinu pora	140
Slika 6.55. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 500x prije smrzavanja i odmrzavanja	141
Slika 6.56. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 2500x prije smrzavanja i odmrzavanja	142
Slika 6.57. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 10000x prije smrzavanja i odmrzavanja	143
Slika 6.58. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 500x poslije smrzavanja i odmrzavanja	144
Slika 6.59. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 2500x poslije smrzavanja i odmrzavanja	145
Slika 6.60. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 10000x poslije smrzavanja i odmrzavanja	146
Slika 6.61. Rezultati EDS analize za mješavine M1, M3 i M5	148
Slika 6.62. Ispitivanje betonske prizme na vlak savijanjem (lijevo), označavanje betonske prizme nakon ispitivanja na vlak savijanjem (desno)	150
Slika 6.63. Betonske kocke mješavine M7 dimenzija 10x10 cm	151
Slika 6.64. Iniciranje pukotina ispitivanjem tlačne čvrstoće kocke mješavine M7 dimenzija 10x10 cm, nakon 56 ciklusa smrzavanja	151
Slika 6.65. Samocijeljenje uzoraka mješavine M3 u vodi	151
Slika 6.66. Označavanje i mjerenje širine pukotina na kockama dimenzija 10x10 cm – M7, nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja prije samocijeljenja	152

Slika 6.67. Mješavina M1 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	152
Slika 6.68. Mješavina M1 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	152
Slika 6.69. Mješavina M2 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	153
Slika 6.70. Mješavina M2 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	153
Slika 6.71. Mješavina M3 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	153
Slika 6.72. Mješavina M3 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	154
Slika 6.73. Mješavina M4 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	154
Slika 6.74. Mješavina M4 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	154
Slika 6.75. Mješavina M5 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	155
Slika 6.76. Mješavina M5 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	155
Slika 6.77. Mješavina M6 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	155
Slika 6.78. Mješavina M6 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	156
Slika 6.79. Mješavina M7 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	156
Slika 6.80. Mješavina M7 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	156
Slika 6.81. Mješavina M8 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	157
Slika 6.82. Mješavina M8 nakon smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)	157
Slika 7.1. Betonske kocke izmjera 15x15x15 cm	176

Slika 7.2. Promjena dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na kockama	177
Slika 7.3. Promjena upijanja vode tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na kockama	178
Slika 7.4. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona	179
Slika 7.5. Ispitivanje poprečne armature na kidalici Shimadzu	182
Slika 7.6. Ispitivanje uzdužne armature na kidalici Shimadzu	182
Slika 7.7. Ispitani uzorci uzdužne armature	183
Slika 7.8. Grafički prikaz prosječnih rezultata ispitivanja točnog i inženjerskog naprezanja i deformacije poprečne armature	184
Slika 7.9. Grafički prikaz prosječnih rezultata ispitivanja točnog i inženjerskog naprezanja i deformacije uzdužne armature	184
Slika 7.10. a) Shema numeričkog modela u SeismoStruct-u, b) shema poprečnog presjeka greda s usvojenom armaturom	186
Slika 7.11. Odnos ukupne vertikalne sile i progiba na polovini raspona (preliminarni nelinearni numerički model upotrijebljen za dimenzioniranje i proračun; Base shear – smicanje baze, displacement - pomak)	187
Slika 7.12. Shema uzdužnih i poprečnih šipki armature za izvedbu greda (prikazane količine su za svih 12 greda)	187
Slika 7.13. 3D prikaz oplata	188
Slika 7.14. Oplata i armaturni koševi gredica	188
Slika 7.15. Svježi beton u oplati	189
Slika 7.16. Raskalupljene grede referentne mješavine	189
Slika 7.17. Promjena dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na armiranobetonskim gredama	191
Slika 7.18. Promjena upijanja vode tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na armiranobetonskim gredama	192
Slika 7.19. Statički sustav ispitivanja armiranobetonskih greda	193
Slika 7.20. Ispitivanje grede na savijanje s pomoću Shimadzu kidalice	194
Slika 7.21. Plan – pozicija mjernih uređaja na gredama	195
Slika 7.22. Karakteristična ovojnica ponašanja armiranobetonskih greda u obliku sila-progib, s naznačenim ključnim točkama ponašanja	196
Slika 7.23. Izgled grede nakon sloma uslijed čistog savijanja	198
Slika 7.24. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (netretirana mješavina R)	200

Slika 7.25. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (netretirana mješavina R)	200
Slika 7.26. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina R – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	201
Slika 7.27. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina R– nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	201
Slika 7.28. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M1 - netretirana)	202
Slika 7.29. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M1– netretirana)	202
Slika 7.30. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M1 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	203
Slika 7.31. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M1 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	203
Slika 7.32. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M2– netretirana)	204
Slika 7.33. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M2– netretirana)	204
Slika 7.34. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M2 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	205
Slika 7.35. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M2 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	206
Slika 7.36. Usporedba ponašanja AB greda uslijed čistog savijanja za referentnu mješavinu R i grede R-P (netretirani uzorak) i R-T (tretirani uzorak) s prikazom karakterističnih točaka ponašanja	207
Slika 7.37. Usporedba ponašanja AB greda uslijed čistog savijanja za mješavinu M1 i grede M1-P (netretirani uzorak) i M1-T (tretirani uzorak) s prikazom karakterističnih točaka ponašanja	207
Slika 7.38. Usporedba ponašanja AB greda uslijed čistog savijanja za mješavinu M2 i grede M2-P (netretirani uzorak) i M2-T (tretirani uzorak) s prikazom karakterističnih točaka ponašanja	208
Slika 7.39. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz srednje vrijednosti ključnih točaka ponašanja (za sve tri mješavine)	209
Slika 7.40. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz srednje vrijednosti ključnih točaka ponašanja (za sve tri mješavine nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	209

Slika 7.41. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz srednje vrijednosti ključnih točaka ponašanja (za sve tri mješavine prije i nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)	210
Slika 7.42. Sekantna krutost tretiranih i netretiranih greda	211
Slika 7.43. Omjer sekantne krutosti tretiranih i netretiranih greda	212
Slika 7.44. Duktilnost μ_1 tretiranih i netretiranih greda	213
Slika 7.45. Omjer duktilnost μ_1 tretiranih i netretiranih greda	213
Slika 7.46. Duktilnost μ_2 tretiranih i netretiranih greda	214
Slika 7.47. Omjer duktilnost μ_2 tretiranih i netretiranih greda	214
Slika 7.48. Maksimalna sila tretiranih i netretiranih greda	215
Slika 7.49. Omjer maksimalne sile tretiranih i netretiranih greda	216
Slika 7.50. Progib pri maksimalnoj sili tretiranih i netretiranih greda	217
Slika 7.51. Omjer progiba pri maksimalnoj sili tretiranih i netretiranih greda	217
Slika 7.52. Sila pri slomu tretiranih i netretiranih greda	218
Slika 7.53. Omjer sila pri slomu tretiranih i netretiranih greda	218
Slika 7.54. Progib pri slomu tretiranih i netretiranih greda	219
Slika 7.55. Omjer progiba pri slomu tretiranih i netretiranih greda	219

Popis tablica

Tablica 1.1. Dopuštene širine pukotina prema različitim standardima za betonske/armiranobetonske građevine	3
Tablica 2.1. Betonske mješavine i njihova svrha	18
Tablica 2.2. Prosječna tlačna čvrstoća betonskih mješavina	18
Tablica 2.3. Prosječna vlačna čvrstoća cijepanjem betonskih mješavina	18
Tablica 2.4. Prosječno vrijeme samocijeljenja betonskih mješavina	19
Tablica 2.5. Mješavine korištene za oblaganje granula EP-a	20
Tablica 2.6. Sastav mješavina betona	21
Tablica 3.1. Sastav betonskih mješavina	44
Tablica 3.2. Vrsta, broj i uvjeti očvršćivanja uzoraka korištenih u različitim metodama ispitivanja	51
Tablica 3.3. Klasifikacija betona s obzirom na prodor klorida	52
Tablica 3.4. Sažetak provedenih rezultata ispitivanja indikatora trajnosti	52
Tablica 3.5. Izmjerena širina pukotine, početni protok te omjer zacjeljivanja	52
Tablica 3.6. Sastavi mješavina	61
Tablica 3.7. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg i očvrsllog betona	62
Tablica 4.1. Sastav kapsula	68
Tablica 4.2. Sastav mješavina morta (kg/m ³)	68
Tablica 6.1. Numerički granulometrijski sastav agregata	97
Tablica 6.2. Ciljani kumulativni sastav agregata	97
Tablica 6.3. Stvarni kumulativni sastav agregata	97
Tablica 6.4. Specifična površina punila određena BET metodom	99
Tablica 6.5. Specifična površina cementa određena BET metodom	99
Tablica 6.6. Specifična površina kristalnog hidrofilnog dodatka određena BET metodom	101
Tablica 6.7. Sastav svih betonskih mješavina za 1 m ³ betona	108
Tablica 6.8. Rezultati ispitivanja svježeg betona	110
Tablica 6.9. Planirana ispitivanja betona i otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja .	111
Tablica 6.10. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona nakon 28. dana očvršćavanja	113
Tablica 6.11. Faktor razmaka pora	127
Tablica 6.12. Rezultati živine porozimetrije za nesmrzavane uzorke te smrzavane i odmrzavane uzorke	140
Tablica 6.13. Udio otvorenih i zatvorenih pora te ukupan udio pora u očvrslim betonskim uzorcima koji nisu izloženi ciklusima smrzavanja/odmrzavanja	148

Tablica 6.14. Udio otvorenih i zatvorenih pora te ukupan udio pora u očvrslim betonskim uzorcima izloženih ciklusima smrzavanja/odmrzavanja	148
Tablica 6.15. Promjena ukupnog udjela pora u očvrslim betonskim uzorcima uzrokovana smrzavanjem/odmrzavanjem	149
Tablica 6.16. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M1	158
Tablica 6.17. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M1	158
Tablica 6.18. Samocijeljenje pukotina mješavine M1	159
Tablica 6.19. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M2	159
Tablica 6.20. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M2	160
Tablica 6.21. Samocijeljenje pukotina mješavine M2	160
Tablica 6.22. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M3	161
Tablica 6.23. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M3	161
Tablica 6.24. Samocijeljenje pukotina mješavine M3	162
Tablica 6.25. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M4	162
Tablica 6.26. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M4	163
Tablica 6.27. Samocijeljenje pukotina mješavine M4	163
Tablica 6.28. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M5	164
Tablica 6.29. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M5	164
Tablica 6.30. Samocijeljenje pukotina mješavine M5	165
Tablica 6.31. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M6	165
Tablica 6.32. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M6	166
Tablica 6.33. Samocijeljenje pukotina mješavine M6	166
Tablica 6.34. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M7	167
Tablica 6.35. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M7	167
Tablica 6.36. Samocijeljenje pukotina mješavine M7	168
Tablica 6.37. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M8	168
Tablica 6.38. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M8	169
Tablica 6.39. Samocijeljenje pukotina mješavine M8	169
Tablica 6.40. Sumirani prikaz učinkovitosti betonskih mješavina za sve metode ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	170
Tablica 6.41. Cijena mješavine M1 za 1 m ³ betona	171
Tablica 6.42. Cijena mješavine M2 za 1 m ³ betona	172
Tablica 6.43. Cijena mješavine M3 za 1 m ³ betona	172
Tablica 6.44. Cijena mješavine M4 za 1 m ³ betona	172

Tablica 6.45. Cijena mješavine M5 za 1 m ³ betona	173
Tablica 6.46. Cijena mješavine M6 za 1 m ³ betona	173
Tablica 6.47. Cijena mješavine M7 za 1 m ³ betona	173
Tablica 6.48. Cijena mješavine M8 za 1 m ³ betona	174
Tablica 6.49. Cijene svih mješavina za 1 m ³ betona	174
Tablica 7.1. Sastav svih betonskih mješavina za 1 m ³ betona	176
Tablica 7.2. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka betona u starosti 28 dana (1. skupina uzoraka)	179
Tablica 7.3. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja starih 56 dana (2. skupina uzoraka)	179
Tablica 7.4. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka betona ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi starih 56 dana (3. skupina uzoraka)	180
Tablica 7.5. Proračunati statički modul elastičnosti uzoraka betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja starih 56 dana (2. skupina uzoraka)	180
Tablica 7.6. Proračunati statički modul elastičnosti uzoraka betona ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi starih 56 dana (3. skupina uzoraka)	180
Tablica 7.7. Pojedinačne i srednje vrijednosti modula elastičnosti poprečne i uzdužne armature	185
Tablica 7.8. Sumirani prikaz učinkovitosti betona i armiranobetonskih greda za sve metode	221

Popis kratica i simbola

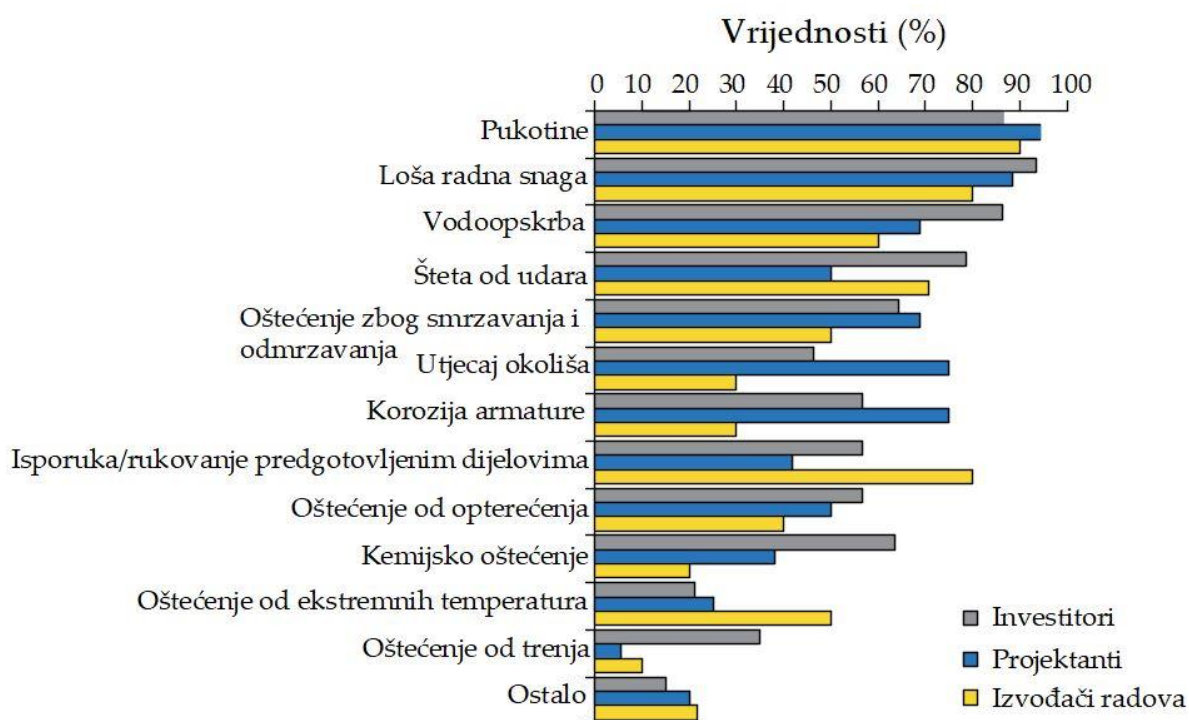
k	koeficijent propusnosti
l_{sred}	prosječna dužina pukotine s obje strane uzorka
w_{sred}	prosječna širina pukotine
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
RCP	<i>Rapid Chloride Permeability</i>
SEM	Scanning electron microscopy
XRD	<i>X-ray diffraction</i>
FRC	<i>Fibre reinforced concrete</i>
CA	<i>Crystalline admixture</i>
SAP	<i>Super absorbent polymer</i>
EDS	<i>Energy Dispersive X-ray Spectrometer</i>
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
BET	Brunauer–Emmett–Teller
TDI	toluen diizocijanat
PFTBA	perfluorotributulamin
TGA/DSC	<i>Thermogravimetric Analysis/Differential Scanning Calorimetry</i>
DRIFTS	<i>Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy</i>
T	transmitancija
$\bar{\nu}$	valni broj
Mikro CT	<i>micro computed tomography</i>
E_{cs}	statički modul elastičnosti
f_{ck}	karakteristična tlačna čvrstoća betona
ε_t	točna deformacija
ε_I	inženjerska deformacija

σ_t	točno naprezanje
σ_I	inženjersko naprezanje
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
D_v	vrijednosti pomaka traverze kidalice
F_c	sila pri prijelazu iz elastičnog u plastičnog ponašanje
d_c	progib pri prijelazu iz elastičnog u plastičnog ponašanje
F_y	sila pri dosezanju granice tečenja glavne uzdužne armature
d_y	progib pri dosezanju granice tečenja glavne uzdužne armature
$F_{\max}$	maksimalna dosegnuta sila
$d_{\max}$	progib pri maksimalnoj dosegnutoj sili
F_u	sila pri slomu
d_u	najveći ostvareni pomak pri slomu
$k_{\sec}$	sekantna krutost
μ	duktilnost
μ_1	duktilnost iskazana odnosom progiba pri maksimalnoj nosivosti grede
μ_2	duktilnost iskazana odnosom progiba pri ultimativnoj nosivosti grede

1. Pukotine i fenomen zacjeljivanja pukotina u betonu

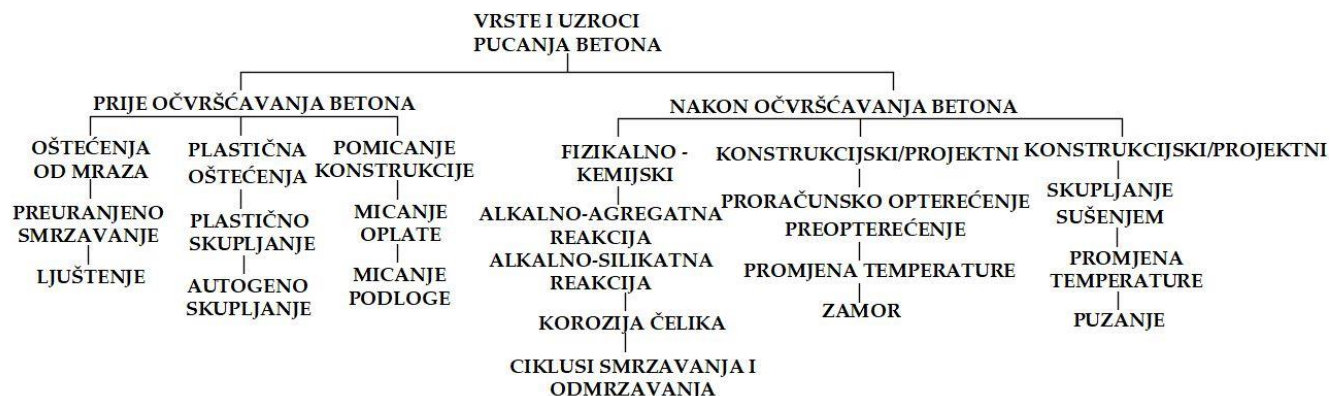
1.1. Pukotine – uzroci nastanka i dopuštene širine

Pukotine u betonu (i armiranom betonu) su prilično česta pojava. U nekim situacijama pukotine u betonu ne štete i potpuno su prihvatljive. U ostalim situacijama su ozbiljni nedostaci zato što negativno utječu na čvrstoću, funkciju ili izgled betona. Gardner i dr. [1] su proveli istraživanje prema kojem je pojava pukotina jedan od glavnih uzroka oštećenja / propadanja konstrukcija koje su prijavili izvođači, projektanti i investitori (Slika 1.1).



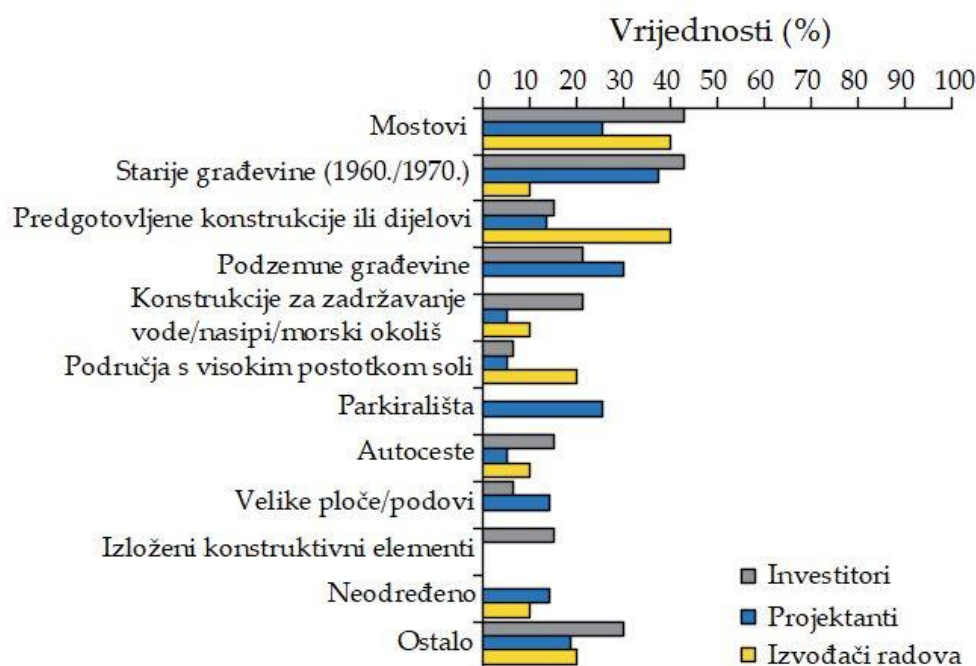
Slika 1.1. Značajni uzroci propadanja/oštećenja betonskih konstrukcija [1]

„Ostalo“ na slici 1.1. podrazumijeva ekspanziju uslijed alkalno silikatne reakcije, oštećenja uzrokovana solima i sulfatima, oštećenja uslijed opožarivanja te situaciju kada su svojstva ugrađenog betona bolja od zahtijevanih svojstava betona te je došlo do raspucavanja zbog krtosti. Golewski [2] uzroke nastanka pukotina sistematizira kako je prikazano na Slici 1.2.



Slika 1.2. Uobičajeni uzroci pojava pukotina u betonu [2]

Građevine najsklonije raspucavanju prema [1] su prikazane slikom 1.3., a elementi najskloniji raspucavanju [1] slikom 1.4.



Slika 1.3. Betonske građevine sklone raspucavanju [1]

Ostalo uključuje: kolnike aerodroma, pilote u tlu i beton izliven preko njih, potporne zidove, kanalizacijske konstrukcije, ojačane konstrukcije koje sadrže spojeve.



Slika 1.4. Betonski elementi skloni raspucavanju [1]

Ostalo uključuje: servisne kanale (željeznica), stepenice, potporne zidove, beton koji se koristi kao zaštita od požara, potporne zidove, prednje zidove tunela, područja visokog zagađenja, zračne luke na Bliskom istoku ili u drugim teškim okruženjima, spojeve, poluspojeve, objekte neposredno iznad pruge (cijevni tuneli).

S obzirom na to da je beton vrlo osjetljiv na pukotine, kemikalije (kisele kiše i soli itd.) vrlo lako prodru u njega. Raspucavanje je jedan od važnih uzroka propadanja betona i smanjenja njegove trajnosti. I dok neki smatraju kako je i mala pukotina opasna dok drugi smatraju kako su pukotine određene širine dopuštene. Tablica 1.1. navodi dopuštene širine pukotina prema različitim standardima.

Tablica 1.1. Dopuštene širine pukotina prema različitim standardima za betonske/armiranobetonske građevine [3]

Reference	Uvjeti izloženosti	Širina pukotine (mm)
ACI odbor 224 [4]	Suhi zrak ili zaštitna membrana	0,41
	Vlažnost, vlažan zrak, tlo	0,30
	Kemikalije za odmrzavanje	0,18
	Morska voda i raspršivanje morskom vodom, vlaženje i sušenje	0,15
	Konstrukcije za zadržavanje vode	0,10
AASHTO LRFD [5]	Korozija nije problem	0,43
	Korozija je problem	0,32
Eurokod 2 [6]	Sve klase osim X0 i XC1	0,30
Eurokod 2 [6]	Razred X0 (bez rizika od korozije)	0,40
	Razred XC1 (korozija izazvana karbonizacijom - suho ili trajno mokro)	
kod fib-modela [7]	Razred X0 (bez rizika od korozije) i XC (korozija izazvana karbonizacijom)	0,30

kod fib-modela [7]	XD (korozija izazvana kloridima koji nisu iz morske vode), XS (korozija izazvana kloridima iz morske vode) i CF (priključak za smrzavanje i odmrzavanje)	0,20
BS-8110 [8]	Nema opasnosti od korozije ili propadanja/suho ili trajno mokro Svi ostali uvjeti	0,40
		0,30

Pukotine u betonu uključuju površinske i unutarnje pukotine-mikropukotine. Površinske pukotine mogle bi se sanirati kemijskim sredstvima, injektiranjem i premazivanjem materijala, ali popravljani sloj površine pukotina lako može otpasti nakon određenog razdoblja, dok su one unutarnje iznimno nepristupačne.

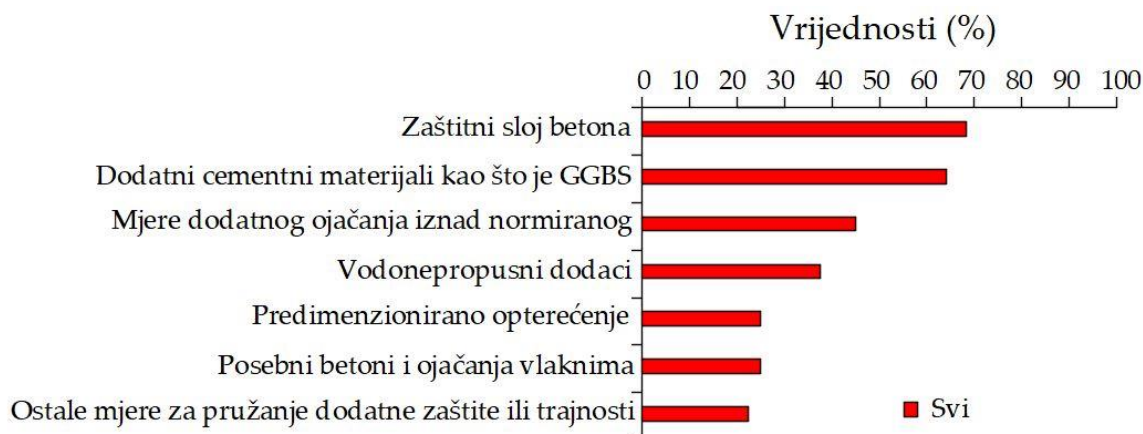
1.2. Pukotine kao posljedica smrzavanja i odmrzavanja

Trajnost građevine je jedan od glavnih zahtjeva koji se postavlja na građevne materijale. Jedan od glavnih čimbenika umanjenja trajnosti materijala smatraju se ciklusi smrzavanja i odmrzavanja [9]. Voda prisutna u materijalu prilikom pada temperature ispod ništice se smrzava i prelazi u led koji ima veći volumen od same vode iz koje je nastao, a tako formiran led stvara naprezanja na stijenke materijala [10] što uslijed ponavljanih ciklusa smrzavanja/odmrzavanja dovodi do oštećenja materijala. Takva se oštećenja kod cementnih kompozita javljaju ili u obliku površinskog ljuštenja ili u obliku unutarnjeg raspucavanja [11] tj. stvaranja pukotina u unutrašnjosti cementnog kompozita.

1.3. Pukotine kao posljedica smrzavanja i odmrzavanja

Pukotine u betonu možda neće utjecati na betonske konstrukcije u ranim fazama, ali sigurno mogu utjecati na njihov životni vijek. Godišnje se u svijetu izdvaja znatna količina novca za popravak postojećih betonskih konstrukcija. Razvijene zemlje poput SAD-a, Njemačke, Južne Koreje itd. suočavaju se sa značajnim količinama propadanja betonskih konstrukcija. Zbog toga troše više novca na održavanje i

popravak nego na izgradnju novih građevina [1]. Najčešće metode popravaka građevina su prikazane Slikom 1.5.



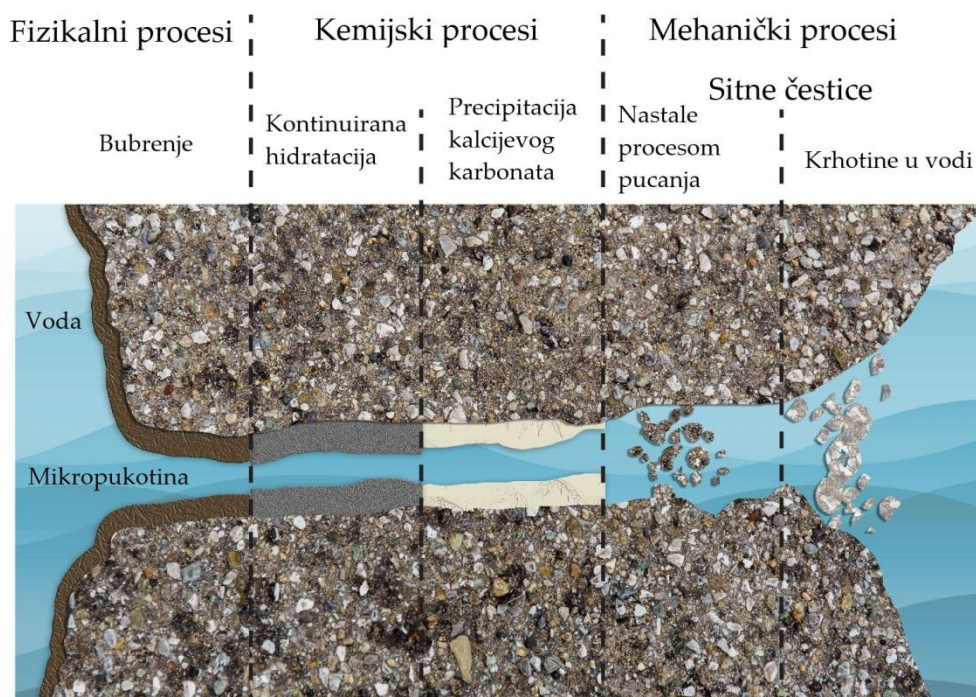
Slika 1.5. Najčešće metode popravka konstrukcija [1]

Ostalo uključuje: očvršćivanje u vodi (gotovi elementi), katodnu zaštitu, inhibitore korozije, odvojeni vodonepropusni sloj preko originalnog betonskog sloja, također premaz za sprječavanje prodora soli, sredstva za viskoznost, ojačanje od nehrđajućeg čelika, kemijske obrade, modeliranje trajnosti.

Gotovo svi slučajevi popravka ne povećavaju životni vijek konstrukcije s obzirom na iznos novca potrošenog na njih. Pogoršanje struktura ne samo da utječe na ekonomiju zemlje nego utječe na nju socijalno i ekološki. Gotovo jedna trećina ispitanika studije provedene od strane Garner i dr. [1] istaknula je nezadovoljstvo postojećim metodama popravaka konstrukcije te iskazalo interes za uvođenjem novih metoda popravaka u vidu samooporavka.

1.3.1. Autogeno zacjeljivanje pukotina

Autogeno zacjeljivanje je zapravo prirodno zacjeljivanje i može biti uzrokovano fizičkim, kemijskim i mehaničkim procesima kao što je to prikazano Slikom 1.6. [12, 13].



Slika 1.6. Proces autogenog zacjeljivanja

Bubrenje betona je spor i djelomično reverzibilan proces uzrokovan upijanjem vode od strane cementnog kamena. Pukotina zacijeljena isključivo ovim načinom može ponovno procuriti. Prema Edwardsenu [14], maksimalna širina pukotina zacijeljena ovim mehanizmom iznosi 100 μm kada je beton kontinuirano u kontaktu s vodom. Kontinuirana hidratacija je zapravo hidratacija nehidratiziranih čestica cementa u betonu, a nehidratizirane čestice čine čak do 50 % mase cementa u konvencionalnom betonu [15]. Ako se beton počne raspucavati, nehidratizirane čestice cementa reagiraju s ulaznom vodom. Ova reakcija ponovno započinje proces hidratacije i stvaraju produkte hidratacije koji će popuniti pukotine. Ovaj mehanizam zacjeljivanja je izraženiji kod betona manje starosti nego betona veće starosti. Prema Edwardsenu [14], ovaj mehanizam cijeljenja ima minimalan učinak u procesu

cijeljenja. Yuan i dr. [16] tvrde da je ovaj mehanizam cijeljenja najučinkovitiji u prvih 7 dana cijeljenja.

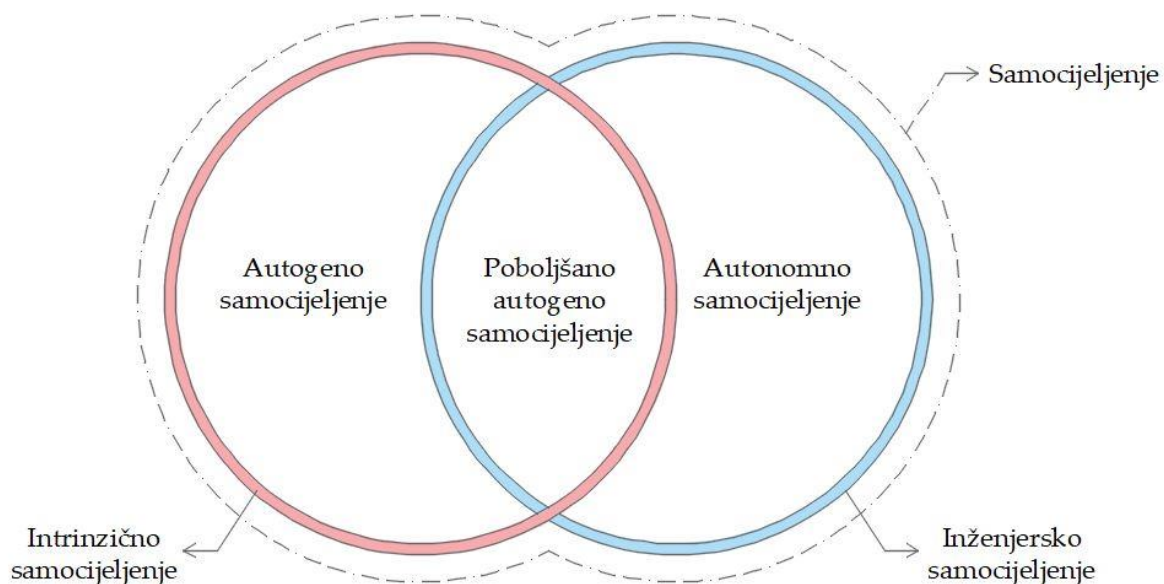
Precipitacija kalcijevog karbonata je glavni mehanizam cijeljenja kod autogenog zacjeljivanja. Ovdje CO_2 iz zraka ulazi u beton i stupa u reakciju s H_2O pri čemu nastaje H_2CO_3 iz kojeg se u nastavku izdvaja CO_3^{2-} i stupa u reakciju s Ca^{2+} ionima u betonu tvoreći CaCO_3 koji se, nakon što mu je prekoračena topivost u vodi, počinje taložiti na rubovima pukotina cijeleći ih. Prema Edvardsenu [14], maksimalna širina pukotina zacijeljena ovim mehanizmom iznosi 200 μm kada je beton kontinuirano u kontaktu s vodom.

Uslijed procesa raspucavanja betona dolazi do odlamanja sitnih čestica iz betona koje nošene vodom kroz pukotinu je blokiraju i tako sudjeluju u procesu cijeljenja pukotine. Prema Meichsner [17], ovo je učinkovito u prvih 7 dana cijeljenja betona u kontaktu s vodom.

Glavni faktori koji utječu na autogeno samocijeljenje su starost i sastav betona, prisutnost vode, oblik i veličina pukotina [18]. Starost betona ključna je za mehanizam samocijeljenja – u ranijoj dobi beton ima više nehidratiziranih vezivnih čestica za stvaranje novog kalcij silikat hidrat (CSH) gela što je poželjno za cijeljenje pukotina. Vezano za sastav betona, bitan je sadržaj klinkera u cementu, sadržaj silikata te tip agregata u betonu. Naime, opskrba kalcijevim ionima je određena sadržajem klinkera u cementu što u konačnici pokazuje sposobnost matrice da formira talog/precipitat CaCO_3 . Dodatak silikata u betonskoj mješavini utječe na pucolansku reakciju i trajanje procesa cijeljenja te potrošnju Ca(OH)_2 . Tip agregata utječe na oblik pukotine i povezan je s procesom zacjeljivanja. Razred betona povezan je s vodocementnim omjerom, sposobnosti veziva za razvoj znatne količine CSH gela uslijed hidratacije, vrstom veziva i njegovom količinom. Prisutnost vode je od vitalnog značaja za fenomen autogenog samocijeljenja obzirom da omogućuje odvijanje kemijskih reakcija i voda služi kao sredstvo za transport čestica. U tom kontekstu potapanje u vodu se smatra najprikladnijim za proces zacjeljivanja a slijede

ga vlažno-suhi ciklusi [19]. Posljednje je moguće zato što se CaCO_3 može lako formirati s obzirom na veliku dostupnost ugljičnog dioksida (CO_2) u zraku.

Maksimalna širina pukotine koja autogenim cijeljenjem može zacijeliti iznosi $150\text{ }\mu\text{m}$ [19] ili čak do $600\text{ }\mu\text{m}$ [13]. Iako je proces samocijeljenja u betonu bez ljudske intervencije (bez dodavanja bilo kakve primjese) otkriven 1836. godine [20], tijekom posljednjih nekoliko desetljeća istraživači pronalaze različite nove metode kako bi se samocijeljenje betona funkcionaliziralo. Za cijeljenje pukotina veće širine primjenjiviji su unaprijeđeno autogeno zacjeljivanje ili autonomno zacjeljivanje (Slika 1.7).



Slika 1.7. Sistematizacija zacjeljivanja pukotina kod betona

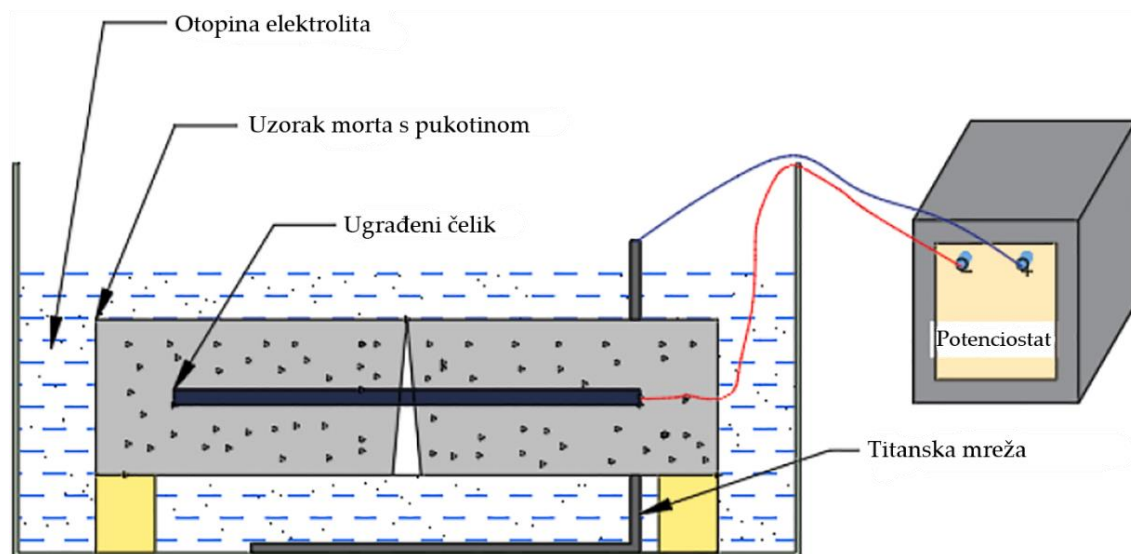
1.3.2. Unaprijeđeno autogeno zacjeljivanje pukotina

Unaprijeđeno autogeno zacjeljivanje odnosi se na zacjeljivanje koje je pospješeno dodavanjem ili vlakana (obično polivinil alkohol vlakana) u beton koja ograničavaju širinu pukotina ili pak direktno utječu na jednoličnu raspodjelu mikropukotina umjesto makropukotina ili zamjenom dijela veziva letećim pepelom ili pak zgurom koji usporavaju brzinu hidratacije a time umanjuju i stvaranje pukotina, a kao učinkoviti su prijavljeni superapsorbirajući polimeri [21]. Učinkovitim u smislu

cijeljenja pukotina su se u [22] uz leteći pepeo pokazali i metakaolin, vapnenac te bentonit.

Superapsorbirajući polimeri (SAP) su hidrofilne tvari koje umiješane u beton upijaju vodu a kako se beton isušuje SAP otpušta vodu u beton pogodujući cijeljenju pukotina [23]. Različiti istraživači koriste SAP različitog podrijetla, različitog postotka zamjene cementa te različite veličine čestica. Hong i dr. [23] su koristili poliakrilate natrijevih soli manje i veće veličine čestica i to u količinama 0,5 % ili 1 % na masu cementa te se pokazalo da je u procesu cijeljenja pukotina učinkovitiji SAP krupnijih čestica i dodan to u većoj količini na masu cementa. Snoeck i De Belle [24] su koristili dvije vrste SAP-a: poliakrilate kalijevih soli i kolipolimer akrilamida i natrij akrilata te utvrdili da beton s dodatkom SAP-a može cijeliti i u uvjetima bez direktnog kontakta s vodom.

Autori u [25] su unaprijeđivali autogeno cijeljenje dodavanjem surfaktant cetiltrimetilamonijev bromida (CTAB) u količinama 0,25 %, 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 2,0 % u otopinu elektrolita (ili otopina ZnSO_4 ili otopina MgSO_4) kako bi se poboljšao učinak cijeljenja pukotina metodom elektrotaloženja (Slika 1.8.) te su zaključili da su obje otopine elektrolita jednako učinkovite a u pogledu količine CTAB-a se optimalnom pokazala količina od 1 % osiguravši najučinkovitije cijeljenje.



Slika 1.8. Skica cijeljenja pukotina metodom elektrotaloženja [25]

1.3.3. Autonomno zacjeljivanje pukotina

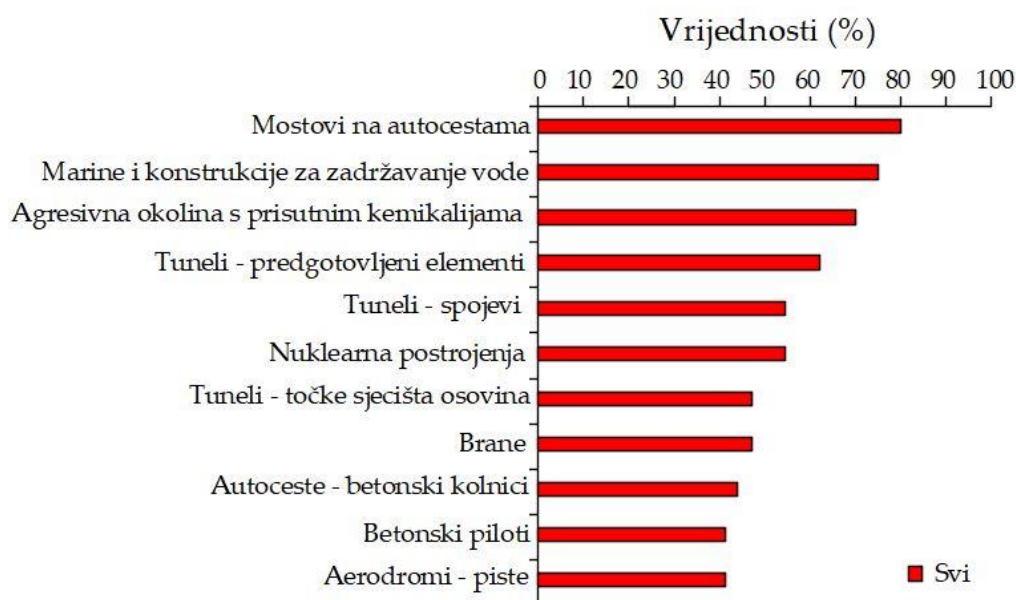
Autonomno zacjeljivanje podrazumijeva zacjeljivanje potaknuto na „umjetne načine“. Tehnike autonomnog samocijeljenja uključuju primjenu kristalnih hidrofilnih dodataka, metodu bakterija i metodu mikrokapsulacije [26]. Svaka od navedenih metoda je detaljno obrađena u naredna tri poglavlja. Danish [26] sistematizira metode samocijeljenja na kemijske (kristalni hidrofilni dodaci i mikrokapsule) i biološke (bakterije) iz čega i proizlazi naziv „kemijski dodaci“ u nazivu ove disertacije.

1.4. Troškovi održavanja građevina i opravdanost autonomnog zacjeljivanja

Prema nekim procjenama 5,2 milijarde dolara se troši na održavanje mostova [12]. Osim toga, popravak konstrukcija povećava gubitak kapitala (zbog prometnih gužvi) i produktivnosti za što se procjenjuje da iznosi 10 puta više od troškova izgradnje građevine u SAD-u [12]. Godišnje se na održavanje, zaštitu i popravak betonskih konstrukcija od strane vlasnika potroši 18-21 milijarda dolara [27]. Oko 45 % ulaganja u izgradnju troši se na inspekciju, održavanje i popravak, a u Europi ovi izdaci

iznose 50 % [1]. U Nizozemskoj se jedna trećina godišnje raspoloživih sredstava troši na pregled, monitoring, održavanje, nadogradnju i popravak [12].

Prema [26] troškovi održavanja građevina su i preko 2 puta veći od troškova proizvodnje betona dok Du [28] tvrdi da oko 50 % troškova konstrukcije čine troškovi njezina održavanja. Osim toga, treba uzeti u obzir i da postoje građevine ili njihovi dijelovi koji su teško dostupni za pristup popravcima, kao npr.: mostovi, spremnici vode, konstrukcije podložne kemijskim reakcijama, predgotovljeni tunelski dijelovi, tunelski priključci, nuklearne instalacije, brane, betonski kolnici, piloni, zrakoplovne piste [26, 29] kako je to prikazano Slikom 1.9.

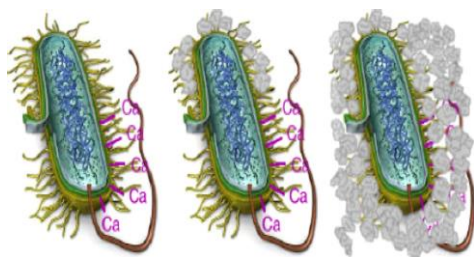


Slika 1.9. Građevine kod kojih bi autonomno cijeljenje pukotina bilo opravdano [1]

Kako bi se smanjili troškovi održavanja i produžio vijek trajanja teško dostupnih građevina, moglo bi se dodatno uložiti u sastav betonske mješavine te je učiniti sposobnom za samocijeljenje i otpornijom na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Integracijom zacjeljujućih sredstava u beton moguće je smanjiti troškove popravaka i održavanja konstrukcija te na taj način stvoriti održive konstrukcije. Iako je inicijalno potrebno veće ulaganje, dugoročne koristi samozacjeljujućeg betona veće su nego kod tradicionalnog.

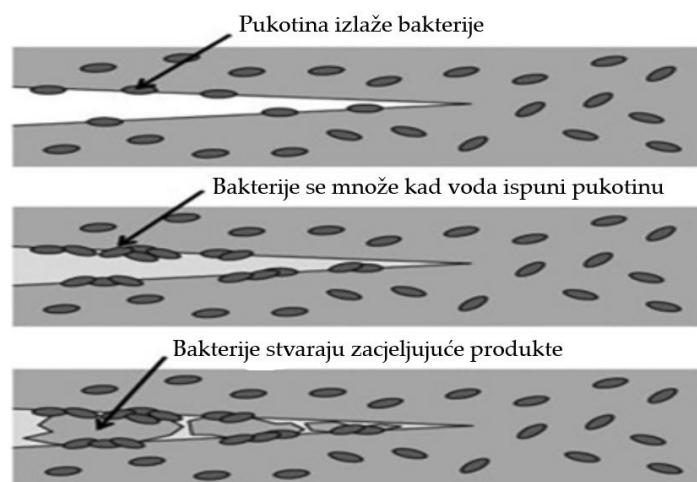
2. Samocijeljenje betona primjenom bakterija

Dodane u beton pojedine bakterije stvaraju ureazu koja katalizira ureu u karbonat i amonij što rezultira povećanjem pH vrijednosti betona i povećanjem koncentracije karbonata u bakterijskom okruženju. Ove komponente dalje hidroliziraju u amonijak (NH_4^+) i ugljičnu kiselinu (CO_3^{2-}) koja dovodi do stvaranja kalcijevog karbonata. Slika 2.1. prikazuje taloženje kalcijevog karbonata na staničnoj stijenci bakterije. Stanična stijenka bakterija je negativno nabijena te bakterije crpe katione iz okoline, uključujući Ca^{2+} , kako bi se taložili na površini njihove stanice. Ca^{2+} ioni reagiraju s CO_3^{2-} kao priprema za taloženje kalcijevog karbonata na površini stanice koja služi kao mjesto nukleacije.



Slika 2.1. Stvaranje kalcijevog karbonata na staničnoj stijenci bakterije [30]

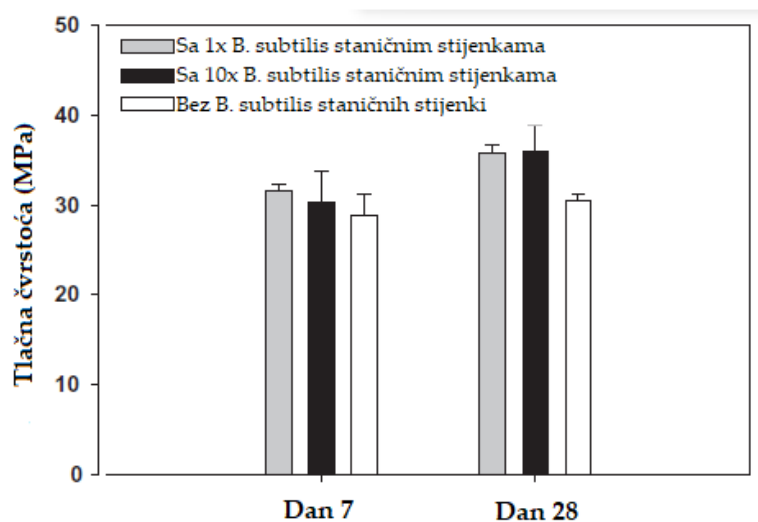
Slika 2.2. prikazuje pukotinu nastalu u betonu s ugrađenim bakterijama i postupak cijeljenja te pukotine. Zapravo, bakterije u betonu se pri nastanku pukotine i u prisustvu vode množe, a na njihovim stijenkama se taloži kalcijev karbonat koji pridonosi cijeljenju pukotine.



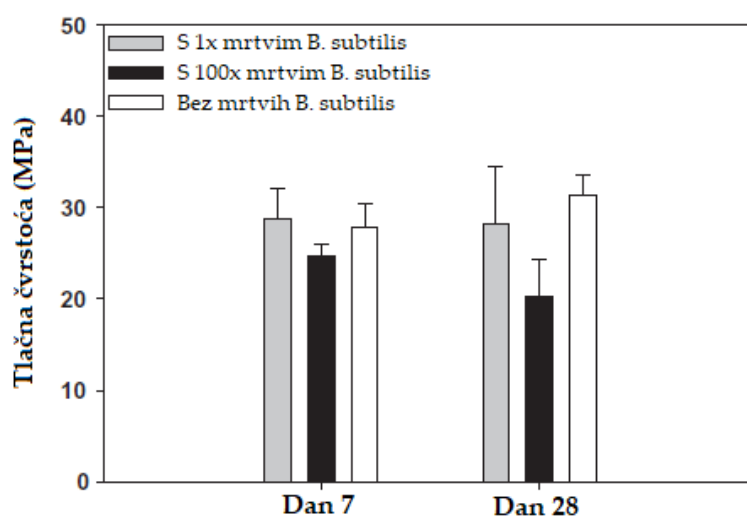
Slika 2.2. Mogući mehanizmi samocijeljenja cementnih materijala [31]

Najčešće korištene bakterije u svrhu samocijeljenja betona uključuju *Bacillus subtilis*, *Bacillus cohnii*, *Bacillus pseudomycoides*, *Escherichia coli*, *Bacillus sphaericus*, *Sporosarcina pasteurii*, *Pseudomonas aeruginosa* i *Diaphorobacter nitroreducens* ili pak njihove mješavine. Prilikom doziranja u betonske mješavine, autori ih doziraju ili direktno ili preko nekog nositelja. U svojim studijama autori promatraju učinak bakterija na mehanička i trajnosna svojstva betona te na postupak samocijeljenja betona. Detaljan pregled literature na tu temu dan je u nastavku.

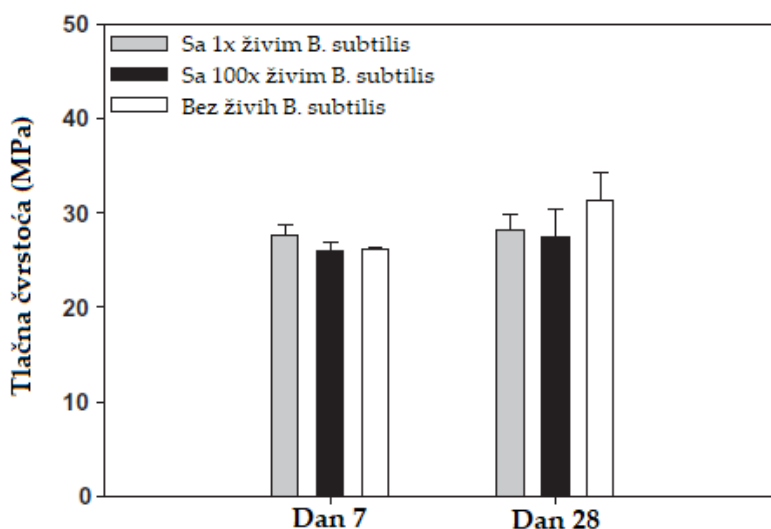
Pei i dr. [32] su izradili kontrolnu mješavinu morta, mješavine morta sa živim i umrtvljenim bakterijama te staničnim stijenjkama živih bakterija *Bacillus subtilis* te međusobno uspoređivali njihove tlačne čvrstoće u starosti od 7 i 28 dana te poroznosti. Tlačne čvrstoće su određivane na uzorcima 2x2x2 inch-a te su vrijednosti tlačnih čvrstoća prikazane Slikama 2.3 do 2.5. Poroznost kontrolnog betona i betona sa staničnim stijenjkama *Bacillus subtilis* prikazana je Slikom 2.6.



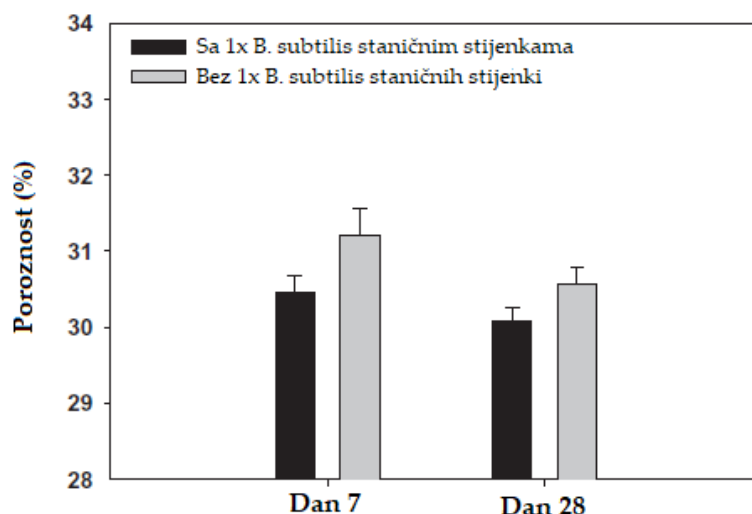
Slika 2.3. Tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka cementnog morta s dodanim staničnim stijenjkama *B. subtilis* u koncentraciji od 0,33 mg/ml (1x) ili 3,33 mg/ml (10x) [32]



Slika 2.4. Tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka cementnog morta s dodanim umrtvljenim stanicama *B. subtilis* u koncentraciji od 0,33 mg/ml (1x) ili 33,33 mg/ml (100x) [32]



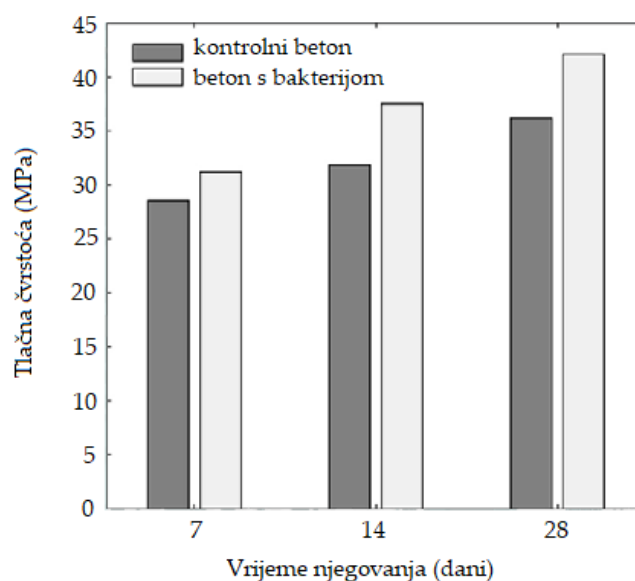
Slika 2.5. Tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana starosti uzoraka cementnog morta s dodanim živim stanicama *B. subtilis* u koncentraciji od 0,33 mg/ml (1x) ili 33,33 mg/ml (100x) [32]



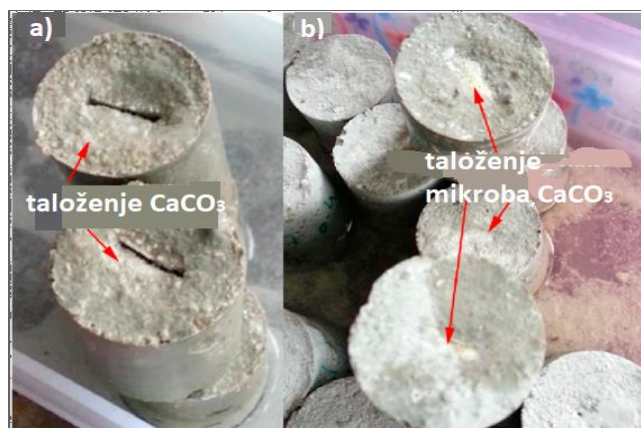
Slika 2.6. Poroznost uzoraka cementnog morta s ili bez staničnih stijenki *B. subtilis* od 0,33 mg/ml (x1) koncentracije [32]

Umrtnjene i žive stanice *B. subtilis* nisu imale pozitivan efekt na tlačnu čvrstoću uzoraka cementnog morta, dok stijenske *B. subtilis* povećavaju tlačnu čvrstoću. Povećanje tlačne čvrstoće betona sa staničnim stijenkama *B. subtilis* direktna je posljedica smanjenja poroznosti takvog betona (Slika 2.6.), a smanjenje poroznosti direktno utječe na povećanje trajnosti takvog betona.

Algaifi i dr. [33] uspoređivali su tlačnu čvrstoću i sposobnost samocijeljenja kod betona s bakterijom *B. pseudomycoides* i kontrolnog betona. Za mješavinu betona s bakterijom pripravljeno je ljekovito sredstvo na biološkoj bazi (otopina bakterije, urea i kalcijev nitrat tetrahidrat) i dodano u vodu za miješanje betona. Od dviju betonskih mješavina izrađeni su cilindrični uzorci promjera 30 mm i visine 50 mm. U dio tih uzoraka je umetnut bakreni lim debljine 0,4 mm i do dubine 20 mm, a koji je nakon očvršćavanja uklonjen kako bi ostavio utor koji simulira pukotinu. Kako bi se pokrenuo proces samocijeljenja, promatrani primjerak je potopljen u vodu nakon 24 sata te je promatrana širina pukotine. Treba napomenuti da je temperatura vode bila 30 °C što simulira okolnu tropsku temperaturu i pH-vrijednost vode je bila 7,8. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće su prikazani Slikom 2.7. Izgled betonskih uzoraka nakon procesa samocijeljenja prikazan je Slikom 2.8.



Slika 2.7. Tlačna čvrstoća betona s i bez bakterija nakon 7, 14 i 28 dana [33]



Slika 2.8. Vizualizacija ljekovitog proizvoda nakon 68 dana u vodi za: (a) kontrolni beton (b) beton s bakterijama [33]

Tlačna čvrstoća betona (Slika 2.7.) s bakterijama je bila u prosjeku 16 % veća od tlačne čvrstoće kontrolnog betona. To se pripisuje taloženju mikroba kalcijevog karbonata unutar betonske jezgre, jer je produkt mikroba ispunio mikropukotine i pore betona. Slika 2.8.a prikazuje kako je pukotina kod kontrolnog betona samo djelomično zacijelila što se pripisuje kemijskoj reakciji između $\text{Ca}(\text{OH})_2$ izlučenog iz betonske matrice i okolnog ugljičnog dioksida. Kod betona s bakterijama pukotina je u potpunosti zacijelila taloženjem mikroba (Slika 2.8.b) što je kasnije identificirano kao vaterit i kalцит (CaCO_3). Ipak, autori su opazili da su kod betona s bakterijama u potpunosti zacijelile pukotine na površini betona, ali ne i u dubljim slojevima.

Safiuddin i dr. [34] su promatrali utjecaj bakterija *Bacillus Subtilis* i *Escherichia Coli* zasebno i kombinirano na samocijeljenje betona. Svaka bakterija zasebno je dozirana u beton u količini 2 %, 3 %, 4 % i 6 % na masu cementa dok su u kombinaciji (po 50 % svaka) dozirane u beton u količini od 2 % i 3 % na masu cementa. Pripremljeno je ukupno jedanaest mješavina betona za praćenje samocijeljenja, sedam mješavina za praćenje tlačnih čvrstoća i pet mješavina za praćenje vlačnih čvrstoća tijekom vremena (Tablica 2.1.). U svaku betonsku mješavinu dodano je 5 % na masu cementa kalcijevog laktata kao nutrijenta za bakterije.

Tablica 2.1. Betonske mješavine i njihova svrha [34]

Kod mješavine	Detalji mješavine	Samocijeljenje	Tlačna čvrstoća	Vlačna čvrstoća cijepanjem
M-Ref	Referenca-M20	DA	DA	DA
M-BS-2	Bacilius Subtilis-2 %	DA	DA	DA
M-BS-3	Bacilius Subtilis-3 %	DA	DA	DA
M-BS-4	Bacilius Subtilis-4 %	DA	NE	NE
M-BS-6	Bacilius Subtilis-6 %	DA	NE	NE
M-EC-2	Escherichia Coli – 2 %	DA	DA	DA
M-EC-3	Escherichia Coli – 3 %	DA	DA	DA
M-EC-4	Escherichia Coli – 4 %	DA	NE	NE
M-EC-6	Escherichia Coli – 6 %	DA	NE	NE
M-BE-2	Mix Bacteria (B.Subtilis+E. Coli)-2 %	DA	DA	NE
M-BE-3	Mix Bacteria (B.Subtilis+E. Coli)-3 %	DA	DA	NE

Za ispitivanje tlačne čvrstoće i praćenje samocijeljenja izrađene su kocke dimenzija 150x150x150 mm, a za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem cilindrični uzorci veličine 150x300 mm. Očvršli uzorci su njegovani u vodi. Rezultati tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su Tablicama 2.2. i 2.3. Samocijeljenje je praćeno svakih 6 sati sve do 72 sata starosti uzoraka. Rezultati praćenja samocijeljenja su prikazani Tablicom 2.4.

Tablica 2.2. Prosječna tlačna čvrstoća betonskih mješavina [34]

Mješavina	Detalji mješavine	7 dana	14 dana	28 dana
M-Ref	Referenca-M20	22,38	26,18	27,83
M-BS-2	Bacilius Subtilis - 2 %	23,21	27,83	33,23
M-BS-3	Bacilius Subtilis - 3 %	26,19	29,24	35,15
M-EC-2	Escherichia Coli – 2 %	33,86	48,26	43,48
M-EC-3	Escherichia Coli – 3 %	34,2	41,11	45,12
M-BE-2	MixBacteria (B.Subtilis+E. Coli)-2 %	13,36	15,83	18,86
M-BE-3	MixBacteria (B.Subtilis+E. Coli)-3 %	12,88	16,16	19,32

Tablica 2.3. Prosječna vlačna čvrstoća cijepanjem betonskih mješavina [34]

Mješavina	Detalji mješavine	7 dana	14 dana	28 dana
M-Ref	Referenca-M20	1,70	2,09	2,12
M-BS-2	Bacilius Subtilis - 2 %	1,74	2,11	2,91
M-BS-3	Bacilius Subtilis - 3 %	1,81	2,19	2,92
M-EC-2	Escherichia Coli – 2 %	2,12	3,32	3,78
M-EC-3	Escherichia Coli – 3 %	2,24	3,35	3,92

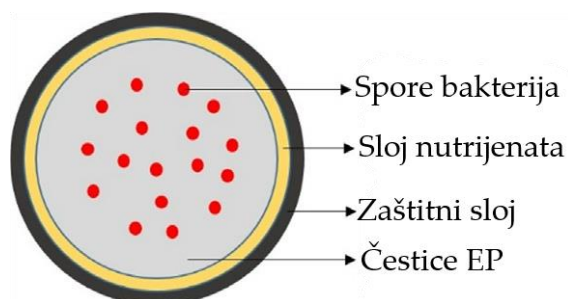
Tablica 2.4. Prosječno vrijeme samocijeljenja betonskih mješavina [34]

Mješavina	Detalji mješavine	Vrijeme samocijeljenja (h)
M-Ref	Referenca-M20	Nema samocijeljenja
M-BS-2	Bacilius Subtilis - 2 %	48
M-BS-3	Bacilius Subtilis - 3 %	32
M-BS-4	Bacilius Subtilis - 4 %	72
M-BS-6	Bacilius Subtilis - 6 %	Samocijeljenje nije evidentirano
M-EC-2	Escherichia Coli – 2 %	Samocijeljenje nije evidentirano
M-EC-3	Escherichia Coli – 3 %	Samocijeljenje nije evidentirano
M-EC-4	Escherichia Coli – 4 %	Samocijeljenje nije evidentirano
M-EC-6	Escherichia Coli – 6 %	Samocijeljenje nije evidentirano
M-BE-2	MixBacteria (B.Subtilis+E. Coli)-2 %	Nema dokaza o samocijeljenju
M-BE-3	MixBacteria (B.Subtilis+E. Coli)-3 %	Samocijeljenje nije evidentirano

Zaključeno je da su pukotine potpuno zacijelile unutar 48 sati za 2 % Bacilius Subtilis, 32 sata za 3 % Bacilius Subtilis, i 72 sata za 4 % Bacilius Subtilis. Najpovoljniji udio bakterije Bacilius Subtilis za samocijeljenje betona bio bi 3 %, dok viši udio nije preporučljiv. Bakterija Escherichia Coli nije imala učinka na samocijeljenje. Zasebno je svaka od ovih bakterija imala pozitivan učinak na razvoj tlačne čvrstoće, s tim da je bakterija Escherichia Coli imala znatniji utjecaj. Kombinirane zajedno obje bakterije su utjecale negativno na tlačnu čvrstoću betona. Ponovno, zasebno je svaka od ovih bakterija imala pozitivan učinak na razvoj vlačne čvrstoće cijepanjem, s tim da je bakterija Escherichia Coli imala znatniji utjecaj.

Çağatay Erşan i dr. [35] su istraživali sposobnost preživljavanja bakterija u alkalnom mediju kakav je beton. Promatrali su sposobnost preživljavanja nezaštićenih i zaštićenih bakterija Pseudomonas aeruginosa i Diaphorobacter nitro reduzens te nezaštićene mješavine mikrobioloških kultura koje sadržavaju aktiviranu kompaktnu denitrifikacijsku jezgru. Pod „zaštićene“ se ovdje misli na bakterije na nekom nositelju (od dijatomejske zemlje, ekspanzirane gline ili granuliranog aktiviranog ugljena). Pod „nezaštićene“ se misli na bakterije direktno unesene u betonsku mješavinu. Pseudomonas aeruginosa i Diaphorobacter nitro reduzens su pokazale bolju sposobnost preživljavanja u betonu kada su zaštićene. U nastavku je prikazan utjecaj bakterija na svojstva betona kada su one unesene na nekom nositelju.

Jiang i dr. [36] su u svojem istraživanju ekspanzirani perlit (EP) omatali s različitim nositeljima bakterija i tvari koje te bakterije hrane (nutrijent) kao što je to prikazano Slikom 2.9.



Slika 2.9. Primjena sredstva za samocijeljenje betona [36]

Ovi autori su pripremili suspenziju saharoze (3,5 g), ekstrakta kvasca (4 g), KH_2PO_4 (0,02 g), CaCl_2 (0,166 g), KCl (0,476 g), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,2 g), $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,02 g), Na_2CO_3 (4,2 g) i NaHCO_3 (5,3 g), svaki po litri destilirane vode te *Bacillus cohnii* bakterije. U tako pripremljenu otopinu su uronjene granule EP pri tlaku od -0,06 MPa i u trajanju od 15 minuta. Nakon toga su granule EP-a osušene do konstantne mase pri 40 °C. Tako osušene granule EP su prskane nutrijentom kojeg su činili kvasac, inozin i L-kalcijev laktat (koncentracije ekstrakta kvasca, inozina i L-kalcijevog laktata bile su 1,5 g/L, 2,68 g/L, odnosno 20,8 g/L). Granule EP-a su ponovno osušene na 40 °C do konstantne mase. Na tako pripremljene granule, visokotlačnom mlaznicom je raspršen zaštitni sloj. Mješavine korištene za zaštitni sloj su bile: geopolimeri (GP), Portland cement (PC), kiseli sulfoaluminatni cement (SC), kalij magnezijev fosfat cement (magnezijev oksid i kalij dihidrogen fosfat (KH_2PO_4), odnosno MKPC) i hemihidratni gips (HG). Sastavi tih mješavina su prikazani Tablicom 2.5.

Tablica 2.5. Mješavine korištene za oblaganje granula EP-a [36]

Tvari	GP	PC	SC	MKPC	HG
Epoksidni perlit (g)	200	200	200	200	200
Voda (g)	300	450	450	450	450
Stiro-akrilna emulzija (g)	30	30	30	30	30
Metakaolin (g)	300	-	-	-	-

Topivi silikat (g)	150	-	-	-	-
Cement (g)	-	300	300	-	-
Magnezijev oksid (g)	-	-	-	75	-
Monokalijev fosfat (g)	-	-	-	225	-
Gips (g)	-	-	-	-	300

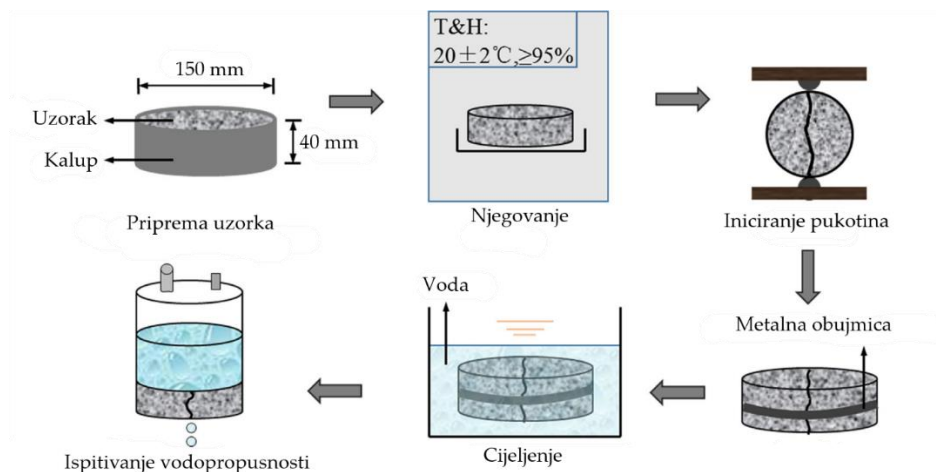
Tako obložene granule EP-a su sušene u plastičnim vrećicama 12 h kako bi se osiguralo dovoljno vlage tijekom očvršćivanja sloja, a zatim stavljene u sušionik na 40°C i sušene do postizanja konstantne mase. Dobivene obložene granule EP-a izravno su dodane u betonsku mješavinu. Pripremljeno je sedam različitih betonskih mješavina kako je to prikazano Tablicom 2.6., s krupnim agregatom (promjera 5-16 mm), pijeskom, cementom (P.O. 42.5), silicij dioksidom, vodom, superplastifikatorom i granulama EP-a. Betonska mješavina bez bakterija je označena kao kontrolna (C), betonska mješavina s granulama EP-a bez zaštitnog sloja s N-B, a betonske mješavine s obloženim granulama s G-B, C-B, S-B, H-B i K-B (obložene s GP, PC, SC, HG, odnosno MKPC).

Tablica 2.6. Sastav mješavina betona [36]

Tvar	Kontrolni beton	N-B	G-B	C-B	S-B	H-B	K-B
Krupni agregat (kg/m ³)	1211	1211	1211	1211	1211	1211	1211
Pijesak (kg/m ³)	519	519	519	519	519	519	519
Cement (kg/m ³)	484	484	484	484	484	484	484
Voda (kg/m ³)	290	290	290	290	290	290	290
Silicijev dioksid (kg/m ³)	36	36	36	36	36	36	36
Superplastifikator (kg/m ³)	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Eksandirani perlit (m ³)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Premaz	Ne	Ne	GP	PC	SC	HG	MKPC

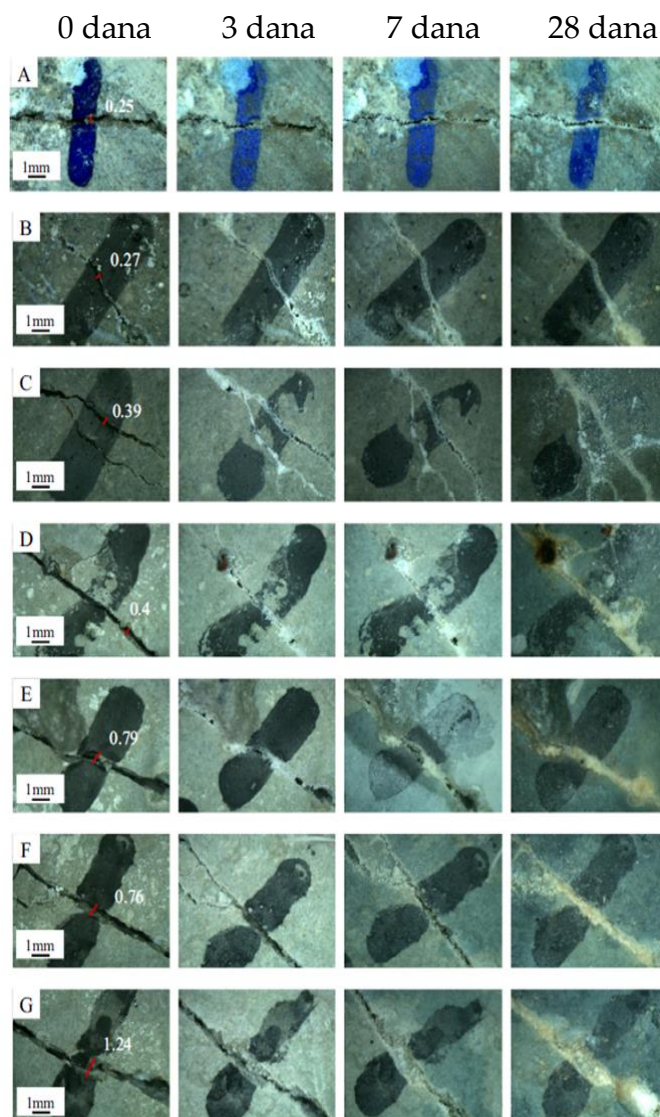
Od svake mješavine izliveni su cilindrični uzorci dimenzija 100 mm x 50 mm i 150 mm x 40 mm (d x h). Uzorci veličine 100 mm x 50 mm korišteni su za promatranje pukotine i mjerenje širine pukotine, a uzorci veličine 150 mm x 40 mm korišteni su za ispitivanje vodopropusnosti. Nakon 24 h, betonski uzorci su izvađeni iz kalupa i

zatim stavljeni u vodu na njegu od 28 dana. Pukotine na svim uzorcima proizvedene su metodom cijepanja. Konačno, uzorci su označeni i vodoravno uronjeni u vodu u plastičnoj kanti radi zacjeljivanja pukotina (Slika 2.10).

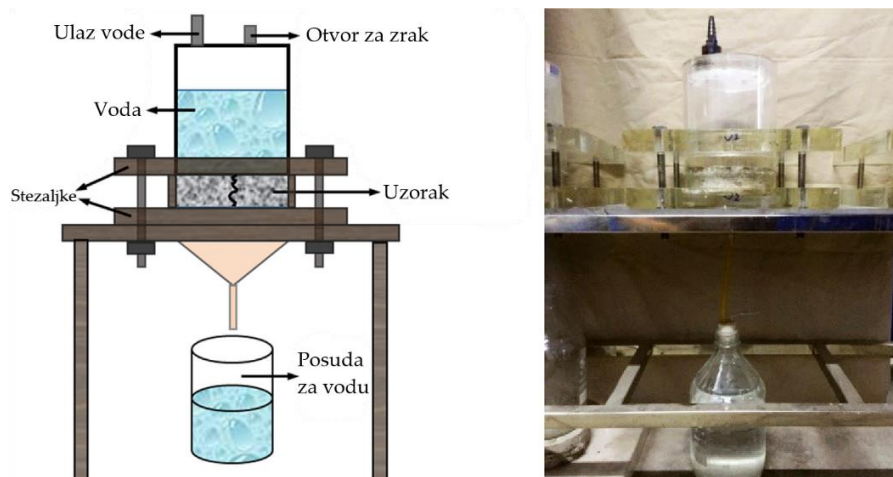


Slika 2.10. Izrada betonskih uzoraka, iniciranje pukotina, ispitivanje vodopropusnosti [36]

U vremenu od 0 dana, 7 dana, 14 dana i 28 dana su praćene širine pukotina mikroskopom i ravnalom (Slika 2.11.) te je ispitana vodopropusnost (Slika 2.12).



Slika 2.11. Proces zacjeljivanja pukotine u betonu: kontrolni beton (A), N-B (B), G-B (C), P-B (D), S-B E, H-B (F) i K-B (G) [36]

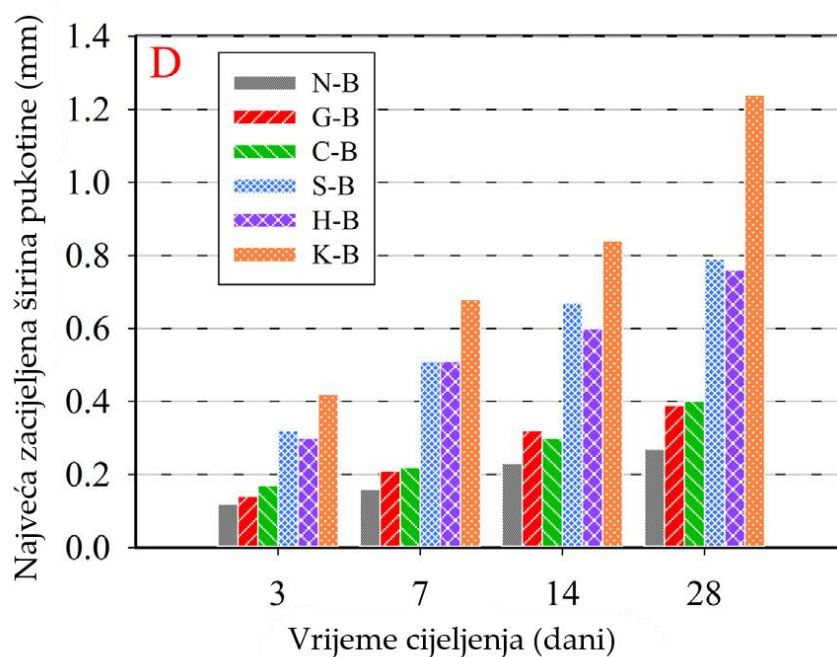


Slika 2.12. Ispitivanje vodopropusnosti [36]

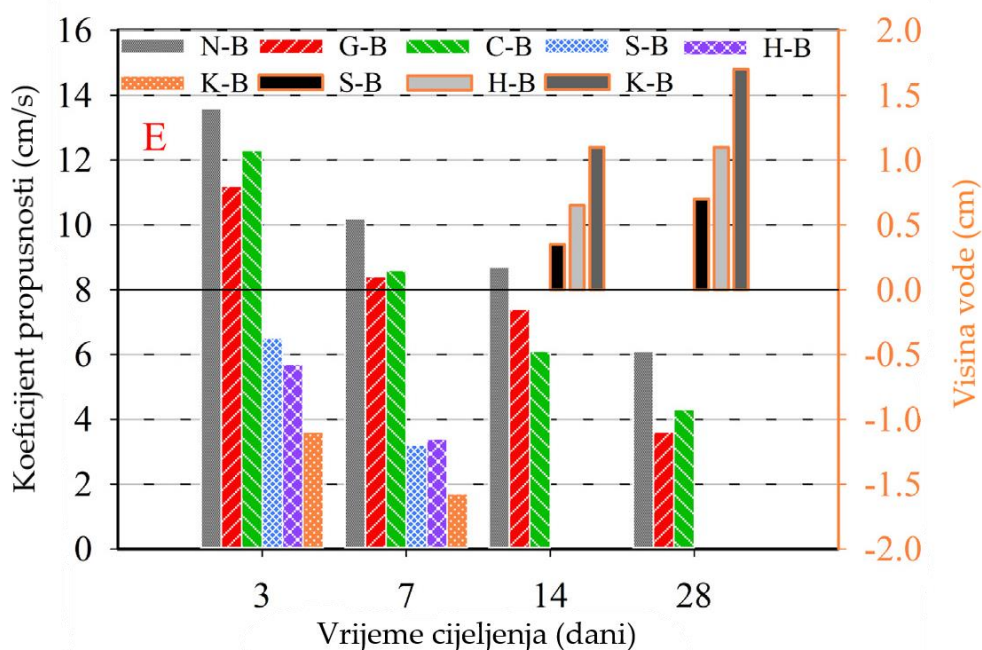
Rezultati ispitivanja prikazani su Slikama 2.13. i 2.14. Koeficijent vodopropusnosti za svaki uzorak pri drugačijem vremenu cijeljenja računat je na sljedeći način (2.1):

$$k = 1500 / (l_{\text{sred}} * w_{\text{sred}} * t) \quad (2.1)$$

gdje je k koeficijent propusnosti (cm/s); l_{sred} prosječna dužina pukotine s obje strane uzorka (cm); w_{sred} prosječna širina pukotine (cm) (dobivena mjerenjem širine pukotine na svakom cm duljine pukotine i uprosječene prema formuli $w_{\text{sred}} = \sum w_n / n$); t je vrijeme potrebno za procjeđivanje 1500 ml vode u pokusu vodopropusnosti. Što je koeficijent vodopropusnosti uzorka manji, to su učinci samocijeljenja pukotine bolji. Uz to, kod uzorka s boljim učincima cijeljenja pukotine, dio vode će ostati u spremniku nakon procesa procjeđivanja, a uzorak više neće propuštati vodu.



Slika 2.13. Najveća zacijeljena širina pukotine tijekom vremena cijeljenja [36]

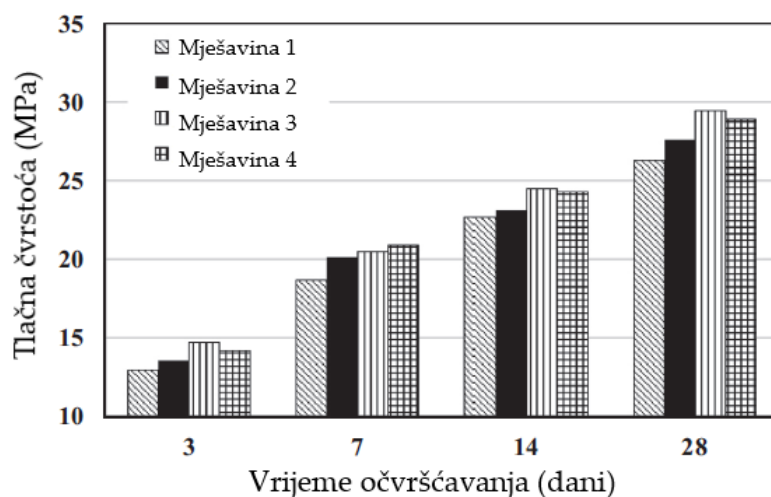


Slika 2.14. Koeficijent propusnosti uzorka tijekom vremena cijeljenja [36]

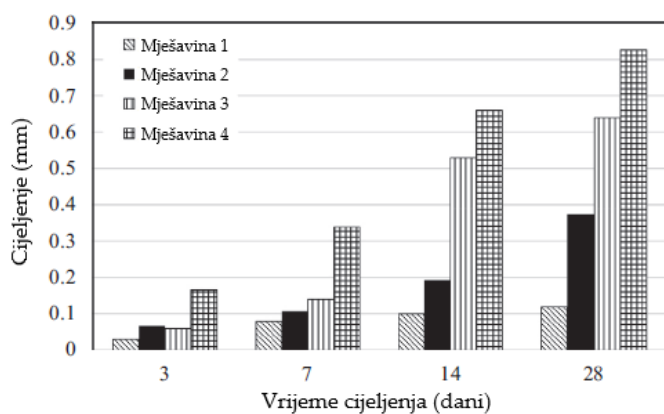
Slika 2.13. prikazuje najveću zacijeljenu širinu pukotine tijekom vremena cijeljenja za 6 vrsta uzoraka. Kako se može vidjeti na dijagramu, povećanjem vremena cijeljenja, širina cijeljenja pukotine uzoraka N-B, G-B i C-B nije se značajno povećala. Nasuprot tomu, S-B, H-B i K-B su pokazali znatno bolju sposobnost zacjeljivanja pukotina.

Naročito uzorak K-B (granule obavijene s MKPC) čija je širina cijeljenja dostigla 1.24 mm nakon 28 dana cijeljenja dok su kod S-B i H-B zapažene vrijednosti od 0.79 mm i 0.76 mm podjednako. Stoga, tehnike samocijeljenja bakterijama koristeći granule EP obavijene u nisko alkalni materijal bi mogle poboljšati sposobnost cijeljenja pukotina u betonu u usporedbi s EP obavijenog u visoko alkalne materijale kao što su GP i PC. Slika 2.14. prikazuje koeficijent propusnosti uzoraka za različita vremena cijeljenja. Kao što je pokazano u dijagramu, s povećanjem vremena cijeljenja, koeficijent propusnosti svih uzoraka postepeno opada. Naročito kada vrijeme cijeljenja dostigne 14 dana, uzorci S-B, H-B i K-B bi mogli podnijeti pritisak vode od 0.35, 0.65 i 1.1 cm visine vode. Nakon 28 dana cijeljenja, visina vode kod uzoraka S-B, H-B i K-B iznosila je 0.7, 1.1 i 1.7 cm. Prestanak procjeđivanja nije bio uočen kod uzoraka N-B, G-B i C-B. Potvrđeno je da granule EP-a nakon postupka obavijanja znatno poboljšavaju mogućnost zacjeljivanja pukotina betona. Kada su čestice EP imobilizirane sporama bakterija obavijene u nisko alkalni materijal, učinak zacjeljivanja pukotina bio je najbolji.

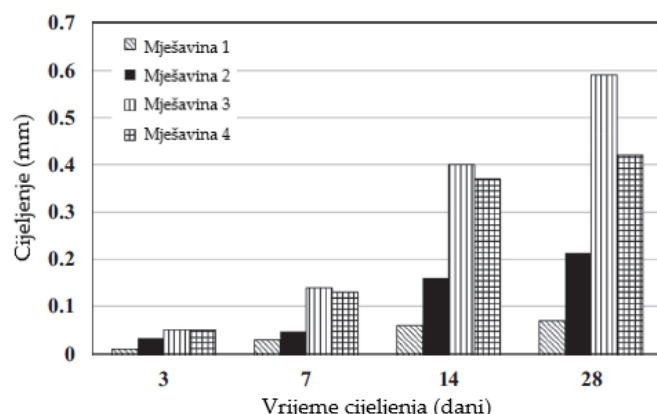
Khaliq i Ehsan [37] su u svom radu koristili *Bacillus subtilis* koju su, u obliku otopine, dodavali direktno u betonsku mješavinu (mješavina 2), preko lakoagregatnog agregata (LWA) natopljenog u otopinu bakterije (mješavina 3) ili preko grafitnih nanočestica (GNP) natopljenih u otopinu bakterije (mješavina 4). Također, imali su i kontrolnu mješavinu (mješavina 1). Za praćenje samocijeljenja betona izrađeni su cilindrični uzorci betona promjera 150 mm i visine 100 mm, a za praćenje tlačne čvrstoće betona izrađeni su cilindrični uzorci betona promjera 150 mm i visine 300 mm. Uzorci u njegovani u kalupu 24 sata, a potom do 28 dana starosti u vodi. Na uzorcima za samocijeljenje pukotine su inicirane u starosti betona od 3, 7, 14 i 28 dana, a nakon toga su ponovno njegovani u vodi te im se pratilo cijeljenje u 3, 7, 14 i 28 danu. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće u 3., 7., 14., i 28. danu starosti betona prikazani su Slikom 2.15., a ispitivanja cijeljenja pukotina Slikom 2.16.



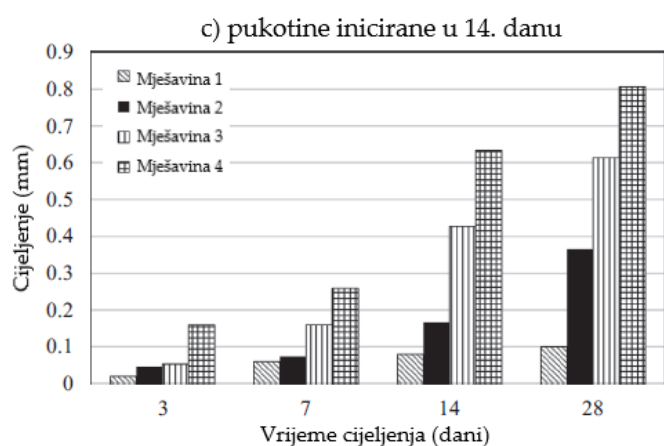
Slika 2.15. Razvoj tlačne čvrstoće ovisno o tehnici ugradnje bakterija [37]



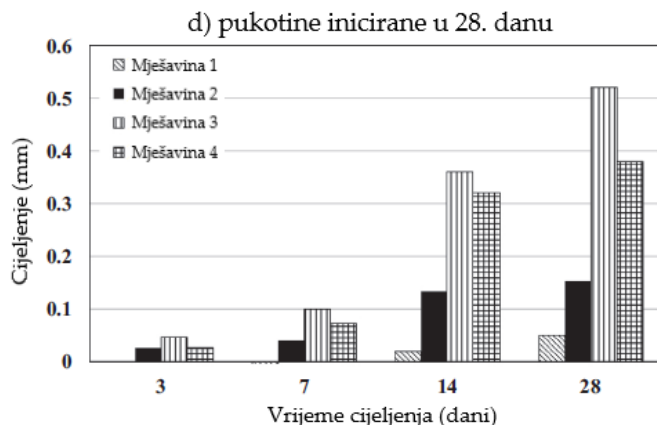
a) pukotine inicirane u 3. danu



b) pukotine inicirane u 7. danu



c) pukotine inicirane u 14. danu



d) pukotine inicirane u 28. danu

Slika 2.16. Zacjeljenje pukotina iniciranim u različitim vremenima [37]

Tlačna čvrstoća s dodatkom bakterije „*Bacillus subtilis*” pokazala se bolja pri svim proučavanim starostima betona od tlačne čvrstoće kontrolnog betona. Posebno

učinkovita se pokazala tehnika unosa bakterija s LWA metodom. Sve mješavine s bakterijama su pokazale bolje cijeljenje tijekom vremena od kontrolne mješavine. Kod pukotina iniciranih u 3. i 7. danu starosti betona, najučinkovitija je bila metoda unosa bakterija preko GNP dok je kod pukotina iniciranih u 14. i 28. danu starosti betona najučinkovitija bila metoda unosa bakterija preko LWA.

Wang i dr. [38] su u svom radu istraživali samocijeljenje betona korištenjem hidrogela s inkapsuliranim bakterijskim sporama (bio-hidrogelova). Bakterijski soj korišten u ovom istraživanju bio je *Bacillus sphaericus*. Izradili su četiri skupine uzoraka, skupina R su uzorci bez ikakvih dodataka, skupina N su uzorci kojima su dodane sve hranjive tvari, uključujući hranu za bakterije (ekstrakt kvasca) i sredstva za taloženje (urea i $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), skupina H su uzorci s hidrogelom, a skupina HS uzorci s hidrogelom na kojem su enkapsulirane bakterije. Na betonskim valjcima je inicirana pukotina te su izloženi okolini od 60 % i 95 % vlažnosti kao i suho-mokro ciklusima (1 sat u vodi, 11 sati na zraku pri 60 % vlažnosti) u trajanju od 4 tjedna. Nije zabilježeno cijeljenje pukotina u 60 % i 95 % vlažnosti, ali je došlo do cijeljenja pukotina pri suho-mokro ciklusima tako da je najbolje cijeljenje zabilježila skupina uzoraka HS, potom H, potom N, a najmanje cijeljenje je zabilježila mješavina R.

Zhang i dr. [39] istraživali su potencijal bakterije *Sporosarcina pasteurii* u alkalno aktiviranom betonu. Proučavali su samocijeljenje alkalno aktiviranog betona s ekspanziranim staklenim granulama bez bakterije te betona s bakterijom (i kalcij laktatom i ureom) unesenom u beton na nositelju od ekspanziranih staklenih granula. Na betonskim uzorcima su inicirane pukotine i praćeno je njihovo cijeljenje tijekom 90 dana. Na uzorcima betona s bakterijom (i kalcij laktatom i ureom) unesenom na nositelju od ekspanziranih staklenih granula praćeno je cijeljenje u vodi i pri mokro-suhim ciklusima. Beton s bakterijom je cijelio bolje od betona bez bakterije, a cijeljenje je bilo učinkovitije kod betona njegovanog mokro-suhim ciklusima nego kod betona njegovanog vodom.

Kanwal i dr. [40] proučavali su utjecaj bakterije *Bacillus subtilis* (BS) imobilizirane ugljenom nastalim sagorijevanjem šećerne trske na mehanička i trajnosna svojstva betona te sposobnost samooporavka betona. Napravili su referentnu mješavinu betona, mješavinu s ugljenom, mješavinu s BS (i kalcijevim laktatom kao nutrijentom) te mješavinu s ugljenom pomiješanim s BS (i kalcijevim laktatom kao nutrijentom). Dodatak BS u mješavinu je unaprijedio tlačnu čvrstoću betona u svim promatranim periodima, a to unaprjeđenje je bilo izraženije kada je BS imobilizirana ugljenom u mješavini. Mješavina s BS je pokazala smanjeno upijanje vode u odnosu na referentnu mješavinu, a mješavina s BS imobiliziranim ugljenom je pokazala drastično smanjeno upijanje vode. Samooporavak betona (u vodi) s prethodno iniciranom pukotinom je bio najizraženiji kod mješavine u kojoj je BS imobilizirana ugljenom, a nešto manje izraženo u mješavini s BS dok je najmanje izraženo bilo kod referentne mješavine. SEM, EDS i XRD analizom je potvrđeno da je produkt cijeljenja zapravo CaCO_3 .

Achal i dr. [41] su uspoređivali mehanička i trajnosna svojstva referentnog morta i morta koji sadržava *Bacillus subtilis* (BS). Dodatak BS mortu je povećao tlačnu čvrstoću morta za 40 %, reducirao poroznost morta za 50 % te značajno smanjio prodor klorida i unaprijedio cijeljenje prethodno inducirane pukotine.

Zhang i dr. [42] su proučavali samocijeljenje (u vodi) referentnog betona, betona s *Bacillus cohnii* unesenom direktno u beton te betona s *Bacillus cohnii* unesenom u beton na nositelju od ekspandiranog perlita i ekspandirane gline. Najučinkovitije cijeljenje (u vodi) je zabilježeno kod mješavine s *Bacillus cohnii* na ekspandiranom perlitu, a potom kod mješavine, a *Bacillus cohnii* na ekspandiranoj glini. Mješavina s *Bacillus cohnii* direktno unesenom u beton je bolje cijelila nego referentna mješavina, ali lošije od mješavina s *Bacillus cohnii* na nositelju od ekspandiranog perlita ili ekspandirane gline. Mikroskopska analiza je potvrdila kristale kalcita kao produkte cijeljenja.

Çağatay Erşan i dr. [43] istraživali su sposobnost samocijeljenja betona (u vodi) s *Pseudomonas aeruginosa* i *Diaphorobacter nitro reducens* na nositelju od ekspanzirane gline i granuliranog aktiviranog ugljena i zaključili da su obje vrste bakterija jednako učinkovite na oba nositelja u procesu samocijeljenja raspucalog betona. Mikroskopski pregled betona je opet potvrdio CaCO_3 kao produkt cijeljenja pukotina.

CaCO_3 koji nastaje u pukotinama nastaje i općenito u betonu s bakterijama te progušćuje strukturu betona utječući tako pozitivno na trajnosna svojstva, a uglavnom (ovisno o vrsti i koncentraciji bakterije) i na mehanička svojstva betona.

3. Samocijeljenje betona primjenom kristalnih hidrofilnih dodataka

Kristalni dodaci (crystalline admixtures, CA) su uglavnom komercijalno dostupni proizvodi različitih proizvođača (Xypex, Kryton, Penetron, Harbin) s dvostrukim učinkom: smanjuju propusnost betona i zacjeljuju pukotine i preporučuje ih se stavljati u beton u količinama 0.3-2 % na masu cementa [44]. Prema različitim proizvođačima, kristalna tehnologija osigurava popunjavanje pukotina bez ljudske intervencije i može zatvoriti pukotine do 400 μm [45], ovisno o starosti pukotina i uvjetima izloženosti. Široka skupina materijala pripada kategoriji generički nazvanih kristalni dodaci čiji sastav je patentiran. Neke su studije također istaknule poteškoće u dobivanju informacija o kemijskom sastavu tih komercijalnih proizvoda. CA se sastoje od čestica različite veličine i kemijskog sastava, uključujući cement, punila, pucolane, trosku, pijesak, silikatni prah i "aktivne kemikalije" [45]. Fizikalno-kemijska svojstva CA-a omogućuju im da djeluju i kao inertni materijali i kao aktivne kemikalije. Europska norma EN 934-2 [46] klasificira CA kao vodootporne dodatke i utvrđuje tri specifična svojstva koja se trebaju mjeriti u betonima s dodatkom CA kako bi se testirali njihovi učinci i učinkovitost: kapilarna apsorpcija, tlačna čvrstoća i sadržaj zraka u svježem stanju betona. Američko Izvješće o kemijskim dodacima betonu - ACI 212.3R-16 [47] klasificira CA u potkategoriju dodataka koji smanjuju propusnost (permeability-reducing admixtures, PRA). PRA se dalje dijele prema svojoj sposobnosti da smanje prodor vode s ili bez hidrostatskog tlaka, u dvije potkategorije: PRAN (permeability-reducing admixtures submitted to non-hydrostatic conditions, dodaci za smanjenje propusnosti izloženi nehidrostatskim uvjetima) i PRAH (permeability-reducing admixtures exposed to hydrostatic conditions, dodaci za smanjenje propusnosti izloženi hidrostatskim uvjetima). PRAN su također poznati kao dodaci za zaštitu od kapilarne vlage, a PRAH kao dodaci za vodootpornost. PRAN se preporučuje za odgodu, bez potpunog blokiranja, ulaska i

prolaska vode u tekućem ili plinovitom obliku, pod manje teškim uvjetima tlaka uzrokovanim kapilarnim djelovanjem. Njihov učinak čini površinu betona vodoodbojnom ili jedva vlažnom; stoga je značajan doprinos PRAN-a dugoročno očuvanje estetske kvalitete betona, sprječavanje prodora oborinske i podzemne vode. CA pripadaju kategoriji PRAH-ova, koji su indicirani da sprječavaju prolaz vode pod hidrostatskim tlakom; čime se smanjuje propusnost betona i samozacjeljuju mikropukotine u hidrostatskim uvjetima. CA su komercijalni proizvodi koje nudi širok raspon proizvođača a njihovi kemijski sastavi se razlikuju od proizvođača do proizvođača. Kao rezultat toga, njihove performanse moraju biti usko povezane sa specifičnim sastavom svakog pojedinog proizvoda i proizvođača; ovo stanje otežava predviđanje globalnog ponašanja ovih dodataka iako se neki opći zaključci mogu istaknuti i sažeti u ovom poglavlju. Kemijski sastavi se temelje na karbonatima, silikatima, aluminatima, tetranatrijevoj EDTA (etilendiamintetraoctena kiselina), glicinu i natrijevom acetatu. Neke studije otkrile su da se CA uglavnom sastoje od vapnenca i cementa, dok su druge opisale prisutnost cementa, silicija i karboniziranih materijala kao glavne komponente [45].

Sljedeća četiri mehanizma opisuju proces samocijeljenja betona s kristalnim dodacima [48]:

1. Mehanizam reakcije taloženja - aktivne kemikalije ulaze u beton s vodom i reagiraju sa slobodnim vapnom i oksidima u porama stvarajući kristalne materijale koji blokiraju pore i pukotine. Ključan čimbenik za stimulaciju taloženja kristala u pukotini je voda, jer su kristalni dodaci reaktivne i hidrofilne prirode. Reakcija između aktivnog spoja kristalnog dodatka i trikalcijevog silikata u prisutnosti vode uzrokuje stvaranje gušćeg kalcijevog silikatnog hidrata. Učinak kalcijevog dodatka može uzrokovati začepljenje pora, stvaranje hidrofobnog sloja u kapilarama ili oboje. Kristalni aditivi

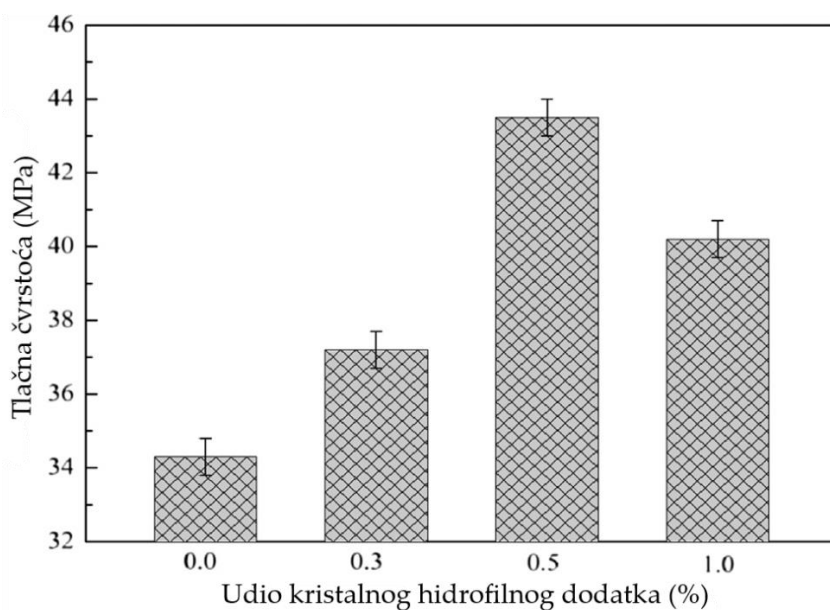
blokiraju pore i pri tome talože hidrate u pukotinama kako bi se mogle oduprijeti prodoru vode pod pritiskom.

2. Mehanizam reakcije taloženja kompleksiranjem - aktivne kemikalije vežu se s Ca^{2+} u betonu i stvaraju nestabilni kompleks koji se raspršuje u otopini pora. Na nehidratiziranim česticama cementa, kompleksni ioni zamijenjeni su SiO_3^{2-} kako bi se formirali C-S-H gelovi i ispunili pore. Aktivne kemikalije ponovno postaju slobodne i nastavljaju se širiti u otopini. Glavni identificirani produkti očvrсле paste su etringit i kalcijev silikat hidrat. Primarni proces za vanjsko zacjeljivanje pukotina je stvaranje kalcijevog karbonata što je posljedica djelovanja kalcijevih aditiva. Interakcija iona karbonata i bikarbonata dovodi do taloženja kalcijevog karbonata što je povezano s povećanjem trajnosti materijala.
3. Kombinirani mehanizam reakcije taloženja i reakcije taloženja kompleksiranjem - dio aktivnih kemikalija sudjeluje u reakciji kapilarne kristalizacije, a drugi dio katalizira hidrataciju nehidratiziranih čestica cementa. Vapnenačke formacije reagiraju s trikalcijevimaluminatom i tvore različite vrste kalcijevih karboaluminata kao što su hemikarboaluminat, monokarboaluminat i trikarboaluminat. Silikatne formacije (mljeveni kvarc) djeluju s kalcijevim hidratom. Vapnenačke formacije imaju puno veću sposobnost upijanja vlage. Visoki afinitet između vapnenačke formacije i kalcijevog aluminata pogoduje kristalizaciji monokarboaluminata umjesto monosulfata. Proces dovodi do smanjenja poroznosti i porasta volumena hidratiziranih faza.
4. Mehanizam kondenzacijske kristalizacije aktivnih kemikalija - ova vrsta tvari stvara netopive kristale vlastitom kondenzacijskom polimerizacijom kako bi popunila pukotine i pore.

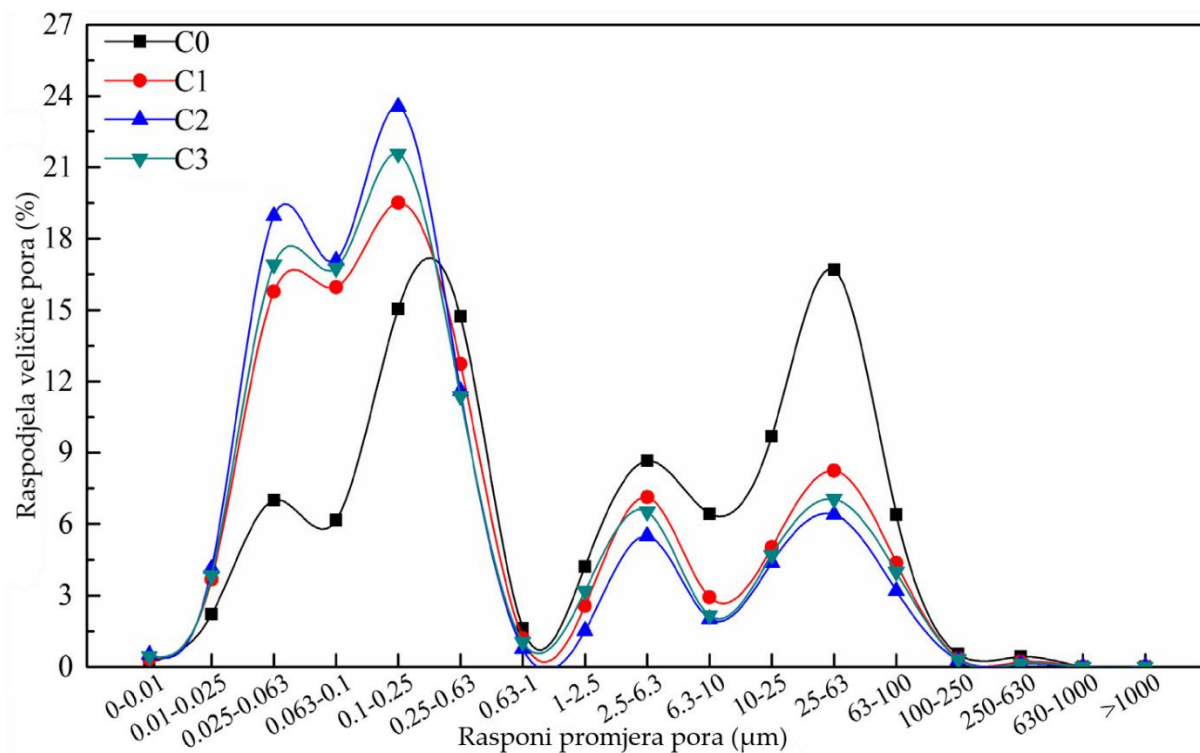
Istraživači u svojim istraživanjima uglavnom ne navode samocijeleću tvar kristalnih hidrofilnih dodataka, a ako je navode radi se o Na_2SO_4 , Na_2SiO_3 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 ,

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, SiO_2 , CaSO_4 , Li_2CO_3 ili $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$. U svojim studijama autori promatraju učinak takvih dodataka na mehanička i trajnosna svojstva betona i na postupak samocijeljenja betona. Detaljan pregled literature na tu temu dan je u nastavku.

Zha i dr. [49] su sami pripremali kristalni hidrofilni dodatak, dodavali ga u mješavine morta u iznosu 0 (mješavina C0), 0.3 (mješavina C1), 0.5 (mješavina C2) i 1 % (mješavina C3) na masu cementa te pratili njegov učinak na tlačnu čvrstoću morta i njegovu sposobnost samocijeljenja. Kristalni hidrofilni dodatak su izradili reakcijom 100 dijelova anhidrida maleinske kiseline, 100 dijelova deionizirane vode, 30 dijelova otopine vodikovog peroksida volumne koncentracije od 30 % i 100 dijelova otopine natrijevog hidroksida s koncentracijom od 0,10 mol/L pri 90-95 °C čija je količina iona kalcija 813 mg/g. Kristalni hidrofilni dodatak je otopljen u vodi prije umješavanja u mješavine morta. Od mješavina morta izrađeni su uzorci 70,7x70,7x70,7 mm koji su nakon očvršćivanja uronjeni u vodenu kupelj. Nakon 28 dana starosti, ispitana im je tlačna čvrstoća, udio pora pojedine veličine te su tretirani na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Tlačna čvrstoća mortova starih 28 dana prikazana je Slikom 3.1., a udio pora pojedine veličine Slikom 3.2.

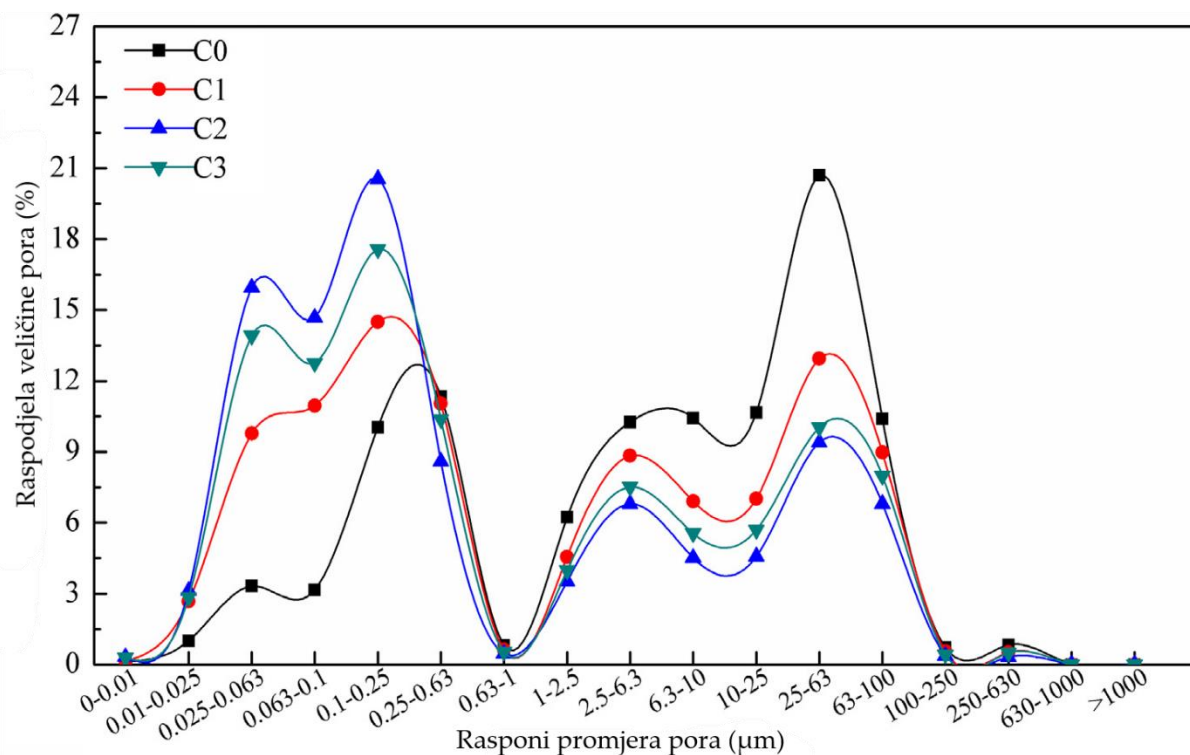


Slika 3.1. Tlačna čvrstoća uzoraka [49]

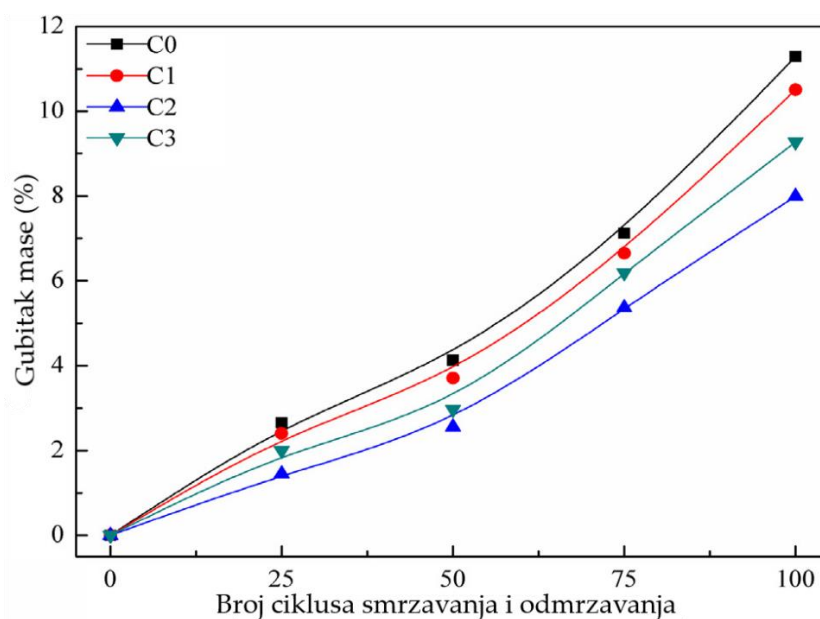


Slika 3.2. Raspodjela pora pojedine veličine u uzorcima [49]

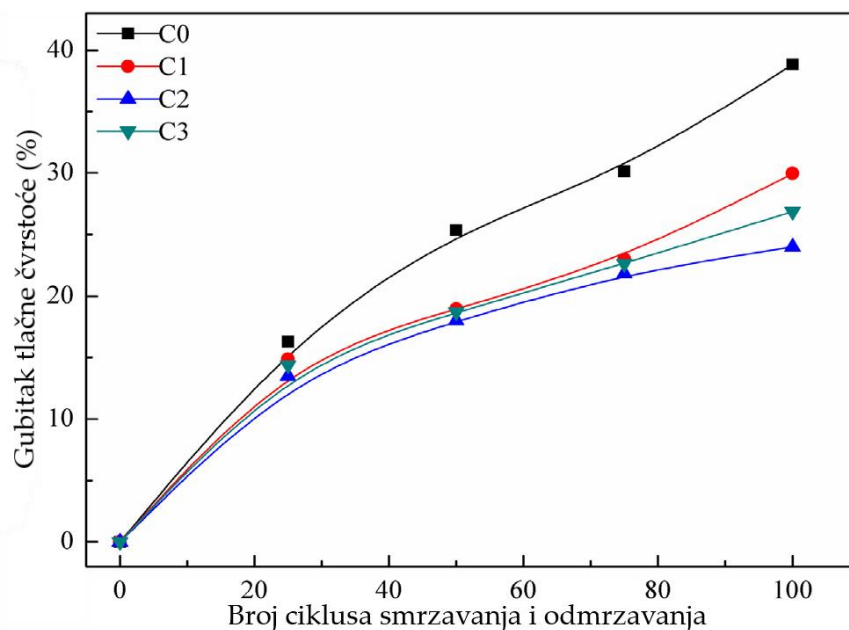
Vodom zasićeni uzorci mortova stavljeni su u hladnjak (-20 ± 2) °C na 4 h, a zatim premješteni u vodenu kupelj (20 ± 2) °C na 4 h. Tako je svaki ciklus smrzavanja/odmrzavanja trajao 8 h. Uzorci mortova su tretirani s 25, 50, 75 i 100 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja. Tijekom smrzavanja i odmrzavanja su im mjereni gubici mase, a dio uzoraka je i trajno izvađen iz hladnjaka zbog ispitivanja tlačne čvrstoće. Nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na uzorcima je mjerena ponovno raspodjela pora pojedine veličine (Slika 3.3). Gubici mase i gubici tlačne čvrstoće mortova su prikazani Slikama 3.4 i 3.5.



Slika 3.3. Raspodjela pora pojedine veličine uzoraka nakon 100 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja [49]

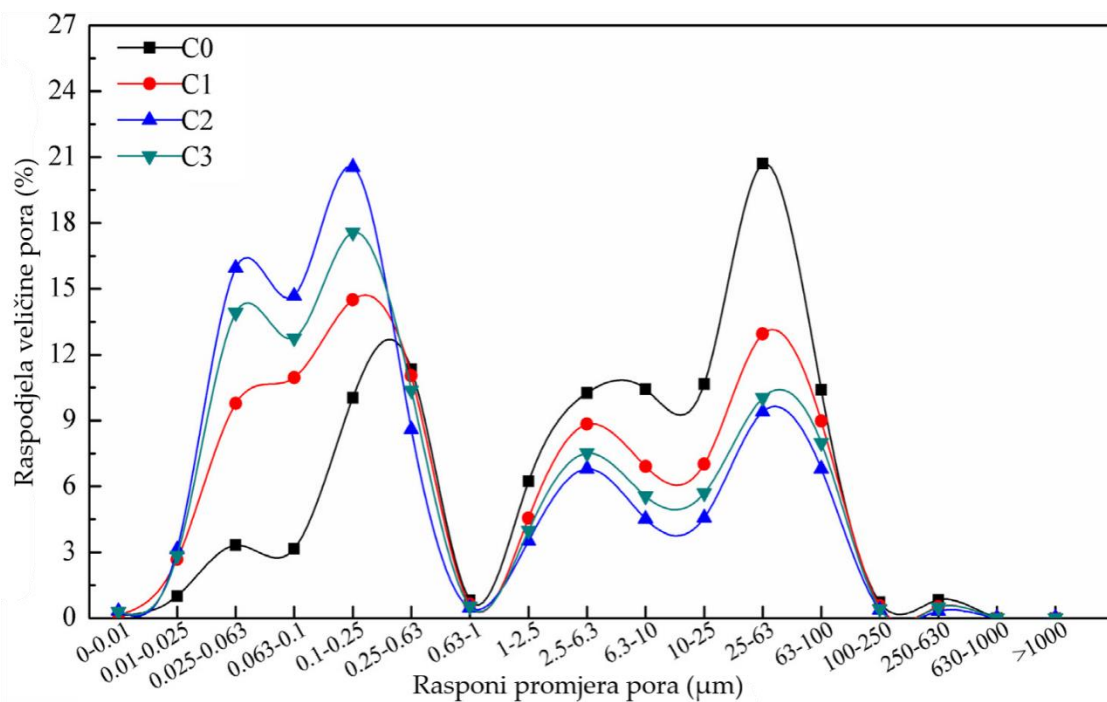


Slika 3.4. Gubitak mase uzoraka tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [49]

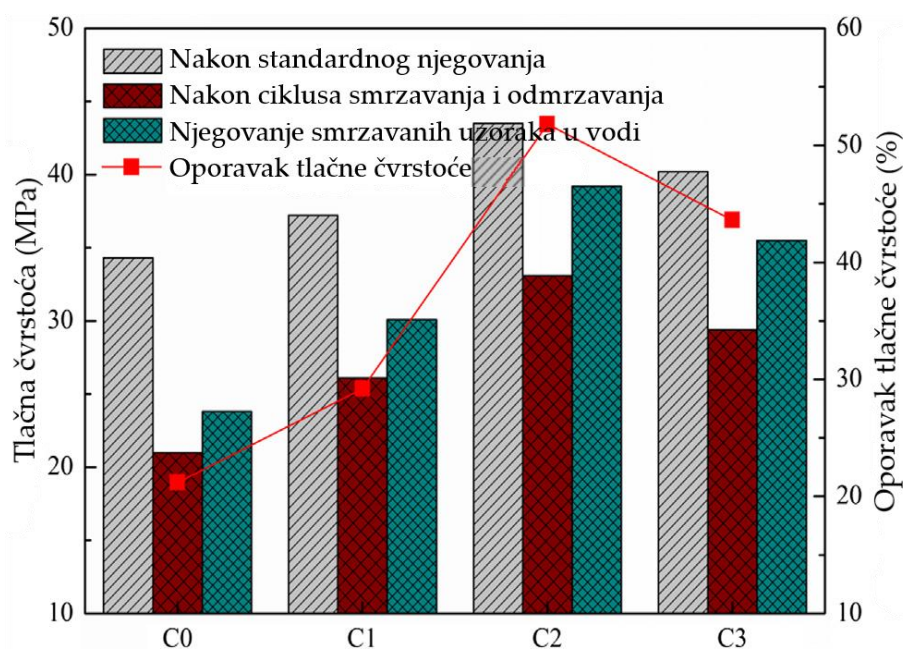


Slika 3.5. Gubitak tlačne čvrstoće uzoraka tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja [49]

Uzorci tretirani sa 100 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja su uronjeni u vodu na 28 dana kako bi se potaknuo proces samocijeljenja te su na njima također mjereni tlačna čvrstoća i raspodjela pora pojedinih veličina. Raspodjela pora pojedinih veličina za uzorke mortova nakon postupka samocijeljenja je prikazana Slikom 3.6, dok Slika 3.7 prikazuje tlačne čvrstoće uzoraka nakon svakog postupka njihova tretiranja. Oporavak tlačne čvrstoće na slici 3.7 je izračunat kao omjer razlike tlačne čvrstoće smrzanvih uzoraka nakon i prije postupka samocijeljenja i razlike tlačnih čvrstoća nesmrzanvih i smrzanvih uzoraka. Slika 3.8. prikazuje samocijeljenje pukotina u mortu tijekom perioda samocijeljenja izraženo kao postotak zacjeljenja. Postotak zacjeljenja je dobiven kao omjer razlike širine pukotine prije i nakon samocijeljenja i širine pukotine prije samocijeljenja.

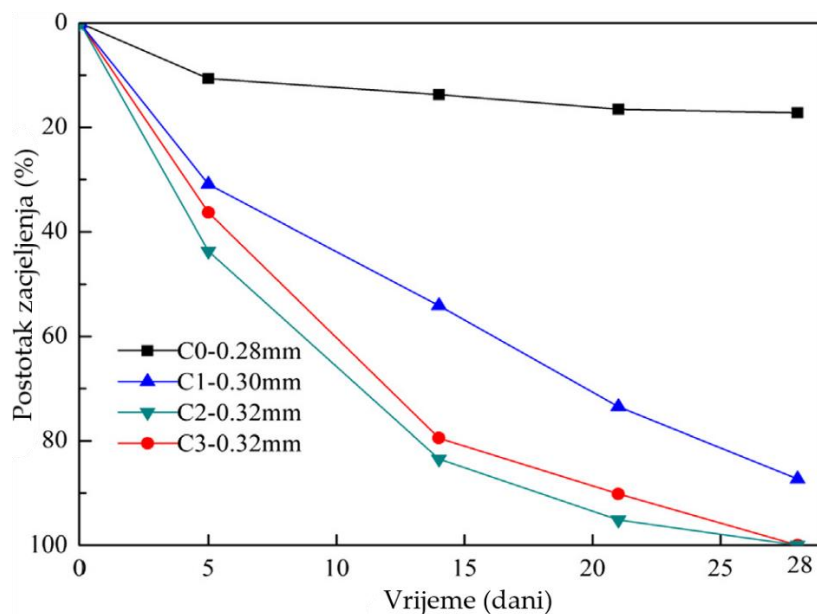


Slika 3.6. Raspodjela promjera pora nakon njegovanja smrzananih uzoraka u vodi [49]



Slika 3.7. Tlačna čvrstoća uzoraka i njezin oporavak nakon njegovanja smrzananih uzoraka u vodi

[49]



Slika 3.8. Samocijeljenje površinskih pukotina uzoraka [49]

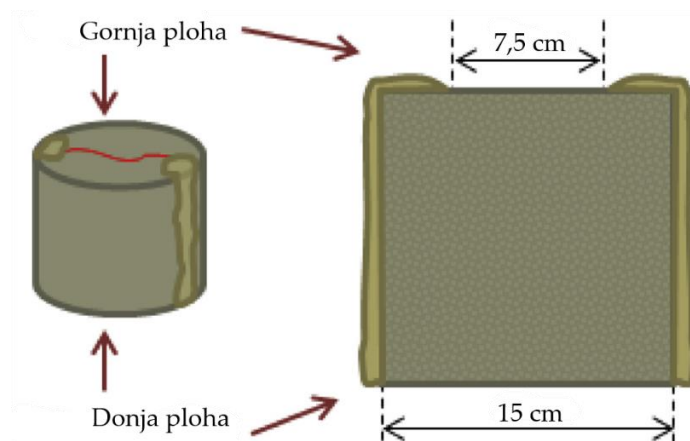
Za materijale na bazi cementa općenito se smatra da su pore čiji je promjer manji od $0,1\ \mu\text{m}$ bezopasne ili manje štetne, a pore čiji je promjer veći od $0,1\ \mu\text{m}$ su štetne [50]. Štetne pore imaju veliki utjecaj na mehanička svojstva i otpornost na smrzavanje i odmrzavanje materijala na bazi cementa. Slika 3.1 prikazuje da najveću tlačnu čvrstoću ostvaruje mješavina C2. Slika 3.2 prikazuje raspodjelu veličine pora mortova neposredno prije izlaganja ciklusima smrzavanja/odmrzavanja. Kao što je pokazano na slici 3.2, udio štetnih pora (promjer veći od $0,1\ \mu\text{m}$) u C0 iznosi 84,4 %, dok udio štetnih pora u C1, C2 i C3 iznosi 64,3 %, 59,3 % i 62 %. Uspoređujući s C0, štetni udjeli pora C1, C2 i C3 smanjuju se za 23,8 %, 42,3 % i 26,5 %, što ukazuje na unutarnju strukturu koja je značajno poboljšana i kompaktnost mortova je pojačana dodavanjem kristalnog hidrofilnog dodatka. Udio štetnih pora kod C2 je najmanji, što ukazuje da se štetne pore morta ne mogu dalje reducirati dodavanjem prekomjerne količine kristalnog hidrofilnog dodatka. Slika 3.3 ukazuje da se udio štetnih pora povećao kod svih mješavina, ali je još uvijek manji kod mješavina C1-C4 nego kod mješavine C0. Slike 3.4 i 3.5 pokazuju da najmanji gubitak mase i gubitak tlačne čvrstoće ostvaruje mješavina C2 s 0.5 % kristalnog hidrofilnog dodatka. Slika 3.6 prikazuje da se udio štetnih pora smanji kod svih mješavina nakon postupka

samocijeljenja, jer se štetne pore pretvaraju u bezopasne pore stvaranjem igličastih kristala. Kao što je prikazano na Slikom 3.7, omjeri oporavka tlačne čvrstoće mješavina C0, C1, C2 i C3 tlačne čvrstoće su 21,1 %, 29,2 %, 51,8 % i 43,6 %. Opet, oporavak tlačne čvrstoće je najizraženiji kod mješavine C2. Slika 3.8 ukazuje da je samocijeljenje pukotina opet najveće kod mješavine betona C2 iz čega definitivno proizlazi zaključak da je optimalna količina kristalnog hidrofilnog dodatka u ovoj studiji 0.5 %.

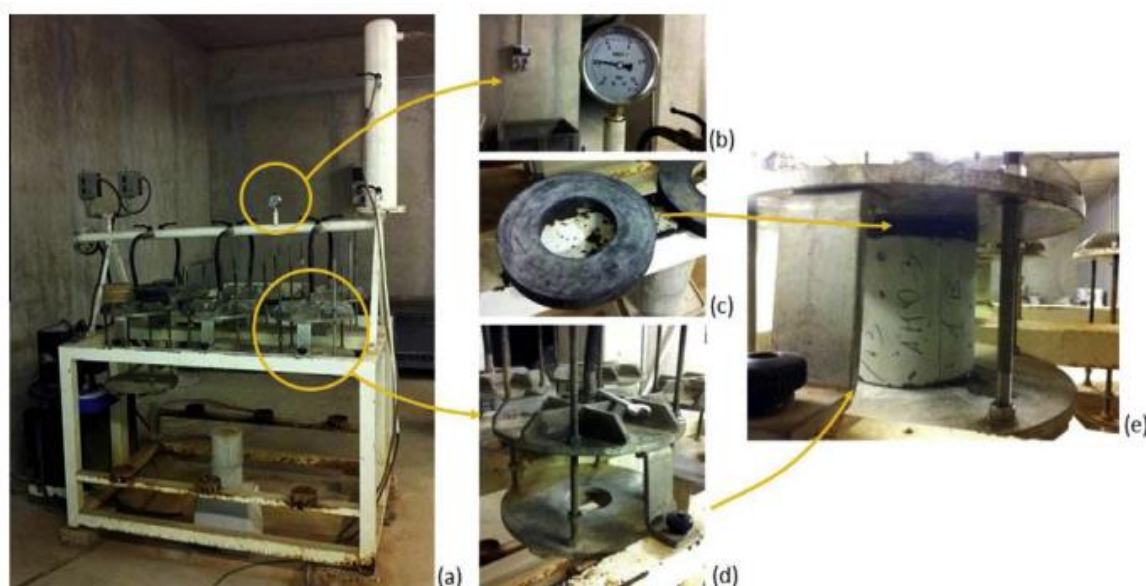
Roig-Flores i dr. [51] su istraživali utjecaj kristalnog hidrofilnog dodatka na sposobnost cijeljenja betona u različitim uvjetima. Pripremili su kontrolnu mješavinu (Control) s 50 kg punila i mješavinu u kojoj su zamijenili 14 kg tog punila s kristalnim hidrofilnim dodatkom (CA). Tih 14 kg kristalnog hidrofilnog dodatka je činilo 4 % mase cementa (količina cementa ostala je ista u obje mješavine). Izradili su cilindrične uzorke promjera 150 mm i visine 150 mm na kojima su nakon 2 dana njihove starosti inicirali pukotine metodom cijepanja (Slika 3.9). Uzorke su potom zabrtvili s bočnih ploha (Slika 3.10) kako bi voda mogla samo protjecati kroz gornju i donju plohu uzoraka. Na tako pripremljenim uzorcima je napravljeno prvo mjerenje protoka vode u trajanju od 5 minuta izlaganjem uzoraka djelovanju vode pod tlakom 2 ± 0.5 bara (Slika 3.11).



Slika 3.9. Proces iniciranja pukotina [51]

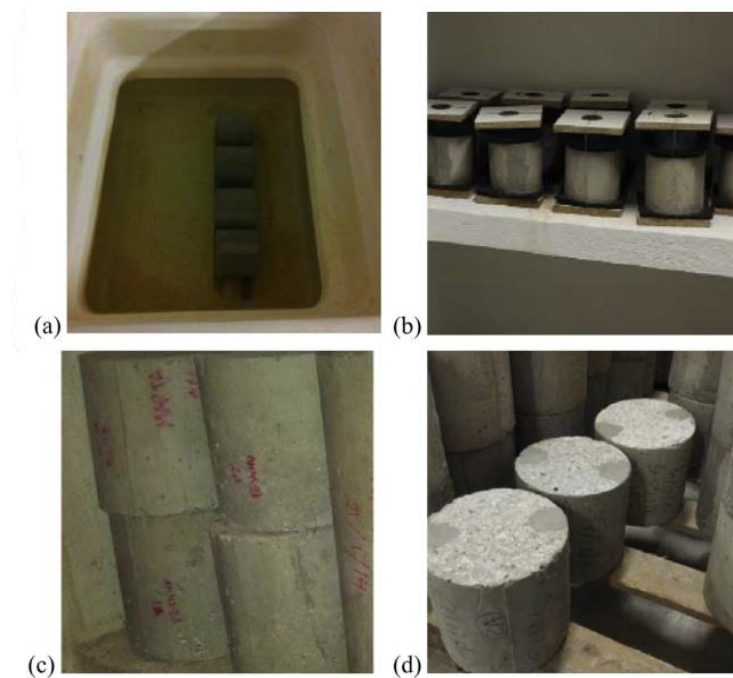


Slika 3.10. Bočno brtvljenje uzorka Sikadurom [51]



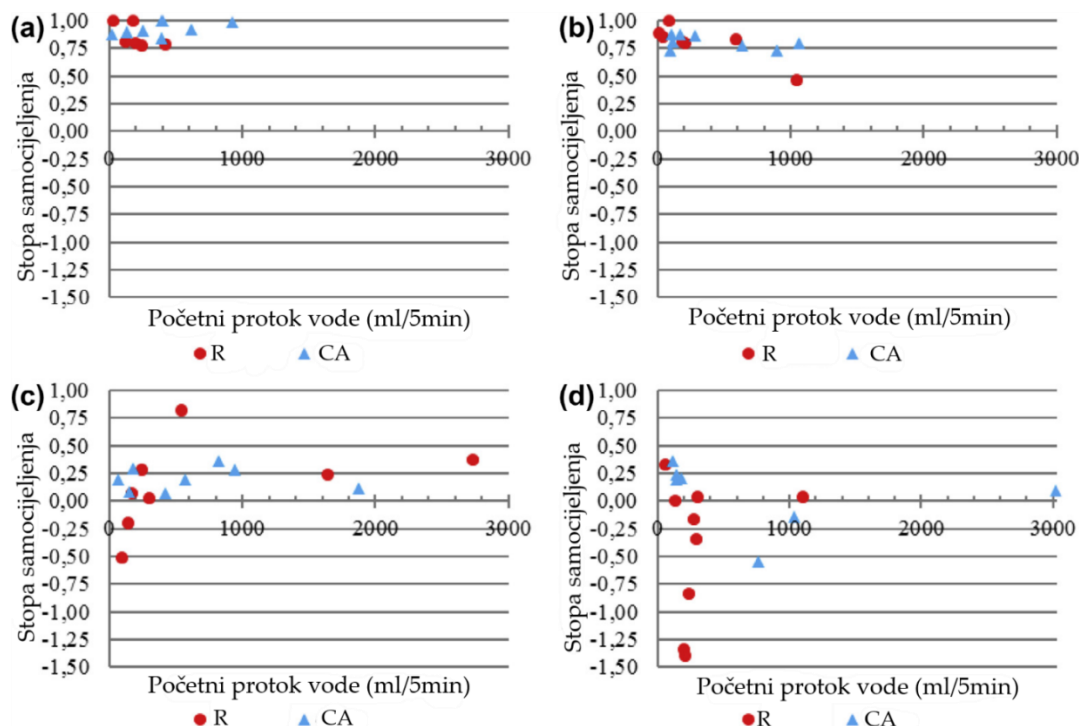
Slika 3.11. Uređaj za mjerenje protoka vode (a) i njegovi dijelovi: manometar (b), brtveni prsten (c), pomoćna konstrukcija (d), pripremljeni uzorak (e) [51]

Uzorci su potom izloženi 4 različita režima njege u trajanju od 42 dana: kontinuirana uronjenost u vodu-WI, kontakt s vodom (visina vode 2 cm primijenjena na gornju plohu uzorka s pukotinom)-WC, boravak u klima komori s temperaturom 20 °C i 95 % vlage-HC, boravak u laboratorijskoj prostori na 40 % vlažnosti-AE (Slika 3.12). Nakon 42 dana, ponovno su izmjereni protoci vode kroz uzorke u trajanju od 5 min.

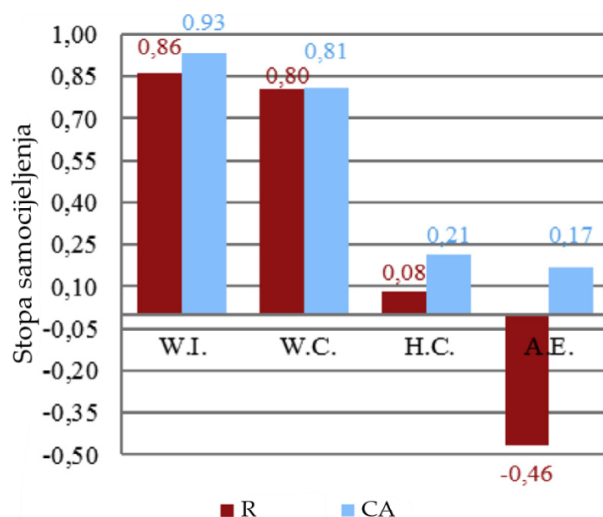


Slika 3.12. Režimi njege uzoraka: kontinuirana uronjenost u vodu (a), kontakt s vodom (b), klima komora (c) i laboratorijski prostor (d) [51]

Iz protoka vode u prvom mjerenju i protoka vode nakon 42 dana cijeljenja uzoraka izračunata je stopa samocijeljenja i prikazana je Slikom 3.13. Slika 3.14 prikazuje učinkovitost pojedinog režima vlažnosti na referentni beton (R) i beton s dodatkom kristalnog hidrofilnog dodatka (CA).



Slika 3.13. Stopa zacjeljenja kod referentnog betona i CA betona u četiri režima vlažnosti: kontinuirana uronjenost u vodu (a), kontakt s vodom (b), klima komora (c) i laboratorijski prostor (d) [51]



Slika 3.14. Prosječna stopa cijeljenja za svaku skupinu izloženosti betona (W.I. – uronjenost u vodi, W.C. – kontakt s vodom, H.C. – klima komora, A.E. – laboratorijski prostor) [51]

Slika 3.14. prikazuje da je najveći postotak zacjeljenja ostvaren ako su uzorci s kristalnim hidrofilnim dodatkom konstantno uronjeni u vodu, a potom ako su uzorci

u kontaktu s vodom visine 2 cm. Ako su uzorci boravili u laboratorijskom prostoru, čak je došlo do daljnjeg otvaranja pukotina i povećanja protoka vode.

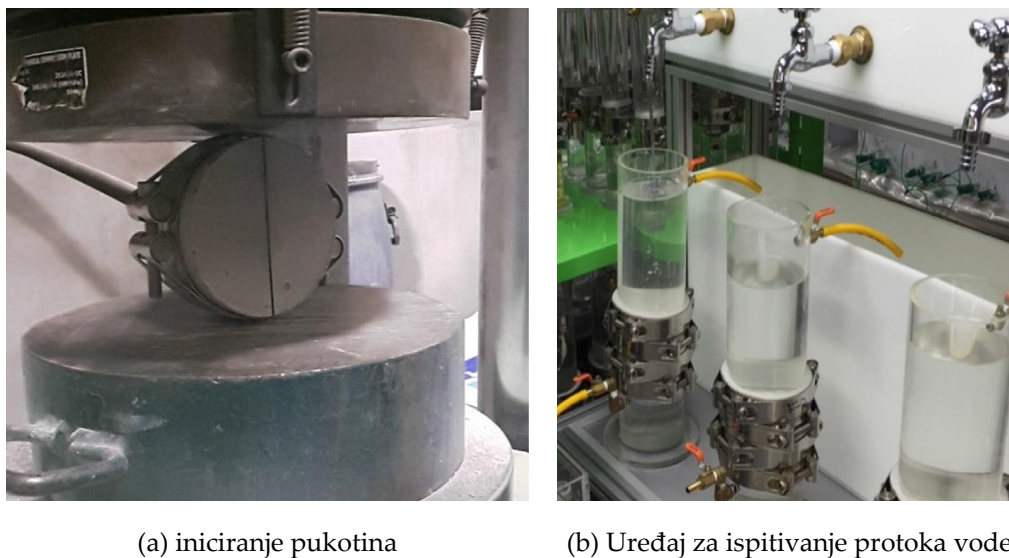
Park i Choi [52] su u svom istraživanju izradili šest mješavina betona, s i bez kristalnog hidrofilnog dodatka, te istraživali sposobnost samocijeljenja takvih betona. U betonskim mješavinama su cement mijenjali s 35 % granulirane zgre (GGBS) te 5, 7 i 10 % ekspandirajućeg agensa (CSA). Kao kristalne hidrofilne dodatke su koristili Na_2SO_4 u iznosu 3 ili 5 % mase cementa ili $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ u iznosu 3 % mase cementa. Detaljni sastav betonskih mješavina je prikazan Tablicom 3.1.

Tablica 3.1. Sastav betonskih mješavina [52]

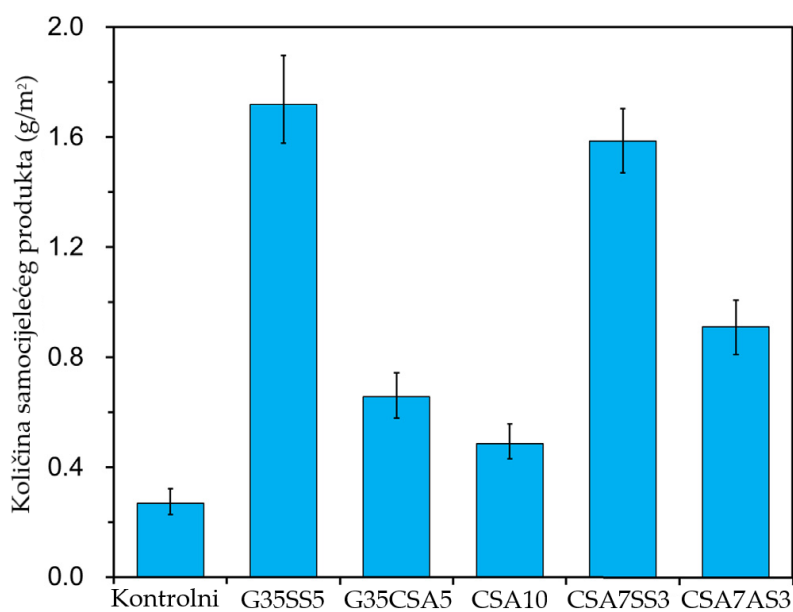
	v/c omjer	Vezivo (% mase)			Kristalni hidrofilni dodaci (% mase)	
		OPC	GGBS	CSA	Na_2SO_4	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
Uobičajeni/Kontrolni	0.4	100	–	–	–	–
G35SS5	0.4	60	35	–	5	–
G35CSA5	0.4	60	35	5	–	–
CSA10	0.4	90	–	10	–	–
CSA7SS3	0.4	90	–	7	3	–
CSA7AC3	0.4	90	–	7	–	3

Iz betonskih mješavina prikazanih Tablicom 3.1. su izrađeni cilindrični uzorci promjera 100 mm i visine 50 mm. Uzorci su u kalupima proveli 1 dan, a potom 7 dana u vodenoj kupelji. Nakon toga, na uzorcima obavijenim metalnom klanfom je generirana pukotina konstantne širine metodom cijepanja (Slika 3.15a). Kako bi se postigla konstantna širina pukotine, u uzorke je prethodno ugrađena bakrena žica. Primjenom metode cijepanja uzorci su raspolovljeni na dva dijela koja su potom pričvršćena zajedno akrilnim gubicama te tako pričvršćena pozicionirana u uređaj za mjerenje brzine protoka vode (Slika 3.15b). Razina vode je uvijek osiguravana konstantnom u visini 250 mm dolijevanjem. Kako je napredovalo samocijeljenje betona, tako se smanjivala brzina protoka vode. Ujedno, na površinama pukotine je praćena količina samocijelećeg produkta. Količina samocijelećeg produkta po svakoj

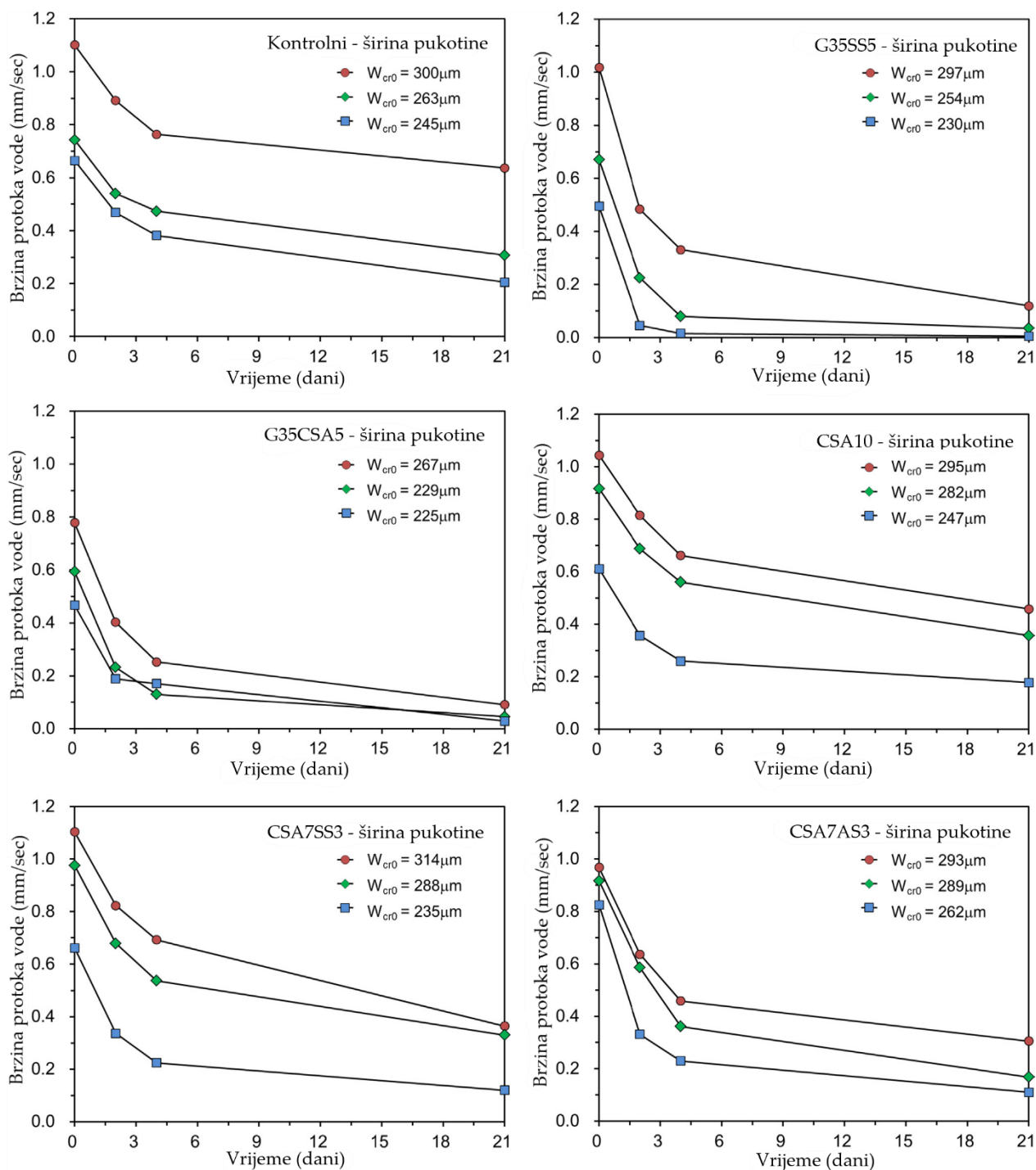
betonskoj mješavini prikazana je Slikom 3.16, a protoci vode kroz betonske uzorke Slikama 3.17a-f.



Slika 3.15. Priprema za ispitivanje protoka vode i iniciranje pukotina [52]



Slika 3.16. Količina samocijelećeg produkta po površini pukotine [52]



Slika 3.17. Smanjenje brzine protoka vode mjereno testom protoka vode [52]

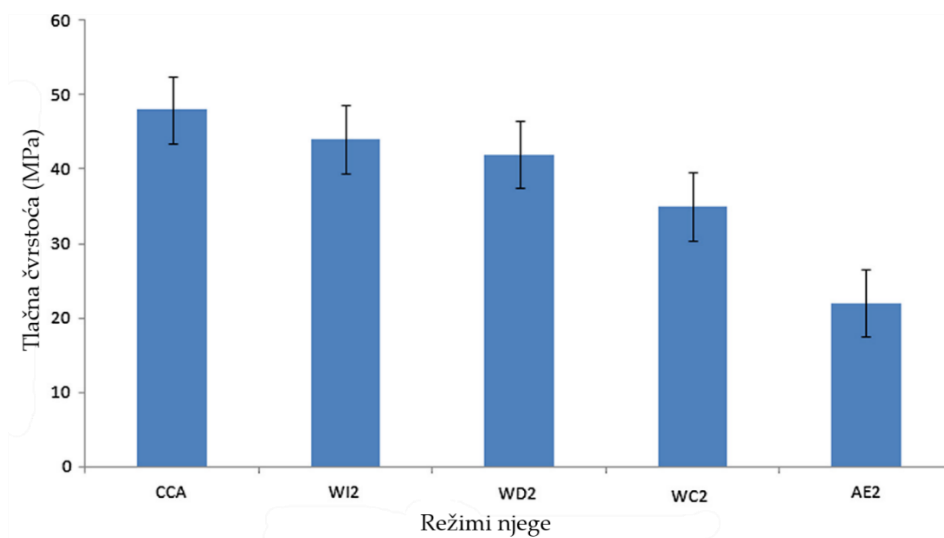
Iz Slike 3.16 vidljivo je da najveću količinu samocijelećeg produkta po pukotini proizvode mješavine G35SS5 i CSA7SS3, a iz Slike 3.17 da se upravo kod tih mješavina najbrže smanjuje protok vode kroz uzorke što znači da su najbrže zacijelile. Općenito, sve mješavine su ostvarile veću količinu samocijelećeg produkta

po pukotini i intenzivnije samocijeljenje nego kontrolna mješavina. Također, učinkovitije po pitanju samocijeljenja se pokazalo koristiti kombinacije CSA s kristalnim hidrofilnim dodacima nego ga koristiti samog u mješavini.

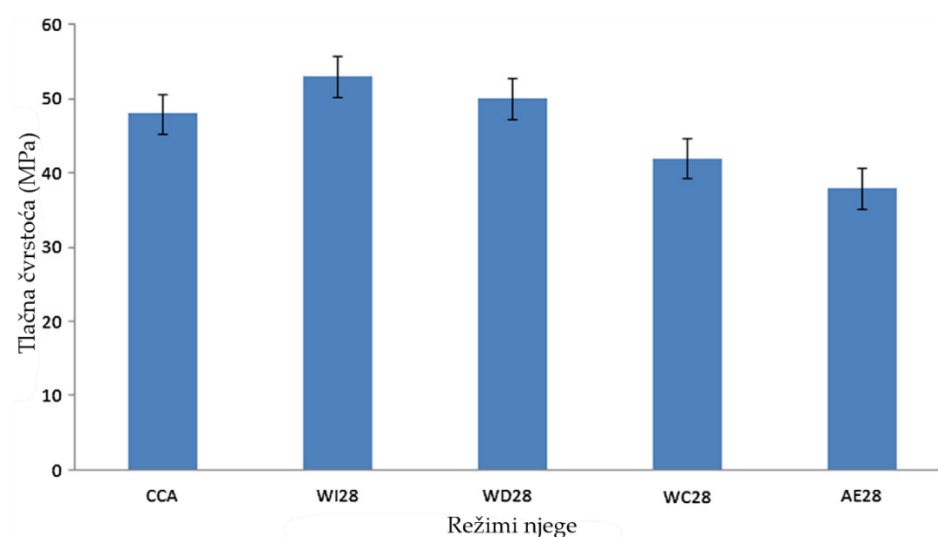
Reddy i Ravitheja [53] su pripremili mješavinu betona s kristalnim hidrofilnim dodatkom (CCA) te su na njoj pratili sposobnost samocijeljenja ispitujući tlačnu i vlačnu čvrstoću cijepanja nakon postupka samocijeljenja. Na uzorcima kocke (za tlačnu čvrstoću) i uzorcima valjaka (za vlačnu čvrstoću cijepanjem) inicirali su pukotine u 2. i 28. danu njihove starosti (Slika 3.18). Sve uzorke s pukotinama su negovali na neki od sljedećih načina kako bi potaknuli samocijeljenje betona: uranjanje u vodu (WI), ciklusi vlaženja-sušenja (WD), kontakt s vodom (WC) i njega na zraku (AE). Nakon 42 dana njege prema određenom režimu, ispitali su tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem na takvim negovanim uzorcima i usporedili ih s čvrstoćama betona na kojemu nisu inicirane pukotine. Rezultati ispitivanja prikazani su Slikama 3.19 – 3.24.



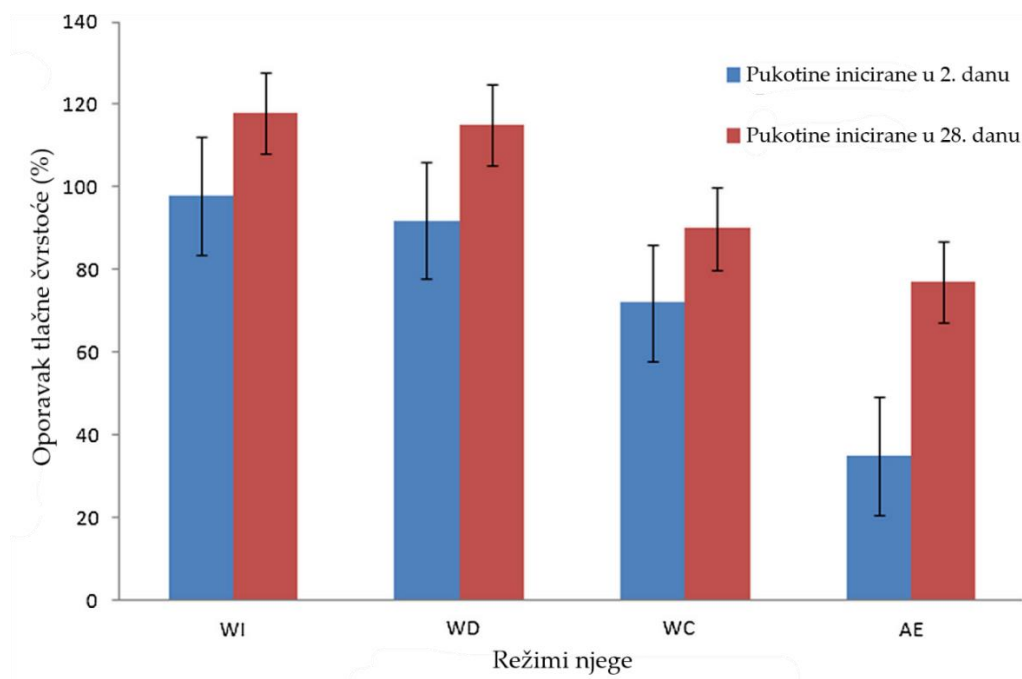
Slika 3.18. Proces prije pucanja betonskog uzorka [53]



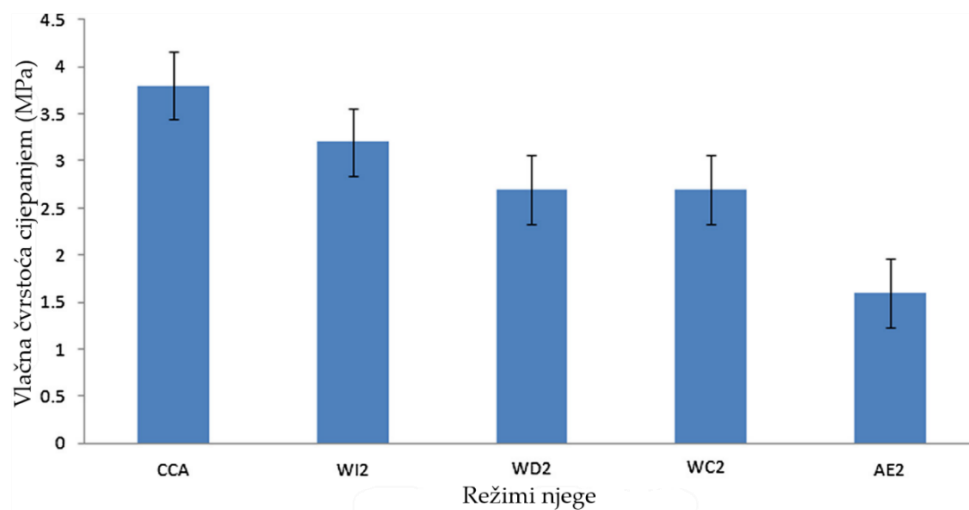
Slika 3.19. Tlačna čvrstoća CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege [53]



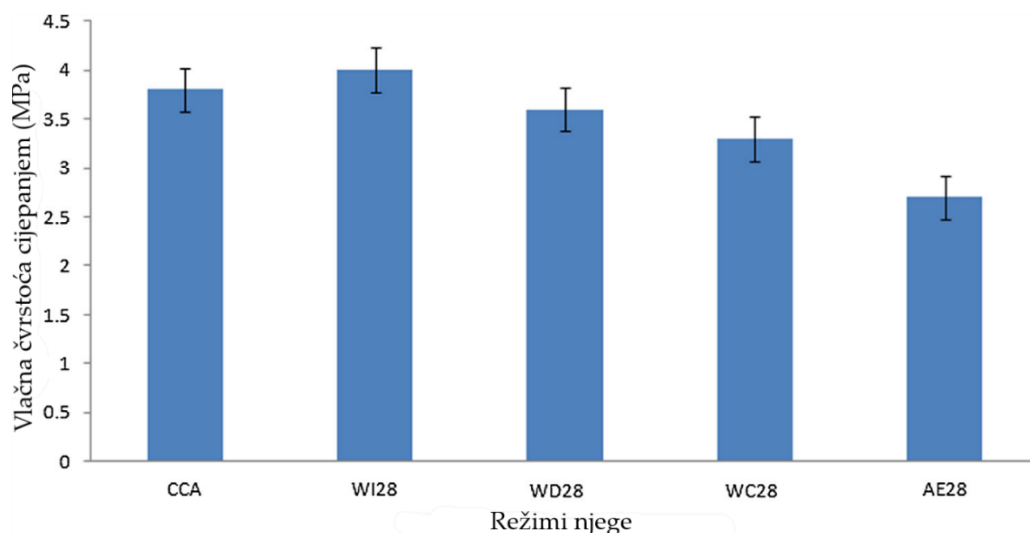
Slika 3.20. Tlačna čvrstoća CCA betona s pukotinama iniciranim u 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege [53]



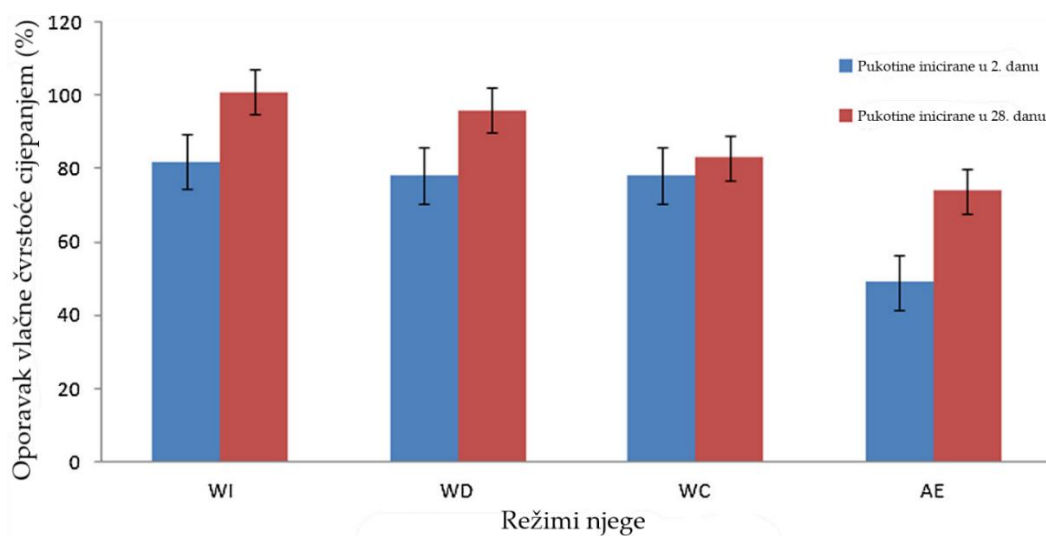
Slika 3.21. Postotak oporavka tlačne čvrstoće CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. i 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege [53]



Slika 3.22. Vlačna čvrstoća cijepanjem CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege [53]



Slika 3.23. Vlačna čvrstoća cijepanjem CCA betona s pukotinama iniciranim u 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege [53]



Slika 3.24. Postotak oporavka vlačne čvrstoće cijepanjem CCA betona s pukotinama iniciranim u 2. i 28. danu starosti uzorka uslijed različitih režima njege [53]

Autori su ovim istraživanjem došli do zaključaka da pukotine inicirane u 28. danu starosti uzoraka bolje cijele nego one inicirane u 2. danu starosti uzoraka (Slike 3.21 i 3.24). Također, od svih režima njege uzoraka s pukotinama, najučinkovitiji po pitanju cijeljenja se pokazao režim njege uranjanjem u vodu, a potom ciklusi vlaženja i sušenja. Štoviše, uzorci njegovani u vodi su dosegili i veću čvrstoću (Slike 3.20 i 3.23) nego uzorci koji nisu prethodno raspucani ako su

pukotine inicirane u 28. danu starosti uzoraka. Suprotno, uzorci koji su raspucali u 2. danu starosti nikad nisu dosegli čvrstoću kao neraspucani uzorci betona (Slike 3.19 i 3.22).

Azarsaa i dr. [54] su spravili četiri mješavine betona s dvije različite vrste cementa i to dvije mješavine bez i dvije s dodatka kristalnog hidrofilnog dodatka (2 % na masu cementa) te im ispitivali različite faktore trajnosti. Od svake mješavine su izrađeni uzorci izmjera i u svrhu prikazanih Tablicom 3.2. Nakon 24 ± 2 h uzorci su izvađeni iz kalupa, svi valjci $\Phi 100 \times 200$ mm kontinuirano su njegovani u vodenoj kupelji do ispitivanja dok su ostali uzorci njegovani na zraku.

Tablica 3.2. Vrsta, broj i uvjeti očvršćivanja uzoraka korištenih u različitim metodama ispitivanja [54]

Metoda ispitivanja	Broj uzorka	Vrsta uzorka	Medij očvršćivanja	Standard
Tlačna čvrstoća	3	valjak ($\phi 100 \times 200$ mm)	28 dana (očvršćivanje pod vodom)	ASTM C39 [55]
Vodopropusnost	3	konusni frustum ($\phi 150$ [gore] $\times 175$ mm)	28 dana (očvršćivanje na zraku)	DIN 1048 [56]
Električna otpornost	3	valjak ($\phi 100 \times 200$ mm)	210 dana (očvršćivanje pod vodom)	AASHTO TP95 [57]
Brzi test prodora klorida (RCP)	4	valjak ($\phi 100 \times 50$ mm)	28 i 56 dana (očvršćivanje pod vodom)	ASTM C1202 [58]
Prividni koeficijent difuzije	3	valjak ($\phi 100 \times 75$ mm)	28 i 56 dana (očvršćivanje pod vodom)	ASTM C1556 [59]
Samocijeljenje	10	valjak ($\phi 100 \times 150$ mm)	28 dana (očvršćivanje na zraku)	Cijeljenje je praćeno kroz protok vode (konstantni vodeni stupac) tijekom perioda

Klasifikacija betonskih mješavina po parametrima brzi test prodora klorida, električna otpornost i prividni koeficijent difuzije napravljena je sukladno Tablici 3.3.

Tablica 3.3. Klasifikacija betona s obzirom na prodor klorida [54]

Propusnost klorida	RCP test (Coulomb)	Električna otpornost (kΩ.cm)		Koeficijent difuzije
		Površinski	Volumni	
Visoka	> 4000	> 12	> 5	> 15
Umjerena	2000-4000	12-21	5-10	10-15
Niska	1000-2000	21-37	10-21	5-10
Jako niska	100-1000	37-254	21-207	2-5
Neznatna	< 100	< 254	< 207	< 2

Rezultati svih ispitivanja pobrojanih u Tablici 3.2. su prikazani Tablicom 3.4. i 3.5.

Tablica 3.4. Sažetak provedenih rezultata ispitivanja indikatora trajnosti [54]

Oznaka mješavine/svojstvo			OPC	OPC-CA	PLC	PLC-CA
Tlačna čvrstoća (Mpa)		28 dana	41,54	46,35	42,07	45,62
Električni otpor (kΩ.cm)	SR (kΩ.cm)	28 dana	6,69 (visoko)	6,45 (visoko)	6,08 (visoko)	6,57 (visoko)
		56 dana	8,15 (visoko)	8,38 (visoko)	7,23 (visoko)	7,7 (visoko)
	BR (kΩ.cm)	28 dana	4,01 (visoko)	4,06 (visoko)	3,91 (visoko)	4,03 (visoko)
		56 dana	6,78 (umjereno)	5,53 (visoko)	6,69 (umjereno)	4,81 (visoko)
Električni naboj (Coulomb)		28 dana	5538 (visoko)	4399,25 (visoko)	4089,25 (visoko)	4257,75 (visoko)
		56 dana	2314,75 (umjereno)	2238 (umjereno)	2578,75 (umjereno)	2827 (umjereno)
Koeficijent vodopropusnosti ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Bazirano na maksimalnoj dubini		156,92	61,20	102,71	25,20
	Bazirano na prosječnoj dubini		97,08	32,81	45,73	19,57
Koeficijent prividne difuzije klorida ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)		28 dana	13,4 (umjereno)	6,28 (nisko)	11,2 (umjereno)	9,77 (nisko)
		56 dana	5,25 (nisko)	4,83 (jako nisko)	8,66 (nisko)	6,51 (nisko)

Tablica 3.5. Izmjerena širina pukotine, početni protok te omjer zacjeljivanja [54]

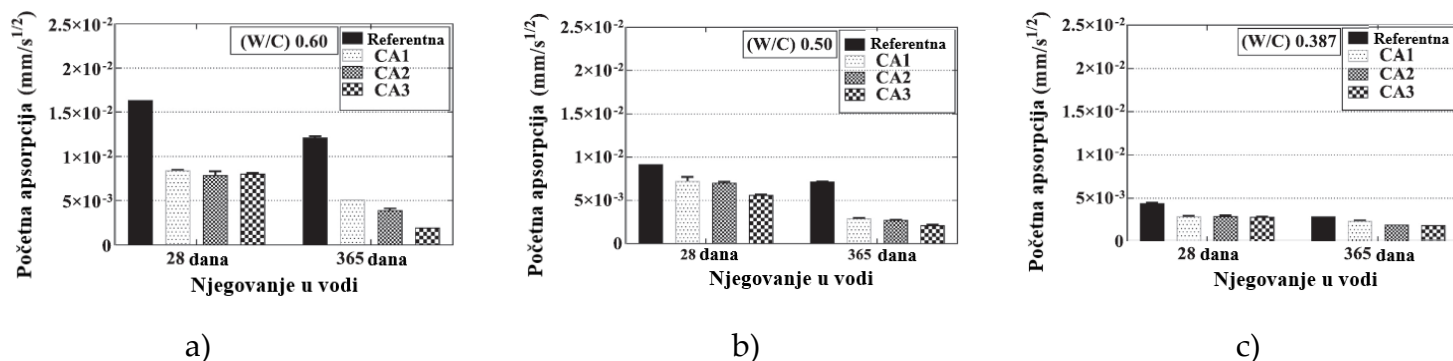
Oznaka uzorka	Širina površinske pukotine (mm)					Stvarni početni protok (lit/5 min)	Omjer zacjeljivanja	
		Vrh	Dno	Prosječno			Pojedinačno	Prosjek
OPC	I	0,226	0,290	0,258	0,2443	0,0696	0,991	0,956
	II	0,292	0,268	0,280		0,1891	0,938	
	III	0,184	0,206	0,195		0,0248	0,941	
OPC-	I	0,230	0,254	0,242	0,2453	0,0575	0,996	0,993

CA	II	0,332	0,275	0,304		0,1926	0,985	
	III	0,176	0,205	0,191		0,0290	0,997	
PLC	I	0,185	0,226	0,206	0,2510	0,0226	0,988	0,975
	II	0,325	0,25	0,288		0,1826	0,982	
	III	0,244	0,273	0,259		0,0796	0,955	
PLC-CA	I	0,203	0,263	0,233	0,2467	0,0915	0,975	0,986
	II	0,248	0,192	0,220		0,0378	0,990	
	III	0,330	0,243	0,287		0,2294	0,992	

Iz Tablice 3.4. vidljivo je da mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom (OPC-CA i PLC-CA) ostvaruju bolje čvrstoće od kontrolnih mješavina (OPC i PLC), niže koeficijente vodopropusnosti no ne može se donijeti zaključak o konkretnom utjecaju kristalnog hidrofilnog dodatka na električni otpor. Međutim, električni naboj i koeficijent prividne difuzije klorida su nešto manji kod mješavina s dodatkom kristalnog hidrofilnog dodatka što govori da kristalni hidrofilni dodatak ipak umanjuje prodor klorida. Gledajući uprosječene vrijednosti omjera zacjeljenja (posljednji stupac Tablice 3.5) zaključuje se da je dodatak kristalnog hidrofilnog dodatka poboljšao samocijeljenje kod betona s obje vrste cementa.

Elsalamawy i dr. [60] su u svom radu proučavali učinak kristalnog dodatka u kontekstu apsorpcije vode, a dobivene su rezultate protumačili SEM i XRD analizom. Izrađeno je 12 betonskih mješavina s tri različita komercijalno dostupna kristalna aditiva (CA), u količini od 2 % na masu cementa prema preporuci proizvođača, CA1, CA2 i CA3, i tri različita vodocementna omjera, 0,6, 0,5 i 0,387, koji pokrivaju raspon betonskih mješavina od visoko do nisko propusnog betona. Koristili su portland cement CEM I 42.5 N, drobljeni ružičasti vapnenac kao agregat, prirodni pijesak, vodu i superplastifikator. Valjci promjera 100 mm i visine 200 mm su izrađeni iz betonskih mješavina, njegovani 7 dana u vodi i ispiljeni na 4 valjka visine 50 mm. Tako pripremljeni valjci su njegovani do 28. ili 365. dana, potom osušeni i jednom svojom stranom stavljeni u kontakt s vodom kako bi se pratila apsorpcija vode dok su ostale strane valjka zabrtvljene. Kontakt s vodom trajao je do 150 sekundi, a tijekom tog vremena se mjerio volumen upijene vode (mm^3/mm^2) te iz njega

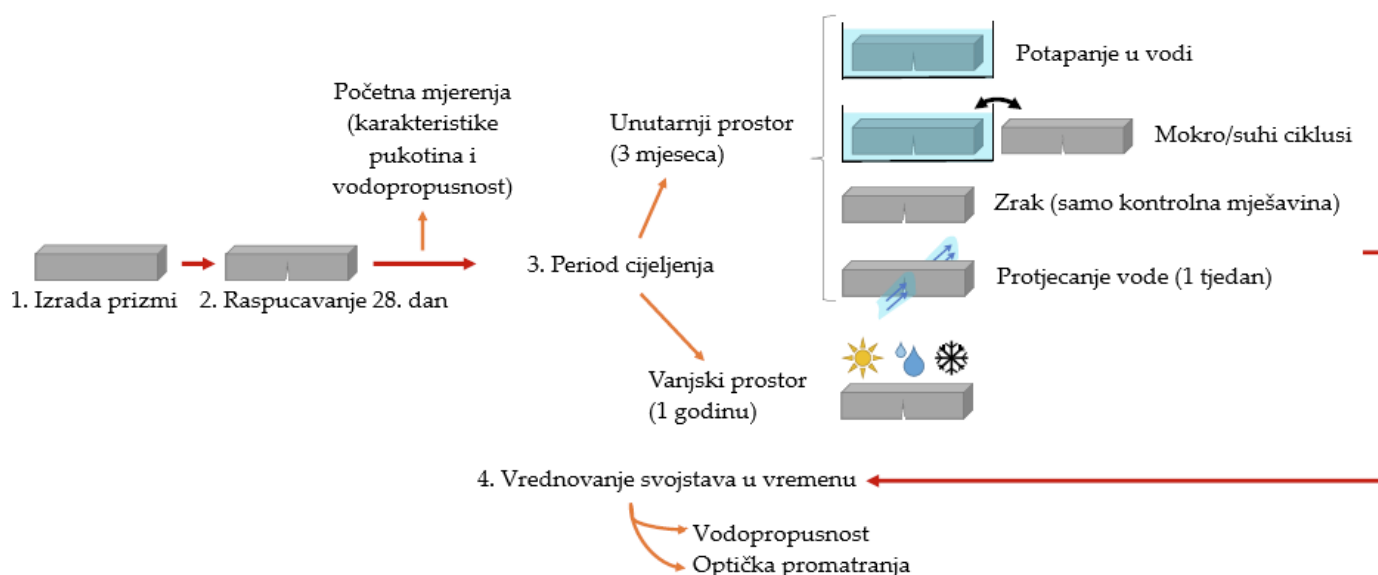
izračunavalo početno upijanje. Početna apsorpcija za betonske mješavine grupirane po različitim v/c prikazana je Slikom 3.25.



Slika 3.25. Početna apsorpcija za betonske uzorke s i bez CA za različite periode njege i različite vodocementne omjere [60]

Rezultati su pokazali da je došlo do značajnog smanjenja početne apsorpcije vode za sve uzorke koji sadrže CA, neovisno o tome radi li se o CA1, CA2 ili CA3, u usporedbi s referentnom mješavinom. Smanjenje apsorpcije vode kod betona s CA u sastavu bilo je izraženije kod mješavina s većim v/c omjerom te izraženije kod uzoraka koji su duže njegovani u vodi prije ispitivanja apsorpcije vode. SEM analiza je pokazala značajno smanjenje sadržaja $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u betonskim mješavinama koja sadrže CA, što može biti zbog prisutnosti silicijevog dioksida visoke finoće u CA, a koji može reagirati s $\text{Ca}(\text{OH})_2$. XRD analiza je pokazala da se kristalni aditivi materijala CA uglavnom sastoje od cementa, silicija i karboniziranih materijala.

Lauch i dr. [61] su u svom radu istraživali sposobnost samocijeljenja betona ojačanih vlaknima (FRC) koji sadrže različite dodatke (kristalni dodatak CA, ekspanzivno sredstvo CSA i superupijajući polimer SAP) na uzorcima podvrgnutim različitim uvjetima izlaganja u laboratoriju (potapanje u vodi, mokro/suhi ciklusi i na zraku tijekom 3 mjeseca, protoku vode 1 tjedan), kao i uvjetima dugotrajne stvarne izloženosti na otvorenom (1 godina pod klimom Montreala), kao što je prikazano na Slici 3.26.



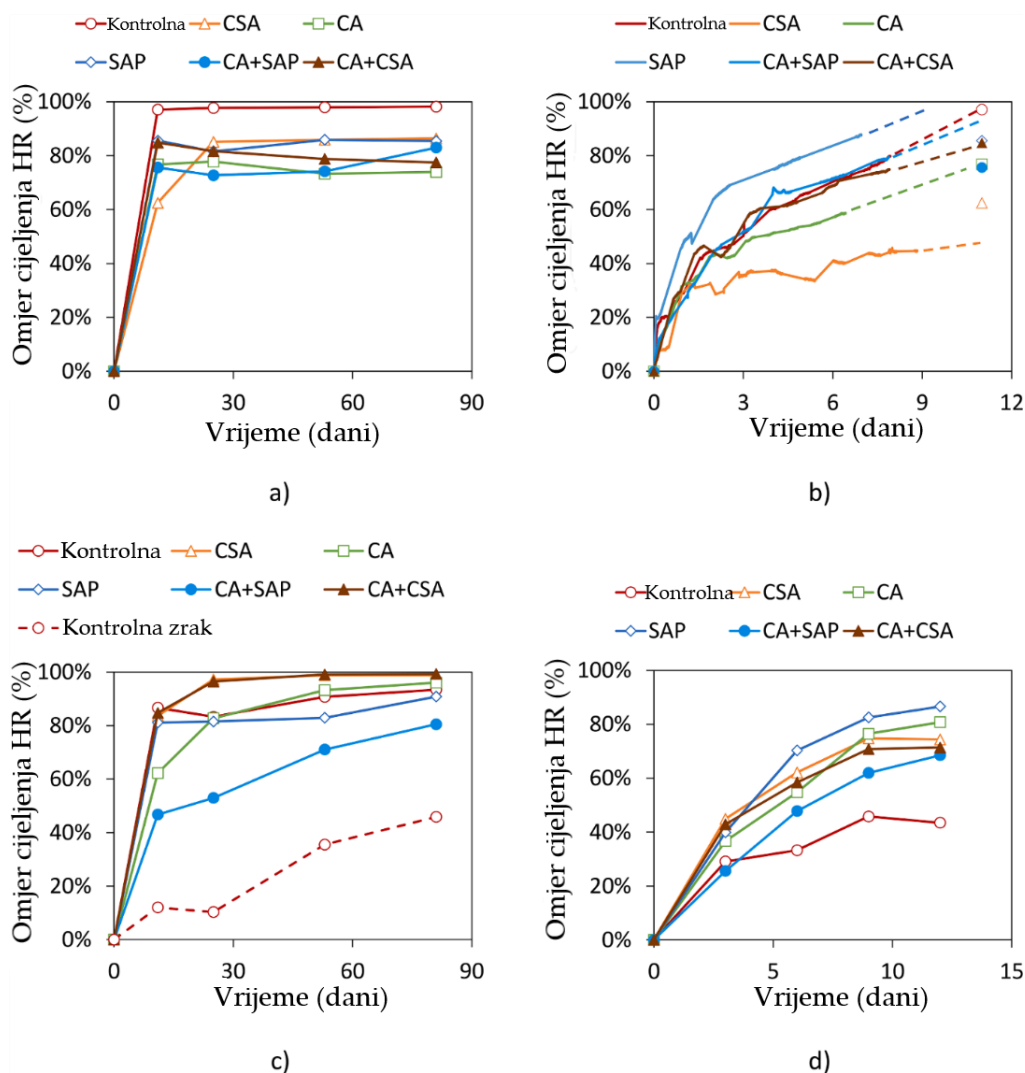
Slika 3.26. Pregled opće metodologije rada autora Lauch i dr. [61]

Izrađeno je šest FRC mješavina: kontrolna mješavina, mješavina s ekspanzivnim sredstvom na bazi kalcijevog sulfoaluminata (CSA), mješavina s kristalnim dodatkom u iznosu 2% na masu cementa (CA), mješavina sa superupijajućim polimerom (SAP), mješavina s kombinacijom CA+SAP, i mješavina s kombinacijom CA+CSA. Ispitni uzorci su bili prizme 75×125×450 mm njegovane u vodi zasićenoj vapnom 28 dana. Uzorci različitih mješavina držani su u odvojenim spremnicima. Prizme su zarezane na sredini raspona (dubine 20 mm), a zatim prethodno napuknute s pomoću metode savijanja u 3 točke u starosti prizmi od 28 dana. Sposobnost samocijeljenja je procijenjena ispitivanjem vodopropusnosti i makroskopskim praćenjem širine pukotine neposredno nakon iniciranja pukotina na prizmama i nakon postupaka samocijeljenja. Za potrebe praćenja samocijeljenja kroz vodopropusnost definiran je omjer cijeljenja (HR) prema formuli (3.1):

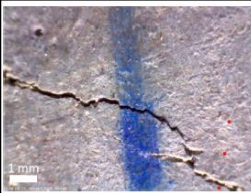
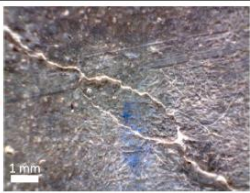
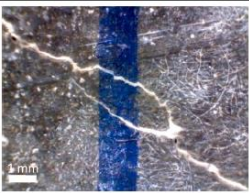
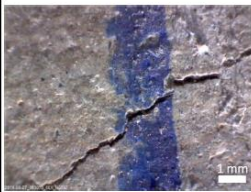
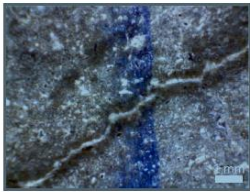
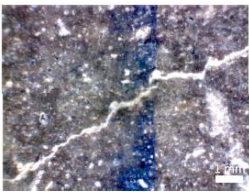
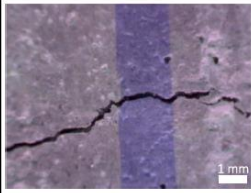
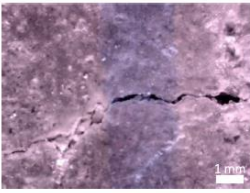
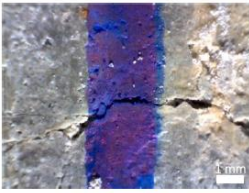
$$HR(\%) = 1 - \frac{K_{wt}}{K_{wi}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

gdje je K_{wt} koeficijent propusnosti u trenutku samocijeljenja t , a K_{wi} početni koeficijent propusnosti neposredno nakon iniciranja pukotine. Rezultati ispitivanja omjera

cijeljenja prikazani su Slikom 3.27 za sve uzorke, a rezultati makroskopskog praćenja širine pukotine samo za SAP uzorke Slikom 3.28.



Slika 3.27. Cijeljenje betonskih mješavina: a) u vodi, b) kontinuiranom protoku vode, c) mokro/suhim ciklusima i okolnom zraku za kontrolnu mješavinu i d) na otvorenom [61]

	Prije cijeljenja	Nakon prvog mjerenja (11 dana u zatvorenom / 3 mjeseca vani)	Nakon zadnjeg mjerenja (4 mjeseca u zatvorenom / 12 mjeseci vani)
Voda	 $w_f = 0.11 \text{ mm}$	 $HR = 94\%$	 $HR = 97\%$
Mokro / suho	 $w_f = 0.13 \text{ mm}$	 $HR = 90\%$	 $HR = 95\%$
Vanjski prostor	 $w_f = 0.14 \text{ mm}$	 $HR = 31\%$	 $HR = 77\%$

Slika 3.28. Makroskopske slike zacjeljivanja dijelova pukotina za SAP uzorke izložene u zatvorenom (uranjanje u vodu i mokro/suho) i na otvorenom [61]

Iz Slike 3.27 je vidljivo da kontrolna mješavina najbolje cijeli u vodi, potom u mokro/suho ciklusima, a najlošije na zraku. Učinak CA na samocijeljenje je najizraženiji u mokro/suhim ciklusima što se dodatno pojačava kada se CA doda CSA. Dodatak CSA s CA gotovo u svim režimima njege pojačava učinkovitost CA na samocijeljenje betona. Iz Slike 3.27 je vidljivo da u zatvorenom prostoru u uvjetima vode i mokro/suhim ciklusima, pukotine su brzo zapunjene bijelim proizvodima, pokazujući visoke omjere zacjeljivanja ($\geq 90\%$) već nakon 11 dana, dok je samocijeljenje bilo sporije u stvarnom izlaganju na otvorenom (SAP prizma je pokazala 31 % zacjeljenja nakon 3 mjeseca i 77 % nakon 12 mjeseci). Rezultati mikroskopske analize su pokazali prisutnost kalcijevog karbonata u formi etringita i homogeno disperziranog kalcita kod kontrolne mješavine te prisutnost kalcijev karbonata u formi aragonita kod mješavina s CA.

Li i dr. [62] su u svom radu istraživali sinergijski učinak superupijajućeg polimera (SAP) i kristalnog dodatka (CA) u iznosu 0,2-2 % na masu cementa za cijeljenje makropukotina u materijalima na bazi cementa (CBM). Kristalni dodaci korišteni u ovom istraživanju su limunska kiselina, silicijev dioksid, natrijev silikat, natrijev karbonat i jedan komercijalni proizvod od proizvođača Harbin (Harbin CA). Kao i u [61] praćen je omjer samocijeljenja te je zaključeno da od svih kristalnih dodataka limunska kiselina ostvaruje najbolji sinergijski učinak sa SAP u pogledu cijeljenja pukotina.

Park i Choi [63] proučavali su zacjeljivanje cementnih materijala s pomoću izotermalne kalorimetrije. Autori su u svom radu koristili obični portland cement, kalcijev sulfoaluminat kao sredstvo za ekspanziju, te različite kristalne dodatke na bazi sulfata (kalcijev sulfat, aluminijski sulfat, natrijev sulfat) i na bazi karbonata (natrijev karbonat, natrijev hidrogenkarbonat i litijev karbonat). Iz mješavina cementnih pasta napravljeni su uzorci 10x10x10 mm, njegovani do 7, 28 ili 91 dan starosti te potom samljeveni u prah i pomiješani s destiliranom vodom za praćenje topline hidratacije izotermalnom kalorimetrijom. Veća topline hidratacije upućivala je na bolju sposobnost daljnje hidratacije materijala, a time i na bolju sposobnost samocijeljenja tog materijala. Mješavine s kristalnim dodacima na bazi sulfata su pokazivale veću toplinu hidratacije od referentne mješavine u starosti uzoraka od 7 dana, ali se s povećanjem starosti uzoraka (28 i 91 dan) njihova učinkovitost smanjivala. Mješavine s kristalnim dodacima na bazi karbonata su pokazivale manju toplinu hidratacije od referentne mješavine u starosti uzoraka od 7 dana, ali jednaku ili veću toplinu hidratacije od referentne mješavine u starosti uzoraka od 28 i 90 dana. Zaključak istraživanja je da učinkovitost kristalnog dodatka po pitanju samocijeljenja betona ovisi o vrsti dodatka (sulfatni ili karbonatni) i o starosti uzorka pri kojoj je došlo do raspucavanja.

Escoffres i dr. [64] su istraživali potencijal samocijeljenja napuknutog betona visokih performansi s čeličnim vlaknima (HPFRC) i betona visokih performansi s čeličnim vlaknima i kristalnim dodatkom u iznosu 2 % na masu cementa (HPFRC-CA). Na prizmama dimenzija 150x150x550 mm i starosti 28 dana je urezana pukotina širine 0.4 mm te su tri takve prizme njegovane u vodi, a tri na zraku u periodu od dodatnih 56 dana. Provedeno je ispitivanje savijanjem u tri točke na prizmama njegovanim u oba medija te izračunat mehanički oporavak za svaku prizmu kao omjer vlačnih naprezanja na prizmi njegovanoj 28 dana u određenom mediju (voda, zrak) i vlačnih naprezanja na tek raspucaloj prizmi u starosti od 28 dana. Prizme bez i s kristalnim dodatkom njegovane na zraku ostvarile su jednak mehanički oporavak dok su prizme s kristalnim dodatkom njegovane u vodi ostvarile nešto bolji oporavak od prizmi bez kristalnog dodatka. SEM analiza je pokazala da se u pukotini mješavine HPFRC formirao kalcijev karbonat u formi aragonita kao samocijeleći produkt dok se u pukotini mješavine HPFRC-CA formirao kalcijev karbonat u formi aragonita kao samocijeleći produkt.

Oliveira i dr. [65] su u svom radu procjenjivali produkte cijeljenja u kratkom vremenu (do 7 dana) i u dužem vremenu (do 178 dana). U svrhu praćenja produkata cijeljenja u kratkom vremenu su napravili cementne paste od cementa i kristalnog dodatka (0 %, 1 % i 2 % zamjene mase cementa) te pomiješali s destiliranom vodom i pratili toplinu hidratacije izotermalnim kalorimetrom. Na ovoj razini je primijećeno da CA usporava proces vezanja cementne paste i ovaj efekt je izraženiji pri većem udjelu CA. Nadalje su iz tih cementnih pasta pripremljeni uzorci promjera 50 mm i visine 100 mm te su njegovani 7 dana na 60 °C u vodi, a potom razrezani na 3 uzorka promjera 50 mm i visine 25 mm te je na njima inducirana pukotina metodom cijepanja. Takvi uzorci su izloženi ponovo njezi od 60 °C u vodi do starosti od 178 dana. SEM analiza je utvrdila prisutnost kalcij hidroksida/portlandita (CH) kao primarnog produkta samocijeljenja što je potvrdilo dvostruku ulogu CA: CA popunjava pukotine i čini cementnu matricu gušćom.

Zhang i dr. [66] su ispitivali učinak CA na mehanička svojstva i transportna svojstva te sposobnost samocijeljenja cementnog kompozita. CA je u ovoj studiji samostalno pripremljen od kelirajućeg sredstva, kalcija, silicija i etilen-vinil acetata (omjeri 4,99-23,75-23,75-47,51) i korišten u udjelima 0, 1,5 %, 3 % i 4,5 % zamjene mase cementa. Izrađeni su uzorci 40x40x40 mm za ispitivanje mehaničkih svojstava (tlačne i vlačne čvrstoće), te njegovani 28 i 56 dana do trenutka ispitivanja. Valjci promjera 100 mm i visine 50 mm poslužili su za određivanje transportnih svojstava (apsorpcija/upijanje vode) i sposobnosti samocijeljenja. Dodatak CA je poboljšao tlačnu i vlačnu čvrstoću u starosti 28 i 56 dana te je veći udio CA imao pozitivniji utjecaj na tlačnu čvrstoću. Upijanje vode smanjivalo se s povećanjem udjela CA u mješavinama. Sposobnost samocijeljenja je promatrana vizualno i kroz praćenje upijanja vode i vodonepropusnosti na uzorcima s iniciranom pukotinom i raspucalim uzorcima koji su njegovani 28 dana u vodi. Po pitanju samocijeljenja je zaključeno da najbolji učinak ima najveća koncentracija CA u mješavini.

Li i dr. [67] su u svom radu istraživali učinkovitost različitih CA premaza na sposobnost samocijeljenja betona. CA premazi koje su koristili su bili na bazi natrijevog karbonata, natrijevog silikata, natrijevog aluminata, tetranatrijevog EDTA-a i glicerina. Rezultati su pokazali da je najbolju sposobnost samocijeljenja imao beton s premazom na bazi natrijevog silikata.

Roig-Flores i dr. [68] u svom radu analiziraju svojstva samocijeljenja betona rane starosti, izrađenih s i bez dodatka CA (4 % na masu cementa), mjerenjem vodopropusnosti napuknutih uzoraka i njihove širine pukotine. Ispitane su dvije klase betona (C30/37 i C45/55) i tri uvjeta izloženosti za cijeljenje: uranjanje u vodu na 15 °C, na 30 °C i mokro/suhi ciklusi. Uzorci su napuknuti nakon 2 dana starosti, do širine pukotine u rasponu od 0,10-0,40 mm. Razmotrena su tri uvjeta izloženosti okoliša kako bi se utvrdio utjecaj dostupnosti vode i njezine temperature na sposobnost samocijeljenja ispitanih uzoraka, uspoređujući referentni beton s

betonom s kristalnim dodatkom. Svi uzorci su cijelili 42 dana u navedenim uvjetima. Najbolju sposobnost cijeljenja su pokazali uzorci betona s CA (za obje klase betona) njegovani u vodi na 30 °C. Uzorci niže klase betona pokazali su veću sposobnost samocijeljenja.

Gojević i dr. [69] u svom radu istražuju učinkovitost CA na tlačnu čvrstoću, vodonepropusnost i sposobnost cijeljenja betona s vodocementnim omjerom 0,45 i 0,55. Napravljene su dvije mješavine za svaki vodocementni omjer, s i bez dodatka CA. Količina CA u mješavinama je bila 1 % na masu cementa. Sastav mješavina prikazan je u Tablici 3.6.

Tablica 3.6. Sastavi mješavina [69]

Sastojak/ mješavina	M-0,45-R	M-0,45-CWA	M-0,55-R	M-0,55-CWA
Cement (kg/m ³)	350	350	350	350
Voda (L/m ³)	157,5	157,5	192,5	192,5
Vodocementni omjer	0,45	0,45	0,55	0,55
Kristalni vodonepropusni dodaci (kg)	-	3,5	-	3,5
Agregat ukupno(kg/m ³)	1969	1969	1872,7	1872,7
Punilo (kg/m ³)	27,6	27,6	26,2	26,2
Dolomit, 0/4 mm (kg/m ³)	523,8	523,8	498,2	524,4
Dolomit, 4/8 mm (kg/m ³)	354,4	354,4	337,1	337,1
Dolomit, 8/16 mm (kg/m ³)	452,8	452,8	430,7	430,7
Dolomit, 16/31,5 mm (kg/m ³)	610,4	610,4	580,5	580,5

Za ispitivanje tlačne čvrstoće, vodopropusnosti i samocijeljenja su izrađene kocke dimenzija 150x150x150 mm te njegovane do 28 dana u vodi. Tlačna čvrstoća i vodopropusnost su određene u 28. danu starosti uzorka te prikazane Tablicom 3.7. Na uzorcima na kojima se pratilo samocijeljenje se inicirala pukotina, a potom su potopljani u vodu na 56 dana. U svrhu praćenja sposobnosti samocijeljenja je izmjerena širina pukotine neposredno nakon iniciranja i nakon procesa njege.

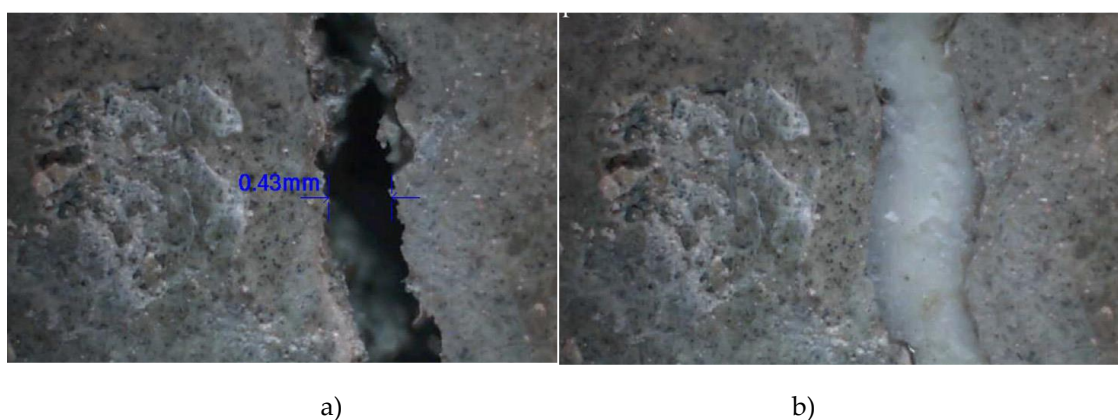
Tablica 3.7. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg i očvrslog betona [69]

Svojstvo/ mješavina	M-0,45-R	M-0,45-CWA	M-0,55-R	M-0,55-CWA
Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	50,9 ± 1,4	49,3 ± 0,8	44,6 ± 1,8	43,5 ± 1,1
Dubina prodora vode (mm)	24 ± 2	19 ± 4	30 ± 8	27 ± 4

Vidljivo je iz Tablice 3.7 da dodatak CA nije imao utjecaja na tlačnu čvrstoću obje mješavine, ali je smanjio dubinu prodora vode. Dodatak CA je bio učinkovitiji po pitanju smanjenja dubine prodora vode kod mješavine s manjim vodocementnim omjerom. Rezultati mjerenja širine pukotina upućuju na zaključak da je CA unaprijedio cijeljenje pukotina i to jednako kod mješavina s vodocementnim omjerom 0,45 i 0,55. U ovom istraživanju korištene su SEM, EDS, XRD i FTIR kako bi se utvrdila kemijska osnova inače komercijalno dobavljivog CA, ali jednoznačan odgovor na to nije dobiven.

4. Samocijeljenje betona primjenom kapsula

Strategija inkapsulacije smatra se svestranom i učinkovitom strategijom za samocijeljenje. U samocijeljenju temeljenom na kapsulama, kapsule pružaju mehaničku zaštitu ljekovitim agensima i otpuštaju ih tek nakon što ih potaknu pukotine (puknućem kapsule ili difuzijom), vlaga, zrak ili promjena pH otopine pora u matrici. U slučajevima kada je pucanje mehanizam okidača, kapsule se lome i ljekovito sredstvo se kapilarnim djelovanjem povlači u pukotinu (Slika 4.1).



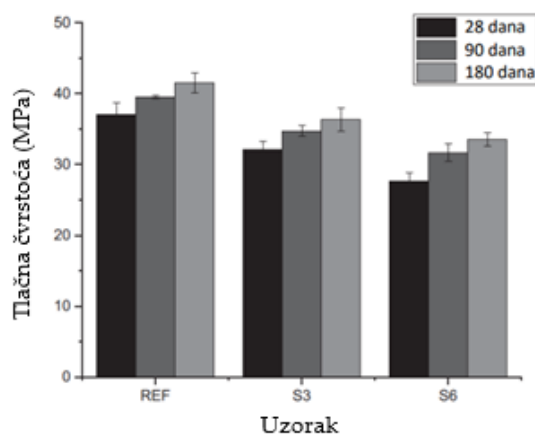
Slika 4.1. Mehanizam djelovanja kapsula u procesu samocijeljenja (a) pukotina prije samocijeljenja, (b) pukotina nakon samocijeljenja [70]

Cijeljenje temeljeno na kapsulama može se široko kategorizirati u cijeljenje izazvano (1) bakterijskim taloženjem i (2) inkapsuliranim kemijskim ljekovitim agensima [71]. Ovo poglavlje obuhvaća inkapsuliranje kemijskim ljekovitim agensima dok je bakterijsko taloženje obrađeno u jednom od poglavlja.

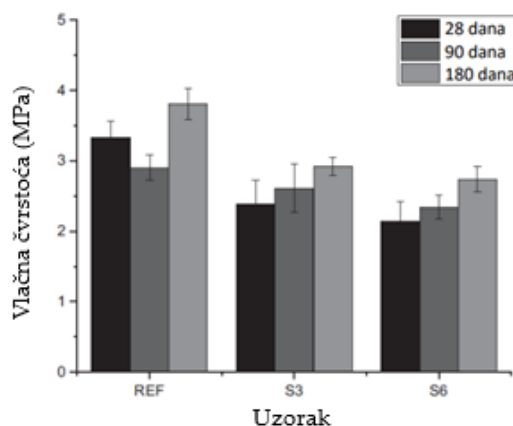
Istraživači u svojim istraživanjima koriste kapsule koje se: 1) ili umiješaju u beton 2) ili se pak ugrađuju u prethodno izbušene rupe u betonu odnosno instaliraju u kalupe/oplatu prije zalijevanja betonskom mješavinom. Kapsule koje se miješaju u beton su obično male i nazivaju se mikrokapsulama ili čak nanokapsulama zbog svoje veličine dok se ovim drugim kapsulama veličina izražava u centimetrima. Mikrokapsule/nanokapsule se izrađuju ili kao jednokomponentne ili kao višekomponentne kapsule. Detaljan pregled literature o različitim mehanizmima

cijeljenja kapsulama dan je u nastavku i to krećući od jednokomponentnih k dvokomponentnim mikrokapsulama/nanokapsulama pa sve do kapsula čija veličina se mjeri u centimentrima.

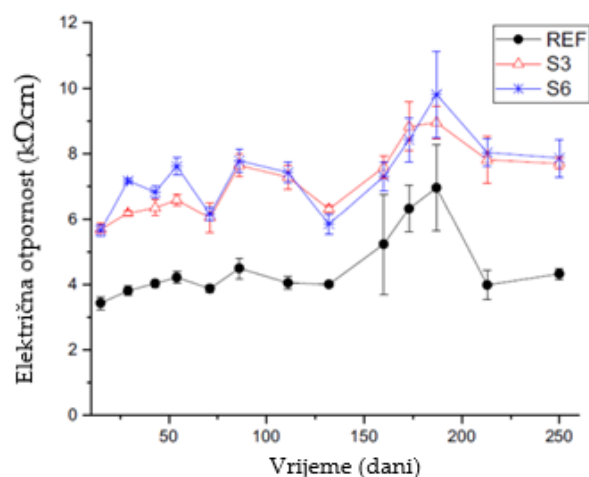
Apolinário de Oliveira i dr. [72] su uspoređivali mehanička svojstva, potencijal ka koroziji i sposobnost samocijeljenja referentnog betona (REF), betona s 3 % nanokapsula od silike (S3) i betona sa 6 % nanokapsula od silike (S6). Od mehaničkih svojstava su proučavali tlačnu i vlačnu čvrstoću betona u 28, 90 i 180 dana starosti uzoraka na uzorcima valjaka dimenzija 100x200 mm, a rezultati su prikazani Slikama 4.2. i 4.3. Potencijal ka koroziji je praćen kroz električnu otpornost na istoj vrsti uzoraka, a rezultati su prikazani Slikom 4.4.



Slika 4.2. Tlačna čvrstoća uzoraka betona u vremenu [72]

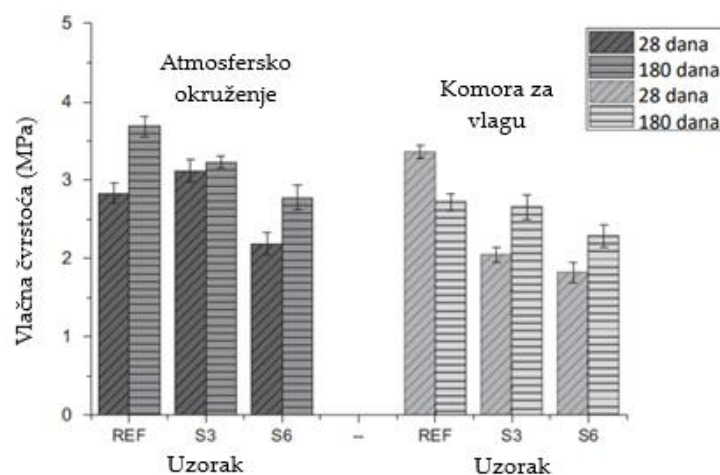


Slika 4.3. Vlačna čvrstoća cijepanjem uzoraka betona u vremenu [72]

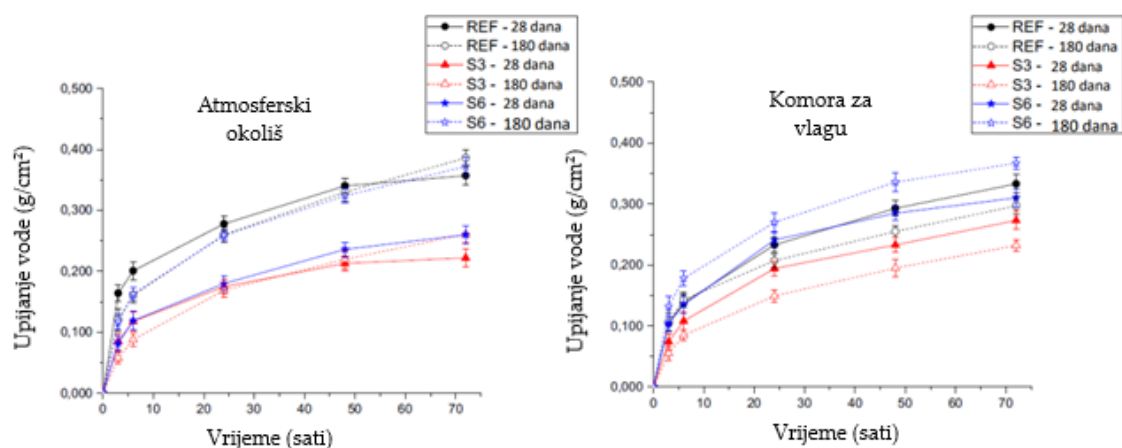


Slika 4.4. Električna otpornost uzoraka betona u vremenu [72]

Na uzorcima starim 28 dana inicirane su pukotine, te su uzorci podvrgnuti postupku samocijeljenja u trajanju od 180 dana i to u dva različita režima: atmosferski uvjeti i uvjeti u klima komori (20 °C i 95 % vlage). Tijekom perioda samocijeljenja na uzorcima su praćeni vlačna čvrstoća cijepanjem, kapilarno upijanje vode te zacjeljivanje pukotina. Vlačna čvrstoća cijepanjem na uzorcima podvrgnutim samocijeljenju je prikazana Slikom 4.5., kapilarno upijanje vode Slikom 4.6., a cijeljenje iniciranih pukotina Slikom 4.7.



Slika 4.5. Vlačna čvrstoća cijepanjem uzoraka betona nakon samocijeljenja [72]



Slika 4.6. Kapilarno upijanje vode uzoraka betona nakon samocijeljenja [72]

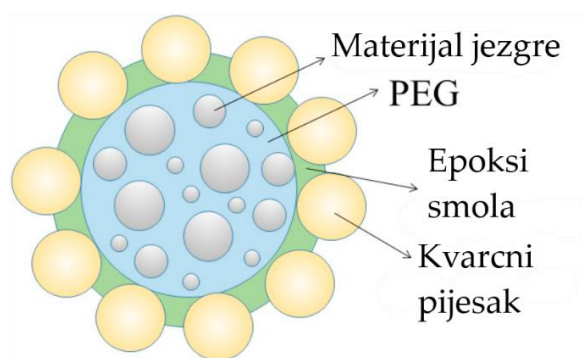
				Uzorak		
				REF	S3	S6
IZLOŽENOST	Atmosferski okoliš	28 dana				
		90 dana				
		180 dana				
	Komora za vlagu	28 dana				
		90 dana				
		180 dana				

Slika 4.7. Izgled pukotina tijekom postupka samocijeljenja [72]

Iz Slike 4.2. je vidljivo da je tlačna čvrstoća kontrolnog betona veća tijekom cijelog promatranog perioda od tlačne čvrstoće betona s nanokapsulama silike. Slika 4.3. potvrđuje da su i vlačne čvrstoće cijepanjem veće tijekom cijelog promatranog perioda od vlačne čvrstoće cijepanjem betona s nanokapsulama silike. Slika 4.4. jasno pokazuje veću električnu otpornost betona s nanokapsulama silike (a time i manju

sklonost ka koroziji armaturnog čelika ugrađenog u takav beton) nego kontrolnog betona tijekom cijelom promatranog perioda. Slika 4.5. prikazuje kako atmosferski uvjeti bolje pospješuju samocijeljenje betona nego uvjeti u klimatskoj komori. Također, vidljivo je da dulji period samocijeljenja uzrokuje i veću razinu samocijeljenja. Najmanje upijanje vode tijekom vremena (a time i najveću razinu zacjeljivanja) ostvaruju uzorci betona s nanokapsulama silike u iznosu 3 % i to u oba režima njege (Slika 4.6.). Prema slici 4.7. beton s nanokapsulama silike pokazuje potpuno cijeljenje pukotina nakon 180 dana. Temeljem rezultata istraživanja, autori zaključuju kako visoki udio vlage pogoduje samocijeljenju betona s nanokapsulama silike.

Feng i dr. [73] istraživali su novu metodu ugradnje minerala koji potiču samocijeljenje, metodu inkapsulacije. Kako bi se izbjegle neželjene reakcije prije pucanja betona, minerali se ugrađuju u beton u vidu kapsula. Autori su u svom istraživanju dizajnirali novu kapsulu, materijali jezgre bili su ili cement ili kombinacija cementa i superupijajućih polimera (SAP), koji su granulirani polietilen glikolom (PEG), nakon čega je slijedio vodonepropusni sloj (tj. epoksi smola i pijesak). Ilustracija kapsula prikazana je na Slici 4.8.



Slika 4.8. Ilustracija strukture kapsula [73]

Pripremljene su dvije vrste kapsula (Tip 1 "SC" i Tip 2 "WSC"). Osnovni materijali SC i WSC su "cement + PEG" i "cement + SAP + PEG". Tablicom 4.1. prikazan je sastav kapsula. Procesi pripreme kapsula sa SAP-om bili su: proces peletizacije - cement,

SAP i PEG zagrijani su na 40 °C, zatim su cement i SAP suho pomiješani u miješalici za mort na 40 °C pri maloj brzini tijekom 30 s, zatim je PEG dodan u smjesu i pasta je kontinuirano miješana 60 s pri maloj brzini, zatim pri velikoj brzini 120 s, očvršli materijali jezgre usitnjeni su čeljusnom drobilicom, nakon čega su granule s veličinom čestica od 2,36-4,75 mm prosijane za sljedeći korak, koji je postupak oblaganja: granule su miješane s epoksidnom smolom 5 minuta i zatim pohranjene na 20 °C oko 0,5–1 h kako bi se poboljšala viskoznost obloženog epoksida, potom su granule s epoksidom ubačene u peletizer sa sitnim pijeskom i miješane 10-15 s pri brzini od 45 okretaja/min, ovaj postupak oblaganja ponovljen je 2-3 puta za bolju vodootpornost kapsula, pa su zatim prosijavanjem dobivene kapsule veličine čestica 2,36–4,75 mm.

Tablica 4.1. Sastav kapsula [73]

Vrsta kapsula	Cement	SAP	PEG	Epoksi smola	Kvarcni pijesak
SC	1	0,02	0,408	0,07 ± 0,005	0,35 ± 0,05
WSC	1	-	0,4	0,05 ± 0,005	0,35 ± 0,05

Spravljene su tri mješavine morta sastava prikazanog u Tablici 4.2. Omjer vode: cementa: pijeska bio je 0,5:1:3, korišten je standardni pijesak, najvećeg promjera zrna 2 mm, modula finoće 3,0.

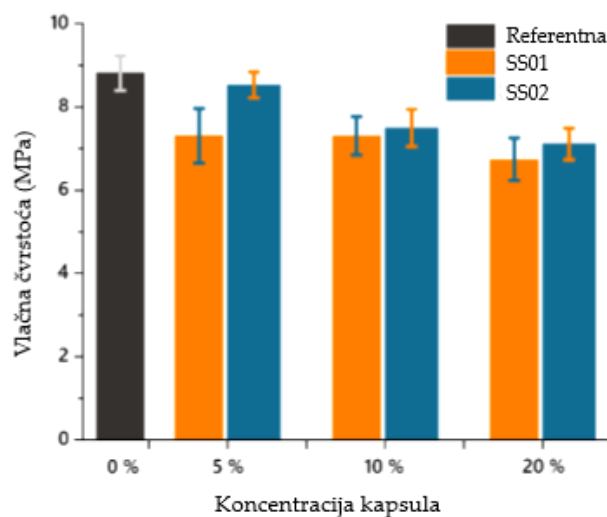
Tablica 4.2. Sastav mješavina morta (kg/m³) [73]

Materijal	Opis mješavine	Cement	Pijesak	Voda	Kapsule	Vlakna
SM0	Kontrolni obični mort	503,4	1510,2	251,7	-	4,6
SM1	Mort sa SC kapsulama	503,4	1406,2	251,7	74	4,6
SM2	Mort s WSC kapsulama	503,4	1406,2	251,7	74	4,6

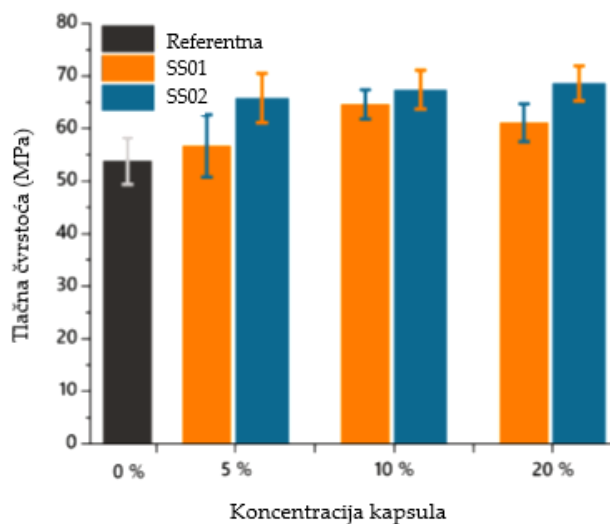
Autori su karakterizirali strukturu i proces hidratacije kapsula s pomoću SEM-a i stereomikroskopa, učinkovitost samocijeljenja napuknutih mortova i produkt zacjeljivanja. Proces hidratacije puknutih kapsula istražen je kroz testove hidrationske topline, električnu vodljivost, mjerenje visine površine i mikroskopsko

promatranje. Učinkovitost samocijeljenja pukotina u mortovima s ugrađenim kapsulama procijenjena je na temelju omjera brtvljenja površinskih pukotina, stope oporavka vodonepropusnosti, tlačne i vlačne čvrstoće. Rezultati su pokazali da bi materijali jezgre u kapsulama mogli reagirati s vodom uz otapanje PEG-a i bubrenje SAP-a nabubrenog u pukotinama, uzorci s ugrađenim kapsulama pokazali su visok omjer brtvljenja za pukotine ispod 400 μm , a čak su se unutarnje pukotine šire od 200 μm mogle premostiti zahvaljujući kapsulama sa SAP-om. Postignut je oporavak vodonepropusnosti, vlačne i tlačne čvrstoće, a stope oporavka napuknutih mortova bile su veće za mortove koji sadrže kapsule, posebno za uzorke SM1, jer su SC kapsule bile pogodnije za premošćivanje unutarnjih pukotina iznad 200 μm nego WSC kapsule. Produkti samocijeljenja bili su C-S-H i CaCO_3 .

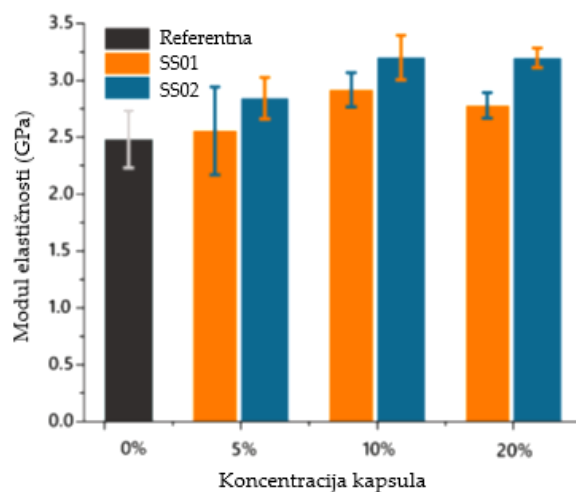
Papaioannou i dr. [74] proizveli su kapsule od portland cementa. Jezgru kapsula su načinili od portland cementa postupkom peletizacije u bubnju. Tako dobivenu jezgru su pokrivali cementom u bubnju prskajući je vodom i otopinom Na_2SiO_3 kako bi dobili ljusku kapsule SS01 ili pak samo otopinom Na_2SiO_3 kako bi dobili ljusku kapsule SS02. Tako pripremljene kapsule su dodavali mortu u iznosu 5, 10 i 20 %. Od ovako pripremljenih mješavina morta izrađene su prizmice dimenzija 20x20x80 mm, njegovane 28 dana u vodi. Na dijelu prizmica ispitane su vlačna čvrstoća savijanjem (Slika 4.9.), tlačna čvrstoća (Slika 4.10.) i modul elastičnosti (Slika 4.11.), a na dijelu prizmica je inicirana pukotina primjenom savijanja u 3 točke. Prizmice s pukotinom su potom dovedene u kontakt s vodom (Slika 4.12.) kako bi se potaknuo proces samocijeljenja. Sve strane prizmice osim pukotine su zabrtvljene. Za ocjenu samocijeljenja mortova praćeno je upijanje vode na prizmicama u 14. i 28. danu te je iz upijanja vode izračunat koeficijent redukcije upijanja vode (Slika 4.13.).



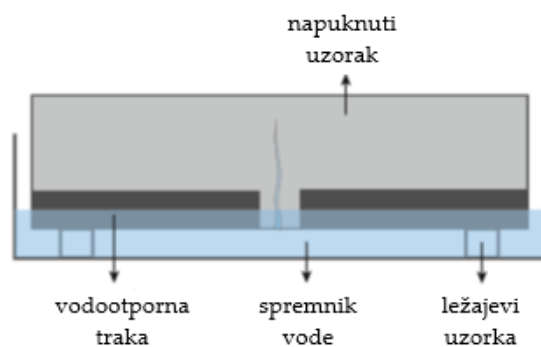
Slika 4.9. Vlačne čvrstoće savijanjem mortova [74]



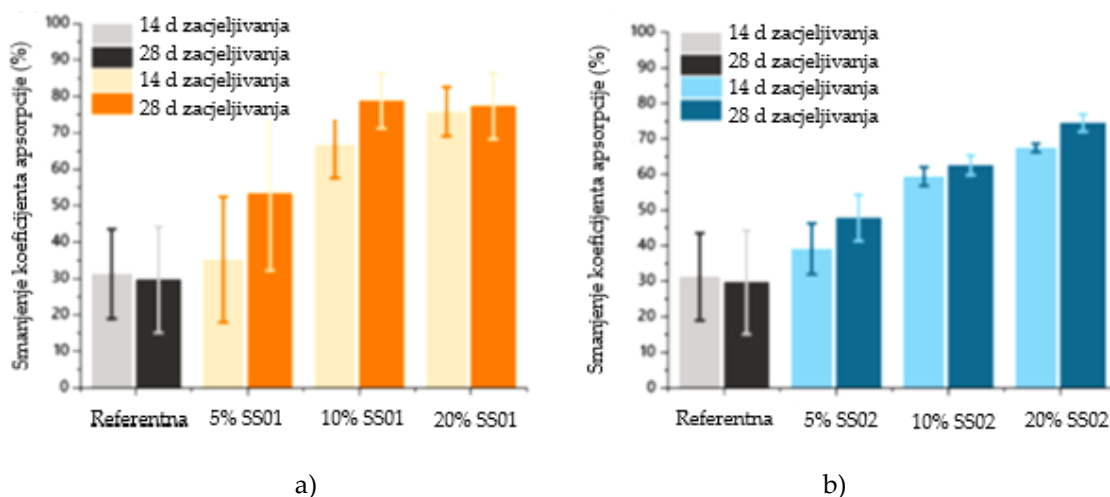
Slika 4.10. Tlačne čvrstoće mortova [74]



Slika 4.11. Moduli elastičnosti mortova [74]



Slika 4.12. Ispitivanje upijanja vode mortova [74]



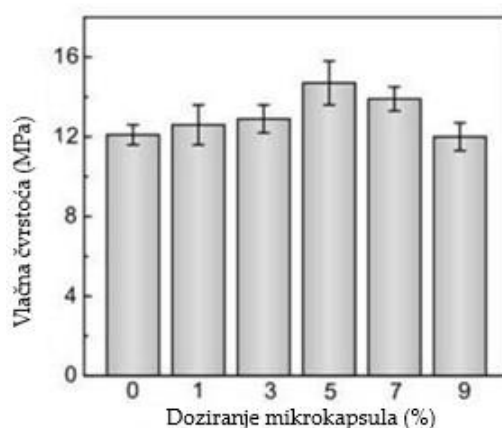
Slika 4.13. Koeficijenti redukcije upijanja vode mortova sa SS01 kapsulama (a) i SS02 kapsulama (b) [74]

Iz Slika 4.13-4.16 vidljivo je da obje vrste kapsula unaprijeđuju mehanička svojstva morta te da su kapsule SS02 uspješnije u tome. Koeficijenti redukcije upijanja vode (Slika 4.17.) rastu kako se povećava udio obje vrste kapsula u mortu i redukcija je veća pri primjeni SS01 kapsula.

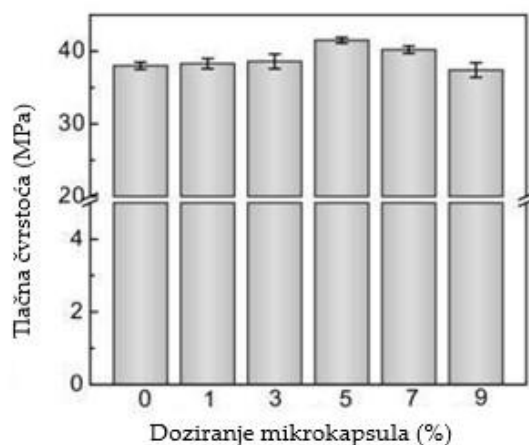
Li i dr. [75] su pripremili kapsule od toluen-di-izocijanata kao jezgre te grafita, parafina i polietilen voska kao ljuske. Pripremljene su mješavine morta s 0,1,3,5,7, i 9 % ovakvih kapsula na masu cementa. Na uzorcima mortova starim 28 dana su određeni tlačna čvrstoća (uzorci 40x40x40 mm), koeficijent prodora klorida (uzorci promjera 100 i visine 50 mm) te su inicirane pukotine na kojima je praćeno

samocijeljenje (uzorci 40x40x160 mm). Pukotine su inicirane opterećivanjem uzoraka sa 60 % ili pak 80 % tlačne čvrstoće. Uzorci s pukotinama su njegovani u sljedeća dva režima: pri sobnoj temperaturi tijekom 5 dana ili pak 10 minuta u mikrovalnoj, a potom 5 dana pri sobnoj temperaturi. Nakon tog perioda njege određene su tlačne čvrstoće uzoraka te stavljene u omjer s početnim tlačnim čvrstoćama kako bi se dobila „relativna čvrstoća nakon procesa cijeljenja“.

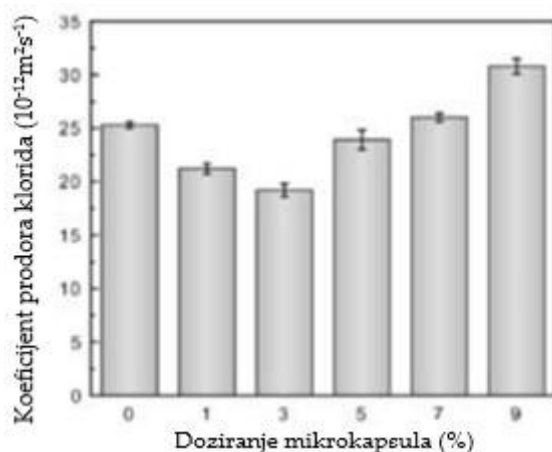
Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće prikazani su Slikom 4.14., tlačne čvrstoće Slikom 4.15., prodora klorida Slikom 4.16.



Slika 4.14. Vlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula [75]

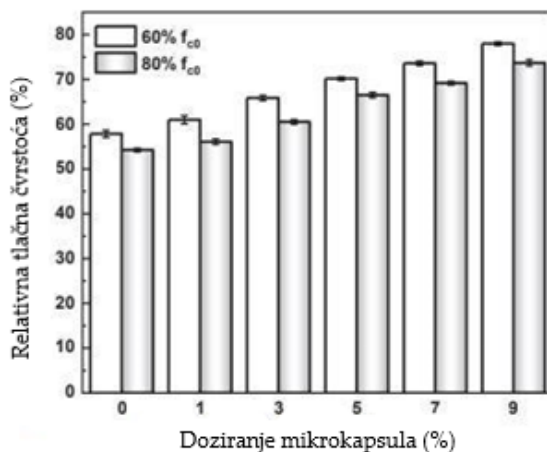


Slika 4.15. Tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula [75]

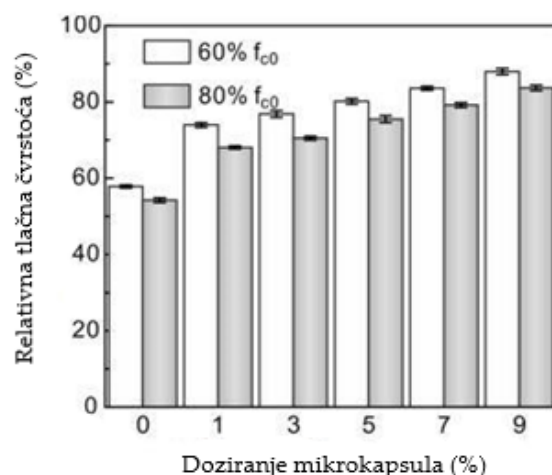


Slika 4.16. Koeficijent prodora klorida uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula [75]

Slike 4.14. i 4.15. pokazuju 5 % kao optimalan udio mikrokapsula u pogledu mehaničkih svojstava mortova. Slika 4.16. pokazuje da koeficijent prodora klorida također opada do udjela kapsula od 5 %. Slika 4.17. pokazuje relativnu čvrstoću nakon procesa cijeljenja pri sobnoj temperaturi njege, a Slika 4.18. isti parametar pri 10 minuta izlaganju mikrovalne i potom pri sobnoj temperaturi.



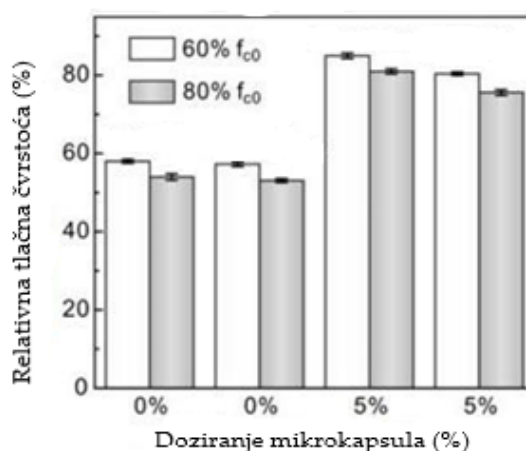
Slika 4.17. Relativna tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula pri njezi na sobnoj temperaturi [75]



Slika 4.18. Relativna tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula pri njezi 10 minuta u mikrovalnoj, a potom na sobnoj temperaturi [75]

Iz Slika 4.17. i 4.18. je vidljivo da svi uzorci na kojima su pukotine inicirane sa 60 % njihove čvrstoće imaju veću relativnu tlačnu čvrstoću od uzoraka na kojima je pukotina inicirana s 80 % čvrstoće. Također, njega pri sobnoj temperaturi se pokazala boljom od njega s 10 minuta u mikrovalnoj, a potom pri sobnoj temperaturi kod kontrolnog betona dok je kod svih betona s mikrokapsulama postignuto bolje samocijeljenje kod njega s 10 minuta u mikrovalnoj, a potom pri sobnoj temperaturi.

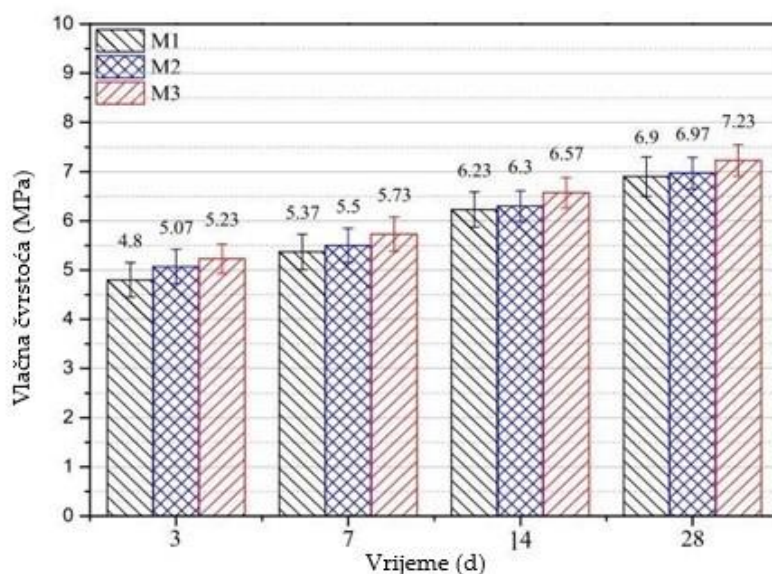
Uzorci s 0 i 5 % mikrokapsula su dodatno njegovani 10 minuta u mikrovalnoj, a onda u vlažnoj komori što se pokazalo boljim režimom njega nego njega pri sobnoj temperaturi (Slika 4.19.).



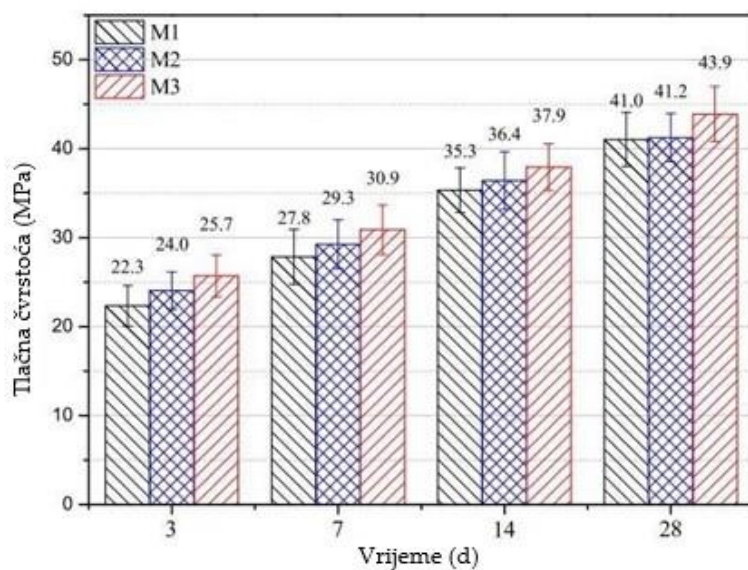
Slika 4.19. Relativna tlačna čvrstoća uzoraka morta s različitim udjelima mikrokapsula pri njezi 10 minuta u mikrovalnoj, a potom na sobnoj temperaturi/vlažnoj komori [75]

Wang i dr. [76] su koristili laki agregat kao nositelja Na_2CO_3 u betonskim mješavinama. Pripremili su tri mješavine betona. Laki agregat (LWA) u mješavini M1 koristili u njegovom osnovnom obliku, u mješavini M2 su LWA natopili s Na_2CO_3 , a u mješavini M3 su tako natopljen LWA zaštitili omotačem od epoksi smole, njegujućeg reagensa i n-butilglicidil etera (ELWA). Prilikom izrade betonskih mješavina su dodavali ekspanzirajući agens (CSA), kristalni hidrofilni dodatak (CA) i $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Na tako pripremljenim uzorcima su ispitali tlačnu i vlačnu čvrstoću uzoraka (na uzorcima 40x40x160 mm) tijekom vremena, prodor klorida (na uzorcima promjera i visine 50 mm) i cijeljenje pukotina (na uzorcima 40x40x160 mm). Za potrebe praćenja cijeljenja pukotina, na uzorcima betona su inicirane pukotine u 7 i 28 danu starosti, a potom su uzorci uronjeni u vodu i otopinu zasićenu s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na 28 dana. Praćene su širine pukotina prije i nakon postupka samocijeljenja te su stavljene u omjer i iskazane kao “normalizirana učinkovitost cijeljenja”.

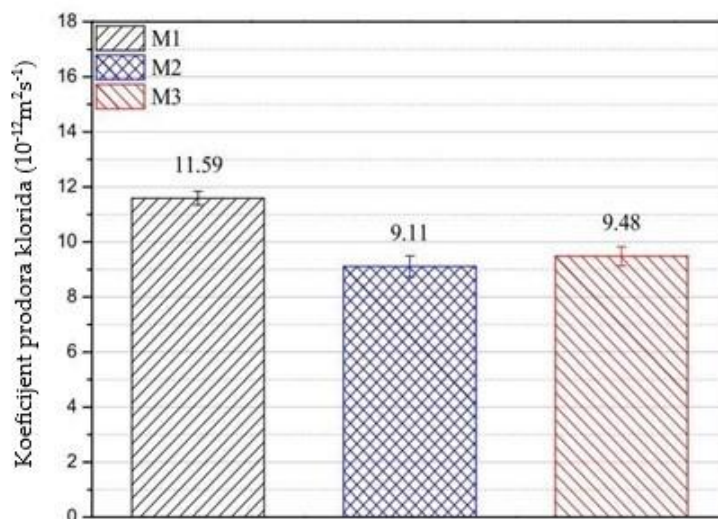
Slika 4.20. prikazuje vlačne čvrstoće savijanjem, a Slika 4.21. tlačne čvrstoće uzoraka betona u vremenu. Slika 4.22. prikazuje prodor klorida, a Slika 4.23. normalizirane učinkovitosti cijeljenja pojedinih mješavina.



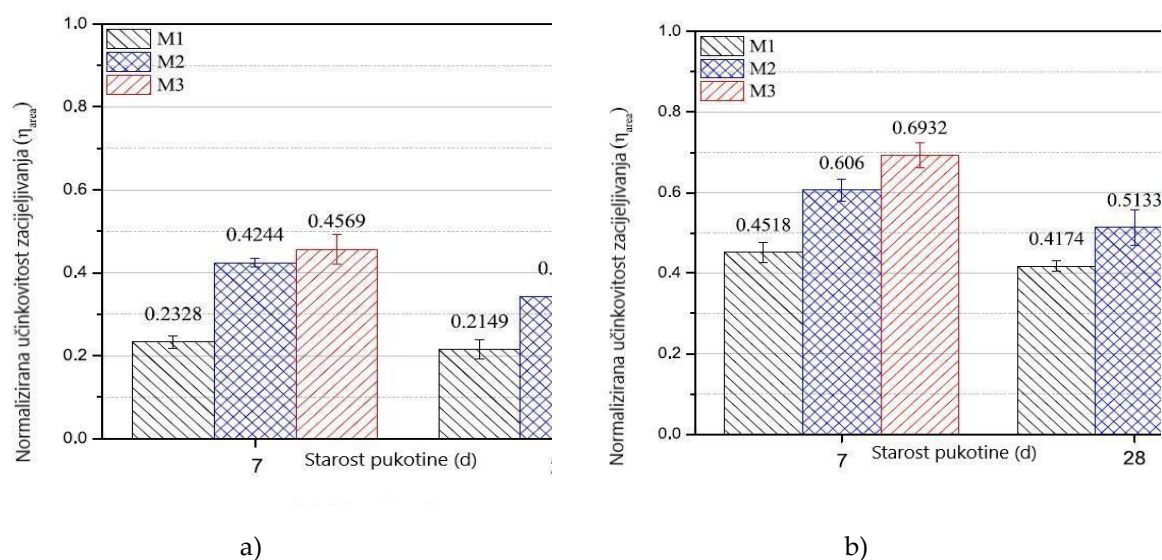
Slika 4.20. Vlačna čvrstoća savijanjem uzoraka [76]



Slika 4.21. Tlačna čvrstoća uzoraka [76]



Slika 4.22. Koefficient prodora klorida [76]



Slika 4.23. Normalizirane učinkovitosti cijeljenja pojedinih mješavina u: a) vodi, b) otopini zasićenoj Ca(OH)_2 [76]

Iz Slika 4.20. i 4.21. je vidljivo da ELWA (mješavina M3) osigurava najbolje tlačne i vlačne čvrstoće betona tijekom vremena, a potom ga slijedi LWA natopljen s Na_2CO_3 (mješavina M2). Prodor klorida (Slika 4.22.) je najmanji u mješavini gdje je LWA natopljen s Na_2CO_3 (mješavina M2). Samocijeljenje pukotina (Slika 4.23.) je najbolje kod mješavine ELWA (mješavina M3), a potom ga slijedi mješavina s LWA natopljenim s Na_2CO_3 (mješavina M2). Cijeljenje pukotina je izraženije u otopini zasićenoj s Ca(OH)_2 nego u vodi.

Milla i dr. [77] su u svom radu istraživali učinkovitost mikroinkapsuliranog kalcijevog nitrata u cijeljenju pukotina. Mikro kapsule koje sadrže kalcijev nitrat kao ljekovito sredstvo su pripremili tehnikom suspenzije vode u ulju s urea formaldehidom kao materijalom ovojnice kapsule. Neovisne varijable u ovom istraživanju bile su veličina mikro kapsule, koncentracija (po težini cementa) i svojstva ovojnice kapsule. Autori su proizveli dvije vrste kapsula, s i bez emulgatora (SP-s emulgatorom, OG-bez emulgatora) za stabilizaciju emulzije te svaku vrstu kapsula radili s dva različita broja okretaja u minuti (800 i 1500 okretaja u minuti). Veći broj okretaja je rezultirao manjim promjerom mikro kapsula. Dodatak

emulgatora rezultirao je hidrofobnom prevlakom ovojnice mikrokapsule, što je povećalo vjerojatnost aglomeracije zbog hidrofobnog privlačenja između čestica. U nastavku su spravljene mješavine betona bez kapsula i s 0,5 i 0,75 % kapsula. U starosti 28 dana su uzorci betona dimenzija 100x100x350 mm stavljeni u sušionik na 3 dana pri 60 °C te nakon toga raspucali. Raspucali uzorci su njegovani u vodi 7, 21 i 42 dana te je promatrano cijeljenje pukotina digitalnom kamerom. Prije svakog promatranja širine pukotine uzorci su osušeni 3 dana pri 60 °C u sušioniku kako bi se simulirao režim suho-vlažno. Mješavine s kapsulama bez emulgatora su bile učinkovitije po pitanju cijeljenja. Također, manji udio kapsula je bio učinkovitiji, a u pogledu broja okretaja kapsula je zaključeno da su kapsule proizvedene većim brojem okretaja bile učinkovitije u pogledu cijeljenja.

Wang i dr. [78] su u svom istraživanju izradili mikrokapsule postupkom polimerizacije tj. procesom formiranja mikrokapsula sintetiziranih korištenjem urea formaldehidne smole kao ljuske i epoksidne smole kao sredstva za cijeljenje. Načinjene su kontrolna mješavina betona i mješavina betona s 10 % mikrokapsula na masu veziva u betonu. Na uzorcima betona izmjera 100x100x100 m starim 60 dana određena je tlačna čvrstoća, a na uzorcima promjera 100 m i visine 50 mm je ispitana brzina prodora klorida. Na obje vrste uzoraka su inicirane pukotine te je praćeno njihovo cijeljenje u 3, 5, 7, 14 i 28 dana pri izloženosti temperaturi od 60 °C i 95 % vlage. Dodatak mikrokapsula je negativno utjecao na 28-dnevnu čvrstoću uzoraka. Obje vrste uzoraka su ostvarile oporavak tlačne čvrstoće pri njezi i to najveći oporavak do 14 dana njege no oporavak je bio izraženiji kod mješavine s mikrokapsulama. Također, mješavina s mikrokapsulama je nakon 28 dana njege ostvarila oporavak u kontekstu manje dubine prodora klorida za 22 % u odnosu na istu mješavinu prije postupka njege.

Wang i dr. [79] su s kapsulama pripremljenim na način opisan u prethodnom pasusu i u iznosu 20 % volumena mješavine napravili uzorke betona promjera 100 m i visine

50 mm te inicirali jednu ili više pukotina na njima i izložili uzorke zamotane u foliju temperaturi od 60 °C. Elektrokemijskom impendancijskom spektroskopijom je praćeno zacjeljivanje nakon 3, 7 i 14 dana i tako da manje očitanje otpora uređaja označava veće oštećenje. Zaključeno je da su uzorci s više pukotina skloniji samocijeljenju od uzorka s jednom pukotinom.

Dong i dr. [80] su u svom istraživanju izradili mikrokapsule od urea formaldehidne smole kao ljuske i epoksidne smole kao sredstva za cijeljenje. Napravili su mortove sa 6 % mikrokapsula na masu veziva s tri različita srednja promjera mikrokapsula. Izradili su prizme 40x40x160 mm za ispitivanje tlačne čvrstoće, kuboide 10x10x30 mm za živinu porozimetriju (MIP) te valjke promjera 100 mm i visine 100 mm za ispitivanje dubine prodora klorida. Na ovim uzorcima su inicirane pukotine te su izloženi njezi pri 50 °C u trajanju od 3, 5, 7, 14 i 28 dana. Najveći oporavak čvrstoće doživjeli su uzorci morta s najkrupnijim kapsulama i to najizraženije do 14-tog dana njege. MIP-om je potvrđen pad u ukupnom udjelu pora, povezanosti pora, kapilarnoj poroznosti i srednjem promjeru pora kod uzoraka s mikrokapsulama izloženih cijeljenju. Mjerenjem dubine prodora klorida na uzorcima izloženim cijeljenju je utvrđeno da su mikrokapsule učinkovite na pukotinama svih širina.

Du i suradnici u sljedeća tri navedena rada [28, 70, 81] istražuju mikrokapsule od toluen-di-izocijanata kao jezgre i parafina i još nekih drugih dodataka, kao opne. Ispituju učinke temperature pripreme, brzinu okretaja u ultrazvučnoj miješalici, omjere sastojaka, temperaturu okoline pri kojoj se promatra samocijeljenje uzoraka morta i brojna druga svojstva. U istraživanju [28] su pripremili mikrokapsule tako da su najprije u tikvici otopili 20 g parafina na temperaturi od 70 °C, 75 °C, 80 °C. Zatim je TDI (maseni omjeri parafina i TDI bili 2:1, 1:1, 1:2, 1:3) dodan u tikvicu kap po kap tijekom 30 s, a smjesa parafina/TDI miješala se 3 h pri brzini (400 okretaja u minuti, 600 okretaja u minuti, 800 okretaja u minuti, 1000 okretaja u minuti). Nakon toga, 200 ml rashladnog sredstva PFTBA, koje je inertna tekućina i ne reagira s parafinom i

TDI, dodano je u tikvicu pod istim uvjetima miješanja kako bi se brzo smanjila temperatura mješavine parafin/TDI ispod tališta parafina. Nakon što su formirane mikrokapsule s TDI kao jezgrom i parafinom kao opnom, suspenzijska tekućina mikrokapsula je izlivena u čašu i miješala se 30 minuta ultrazvučnim valovima. Mikrokapsule su filtrirane iz mješavine i sušene na 40 °C 24 h. Distribucija veličine i morfologija mikrokapsula karakterizirana je laserskim analizatorom veličine čestica i skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM). Na frakciju jezgre mikrokapsula značajno su utjecali temperatura pripreme, brzina miješanja i omjer mase parafin/TDI. Optimalni parametri pripreme mikrokapsula uključivali su maseni omjer parafin/TDI od 1:2 i brzinu miješanja od 600 okretaja u minuti na 75 °C, gdje je najveći udio jezgre mikrokapsula bio 66,5 %. Raspodjela veličine mikrokapsula bila je između 30 µm i 300 µm pod optimalnim parametrima pripreme. FTIR spektri mikrokapsula potvrdili su da je TDI uspješno inkapsuliran u parafinsku opnu. Nadalje, pripremili su pet mješavina morta s udjelima kapsula od 0, 1,5, 3,0, 4,5, 6,0 na masu cementa te od njih izradili uzorke dimenzija 70,7x70,7x70,7 mm. Na uzorcima morta starim 28 dana ispitali su tlačnu čvrstoću, a i inicirali pukotinu te ostavili uzorke da cijele 48 sati na zraku. Najbolju tlačnu čvrstoću, a i najbolje samocijeljenje postigli su uzorci s 3 % mikrokapsula.

U svojem sljedećem radu [70] su zamiješali mješavinu s 0 i 3 % mikrokapsula kojima su opne bile priređene na tri različita načina; parafin rastaljen na 75 °C i uz miješanje 600 okretaja u minuti, parafin i vosak rastaljeni na 120 °C i uz miješanje 800 okretaja u minuti te parafin, vosak i nano SiO₂ rastaljeni na 120 °C i uz miješanje 800 okretaja u minuti. Najkrupnije su ispale mikrokapsule pripremljene na posljednji način a najsitnije one pripremljene na prvi način. Tlačna čvrstoća bila je najveća kod morta s kapsulama opisanim na prvi način. Na uzorcima mortova su inicirane pukotine i praćeno je njihovo cijeljenje u 1, 3, 7 i 10 dana pri sobnoj temperaturi. Mort s mikrokapsulama pripremljenim na posljednji opisan način bio je najuspješniji u pogledu cijeljenja.

U posljednjem radu [81] su na mortovima spravljenim prema recepturi opisanoj u [70] inicirali pukotine i pratili njihovo zacjeljivanje pri temperaturama 10, 30, 50 i 60 °C te vlažnosti od 50 %. Zacjeljivanje su pratili kroz oporavak tlačne čvrstoće i oporavak u kontekstu koeficijenta difuzije klorida u periodu 1, 3, 7, i 10 dana. Zaključili su da viša temperatura pogoduje cijeljenju pukotina i kao optimalnu temperaturu odredili 50 °C. Cijeljenje je bilo najizraženije kod mješavine morta s mikrokapsulama čija je opna dobivena od parafina, voska i nano SiO₂ rastaljenih na 120 °C i uz miješanje 800 okretaja u minuti.

Wu i dr. [82] su u svom radu istraživali kapsuliranje sredstva za cijeljenje na bazi poliuretana (PU) u betonu, pri čemu se sustav pokreće kada se pukotina formira i širi kroz beton. Razmatrali su tri nova tipa sustava za inkapsulaciju ljekovitog sredstva (Slika 4.24.); dvostruka kapsula u kontaktu s tijelom, dvostruka kapsula paralelnog stila i kapsula koncentričnog stila. Kapsule su bile načinjene od stakla.



Slika 4.24. Tri različite vrste kapsula (A: tip A: dvostruka kapsula paralelnog stila; B: tip B: dvostruka kapsula u kontaktu s tijelom; C: tip C: koncentrična kapsula) [82]

Koristili su dvokomponentni sustav cijeljenja za kapsuliranje poliuretana i različitih vrsta akceleratora - na bazi amina (dimetilbenzilamin, BDMA) i na bazi kositra (dibutylkositrenidilaurat, DBTDL). Kapsule A i B (Slika 4.24.) su najprije napunjene s dvije različite tekućine s pomoću injektora te začepljene gumenim čepom. Kapsula tipa C (koncentrična) sastojala se od koncentričnih unutarnjih i vanjskih cijevi - PU je bio inkapsuliran u unutarnju cijev, a ubrzivač u vanjsku cijev. Kapsula je također zapečaćena gumenim čepom. Kapsule su u nastavku ili ugrađene u prethodno izbušene rupe u mortu ili su zalivene svježim mortom. Na uzorcima mortova (po dva

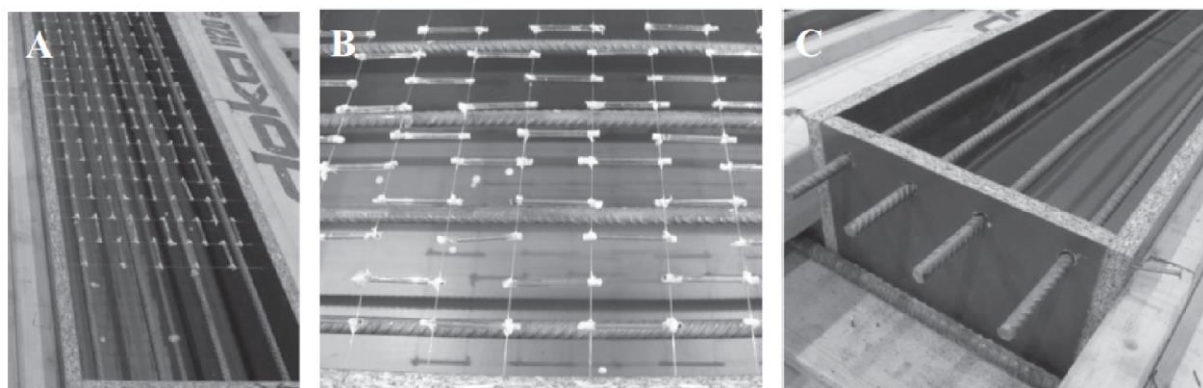
spojena bloka svaki dimenzija 70,9x70,9x70,9 mm) starim 28 dana su inicirane pukotine te je praćena sposobnost njihova zacjeljivanja pri izlaganju uzoraka mortova temperaturi od 20 °C i relativnoj vlazi od 90 %. Učinkovitost cijeljenja pukotina je praćena kroz radijus u kojem se širila ljekovita tvar u betonu. Najveću učinkovitost u tom kontekstu su pokazale kapsule tipa A.

Gilabert i dr. [83] su u svom radu analizirali proces popunjavanja pukotina metodom inkapsulacije. Kapsule su radili od borosilikatnog stakla promjera 3 mm i debljine stijenke 175 µm te duljine 50 mm i punili ih ili samo poliuretanskom smolom ili kombinacijom poliuretanske smole i ubrzivača/akceleratora (u dvije odvojene kapsule). Napunjene kapsule su ugrađene u prethodno izbušene rupe u betonu. Pukotina je inicirana laganim udarcem betonskog uzorka nakon čega je razliveno zacjeljujuće sredstvo. U slučaju obje vrste kapsula je zaključeno kako smola više djeluje kao ljepilo nego sredstvo za cijeljenje pukotina, a da akcelerator nije poslužio svrsi već ga je upila betonska matrica.

Hu i dr. [84] su ljekovitu tvar u kapsulama radili od poliuretana (PU) razrijeđenog acetonom (AC) u različitim omjerima AC:PU (0:20, 1:20, 1:10, 3:20, 1:5, 1:4), a stijenke kapsula od kvarcnog stakla. Napravljena su dva tipa kapsula; kapsule s ravnim čepom i kapsule sa zaobljenim čepom. Napunjene kapsule s ravnim čepom su ugrađene u prethodno izbušene rupe u mortu dok su kapsule sa zaobljenim čepom zalivene u mort. U mort su ugrađivane jedna ili pak dvije kapsule. Pukotina je inicirala laganim udarcem uzorka morta nakon čega je razliveno zacjeljujuće sredstvo. Zaključeno je da AC povećava područje disperzije ljekovitog sredstva te da je najučinkovitiji po pitanju cijeljenja bio omjer AC:PU od 1:5. Također, kapsule sa zaobljenim čepom bile su učinkovitije od kapsula otvorenog tipa. Očekivano, dvije kapsule u uzorku morta bile su učinkovitije po pitanju zacjeljivanja od jedne kapsule.

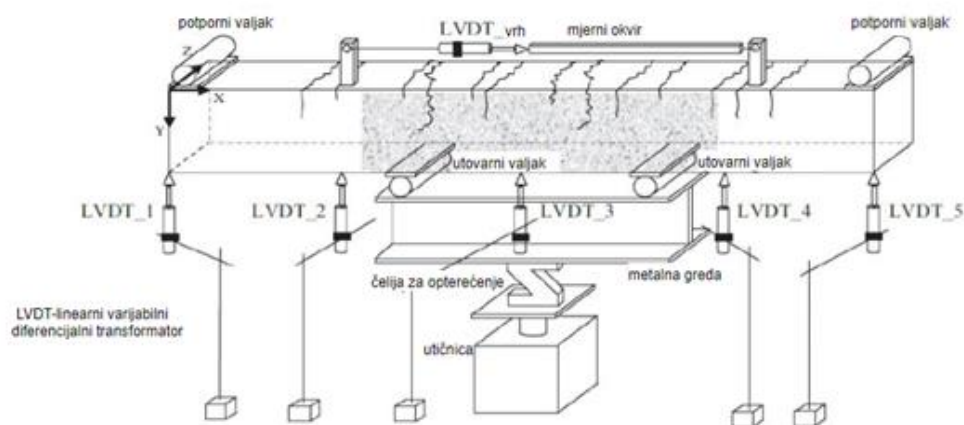
Van Tittelboom i dr. [85] su pratili samocijeljenje betona na razini armiranobetonskih greda dimenzija 150x250x3000 mm. Izradili su armiranobetonske grede od tri

različite mješavine betona: kontrolnog betona (REF), betona kombiniranog s kapsulama čiju jezgru čini poliuretan, a ljusku staklena opna (PU) te betona sa superupijajućim polimerom (SAP). Oko 350 kapsula duljine 50 mm i promjera 3 mm je ugrađeno u gredu PU (Slika 4.25.). Kod betona sa superupijajućim polimerom je korištena veća količina vode nego u preostale dvije betonske mješavine, jer superupijajući polimer upija vodu, a onda je kasnije otpušta u beton.



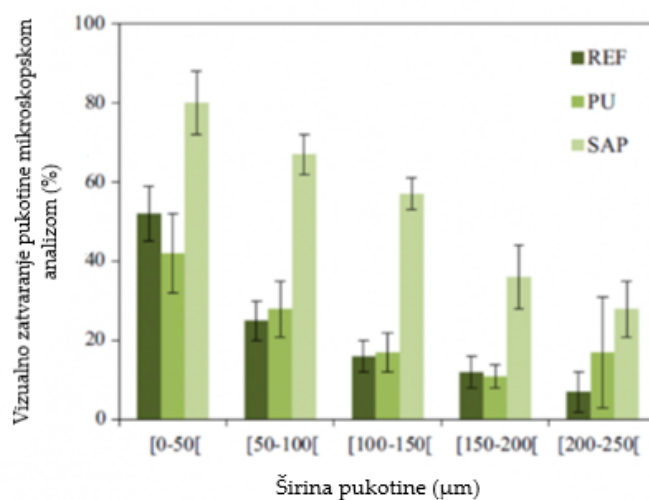
Slika 4.25. Izrada greda s kapsulama: a) pričvršćivanje kapsula od poliuretana na žičanu mrežu, b) kapsule od poliuretana na mreži, c) raspored armature u oplati [85]

Armiranobetonske grede su opterećivane savijanjem u četiri točke (Slika 4.26.) kako bi se inicirale pukotine, a potom prskane vodom 4 puta dnevno po 1 minutu tijekom 6 tjedana kako bi se potaklo samocijeljenje pukotina.



Slika 4.26. Postupak iniciranja pukotina na gredama [85]

Pukotine su izmjerene prije i nakon postupka samocijeljenja te je izračunat koeficijent cijeljenja pukotina određene širine (Slika 4.27.).

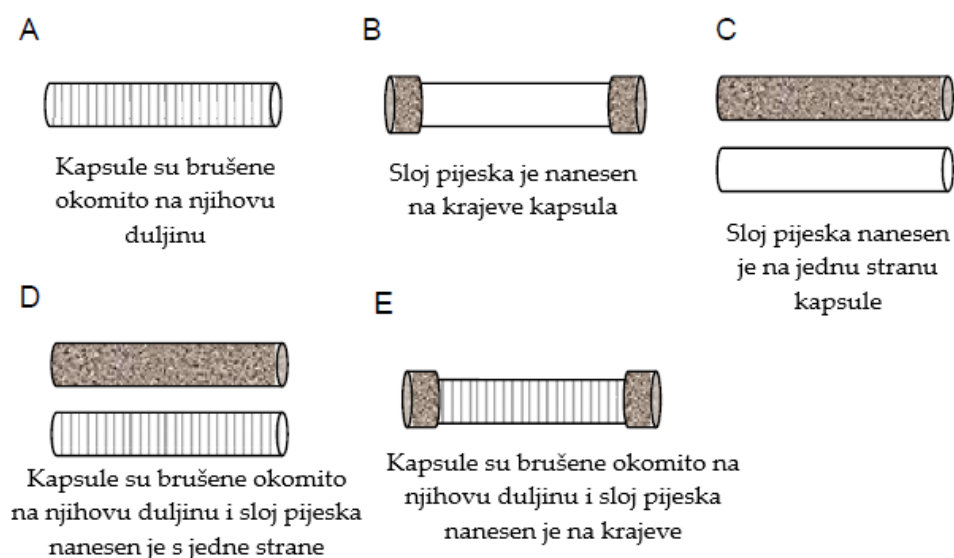


Slika 4.27. Koeficijent cijeljenja pukotina određene širine [85]

Iz Slike 4.27. vidljivo je da je najučinkovitiji u postupku cijeljenja pukotina svih širina superupijajući polimer. Kapsule poliuretana najveću učinkovitost pokazuju kod pukotina najveće širine, a najmanju kod pukotina najmanje širine.

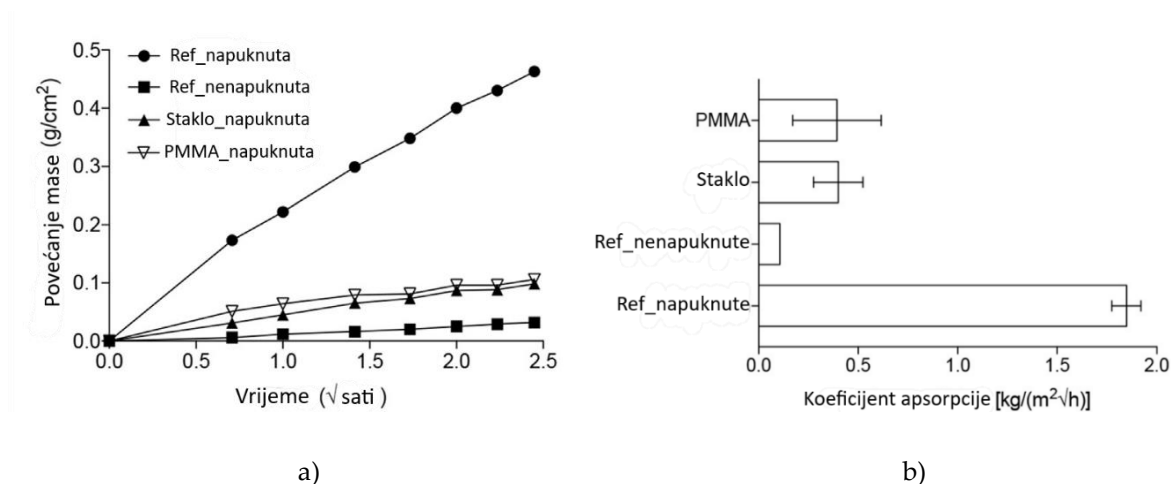
Staklene kapsule su sklone lomljenju prilikom miješanja betona. Stoga su Hilloulin i dr. [86] u svom istraživanju ispitivali mogu li krti termoplasti izdržati proces miješanja betona i mogu li se slomiti s pojavom pukotina na sobnoj temperaturi. Ekstrudirali su kapsule iz tri različita polimera s niskom temperaturom staklastog prijelaza T_g : poli(mliječna kiselina) (PLA) ($T_g = 59\text{ }^{\circ}\text{C}$), polistiren (PS) ($T_g = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$) i poli(metil metakrilat/n-butil) metakrilat (P(MMA/n-BMA)) ($T_g = 59\text{ }^{\circ}\text{C}$). Odabrani polimeri P(MMA/n-BMA), PLA i PS pokazuju krhko ponašanje na sobnoj temperaturi miješanja betona, ali se bolje ponašaju kada se zagriju prije uporabe u betonu. Ovakve kapsule imaju veći stupanj preživljavanja u odnosu na staklene kapsule, no zagrijavanje polimernih kapsula dodatno komplicira postupak izrade samocijelećeg betona te je potrebno istražiti dodatne metode povećanja njihove duktilnosti.

Araújo i dr. [87] su u svom radu procjenjivali prikladnost polimernih cilindričnih kapsula izrađenih od poli(metil metakrilata) (PMMA) za nošenje sredstva za cijeljenje u betonu. Proučavali su različite parametre koji utječu na stopu preživljavanja kapsula prilikom miješanja svježeg betona: materijal kapsule (PMMA u odnosu staklo); dimenzije kapsule tj. debljina stijenke; sastav betona - tradicionalni beton (TC) s drobljenim agregatima u odnosu na samozbijajući beton (SCC) s riječnim šljunkom i vrsta miješalice za beton - Creteangle miješalice s prisilnim djelovanjem (tip SE/GB) s maksimalnim kapacitetom od ~14 l u odnosu na Eirich miješalicu s okomitom osovinom s rotirajućom tavicom i maksimalnim kapacitetom od 50 l. Razmotreno je pet različitih tretmana kapsula kao što je prikazano na Slici 4.28.: (A) kapsule su brušene okomito na njihovu duljinu kako bi se stvorila hrapava površina i povećala veza s matricom; (B) sloj pijeska nanesen je na oba kraja kapsula kako bi se kapsule učvrstile i izbjeglo klizanje; (C) gruba površina je stvorena nanošenjem sloja pijeska na jednu stranu kapsule da se poveća adhezija i da se spriječi izvlačenje kapsula iz matrice; (D) kombinacija tretmana A i C za daljnje poboljšanje prijanjanja na matricu i; (E) kombinacija tretmana A i B.



Slika 4.28. Razni površinski tretmani primijenjeni na PMMA kapsule [87]

Budući da kapsule debljine stijenke od 0,2 i 0,4 mm nisu preživjele proces miješanja betona, za daljnje ispitivanje odabrane su samo kapsule debljine stijenke 0,7 mm. Kapsule s debljinom stijenke od 0,7 mm mogle su izdržati proces miješanja betona i puknuti pri relativno malim širinama pukotina ($116 \mu\text{m}$) nakon primjene površinske obrade za povećanje adhezije između kapsula i cementne matrice. Nadalje, za procjenu sposobnosti cijeljenja spravljani su uzorci morta dimenzija $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ s jednom kapsulom smještenom u sredini uzorka na približno 1,3 cm od dna te je na njima inicirana pukotina. Ljekovito sredstvo u kapsuli autori nazivaju tek vodoodbojnim sredstvom (WRA). Učinkovitost cijeljenja nakon loma procijenjena je s pomoću testa kapilarne apsorpcije vode. Prosječna apsorpcija vode kao funkcija kvadratnog korijena vremena i koeficijenti apsorpcije svake serije ispitivanja prikazani su na Slici 4.29. Rezultati ispitivanja kapilarne apsorpcije vode na prizmama morta koje sadrže kapsule jasno su pokazali da je manji prodor vode ostvaren za samocijeljenje napuknutih uzoraka betona s kapsulama nego betona bez kapsula. Kapsule od stakla i kapsule od PMMA bile su jednako učinkovite. Bolje preživljavanje kapsula zabilježeno je kod SCC betona u usporedbi s TC betonom. Eirich miješalica s okomitom osovinom bila je manje agresivna za kapsule prilikom miješanja.



Slika 4.29. Prosječna apsorpcija vode kao funkcija kvadratnog korijena vremena (a) i koeficijenta apsorpcije (b) za svaku od serija [87]

Kako bi se potvrdila učinkovitost samocijeljenja kapsulama u velikim betonskim elementima, izrađene su tri betonske grede u stvarnom mjerilu (200x400x2500 mm). Jedna greda je sadržavala kapsule PMMA, druga staklene kapsule, a referentna je bila bez kapsula. Na gredama je procijenjena učinkovitost samocijeljenja inkapsulacijskih materijala (staklo ili PMMA). Rezultati su pokazali da su napuknute betonske grede s umiješanim kapsulama (staklo ili PMMA) ispunjenim vodoodbojnim sredstvom pokazale veću otpornost na prodor klorida u usporedbi s običnim napuknutim betonskim gredama. PMMA kapsule su pokazale manju učinkovitost samocijeljenja (u odnosu na prodor klorida) u usporedbi sa staklom zbog nepovoljnijeg rasporeda kapsula u betonu. Međutim, beton koji sadrži staklene kapsule osjetljiv je na alkalno-silikatnu reakciju. Iako je još uvijek potrebna optimizacija PMMA kapsula kako bi se poboljšala njihova distribucija u betonu i postigla veća učinkovitost samocijeljenja, dobiveni rezultati ovih autora pokazuju da bi ove kapsule mogle biti obećavajuće rješenje za samocijeljeće betone.

Al-Tabbaa i dr. [88] su koristili mikrokapsule čija ljuska je bila od želatine/gume ljuske arabike, a ljekovito sredstvo je bilo natrijev silikat u emulziji s mineralnim uljem i emulgatorom. U mješavinu betona je dozirano mikrokapsula u količini od 2,67 % mase cementa te je iz takvog betona izliven zid dimenzija 150x1000x1500 mm. Istovremeno, izrađen je i zid od referentnog betona. Hidrauličkim prešama je inicirana pukotina na 0,5 m od donjeg ruba oba zida te je praćeno njezino cijeljenje tijekom vremena. Opaženo je da nakon perioda samooporavka zid s mikrokapsulama ima značajno manji koeficijent propusnosti, značajno veći postotak zacjeljenja pukotine (po širini i dubini) i značajno veći oporavak čvrstoće od zida načinjenog od referentnog betona.

Razvoj prikladnih kapsula ključan je za postizanje samocijeljenja kapsuliranjem. U kontekstu samocijeljećeg betona, idealno su potrebne kapsule koje se mogu lako umiješati u beton i otpuštaju sredstvo za cijeljenje kada dođe do pucanja.

Optimizacija ovih svojstava omogućila bi uspješnu implementaciju u velikim razmjerima u praktičnim (konkretnim) primjenama [87]. Mikro kapsule mogu inkapsulirati ograničene količine sredstva za popravak i stoga se većina sredstva za cijeljenje iscrpi u jednom ciklusu punjenja, pa je ponovljeno cijeljenje tijekom dugoročnog razdoblja upitno. Stoga su nedavni istraživački napor usmjereni su na pametno oslobađanje ljekovitih sredstava.

5. Metode ocjene otpornosti betona i betonskih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

5.1. Ocjena otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Ocjena otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja podrazumijeva *direktne i indirektne postupke*. *Direktni postupci* su oni koji su normirani sukladno Europskom zakonodavstvu. Prema Europskom zakonodavstvu, otpornost betona na cikluse smrzavanja/ odmrzavanja ispituje se postupcima propisanim u normama HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89] i CEN/TR 15177:2006 [90]. U postupku opisanom u HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89] uzorci betona zasićeni vodom ili 3 %-tnom otopinom NaCl izlažu se ciklusima smrzavanja/odmrzavanja (56 ciklusa) te se mjeri površinsko ljuštenje betona tijekom tih ciklusa, prati se gubitak mase tijekom tih ciklusa, dok se za praćenje oštećenja unutarnje strukture može koristiti postupak opisan u CEN/TR 15177:2006 [90], u kojem se mjerenjem vremena prolaska ultrazvučnog impulsa računa relativni dinamički modul elastičnosti i utvrđuje oštećenje unutarnje strukture betona. CEN/TR 15177:2006 [90] razlikuje nekoliko metoda ispitivanja, a jedna od njih je i metoda ploča u kojoj su ploče dimenzije 5x150x150 mm prekrivene vodom ili 3 %-tnom otopinom NaCl za vrijeme izlaganja ciklusima smrzavanja/odmrzavanja (56 ciklusa). Na ovakvim pločama istovremeno se može pratiti površinsko ljuštenje i oštećenje unutarnje strukture betona.

Indirektno se unutarnja oštećenja betona tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja mogu ocijeniti na sljedeće načine:

- kroz pad tlačne čvrstoće betona tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pri čemu se tlačna čvrstoća određuje prema HRN EN 12390-3:2019 [91]
- kroz pad vlačne čvrstoće betona tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pri čemu se vlačna čvrstoća određuje prema HRN EN 12390-5:2019 [92] ili HRN EN 12390-6:2019 [93]
- kroz povećanje prodora vode pod tlakom betona tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pri čemu se dubina prodora vode pod tlakom određuje prema HRN EN 12390-8:2019 [94]
- kroz promjenu u raspodjeli veličine pora pojedine veličine u betonu tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja određeno živinim porozimetrom
- kroz promjenu u raspodjeli i međusobnoj povezanosti pora u betonu tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja određeno nano kompjuteriziranom tomografijom (nano CT)
- kroz promjenu u unutarnjoj strukturi uzoraka betona tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja određeno skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM analiza),

a pri čemu se promjena promatra usporedbom dobivenih rezultata po pojedinoj metodi na uzorcima betona koji nisu bili izloženi smrzavanju/odmrzavanju i na uzorcima betona koji su bili izloženi smrzavanju/odmrzavanju prema npr. CEN/TR 15177:2006 [90] (metoda ispitivanja prizme ili neka druga metoda sukladno normi).

5.2. Načini poboljšanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Otpornost betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja uobičajeno se poboljšava dodavanjem aeranta u betonsku mješavinu [95]. Aerant je kemijski dodatak betonu koji u svježu betonsku mješavinu unosi veliku količinu zračnih mjehurića, a koji prekidaju kapilare kojima bi se voda „penjala“ u beton. Ako nema vode u betonu, nema ni problema sa smrzavanjem/odmrzavanjem. Međutim, treba biti oprezan s aerantima, jer zračni mjehurići utječu negativno na tlačnu čvrstoću betona.

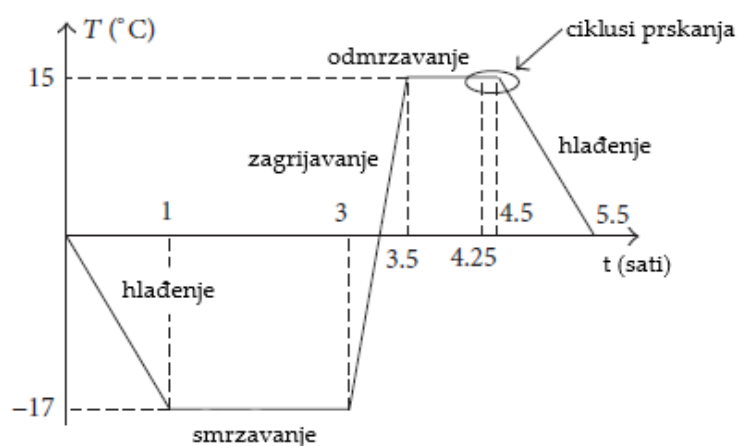
Osim aerantom, literatura navodi i da se otpornost betona može poboljšati mineralnim dodacima kao što su zgura [96], leteći pepeo [97] i silikatna prašina [98]. Naime, na otpornost cementnih kompozita na smrzavanje/odmrzavanje uvelike utječe veličina i distribucija pora u samom materijalu. Autori u [99] klasificirali su pore izravno prema njihovom utjecaju na otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja kao: bezopasne (do 0,02 μm), manje štetne (0,02-0,05 μm), štetne (0,05-0,2 μm) i štetnije (veće od 0,2 μm). Mineralni dodaci su sitniji od samog cementa te čine cementnu matricu gušćom, a time i vjerojatno povećavaju udio manjih i manje štetnih pora te smanjuju udio onih krupnijih i štetnijih.

Dodatno, otpornost betona može se poboljšati i djelomičnom zamjenom agregata gumom [100, 101, 102, 103], primjenom polimernih veziva [104, 105], modifikacijom [106, 107, 108] ili impregnacijom betona polimerom [109, 110], primjenom polikarbonatnih superplastifikatora [111, 112], primjenom biomimetičkih polimernih dodataka [113] i primjenom polimernih vlakana [114].

5.3. Ocjena otpornosti betonskih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Ocjena otpornosti betonskih elemenata na cikluse smrzavanja i odmrzavanja nije standardizirana te različiti istraživači primjenjuju različite metode. Ovdje treba napomenuti da radova koji se bave otpornošću betonskih elemenata na cikluse smrzavanja/odmrzavanja ima vrlo malo, jer smrzavanje/odmrzavanje takvih elemenata zahtjeva izradu specijalne komore, što je izrazito skupo. Neki od radova kojima u naslovu stoji „beams“ [115, 116, 117] zapravo podrazumijevaju manje armiranobetonske elemente koji bi se mogli smatrati prizmama i koji bi bez problema mogli biti tretirani u komori za smrzavanje i odmrzavanje namijenjenoj za tretiranje na razini betona kao materijala. Rezultati istraživanja ono malo radova koja obrađuju „real scale“ elemente su prikazani u nastavku.

Qin i dr. [118] su u svom istraživanju izradili armiranobetonske stupove dimenzija 200x200x1100 mm, te ih u starosti od 2 mjeseca saturirali vodom i izložili djelovanju 0, 100, 200 i 300 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja pri čemu su detalji svakog ciklusa prikazani Slikom 5.1.



Slika 5.1. Temperaturene promjene u jednom ciklusu smrzavanja/odmrzavanja [118]

Tako tretirane stupove su učvrstili u armiranobetonski temelj te ih opterećivali pri vrhu simulirajući horizontalnu silu potresa. Autori su zaključili da ciklusi

smrzavanja/odmrzavanja utječu negativno na nosivost, duktilnost, čvrstoću i krutost greda.

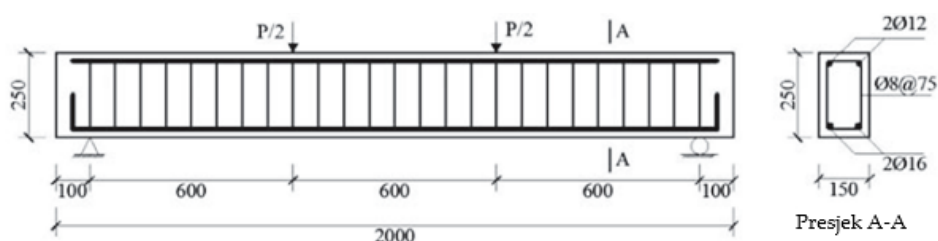
Cao i dr. [119] su istraživali ponašanje armiranobetonskih greda dimenzija 100x150x1000 mm različito armiranih i izrađenih s betonom dvije različite čvrstoće (40 i 50 N/mm²) izloženih savijanju u dvije točke nakon 0, 50, 100 i 125 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja. Jedan ciklus smrzavanja/odmrzavanja je podrazumijevao izlaganje uzoraka u vodi temperaturama od (-17±2 °C) do (6± 2 °C) i trajao je 3 sata. Autori su opazili da opterećenje pri kojem dolazi do pojave pukotina na gredama i granična nosivost greda opada s brojem ciklusa smrzavanja/odmrzavanja, ali i da je taj utjecaj smrzavanja/odmrzavanja znatno manji kod greda s višim razredom čvrstoće betona. Stoga su zaključili da beton visokih čvrstoća može umanjiti utjecaj ciklusa smrzavanja/odmrzavanja na ponašanje elemenata u stvarnim uvjetima izloženosti.

Kosior-Kazberuk i Wasilczyk [120] su istraživali ponašanje armiranobetonskih greda dimenzija 80x120x1100 mm istodobno izloženih opterećenju savijanjem u jednoj točki i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja i izloženih samo opterećenju savijanjem u jednoj točki. Minimalna i maksimalna temperatura tijekom jednog ciklusa smrzavanja/odmrzavanja su bile od -20 °C do +20 °C. Pri 0, 3, 6, 12, 18, 24, 33, 39, 60, 81, 102, 123 i 150 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pratili su broj pukotina i srednju vrijednost širine pukotina, progib grede i deformaciju u vlačnoj zoni. Broj i srednja širina pukotine, kao i progib te deformacija u vlačnoj zoni bile su značajno veće kod greda koje su izložene opterećenju savijanjem u jednoj točki i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja nego kod greda izloženih samo opterećenju savijanjem u jednoj točki.

Duan i dr. [121] su istraživali ponašanje armiranobetonskih greda dimenzija 80x120x1100 mm prethodno izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja i opterećenju 0, 20 i 50 % njihove granične nosivosti (Slika 5.2.) pri savijanju u dvije točke. Shema opterećivanja greda na savijanje prikazana je na Slici 5.3.



Slika 5.2. Uređaj za prethodno opterećivanje greda uz istodobno smrzavanje/odmrzavanje [121]

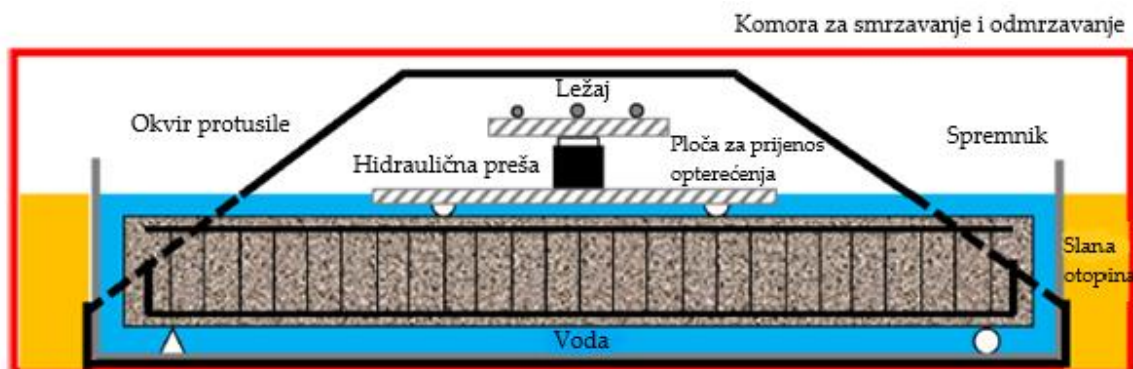


Slika 5.3. Shema opterećivanja greda na savijanje u dvije točke [121]

Istodobno su na savijanje u dvije točke ispitali i gredu koja nije bila podvrgnuta ciklusima smrzavanja/odmrzavanja i opterećenju. One grede koje su bile podvrgnute smrzavanju i odmrzavanju i prethodnom opterećivanju bile su ispitane na savijanje u dvije točke nakon 20, 40, 60 i 80 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, pri čemu je ciklus podrazumijevao promjenu temperature od -18 °C do 14 °C. Zaključeno je da granična nosivost greda opada s brojem ciklusa smrzavanja/odmrzavanja, kao i s većim postotkom prethodnog opterećivanja.

Gong i dr. [122] napravili su gotovo identičan test na armiranobetonskim gredama dimenzija 150x250x2000 mm. Broj i režim ciklusa smrzavanja/odmrzavanja, kao i postoci prethodnog opterećivanja bili su identični kao u istraživanju [121]. Prethodno opterećivanje u komori za smrzavanje/odmrzavanje se i ovdje odvijalo u dvije točke

(Slika 5.4.). Na kraju su grede opterećene savijanjem u dvije točke, kao i u prethodnom istraživanju i doneseni su isti zaključci tj. da je izlaganje kombiniranom opterećivanju greda znatno kritičnije nego samo izlaganje jednom od opterećivanja (ili smrzavanje/odmrzavanje ili prethodno opterećivanje do određenog postotka granične nosivosti).



Slika 5.4. Shematski prikaz prethodnog opterećivanja greda uz istodobno smrzavanje/odmrzavanje [122]

Omran i El-Hacha [123] su istraživali ponašanje armiranobetonskih greda dimenzija 200x400x5150 mm. Postojale su dvije serije greda; po jedna greda u svakoj seriji je bila neojačana, a po 4 su bile ojačane karbonskim vlaknima u vlačnoj zoni i uz različiti intenzitet prednaprežanja granične vlačne čvrstoće vlakana (0, 20, 40 i 60 %). Serija 1 podvrgnuta je 500 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, a serija 2 podvrgnuta je 500 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i uz to prethodno opterećena s 47 % granične nosivosti grede ojačane nenapregnutim karbonskim vlaknima. Jedan ciklus smrzavanja/odmrzavanja je podrazumijevao temperaturu od -34 °C do +34 °C i relativnu vlagu od 75 %. Autori su opazili da kod greda serije 2 koje su ojačane prednapetim karbonskim vlaknima dolazi do odvajanja vlakana od betona tijekom opterećivanja, ali se pojavljuje i manji broj pukotina u vlačnoj zoni nego kod greda s nenapetim karbonskim vlaknima iste serije.

Cao i dr. [124] su u svom radu istraživali ponašanje armiranobetonskih greda dimenzija 150x250x2000 mm na smicanje nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

Grede su bile izložene 0, 75, 125 i 150 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja, no autori nisu naveli detalje ciklusa smrzavanja/odmrzavanja. Autori zaključuju da ciklusi smrzavanja/odmrzavanja ne mijenjaju mehanizam sloma greda.

Prema ovdje iznesenom, ne postoji jednoznačna metoda za ispitivanje otpornosti betonskih/armiranobetonskih elemenata na smrzavanje/odmrzavanje, već svaki autor definira neku svoju metodu.

6. Eksperimentalni dio na razini materijala

Hipoteze istraživanja obuhvaćenog doktorskom disertacijom su sljedeće:

H1: Kemijski dodaci za samocijeljenje mogu značajno poboljšati otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

H2: Primjena kemijskih dodataka za samocijeljenje u svrhu poboljšanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja je ekonomski opravdana.

6.1. Materijali

6.1.1. Svojstva agregata

U eksperimentalnom dijelu istraživanja spravljeno je 8 betonskih mješavina za koje je korišten dolomit kao agregat u frakcijama 0 - 4 mm, 4 - 8 mm, 8 - 16 mm i 16 - 31,5 mm te punilo dolomitnog tipa. Slikom 6.1. prikazane su sve frakcije agregata korištene u ovom istraživanju.



Slika 6.1. Frakcija agregata korištene za izradu betonskih mješavina

Gustoća dolomita određena prema normi HRN EN 1097-6 [125] iznosila je 2780 kg/m³. Gustoća punila određena prema normi HRN EN 1097-6 [125] iznosila je 2780 kg/m³. Tablica 6.1. prikazuje rezultate prosijavanja svih frakcija agregata određene prema normi HRN EN 933-1 [126], a tablica 6.2. izračun ciljane kumulativne krivulje agregata. Tablica 6.3. prikazuje izračun stvarne kumulativne krivulje agregata pri čemu treba napomenuti da je 5 % frakcije 0 - 4 mm zamijenjeno s punilom.

Tablica 6.1. Numerički granulometrijski sastav agregata

Frakcija (mm)	Prolaz kroz sito	Veličina otvora sita (mm)									
		0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
0 - 4	%	0	4,17	7,04	13,99	28,87	59,62	92,36	99,21	99,21	99,21
4 - 8	%	0	0	0	0	0,10	0,60	14,54	98,19	100	100
8 - 16	%	0	0	0	0	0	0	0	15,83	95,79	100
16 - 31,5	%	0	0	0	0	0	0	0	0	6,70	100

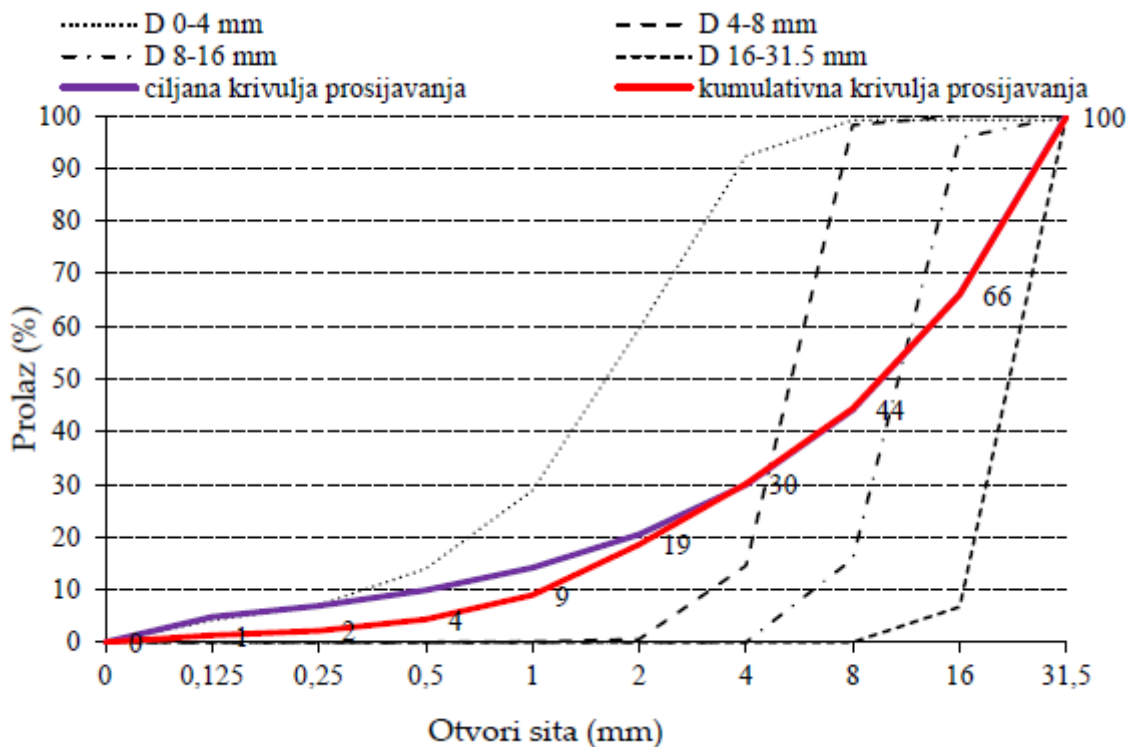
Tablica 6.2. Ciljani kumulativni sastav agregata

Ciljana krivulja	Prolaz kroz sito	Veličina otvora sita (mm)									
		0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
A	%	0	3,35	4,85	7,09	10,50	15,77	24,17	37,90	61,03	100
B	%	0	6,30	8,91	12,60	17,82	25,20	35,63	50,40	71,27	100
Ciljana krivulja: (A+B)/2	%	0	4,82	6,88	9,85	14,16	20,49	29,90	44,15	66,15	100

Tablica 6.3. Stvarni kumulativni sastav agregata

Frakcija (mm)	Prolaz kroz sito	Veličina otvora sita (mm)									
		0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
0 - 4	31 %	0	1,29	2,18	4,34	8,95	18,48	28,63	30,75	30,75	30,75
4 - 8	10 %	0	0	0	0	0,01	0,06	1,45	9,82	10	10
8 - 16	24 %	0	0	0	0	0	0	0	3,80	22,99	24
16 - 31,5	35 %	0	0	0	0	0	0	0	0	2,35	35
Stvarna krivulja	100 %	0	1,29	2,18	4,34	8,96	18,54	30,09	44,37	66,09	99,75

Krivulje prosijavanja dolomitnih frakcija prikazane su s ciljanom i stvarnom kumulativnom krivuljom agregata na Slici 6.2.

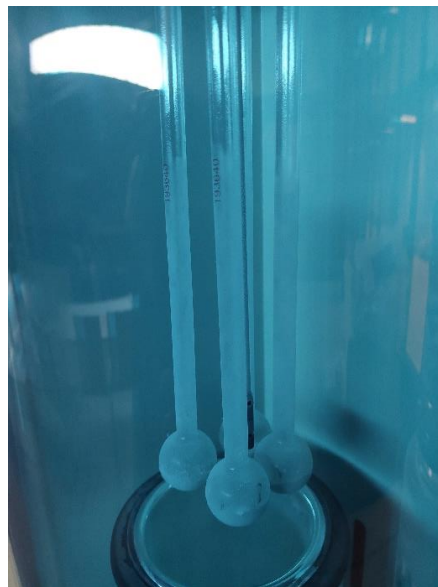


Slika 6.2. Krivulje prosijavanja frakcija, ciljana i stvarna kumulativna krivulja agregata

Specifična površina punila određena je BET metodom (Slikom 6.3. prikazana je priprema uzoraka, a ispitivanje Slikom 6.4.) sukladno normi HRN ISO 9277 [127] te su rezultati prikazani Tablicom 6.4.



Slika 6.3. Priprema uzoraka za ispitivanje specifične površine



Slika 6.4. Priprema uzoraka za ispitivanje i uređaj za određivanje specifične površine BET metodom

Tablica 6.4. Specifična površina punila određena BET metodom

Mjerenje	Specifična površina (m ² /g)
1.	2,21
2.	2,43
3.	1,67*
Srednja vrijednost	2,32

* izuzeto iz proračuna srednje vrijednosti zbog prevelikog odstupanja

6.1.2. Svojstva veziva

Cement korišten za izradu betonskih mješavina bio je CEM I 52,5 N gustoće u iznosu 2960 kg/m³ određene prema HRN EN 196-6 [128]. Specifična površina cementa određena je BET metodom sukladno normi HRN ISO 9277 [127] te je prikazana Tablicom 6.5.

Tablica 6.5. Specifična površina cementa određena BET metodom

Mjerenje	Specifična površina (m ² /g)
1.	3,09*
2.	3,94
3.	3,64
Srednja vrijednost	3,79

* izuzeto iz proračuna srednje vrijednosti zbog prevelikog odstupanja

6.1.3. Svojstva dodataka betonu

U svim mješavinama (osim u mješavinama M7 i M8) korišten je Sika-in superplastifikator Visco Crete 5380 I (Slika 6.5.) u iznosu 1 % na masu cementa čija gustoća iznosi $1,08 \text{ g/cm}^3$. Za mješavine (M3, M4, M7 i M8) korišten je kristalni hidrofilni dodatak (Slika 6.6.) Penetron Admix tvrtke Penetra u iznosu 1 % i 3 % na masu cementa, čija gustoća je određena prema normi HRN EN 1097-6 [125] je iznosila 2910 kg/m^3 . Specifična površina kristalnog hidrofilnog dodatka određena je BET metodom sukladno normi HRN ISO 9277 [127] te je prikazana Tablicom 6.6.



Slika 6.5. Superplastifikator Visco Crete 5380 I



Slika 6.6. Izgled kristalnog hidrofilnog dodatka

Tablica 6.6. Specifična površina kristalnog hidrofilnog dodatka određena BET metodom

Mjerenje	Specifična površina (m ² /g)
1.	2,77
2.	2,69
3.	2,64
Srednja vrijednost	2,70

Parafinske mikrokapsule s toluen 2,4-diizocijanatom (TDI) pripremljene su prema postupku detaljno opisanom u literaturi [28]. Budući da su autori [28] ispitali utjecaj različitih čimbenika (temperatura i brzina miješanja, omjer parafin/TDI, količina sredstva za hlađenje) na dobivanje konačnog produkta (mikrokapsula), odabrani su uvjeti koje su oni preporučili kao najpovoljnije.

Parafinski vosak/kuglice (temperatura solidifikacije 56 – 60 °C) i toluen 2,4-diizocijanat (TDI) dobavljeni su od tvrtke Kefo d.o.o. (proizvođači Acros Organics i Fisher UK). Perfluorotributylamin (PFTBA) je kupljen od tvrtke Wuhan Bright Chemical Co., Ltd., Kina.

U staklenoj čaši izvagano je 10 g parafinskog voska i na električnoj grijalici zagrijano na 75 °C do potpunog prijelaza u tekuće stanje (Slika 6.a) – taljenje parafinskih kuglica). U rastaljeni parafin dodano je 20 g TDI te je smjesa miješana brzinom od 600 rpm (okretaja u minuti) mehaničkom miješalicom IKA RW16 (Slika 6.b) – miješalica) tijekom 3 sata uz konstantnu temperaturu od 75 °C (Slika 6.c - mehaničko miješanje). Nakon isteka vremena, zagrijavanje je prekinuto te je u smjesu (uz miješanje) dodano 100 ml perfluorotributylamina (PFTBA) kako bi došlo do naglog hlađenja, skrućivanja (solidifikacije) parafina i nastanka mikrokapsula. Heterogena smjesa mikrokapsula i tekućeg PFTBA u čaši stavljena je u ultrazvučnu kupelj Bandelin Sonorex (Slika 6.d) – ultrazvučna kupelj) na 30 min kako bi došlo do razdvajanja aglomeriranih mikrokapsula koje su zatim odvojene od tekućine vakuumskom filtracijom. Mikrokapsule su sušene na temperaturi od 40 °C kroz 24 sata te su pohranjene na hladnom mjestu (u hladnjaku).



a) taljenje
parafinskih
kuglica



b) miješalica



c) mehaničko
miješanje



d) ultrazvučna
kupelj

Slika 6.7. Postupak proizvodnje mikrokapsula

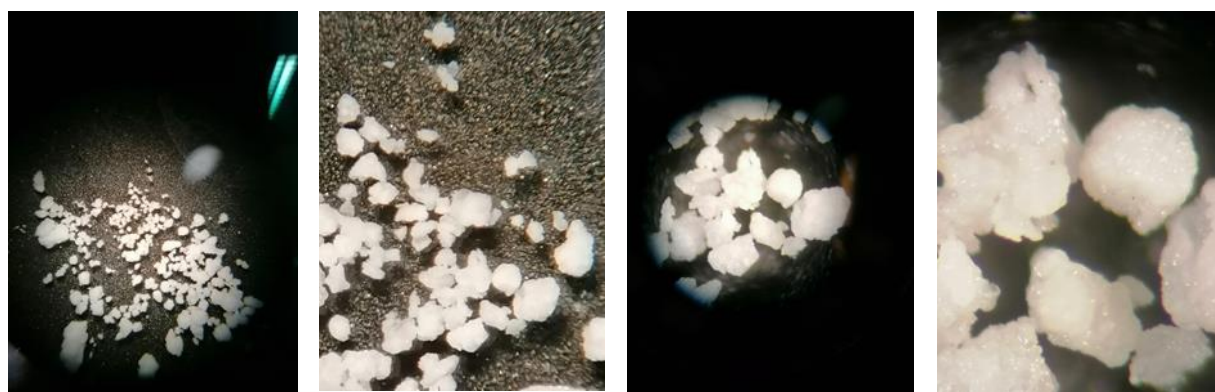
Maseni omjer parafina i TDI u mikrokapsulama određen je jednostavnim vaganjem odnosno računom iskorištenja. Za pripremu je uzeto točno 10 g parafina i 20 g TDI, a masa osušenih mikrokapsula bila je 29,5 g što je iskorištenje od 98 %. Budući da niti parafin niti TDI nisu topljivi u PFTBA do gubitka od 2 % je došlo prilikom filtracije (zaostale mikrokapsule na filteru i u čaši). Kako je početni omjer masa parafina i TDI bio 1 : 2, izračun pokazuje kako je sadržaj TDI u mikrokapsulama približno 66 % što se vrlo dobro poklapa s podacima iz literature [28].

Morfologija mikrokapsula

Morfologija mikrokapsula ispitana je optičkom mikroskopijom na stereo mikroskopu Motic SMZ-168-TL (Slika 6.8.). Slike mikrokapsula pri različitim povećanjima (5 – 350 x, Slika 6.9.) jasno pokazuju da su nastali agregati koji znatno variraju u veličini (od 1 – 10 mm), ali koji se sastoje od mnogo malih sferičnih primarnih čestica. Veličina tih primarnih čestica je u rasponu od oko 100 do 300 μm što se također podudara s podacima navedenim u literaturi [28].



Slika 6.8. Optički mikroskop



a) uvećanje 5x

b) uvećanje 50x

c) uvećanje 75x

d) uvećanje 350x

Slika 6.9. Izgled mikrokapsula pod optičkim mikroskopom

Kako bi se dokazao sastav mikrokapsula (parafin + TDI), korištene su dvije suvremene instrumentalne metode: infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom (FT-IR) i termogravimetrijska analiza sa simultanom razlikovnom pretražnom kalorimetrijom (TGA/DSC).

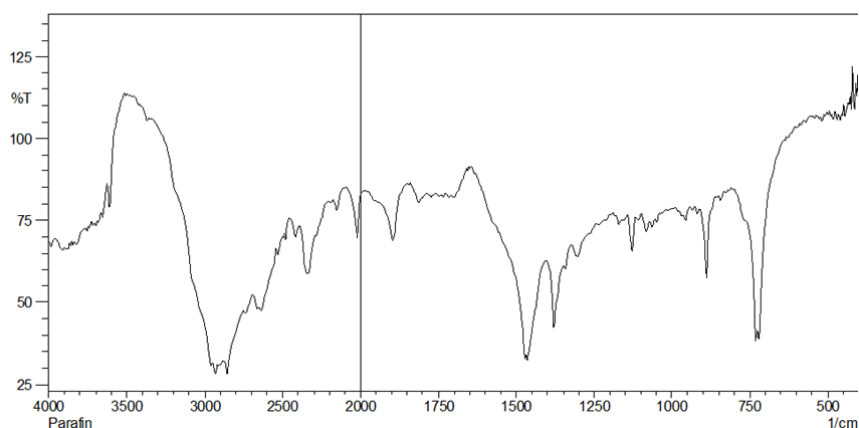
Infracrvena spektroskopija parafina i mikrokapsula

Infracrveni spektri (IR) čistog parafina i pripremljenih mikrokapsula snimljeni su na FTIR 8400s SHIMADZU (Kyoto, Japan) spektrofotometru (Slika 6.10.) metodom difuzne refleksije infracrvenog zračenja (engl. Diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy, DRIFTS), u valnom području od 400 do 4000 cm^{-1} , pri

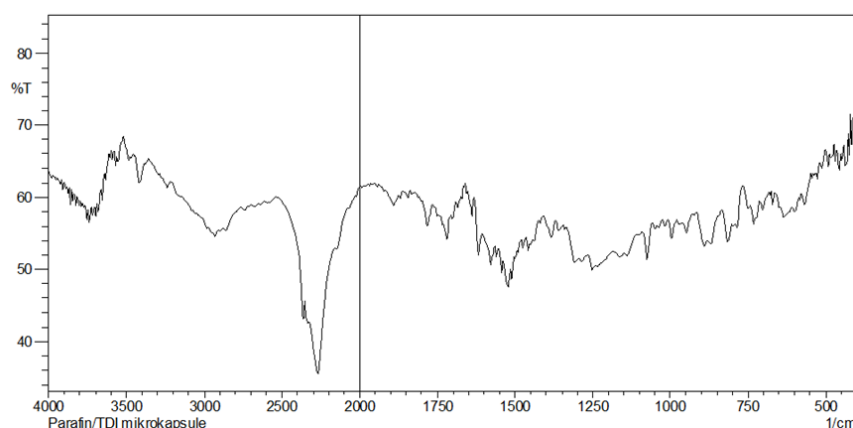
rezoluciji od $4,0\text{ cm}^{-1}$. Spektri uzoraka snimljeni su korištenjem uzorka pomiješanog s bezvodnim kalijevim bromidom (KBr) u približnom omjeru 5:100. Podaci su prikupljeni i obrađeni računalnim programom IR Solution 1.30.106, a dobiveni rezultati su prikazani kao ovisnost transmitancije (T) o valnom broju ($\bar{\nu}$) izraženom u cm^{-1} (Slike 6.11. i 6.12.).



Slika 6.10. FTIR spektrofotometar

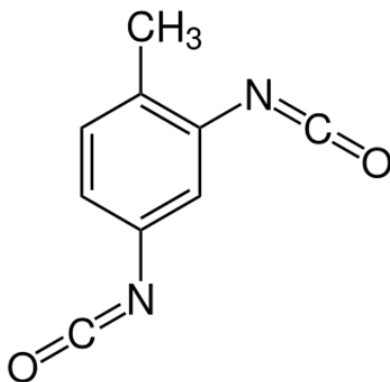


Slika 6.11. FTIR analiza parafina



Slika 6.12. FTIR analiza mikrokapsula

Infracrveni spektri čistog parafina i mikrokapsula se jasno razlikuju. Jaki maksimumi pri 2939 cm^{-1} i 2860 cm^{-1} u spektru parafina odgovaraju simetričnim i asimetričnim vibracijama istezanja $-\text{CH}_2$ i $-\text{CH}_3$ skupina. Također, ističu se i maksimumi pri 1460 cm^{-1} ($-\text{CH}$ deformacije), 1380 cm^{-1} ($-\text{CH}_3$ savijanje) i 725 cm^{-1} ($-\text{CH}_2$ ljuljanje). Svi navedeni vibracijski maksimumi potvrđuju linearnu zasićenu alifatsku strukturu parafinskog voska. Iako se oni mogu vidjeti i u spektru mikrokapsula, daleko su manje izraženi dok je najistaknutiji maksimum pri 2270 cm^{-1} koji odgovara asimetričnoj vibraciji istezanja $-\text{NCO}$ skupina u strukturi TDI. Odnos veličina vibracijskih maksimuma u spektru mikrokapsula (Slika 6.13.) potvrđuje (samo semikvantitativno) i njihov prethodno određen sastav odnosno da je u njima omjer parafina i TDI 1 : 2.



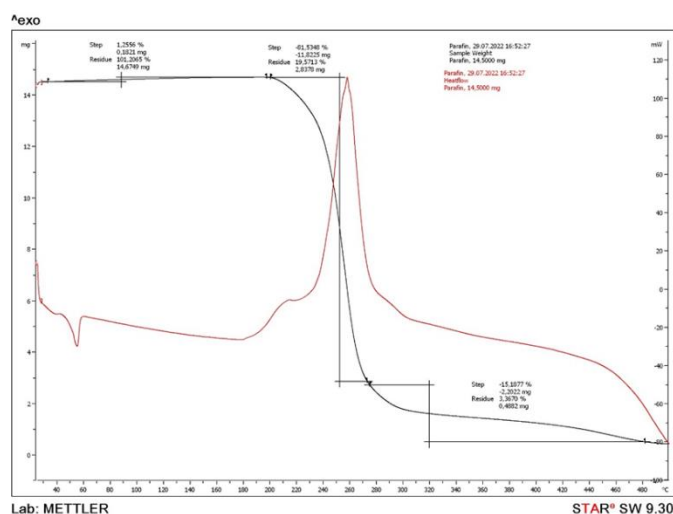
Slika 13. Struktura TDI-a

Termogravimetrijska analiza parafina i mikrokapsula

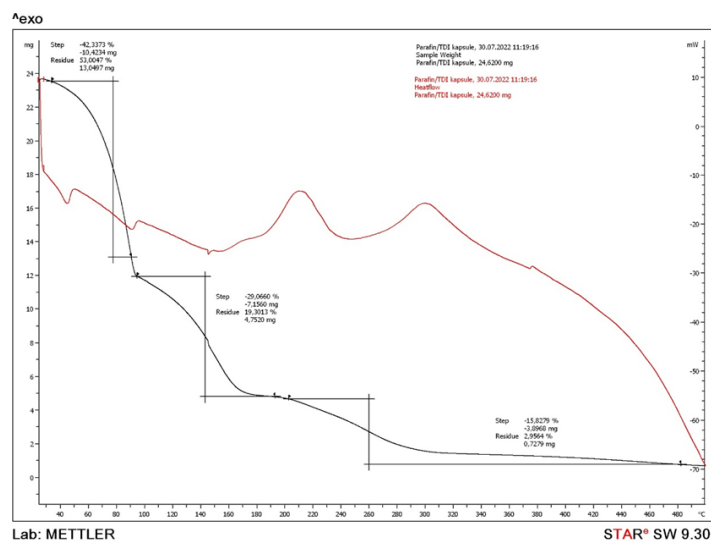
Termogravimetrijska analiza (TA) čistog parafina i pripremljenih mikrokapsula napravljena je na simultanom TGA/DSC uređaju, STARe System, Mettler Toledo (Columbus, SAD) u struji kisika (Slika 6.14.). Uzorci su snimani u posudicama od aluminijevog oksida (Al_2O_3) volumena $70\ \mu\text{L}$ u temperaturnom intervalu od $25\ ^\circ\text{C}$ do $500\ ^\circ\text{C}$ brzinom zagrijavanja od $10\ ^\circ\text{C}\ \text{min}^{-1}$ i brzinom protoka kisika od $150\ \text{cm}^3\text{min}^{-1}$. Podaci su prikupljeni i obrađeni računalnim programom STARe Software 9.30.107. Dobiveni rezultati (Slike 6.15 i 6.16.) su prikazani u obliku termogravimetrijskih (crna krivulja) i kalorimetrijskih krivulja (crveno) u obliku ovisnosti mase uzoraka (m) ili protoka topline (izraženog u mW) o temperaturi (t) izraženoj u $^\circ\text{C}$.



Slika 6.14. TGA/DSC uređaj



Slika 6.15. TGA/DSC analiza parafina



Slika 6.16. TGA/DSC analiza mikrokapsula

Kao i u slučaju infracrvenih spektara, termogravimetrijske i kalorimetrijske krivulje uzoraka parafina i mikrokapsula znatno se razlikuju. Parafin izgara (mjerena su rađena u struji kisika) u jednom koraku pri temperaturi od 260 °C te dolazi do naglog gubitka mase od oko 96 %. Ovom gubitku mase odgovara i oštar egzoterman maksimum (kalorimetrijska krivulja) koji ukazuje na oksidaciju ugljikovodika odnosno izgaranje. Uzorak mikrokapsula pokazuje termički raspad u dva odnosno tri koraka. U temperaturnom području od 25 do 200 °C dolazi do značajnog gubitka mase (~ 70 %) s time da onaj pri nižim temperaturama odgovara isparavanju većeg dijela TDI (dva manja endotermna maksimuma na kalorimetrijskoj krivulji), a izgaranje preostalog TDI se odvija oko 200 °C (egzoterman maksimum). Gubitak mase pri temperaturi od oko 260 °C zajedno s odgovarajućim egzotermnim kalorimetrijskim maksimumom ukazuje na izgaranje parafina. Iako je na temelju gravimetrijskih krivulja teško precizno izračunati odnos masa TDI i parafina u uzorku, on je približno 70 : 30 što odgovara prethodno određenom vaganjem odnosno računanjem na temelju iskorištenja.

Izgled mikrokapsula (izrađene od parafina, TDI i PFTBA) prikazan je Slikom 6.17. Kapsule su korištene u mješavinama M5 i M6 u iznosu od 1 % i 3 % mase cementa.



Slika 6.17. Izgled mikrokapsula

6.1.4. Sastav betonskih mješavina

Sastav svih betonskih mješavina je prikazan Tablicom 6.7. M1 je referentna mješavina bez dodataka, M2 je mješavina s aerantom, M3 je mješavina s 1 % Penetronovog kristalnog hidrofilnog dodatka, M4 je mješavina s 3 % Penetronovog kristalnog hidrofilnog dodatka, M5 je mješavina s 1 % mikrokapsula, M6 je mješavina s 3 % mikrokapsula, sve mješavine (M1-M6) sadrže 1% superplastifikatora, dok su mješavine M7 i M8 bez superplastifikatora, M7 je mješavina s 1 % Penetronovog kristalnog hidrofilnog dodatka, a M8 je mješavina s 3 % Penetronovog kristalnog hidrofilnog dodatka.

Tablica 6.7. Sastav svih betonskih mješavina za 1 m³ betona

Mješavina/Komponente	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Cement (kg)	400	396	396	388	396	388	396	388
Voda (kg)	140	140	140	140	140	140	180	180
v/c	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,45	0,45
Superplastifikator 1 % (kg)	4	4	4	4	4	4	-	-
Aerant 0,2 % (kg)	-	0,8	-	-	-	-	-	-
Kristalni hidrofilni dodatak (kg)	-	-	4	12	-	-	4	12
Mikrokapsule (kg)	-	-	-	-	4	12	-	-
Dolomit 0-4 mm (kg)	576,6	576,6	576,6	576,6	576,6	576,6	572,6	572,6
Dolomit 4-8 mm (kg)	195,6	195,6	195,6	195,6	195,6	195,6	184,8	184,8
Dolomit 8-16 mm (kg)	469,8	469,8	469,8	469,8	469,8	469,8	443,4	443,4
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	685	685	685	685	685	685	646,4	646,4
Punilo 5 % (kg)	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2	-	-

6.1.5. Svojstva svježeg betona

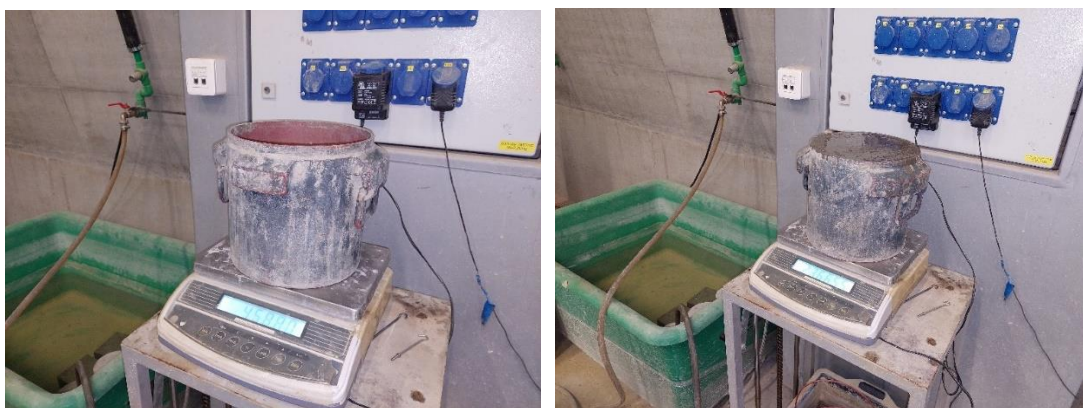
Konzistencija betona određena je prema HRN EN 12350-2 [129], gustoća svježeg betona prema HRN EN 12350-6 [130], a udio pora prema normi HRN EN 12350-7 [131]. Na svježoj betonskoj mješavini određena je konzistencija, gustoća i udio pora, te je navedeno prikazano na slikama 6.18., 6.19. i 6.20. Dobiveni rezultati ispitivanja svježe betonske mješavine prikazani su u Tablici 6.8.



Slika 6.18. Određivanje konzistencije betona slijeganjem



Slika 6.19. Određivanje udjela pora u betonu



Slika 6.20. Određivanje gustoće svježeg betona

Tablica 6.8. Rezultati ispitivanja svježeg betona

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Konzistencija (cm)	12,00	14,00	11,00	11,00	14,50	13,00	11,00	10,00
Gustoća (kg/m ³)	2503,75	2439,00	2520,25	2489,00	2431,25	2428,75	2451,00	2457,00
Udio pora (%)	1,50	5,00	1,50	1,60	2,90	2,90	1,80	1,50

Kao što je vidljivo u Tablici 6.8. rezultati ispitivanja svojstava betona u svježem stanju za sve mješavine ostvaruju konzistenciju 11-14 cm prema metodi slijeganja, što ih svrstava u razred konzistencije S3 sukladno normi HRN EN 206 [132]. Uvidom u istu tablicu vidljivo je da betoni ostvaruju gustoće 2428,75-2503,75 kg/m³, a takav se beton prema normi HRN EN 206 [132] svrstava u betone normalne gustoće. U istoj tablici je vidljivo da mješavina M2 ima veći udio pora (5 %) što je i očekivano s obzirom na dodatak aeranta.

U nastavku istraživanja su iz svih mješavina betona lijevani uzorci betona broja, oblika i svrhe kako je to prikazano Tablicom 6.9. Svi uzorci su nakon 24 sata starosti raskalupljeni te stavljeni u vodu, a nakon toga je s njima postupano onako kako nalaže norma po kojoj se pojedino ispitivanje provodi. Istraživanja su provedena na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek i suradničkim organizacijama kako je to prikazano u Tablici 6.9.

Tablica 6.9. Planirana ispitivanja betona i otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

	Ispitano svojstvo	Tip ispitnih uzoraka	Ispitivanje proveo	Norma
	Tlačna čvrstoća pri 28 dana starosti	2 kocke brida 15 cm	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRN EN 12390-3:2019 [91]
Direktni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	Mjerenje temperature u uzorku	1 kocka brida 15 cm	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	Praćenje ugrađenim termometrima u uzorcima izlaganim djelovanju smrzavanja/odmrzavanja prema HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89]/ točka 8 norme CEN/TR 15177:2006 [90]
	Smrzavanje i odmrzavanje u klima komori, tretiranje vodom sa soli (ljuštenje i unutarnje oštećenje)**	4 šnite betona izmjera 5x15x15 cm za ljuštenje i 2 šnite betona izmjera 5x15x15 cm za unutarnje oštećenje	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRS CEN/TS 12390-9:2016 [91] i CEN/TR 15177:2006 [90]
	Smrzavanje i odmrzavanje u klima komori, tretiranje vodom bez soli (ljuštenje i unutarnje oštećenje)**	4 šnite betona izmjera 5x15x15 cm za ljuštenje i 2 šnite betona izmjera 5x15x15 cm za unutarnje oštećenje	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89] i CEN/TR 15177:2006 [90]
	Faktor razmaka pora	1 šnita betona izmjera 2x15x10 cm	Građevinski fakultet u Zagrebu	HRN EN 480-11:2005 [133]
Indirektni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	Smrzavanje i odmrzavanje uzoraka kocaka i prizmi u komori sa sposobnošću primanja i otpuštanja vode*	6 kocaka brida 15 cm i 3 prizme 10x10x40 cm	Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu	CEN/TR 15177:2006 [90]
	Tlačna čvrstoća prije smrzavanja/odmrzavanja	2 kocke brida 15 cm	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRN EN 12390-3:2019 [91]
	Tlačna čvrstoća nakon smrzavanja/odmrzavanja	3 kocke brida 15 cm	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRN EN 12390-3:2019 [91]
	Vlačna čvrstoća savijanjem prije	3 prizme 10x10x40 cm	Građevinski i arhitektonski	HRN EN 12390-5:2019 [92]

Interpretacija rezultata ispitivanja direktnih i indirektnih postupaka	smrzavanja/odmrzavanja		fakultet Osijek	
	Vlačna čvrstoća savijanjem nakon smrzavanja/odmrzavanja	3 prizme 10x10x40 cm	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRN EN 12390-5:2019 [92]
	Dubina prodora vode pod tlakom prije smrzavanja/odmrzavanja	3 kocke brida 15 cm	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRN EN 12390-8:2019 [94]
	Dubina prodora vode pod tlakom nakon smrzavanja/odmrzavanja	3 kocke brida 15 cm	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	HRN EN 12390-8:2019 [94]
	Raspodjela pora prije smrzavanja/odmrzavanja	djelić netretiranog uzorka	Građevinski fakultet u Zagrebu	živin porozimetar
	Raspodjela pora nakon smrzavanja/odmrzavanja	djelić tretiranog uzorka	Građevinski fakultet u Zagrebu	živin porozimetar
	SEM/EDS analiza prije smrzavanja/odmrzavanja	djelić netretiranog uzorka	Odjel za kemiju u Osijeku/Odjel za primijenjenu kemiju i kemiju okoliša, Sveučilište u Szegedu	elektronički mikroskop s EDS detektorom
	SEM/EDS analiza nakon smrzavanja/odmrzavanja	djelić tretiranog uzorka	Odjel za kemiju u Osijeku/Odjel za primijenjenu kemiju i kemiju okoliša, Sveučilište u Szegedu	elektronički mikroskop s EDS detektorom
	Raspodjela i povezanost pora prije smrzavanja/odmrzavanja	djelić netretiranog uzorka	Odjel za kemiju u Osijeku/Odjel za primijenjenu kemiju i kemiju okoliša, Sveučilište u Szegedu	Mikro CT
	Raspodjela i povezanost pora nakon smrzavanja/odmrzavanja	djelić tretiranog uzorka	Odjel za kemiju u Osijeku/Odjel za primijenjenu kemiju i kemiju okoliša, Sveučilište u Szegedu	Mikro CT
	Mjerenje širine pukotina	na nesmrznutim i na smrznutim uzorcima kocaka prije samocijeljenja	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	Precizno ravnalo

	Mjerenje širine pukotina	na nesmrznutim i na smrznutim uzorcima kocaka nakon samocijeljenja	Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek	Precizno ravnalo
--	--------------------------	---	---	------------------

6.1.6. Tlačna čvrstoća uzoraka starih 28 dana

Nakon 28 dana njege, 3 kocke od svake mješavine su izvađene iz vode te je određena tlačna čvrstoća (Slika 6.21.) sukladno normi HRN EN 12390-3 [91].



Slika 6.21. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Rezultati određivanja tlačne čvrstoće 28. dan prikazani su Tablicom 6.10. Prikazane vrijednosti su srednje vrijednosti dvije izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji.

Tablica 6.10. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona nakon 28. dana očvršćavanja

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (MPa)	66,03	48,81	67,61	65,04	67,67	48,71	46,68	46,09

Iz Tablice 6.10. je vidljivo da najbolje tlačne čvrstoće ostvaruju mješavine M1, M3 i M5 dok nešto lošije tlačne čvrstoće ostvaruje mješavina M4, a najlošije rezultate

mješavine M2 i M6 te M7 i M8. Očekivano je da aerant loše utječe na čvrstoću betona no i dodatak kristalnog hidrofilnog dodatka i mikrokapsula u većoj količini (3 % na masu cementa) su se loše odrazili na tlačnu čvrstoću betona suprotno očekivanjima. Očekivano, mješavine s većim v/c omjerom (M7 i M8) su postigle manju tlačnu čvrstoću od mješavina s manjim v/c omjerom.

6.2. Direktni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

6.2.1. Mjerenje temperature u uzorcima/klima komora

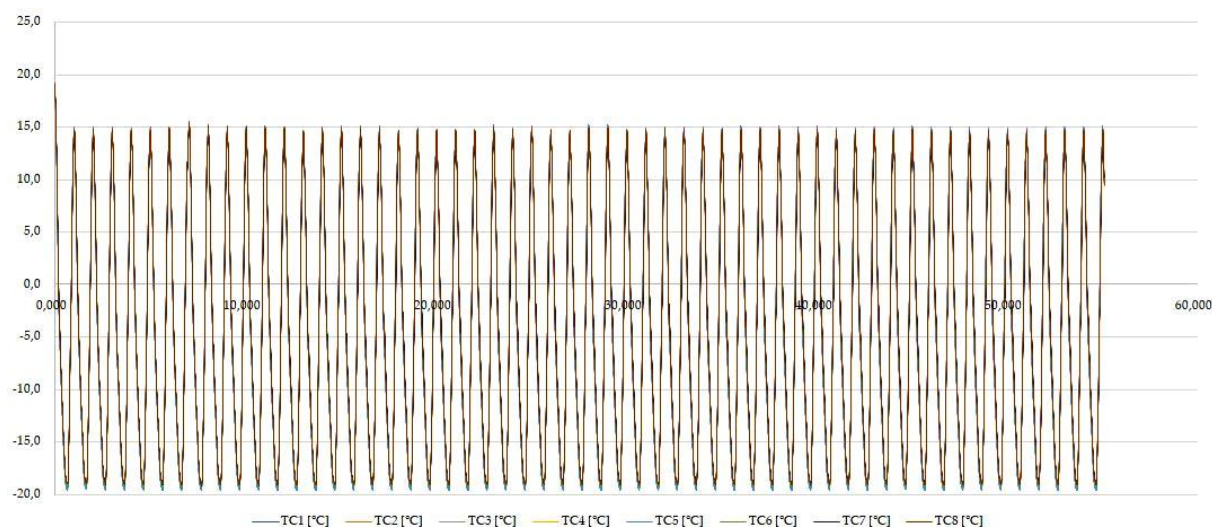
U uzorke kocaka svježe mješavine betona ugrađen je po jedan termopar tip T (Slika 6.22.), te su nakon očvršćivanja i njege uzorci starosti 28 dana i zasićeni vodom stavljeni u klima komoru te podvrgnuti smrzavanju i odmrzavanju prema temperaturnoj krivulji danoj u normi HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89] i točki 8 norme CEN/TR 15177:2006 [90]. Praćene su temperature tijekom ciklusa smrzavanja/odmrzavanja s pomoću termoparova u središtu svake betonske kocke pri čemu su termoparovi bili spojeni na ALMEMO data logger za prikupljanje podataka (temperature) kako je to prikazano Slikom 6.23. Na Slici 6.14. prikazani su rezultati ispitivanja temperature tijekom 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u svih 8 betonskih kocaka (1 ciklus=24 h). Iz Slike 6.24. je vidljivo kako su odstupanja u temperaturi tijekom izloženih ciklusa različitih mješavina zanemariva. Također, ovime je pokazano da je korištena komora u mogućnosti postići temperature u uzorku zahtijevane normama HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89] i CEN/TR 15177:2006 [90], točka 8.



Slika 6.22. Kocke betona s ugrađenim termoparovima



Slika 6.23. Termoparovi iz kocaka betona u klima komori spojeni na uređaj za prikupljanje podataka



Slika 6.24. Rezultati ispitivanja temperature u kockama betona tijekom izloženosti ciklusima smrzavanja/odmrzavanja

6.2.2. Otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema HRS CEN 12390-9:2016

Nakon 21 dan njege betonskih uzoraka, dio kocaka je izvađen iz vode te su iz kocaka ispiljene plohe debljine 5 cm (Slika 6.25.) na kojima je određeno ljuštenje (Slika 6.26., 6.27. i 6.28.) sukladno normi HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89]. Plohe su u komori za smrzavanje i odmrzavanje bile prekrivene slojem vode i slojem 3 % otopine NaCl-a, te im je ispitana otpornost na smrzavanje i odmrzavanje mjerenjem količine oljuštenog materijala.



Slika 6.25. Plohe betona za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja



Slika 6.26. Plohe betona pripremljeni za ispitivanje otpornosti na cikluse smrzavanja/odmrzavanja



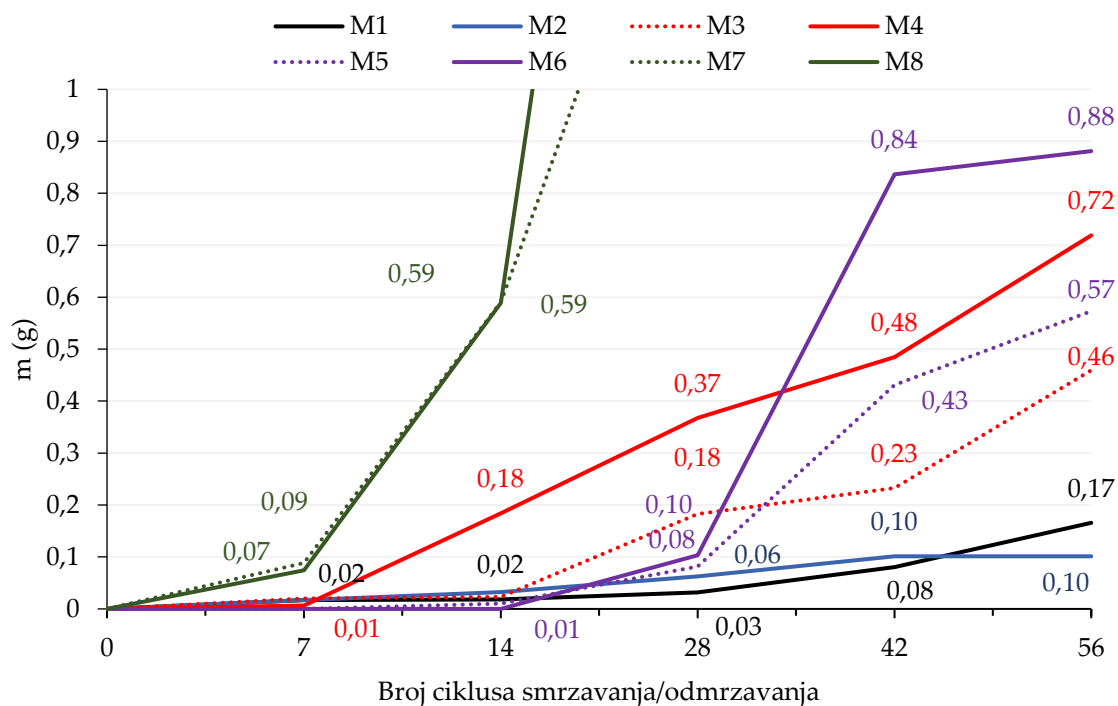
Slika 6.27. Uzorci betona u komori za smrzavanje i odmrzavanje



Slika 6.28. Ispitivanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja-ljuštenje

Uzorci betona nakon očvršćivanja i njege stavljeni su u klima komoru za ispitivanje prema HRS CEN/TS 12390-9:2016 [89]. Na slikama 6.29.-6.30. prikazani su rezultati ispitivanja na uzorcima betona prekrivenim slojem vode (bez soli), a slikama 6.31.-6.32. rezultati ispitivanja na uzorcima betona prekrivenim slojem 3 % otopine NaCl-a

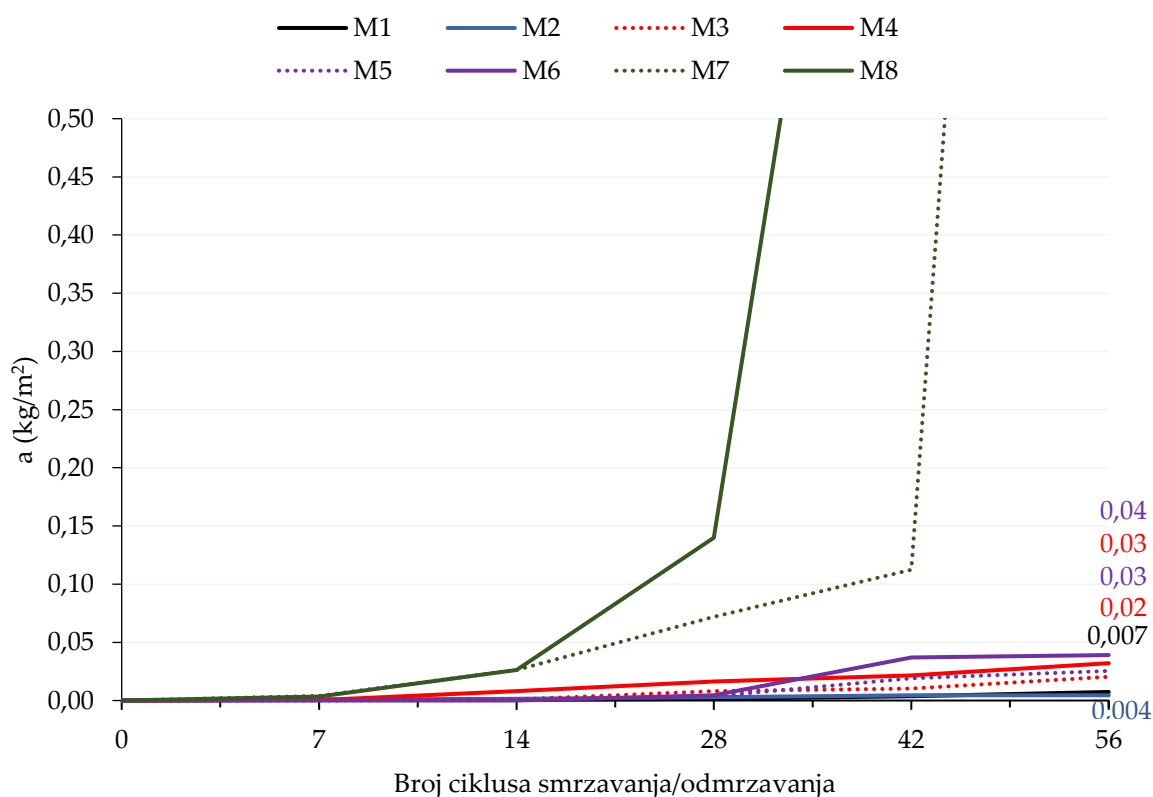
(sa soli). Prikazane krivulje su srednje vrijednosti četiri izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji.



Slika 6.29. Rezultati ispitivanja gubitaka mase ljuštenjem uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli

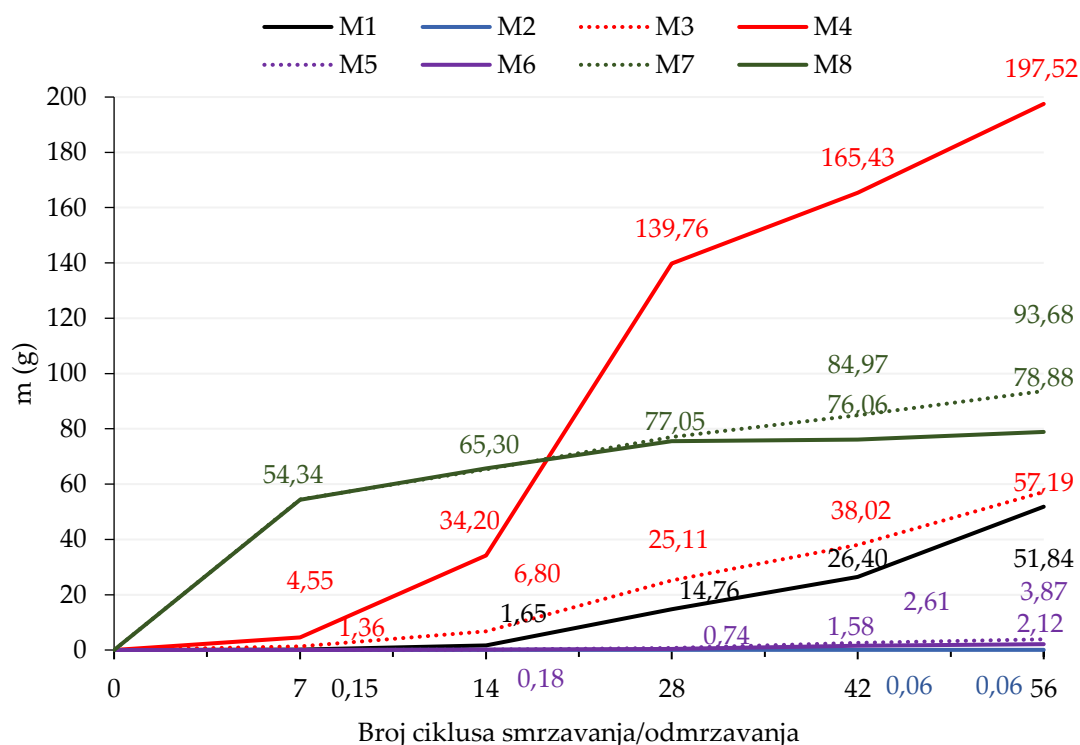
Slika 6.28. pokazuje ukupnu masu oljuštenog materijala za sve betonske mješavine. Vidljivo je da je u mješavini M2 koja sadrži aerant bitno smanjen gubitak mase ljuštenjem nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u odnosu na mješavinu M1, dok su kristalni hidrofilni dodatak u mješavinama M3 i M4 te M7 i M8 i mikrokapsule u mješavinama M4 i M5 djelovali suprotno očekivanom na gubitak mase ljuštenjem tj. povećali gubitak mase ljuštenjem. Mješavine M7 i M8 imale su nakon 14. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja vidljive duboke pukotine, odvajao se agregat od cementnog kamena, pa je ljuštenje bilo jako izraženo. Mješavina s manjim udjelom kristalnog hidrofilnog dodatka (M3) bilježi manju masu oljuštenog materijala u odnosu na mješavine s većim udjelom kristalnog hidrofilnog dodatka (M4). Mješavina s manjim udjelom mikrokapsula (M5) bilježi manju masu oljuštenog

materijala u odnosu na mješavinu s većim udjelom mikrokapsula (M6). Mješavine s većim v/c omjerom (M7 i M8) bilježile su veću masu oljuštenog materijala od mješavina s manjim v/c omjerom, što znači da manji v/c omjer povoljnije utječe na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja u uvjetima bez soli. Najmanju količinu oljuštenog materijala, a time i najbolju otpornost na smrzavanja i odmrzavanja po ovoj metodi i u uvjetima bez soli bilježi mješavina M2, a slijede je redom mješavine M1, M3, M5, M4, M6, M7 i M8.



Slika 6.30. Rezultati ispitivanja količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli

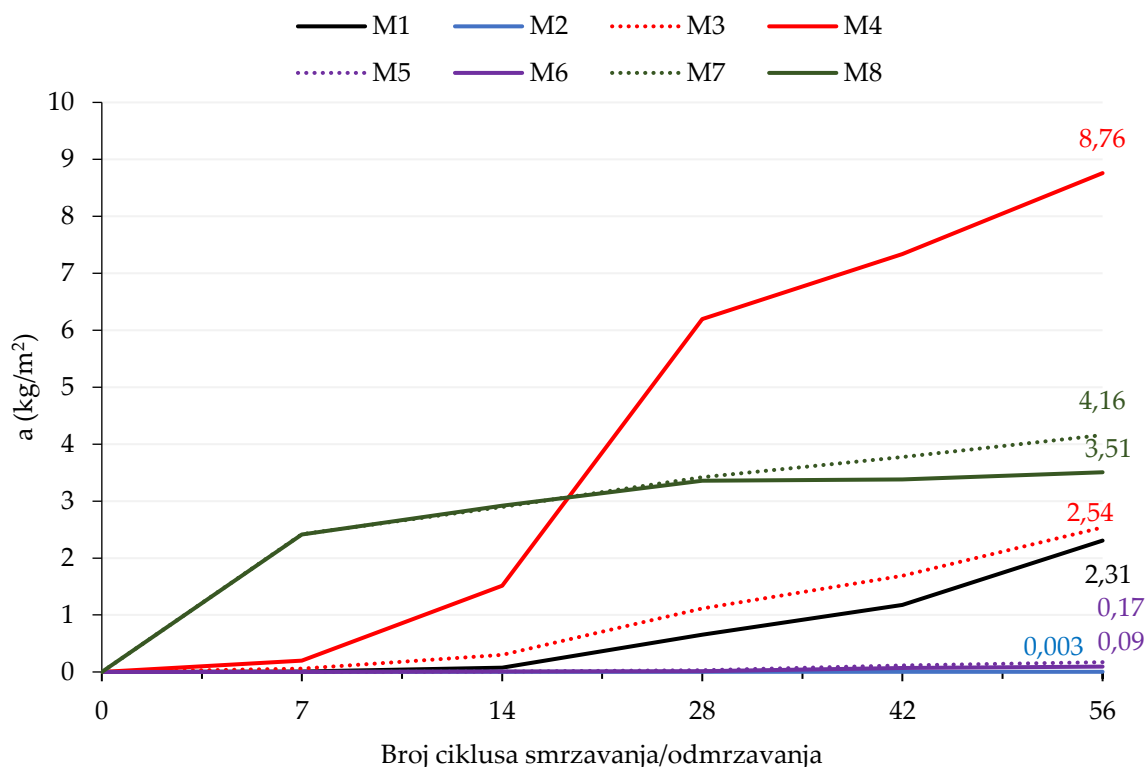
Slika 6.29. prikazuje rezultate ispitivanja ukupne količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Svi zaključci navedeni ispod slike 6.28. mogu se i ovdje preslikati.



Slika 6.31. Rezultati ispitivanja gubitaka mase ljuštenjem uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli

Na Slici 6.31. prikazani su rezultati ispitivanja gubitaka mase ljuštenjem uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli. Vidljivo je da je u mješavini M2 koja sadrži aerante te u mješavinama M5 i M6 koje sadrže mikrokapsule drastično smanjen gubitak mase ljuštenjem nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u odnosu na mješavinu M1, dok su kristalni hidrofilni dodatak u mješavinama M3 i M4 te M7 i M8 djelovao suprotno očekivanom na gubitak mase ljuštenjem tj. povećao gubitak mase ljuštenjem. Mješavina s manjim udjelom kristalnog hidrofilnog dodatka (M3) bilježi značajno manju masu oljuštenog materijala u odnosu na mješavinu s većim udjelom kristalnog hidrofilnog dodatka (M4). Mješavina s manjim udjelom mikrokapsula (M5) bilježi nešto veću masu oljuštenog materijala u odnosu na mješavinu s većim udjelom mikrokapsula (M6). Ne može se donijeti jednoznačan zaključak kako v/c omjer utječe na masu oljuštenog materijala. Najmanju masu oljuštenog materijala, a time i najbolju otpornost na smrzavanja i odmrzavanja po ovoj metodi i u uvjetima sa soli bilježe mješavine M2, M5 i M6, a slijede ih redom

mješavine M1, M3, M8, M7 i M4.



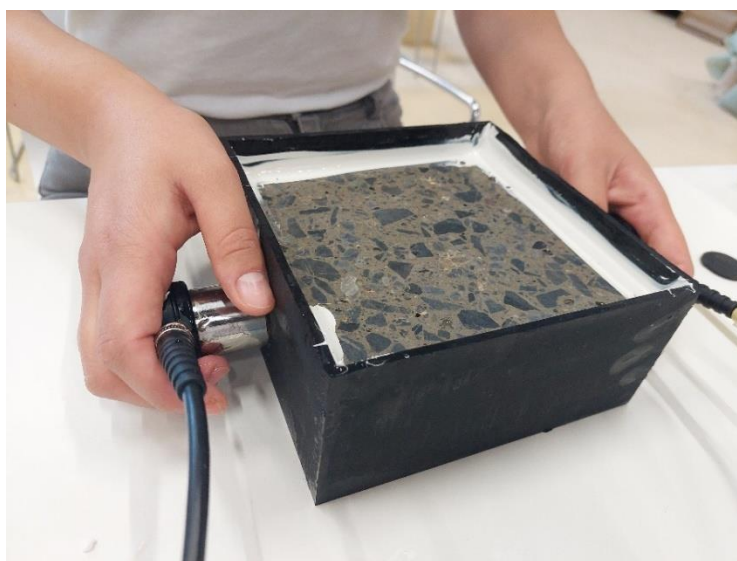
Slika 6.32. Rezultati ispitivanja količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli

Na Slici 6.32. prikazani su rezultati ispitivanja ukupne količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli. Svi zaključci navedeni ispod slike 6.30. mogu se i ovdje preslikati.

Rezultati ispitivanja po ovoj metodi razlikuju se ovisno o tome je li sloj koji pokriva uzorke bio samo voda ili 3 % otopina NaCl.

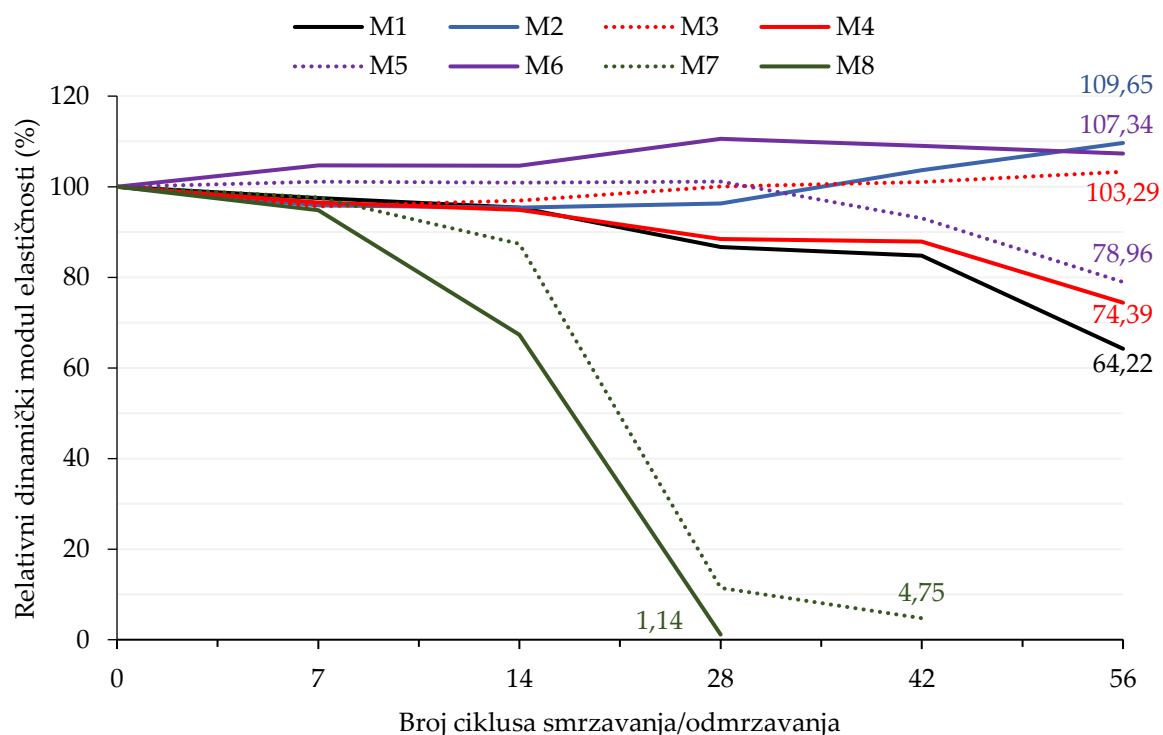
6.2.3. Otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja prema HRN CEN/TR 15177

Za praćenje oštećenja unutarnje strukture može se koristiti postupak opisan u CEN/TR 15177:2006 [90], u kojem se mjerenjem vremena prolaska ultrazvučnog impulsa računa relativni dinamički modul elastičnosti i utvrđuje oštećenje unutarnje strukture betona. CEN/TR 15177:2006 [90] razlikuje nekoliko metoda ispitivanja, a jedna od metoda je i metoda ploča pri čemu su ploče dimenzije 5x150x150 mm prekrivene vodom ili 3 %-tnom otopinom NaCl dok se izlažu ciklusima smrzavanja/odmrzavanja (56 ciklusa). Zapravo, ploče ovih izmjera istodobno mogu poslužiti za praćenje ljuštenja i za praćenje unutarnjih oštećenja kao što je prikazano na Slici 6.33.



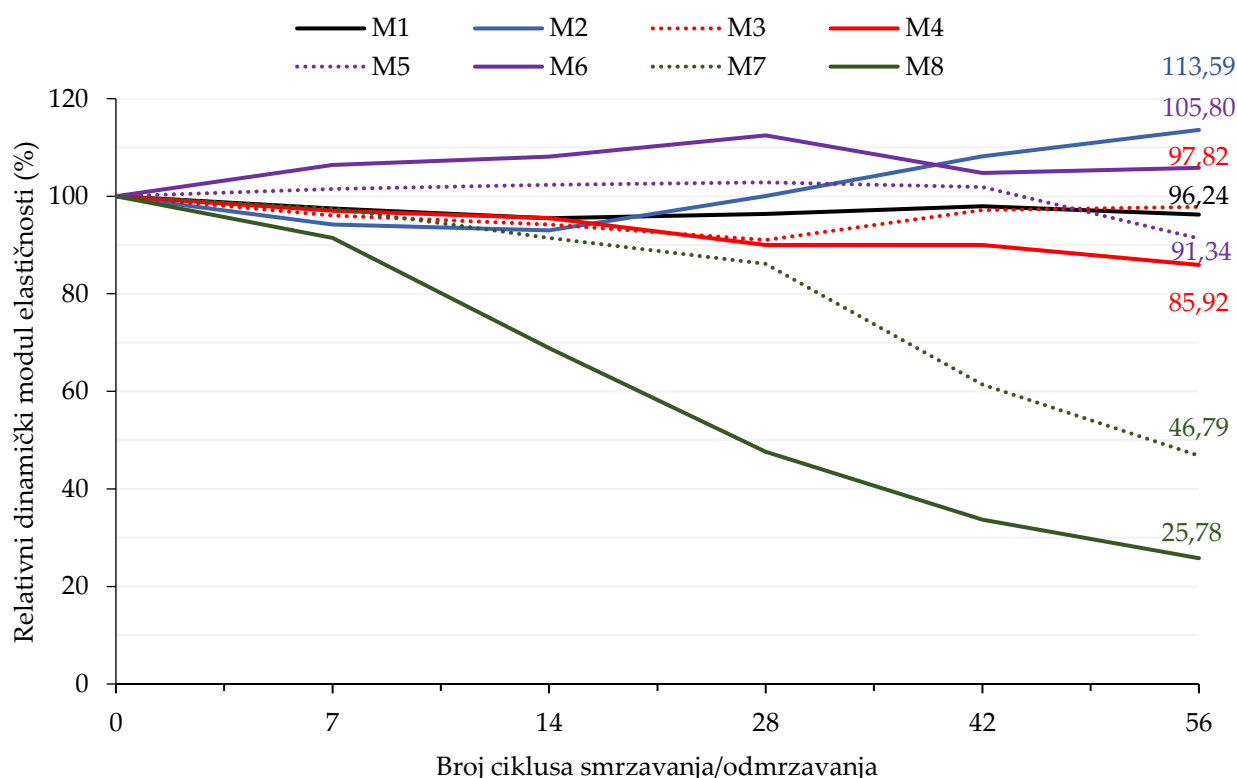
Slika 6.33. Ispitivanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja prema normi-unutarnja oštećenja

Na slici 6.34. prikazani su rezultati ispitivanja na uzorcima betona prekrivenim slojem vode (bez soli), a Slici 6.35. rezultati ispitivanja na uzorcima betona prekrivenim slojem 3 % otopine NaCl-a (sa soli). Prikazane krivulje su srednje vrijednosti dvije izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji.



Slika 6.34. Rezultati ispitivanja unutarnjih oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli

Slika 6.34. prikazuje kako je relativni dinamički modul elastičnosti nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli najveći kod mješavine s aerantom (M2), a potom redom kod mješavine s 3 %mikrokapsula (M6), mješavine s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka (M3), mješavine s 1 % mikrokapsula (M5), mješavine s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka (M4), referentne mješavine (M1) te mješavina s većim v/c omjerom M7 i M8. Veći v/c omjer je opet rezultirao većim padom u relativnom dinamičkom modulu, a time i lošijom otpornošću na cikluse smrzavanja i odmrzavanja u odnosu na manji v/c omjer (M7 i M8 vs. M3 i M4).



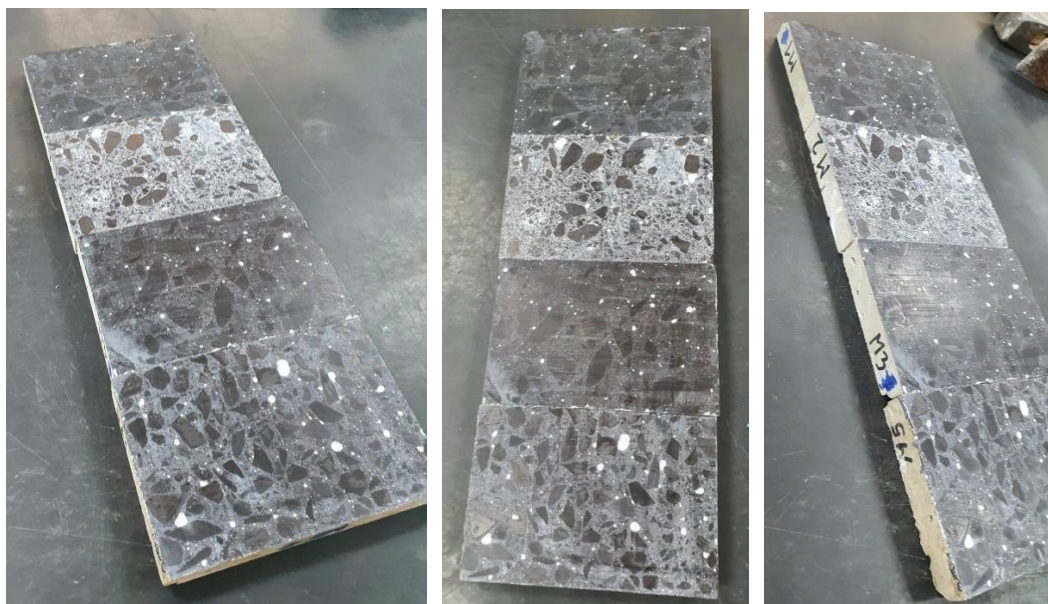
Slika 6.35. Rezultati ispitivanja unutarnjih oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli

Slika 6.35. prikazuje kako je relativni dinamički modul elastičnosti nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli najveći kod mješavine s aerantom (M2), a potom redom kod mješavine s 3 % mikrokapsula (M6), mješavine s 1% kristalnog hidrofilnog dodatka (M3), referentne mješavine (M1), mješavine s 1 % mikrokapsula (M5), mješavine s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka (M4) te mješavina s većim v/c omjerom M7 i M8. Veći v/c omjer je opet rezultirao većim padom u relativnom dinamičkom modulu, a time i lošijom otpornošću na cikluse smrzavanja i odmrzavanja u odnosu na manji v/c omjer (M7 i M8 vs. M3 i M4).

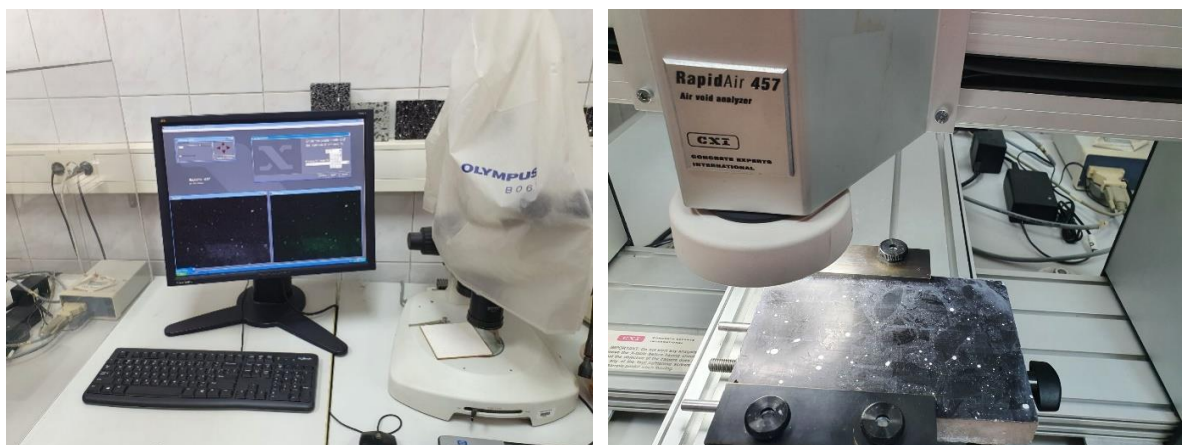
Rezultati ispitivanja po ovoj metodi ne razlikuju se ovisno o tome je li sloj koji pokriva uzorke bio samo voda ili 3 % otopina NaCl.

6.2.4. Otpornost prema normi HRN EN 480-11:2005 - faktor razmaka pora

Normom HRN EN 480-11:2005 [133] uzorci očvrslog betona se promatraju mikroskopski te se mjeri razmak pora i izračunava faktor razmaka pora. Navedena metoda služi više za predviđanje ponašanja betona u uvjetima smrzavanja/odmrzavanja nego za praćenje stvarnog ponašanja betona u uvjetima smrzavanja i odmrzavanja. Na Slici 6.36. prikazani su uzorci betona pripremljeni za ispitivanje faktora razmaka pora, a na Slici 6.37. prikazan je uređaj s pomoću kojeg se određuje faktor razmaka pora.



Slika 6.36. Pripremljeni uzorci za ispitivanje faktora razmaka pora



Slika 6.37. Uređaj za određivanje faktora razmaka pora – Rapid Air 457

Tablica 6.11. Faktor razmaka pora

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Udio pora (%)	0,97	9,38	1,67	2,30	3,49	1,24	0,95	0,61
Faktor razmaka pora (mm)	0,995	0,076	0,392	0,326	0,253	0,171	0,284	0,449

Kao što je i očekivano, mješavina M2 ima najveći udio zraka u očvrslom betonu, a za koji je izravno odgovoran aerant u mješavini (Tablica 6.11). S obzirom na to da metoda zahtjeva faktor razmaka pora manji od 0,2 mm kako bi se beton smatrao otpornim na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, po ovoj metodi bi se beton mješavina M2 i M6 mogao smatrati otpornim na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

6.3. Indirektni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Indirektni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja podrazumijevaju ispitivanje svojstava uzoraka prije ciklusa smrzavanja/odmrzavanja i nakon 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja prema CEN/TR 15177:2006 [90]. Na Slici 6.38. i Slici 6.39. prikazan je vanjski i unutarnji dio klima komore za ispitivanje kocaka i prizmi na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Ladice komore imaju priključak na vodu i odvodnju te vode, pa se uzorci u njima mogu ispitivati na smrzavanje i odmrzavanje pod različitim režimima.



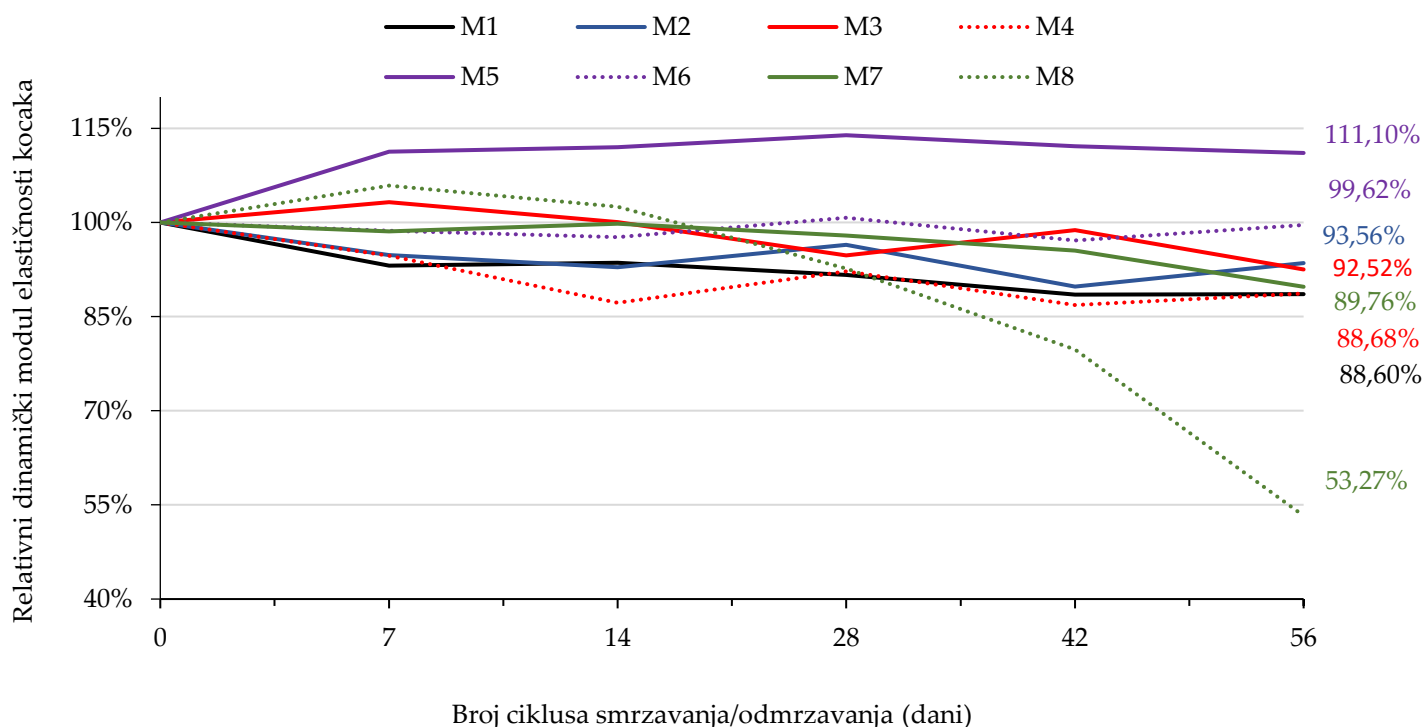
Slika 6.38. Komora za ispitivanje kocaka i prizmi betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja



Slika 6.39. Kocke i prizme u komori za ispitivanje betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

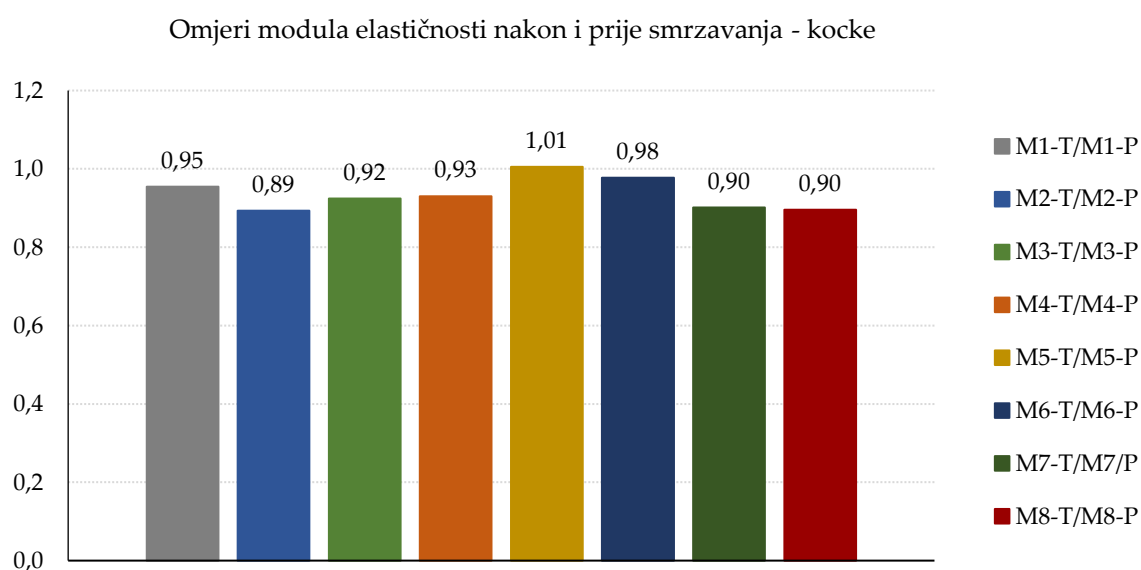
6.3.1. Promjena dinamičkog modula elastičnosti uslijed smrzavanja i odmrzavanja

Na Slici 6.40. prikazani su rezultati ispitivanja relativnog dinamičkog modula elastičnosti betonskih kocki svih spravljenih mješavina tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja/odmrzavanja. Prikazane vrijednosti su srednje vrijednosti šest izmjerenih pojedinačnih vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji.



Slika 6.40. Rezultati ispitivanja relativnog dinamičkog modula elastičnosti betonskih kocaki svih mješavina tijekom 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja

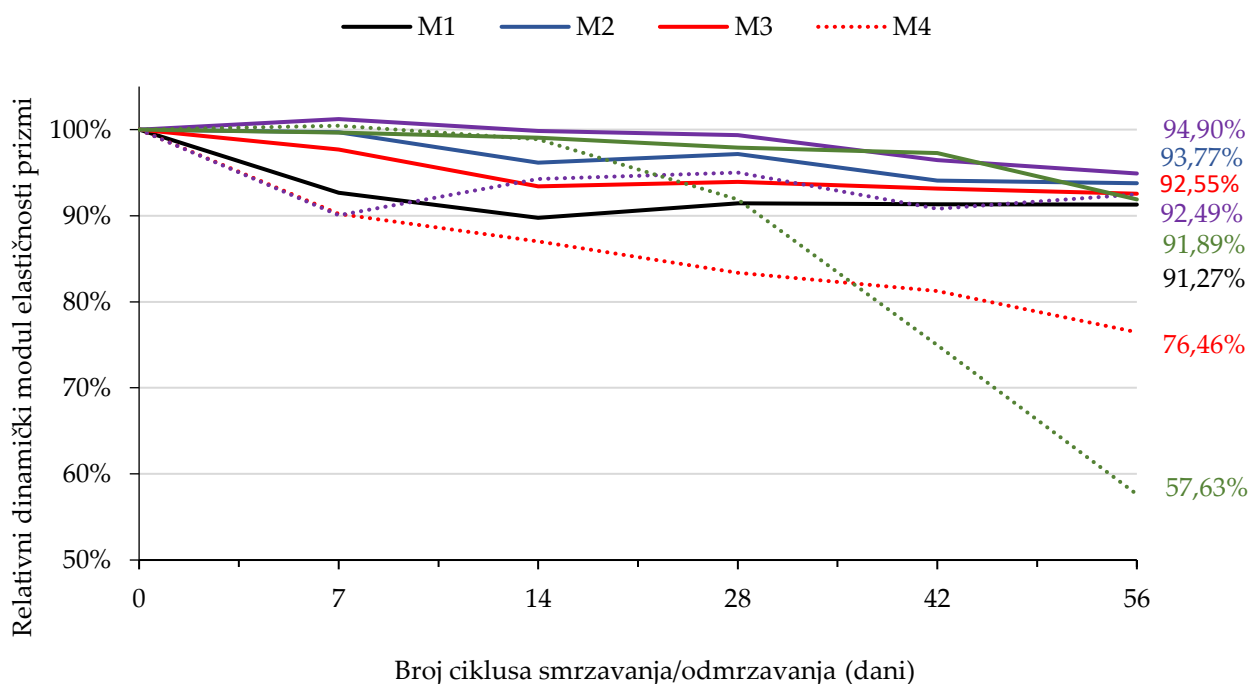
Iz Slike 6.40. je vidljivo da sve smrzanane mješavine pokazuju lošiji rezultat u odnosu na nesmrzanane mješavine, osim mješavine s 1 % mikrokapsula (M5). Omjeri modula elastičnosti nakon i prije smrzavanja kocaka prikazani su na Slici 6.41.



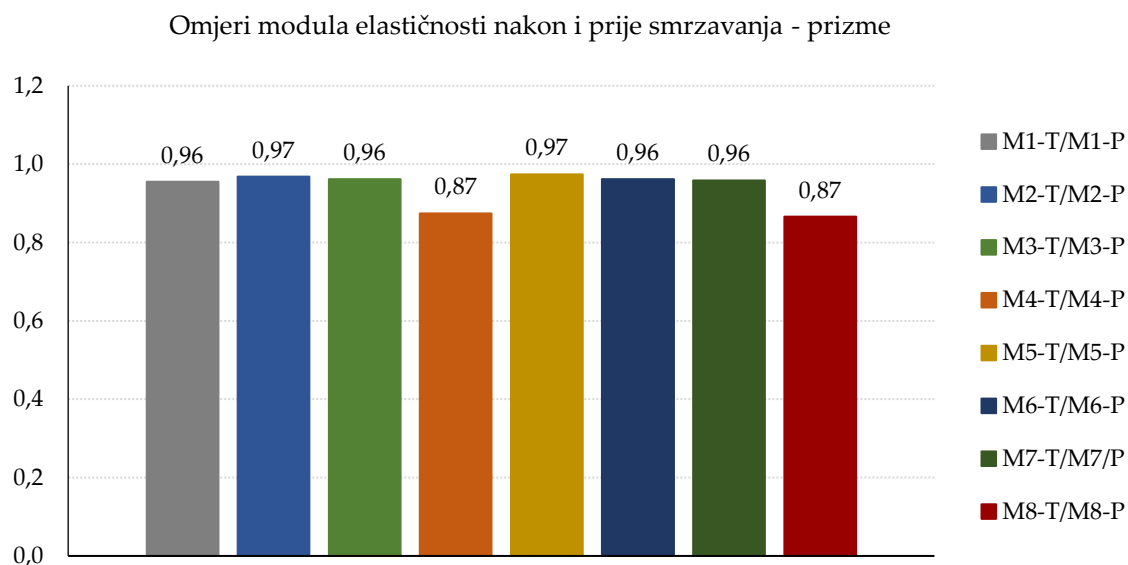
Slika 6.41. Omjer dinamičkog modula elastičnosti betonskih kocaki svih mješavina prije i nakon 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja

Iz Slike 6.41. vidljivo je da je modul elastičnosti nakon i prije smrzavanja kocaka najveći kod mješavine M5, potom mješavina M6, M1, M4, M3, M7 i M8 te najmanji kod mješavine M2. Iz navedenog se može zaključiti da su najmanja unutarnja oštećenja po ovoj metodi pretrpjele mješavine s mikrokapsulama. Mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom pretrpjele su nešto veća unutarnja oštećenja od referentne mješavine. Veći v/c omjer rezultirao je većim unutarnjim oštećenjima od manjeg v/c omjera.

Na Slici 6.42. prikazani su rezultati ispitivanja relativnog dinamičkog modula elastičnosti betonskih prizmi svih spravljenih mješavina tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja/odmrzavanja. Prikazane vrijednosti su srednje vrijednosti tri izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji. Iz Slike 6.42. je vidljivo da sve mješavine pokazuju lošiji rezultat od početnog tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Omjeri modula elastičnosti nakon i prije smrzavanja prizama prikazani su na Slici 6.43.



Slika 6.42. Rezultati ispitivanja relativnog dinamičkog modula elastičnosti betonskih kocki svih mješavina tijekom 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja



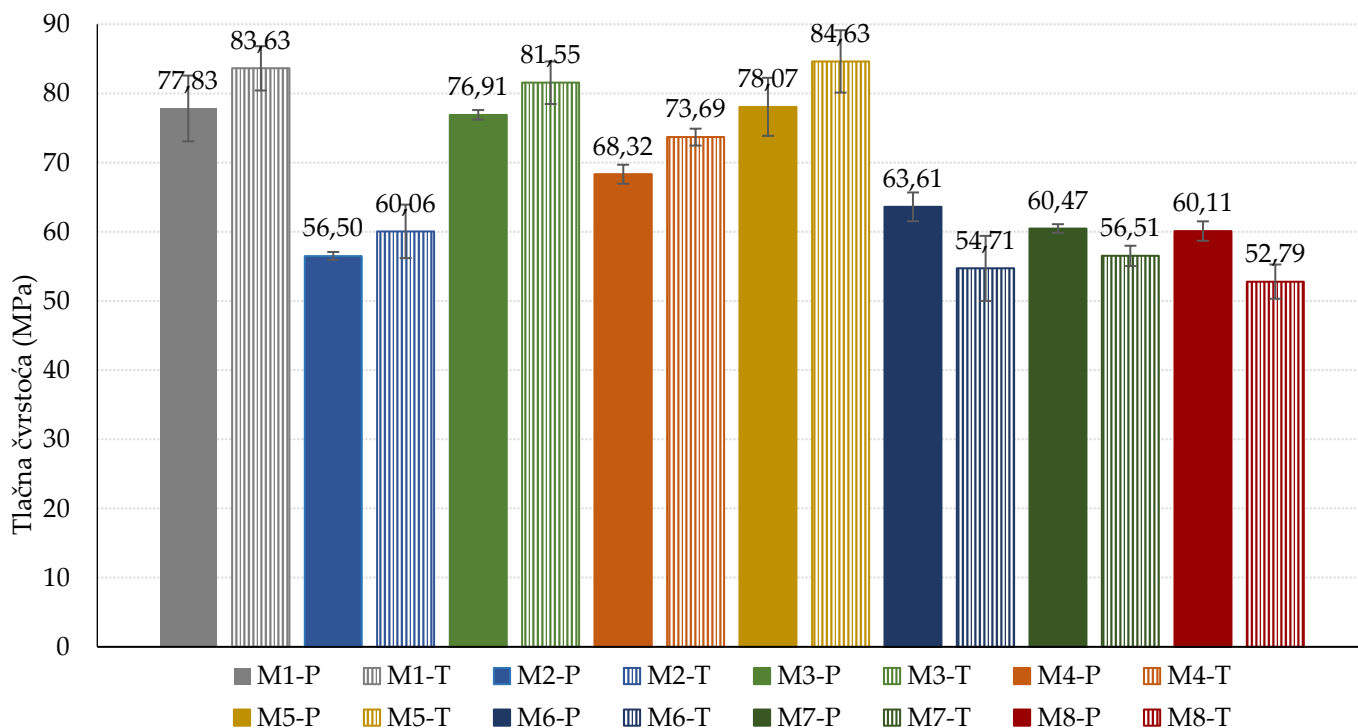
Slika 6.43. Omjer dinamičkog modula elastičnosti betonskih prizmi svih mješavina prije i nakon 56 ciklusa smrzavanja/odmrzavanja

Iz Slike 6.43. vidljivo je kako je modul elastičnosti nakon i prije smrzavanja prizama najveći kod mješavina M2 i M5, potom mješavina M1, M3, M6 i M7 te najmanji kod mješavina M4 i M8. Iz navedenog se može zaključiti da su najmanja unutarnja oštećenja po ovoj metodi pretrpjele mješavine s aerantom i s 1 % mikrokapsula. Mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom pretrpjele su jednaka ili nešto veća unutarnja oštećenja od referentne mješavine. Veći v/c omjer rezultirao je većim unutarnjim oštećenjima od manjeg v/c omjera(mješavine M7 i M8 vs. mješavine M3 i M4).

6.3.2. Promjena tlačne čvrstoće uslijed smrzavanja i odmrzavanja

Od svake mješavine 3 kocke stare najmanje 28 dana su izložene ciklusima smrzavanja/odmrzavanja (56 ciklusa) kako je to opisano u 6.3., a 3 kocke su ostavljene u laboratorijskim uvjetima (sobna temperatura) do trenutka ispitivanja. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće kocaka ostavljenih u laboratorijskim uvjetima i rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće kocaka izloženih ciklusima

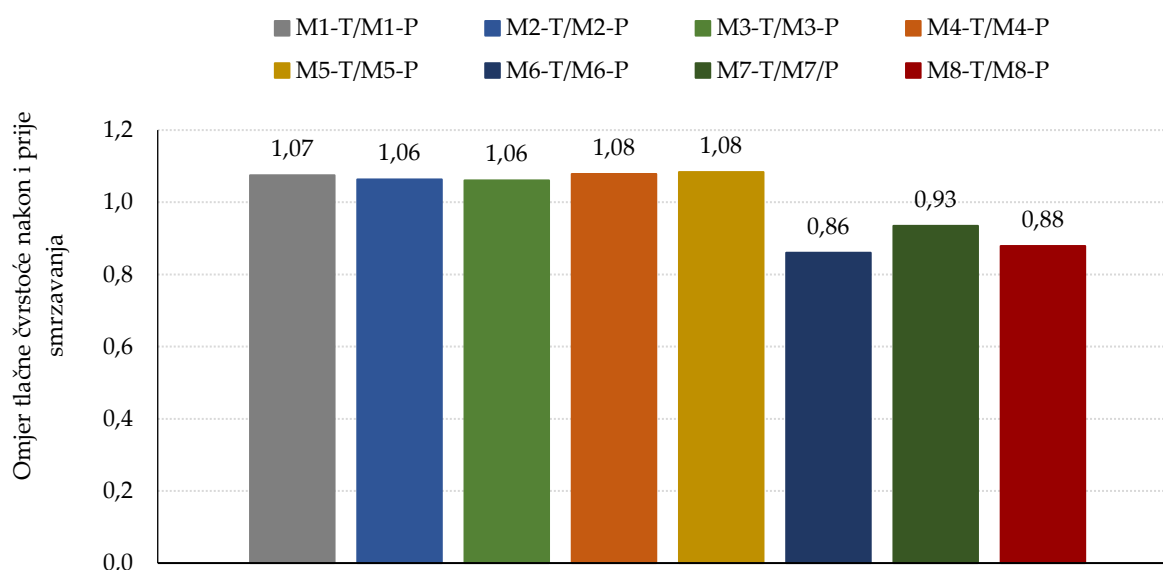
smrzavanja/odmrzavanja prikazani su Slikom 6.44. Prikazane vrijednosti su srednje vrijednosti dvije izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji.



Slika 6.44. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja

Oznake mješavina M1-P, M2-P, M3-P, M4-P, M5-P, M6-P, M7-P i M8-P su mješavine prije smrzavanja, dok su mješavine s oznakama M1-T, M2-T, M3-T, M4-T, M5-T, M6-T, M7-T i M8-T, tretirane mješavine, tj. mješavine koje su bile podvrgnute 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Iz Slike 6.44. je vidljivo kako kristalni hidrofilni dodatak i mikrokapsule u većem udjelu (3 %) te aerant smanjuju tlačnu čvrstoću uzoraka.

Na Slici 6.45. grafički su prikazani omjeri ispitivanja tlačne čvrstoće nakon i prije smrzavanja.



Slika 6.45. Omjer tlačne čvrstoće betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja

Iz Slike 6.45. je vidljivo kako najbolji omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja ostvaruju mješavine M4 i M5, a slijede ih mješavine M1, M2 i M3. Najmanje omjere tlačnih čvrstoća ostvarile su mješavine M7, M8 i M6. Treba primijetiti da većina mješavina (M1-M5) ostvaruje omjer tlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja veći od 1 što znači da im ovakav režim smrzavanja i odmrzavanja više pogoduje u razvoju čvrstoća nego šteti. Ne može se donijeti jednoznačan zaključak kako kristalni hidrofilni dodatak i mikrokapsule djeluju na otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Također, evidentno je da veći v/c omjer ima lošiji utjecaj na mješavine izložene smrzavanju i odmrzavanju u odnosu na manji (mješavine M7 i M8 vs. mješavine M3 i M4).

6.3.3. Promjena vlačne čvrstoće savijanjem uslijed smrzavanja i odmrzavanja

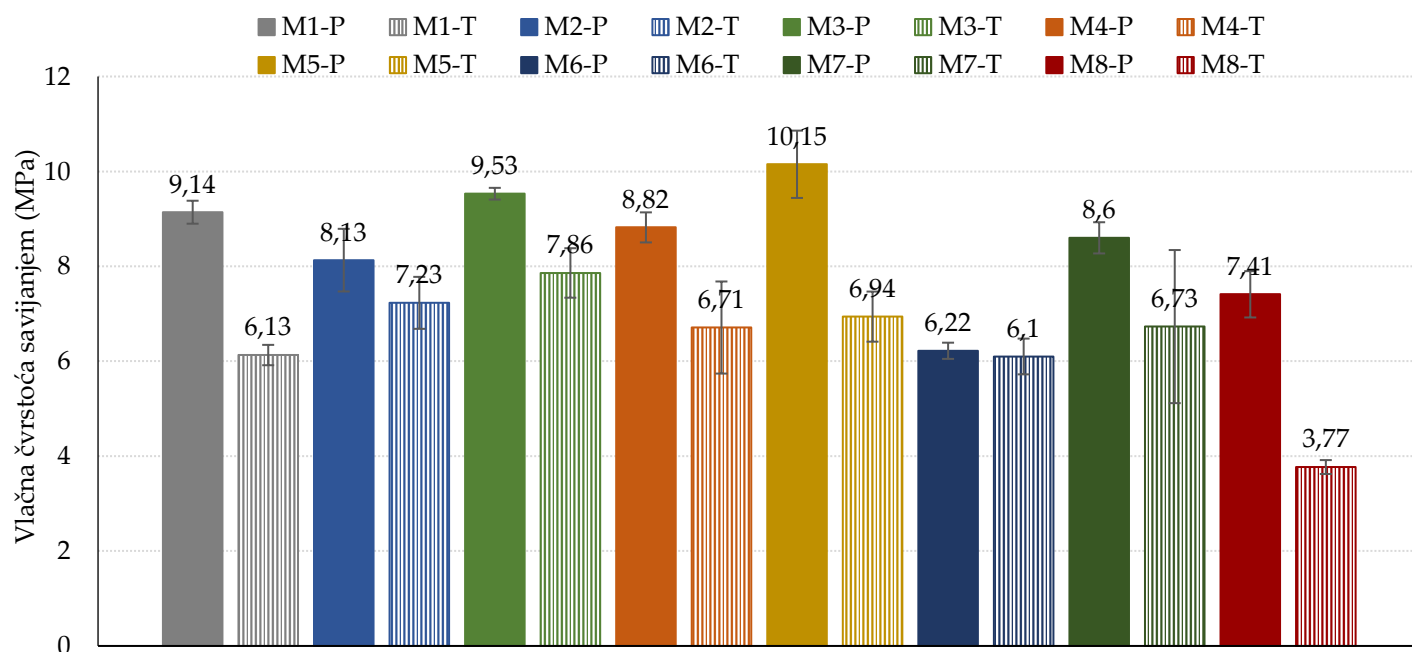
Rezultati rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće prizama (Slika 6.46.) starih najmanje 28 dana prema HRN EN 12390-5 [92] ostavljenih u laboratorijskim uvjetima i rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće prizama izloženih ciklusima smrzavanja/odmrzavanja (56 ciklusa) kako je to opisano u 6.3. prikazani su Slikom 6.47.

Prikazane vrijednosti su srednje vrijednosti tri izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji.



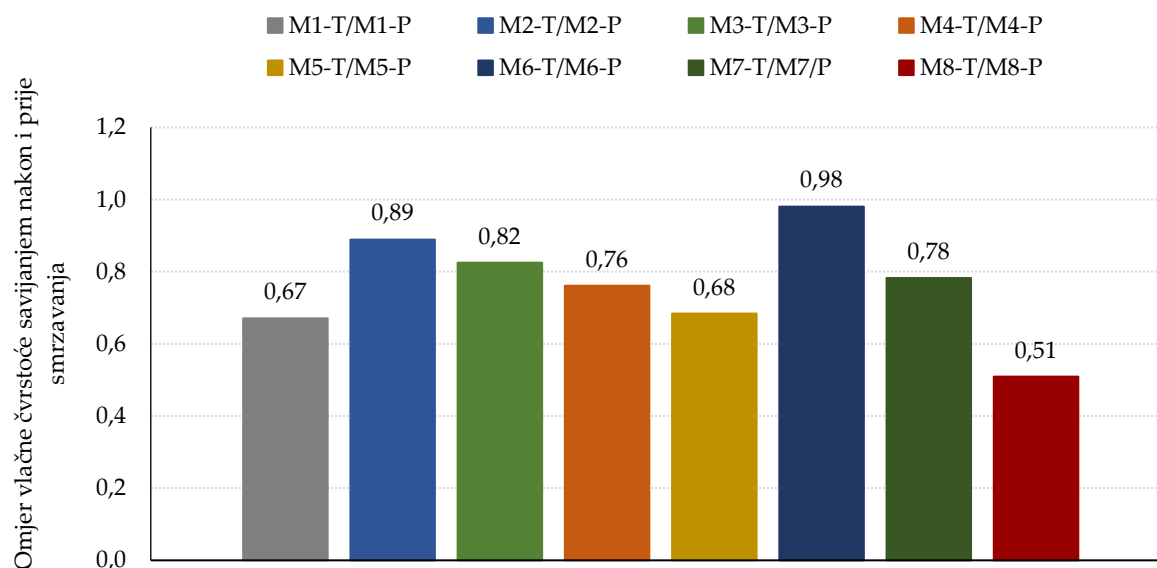
Slika 6.36. Ispitivanje vlačne čvrstoće betona savijanjem

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem prije i nakon smrzavanja prikazani su grafički na Slici 6.47.



Slika 6.47. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja

Oznake mješavina M1-P, M2-P, M3-P, M4-P, M5-P, M6-P, M7-P i M8-P su mješavine prije smrzavanja, dok su mješavine s oznakama M1-T, M2-T, M3-T, M4-T, M5-T, M6-T, M7-T i M8-T, tretirane mješavine, tj. mješavine koje su bile podvrgnute 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Iz Slike 6.48. vidljivo je kako kristalni hidrofilni dodatak i mikrokapsule u manjem udjelu (1 %) povećavaju tlačnu čvrstoću uzoraka.



Slika 6.48. Omjer vlačne čvrstoće savijanjem betona svih mješavina nakon i prije smrzavanja

Iz Slike 6.48. je vidljivo kako najbolji omjer vlačnih čvrstoća nakon i prije smrzavanja ostvaruje mješavina M6, a slijede je mješavine M2, M3, M7. Najmanje omjere tlačnih čvrstoća ostvarile su mješavine M4, M1 i M8. Ipak, kristalni hidrofilni dodaci i mikrokapsule su poboljšali otpornost mješavine na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Veći v/c omjer je lošije utjecao na otpornost betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja nego manji v/c omjer (mješavine M7 i M8 vs. mješavine M3 i M4).

6.3.4. Promjena dubine prodora vode uslijed smrzavanja i odmrzavanja

Na Slici 6.49. i 6.50. prikazano je ispitivanje kocaka betona starih najmanje 28 dana na prodor vode pod tlakom prema HRN EN 12390-8:2019 [94]. Rezultati ispitivanja

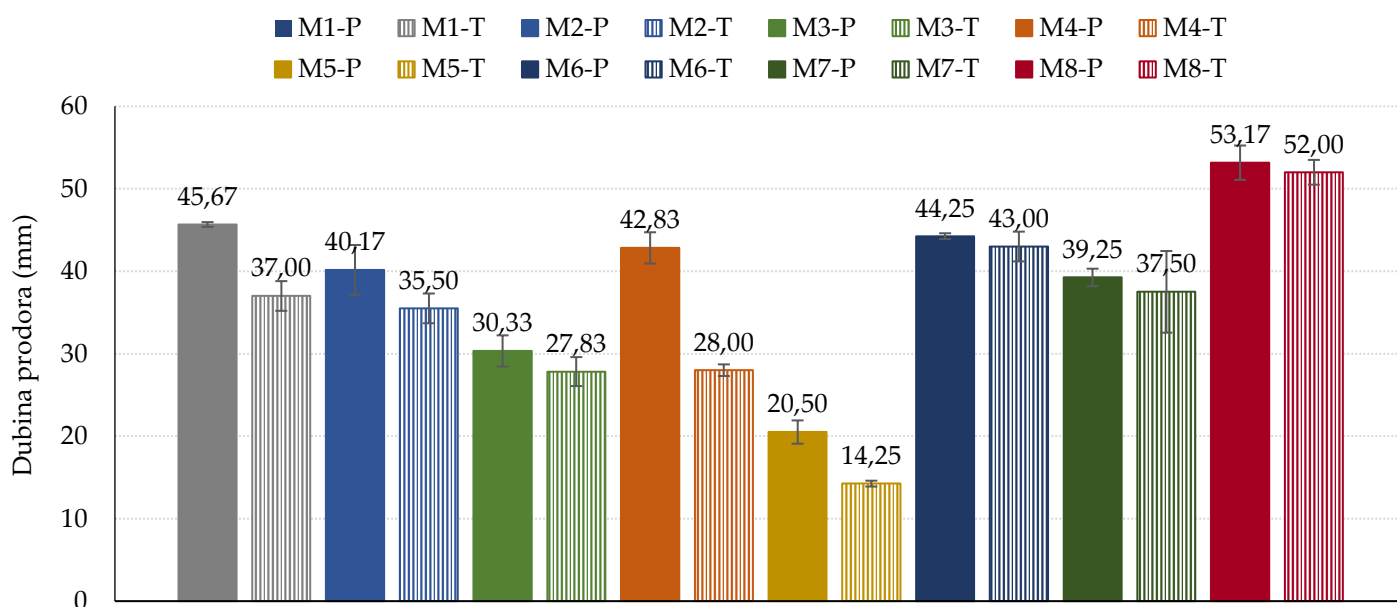
prodora vode provedenog na kockama ostavljenih u laboratorijskim uvjetima prikazani i rezultati ispitivanja prodora vode provedenog na kockama izloženih ciklusima smrzavanja/odmrzavanja (56 ciklusa) kako je to opisano u 6.3. prikazani su Slikom 6.51. Prikazane vrijednosti su srednje vrijednosti tri izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskoj disertaciji.



Slika 6.49. Ispitivanje kocaka betona na prodor vode pod tlakom



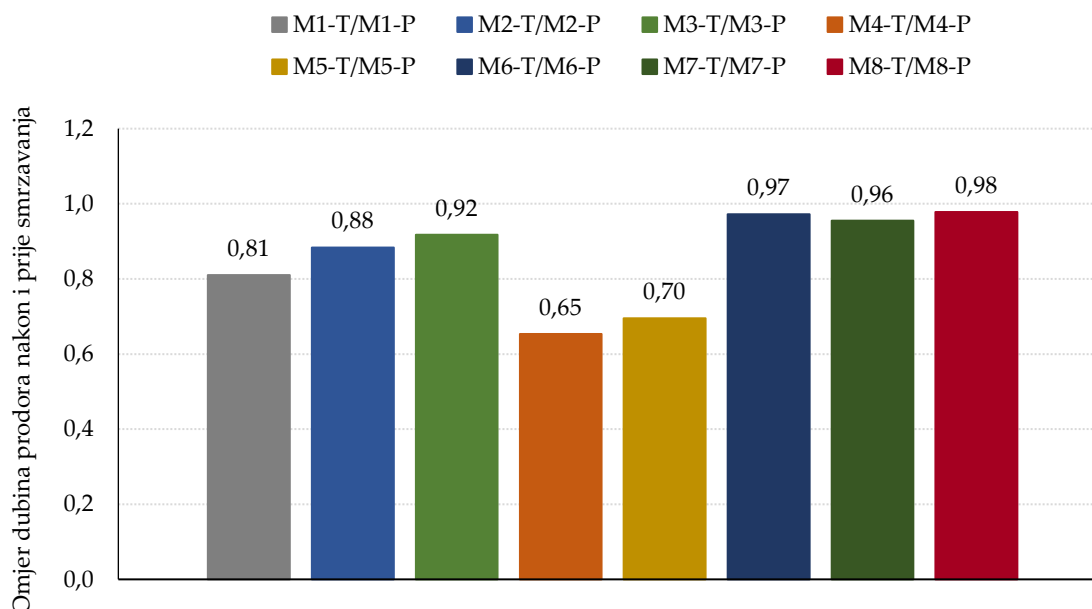
Slika 6.50. Uzorci nakon ispitivanja prodora vode pod tlakom



Slika 6.51. Dubina prodora vode svih mješavina prije i nakon smrzavanja

Oznake mješavina M1-P, M2-P, M3-P, M4-P, M5-P, M6-P, M7-P i M8-P su mješavine prije smrzavanja, dok su mješavine s oznakama M1-T, M2-T, M3-T, M4-T, M5-T, M6-T, M7-T i M8-T, tretirane mješavine, tj. mješavine koje su bile podvrgnute 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Iz Slike 6.51. je vidljivo kako kristalni hidrofilni dodatak, mikrokapsule i aerant smanjuju dubinu prodora vode pod tlakom.

Na Slici 6.52. grafički su prikazani omjeri ispitivanja tlačne čvrstoće nakon i prije smrzavanja.



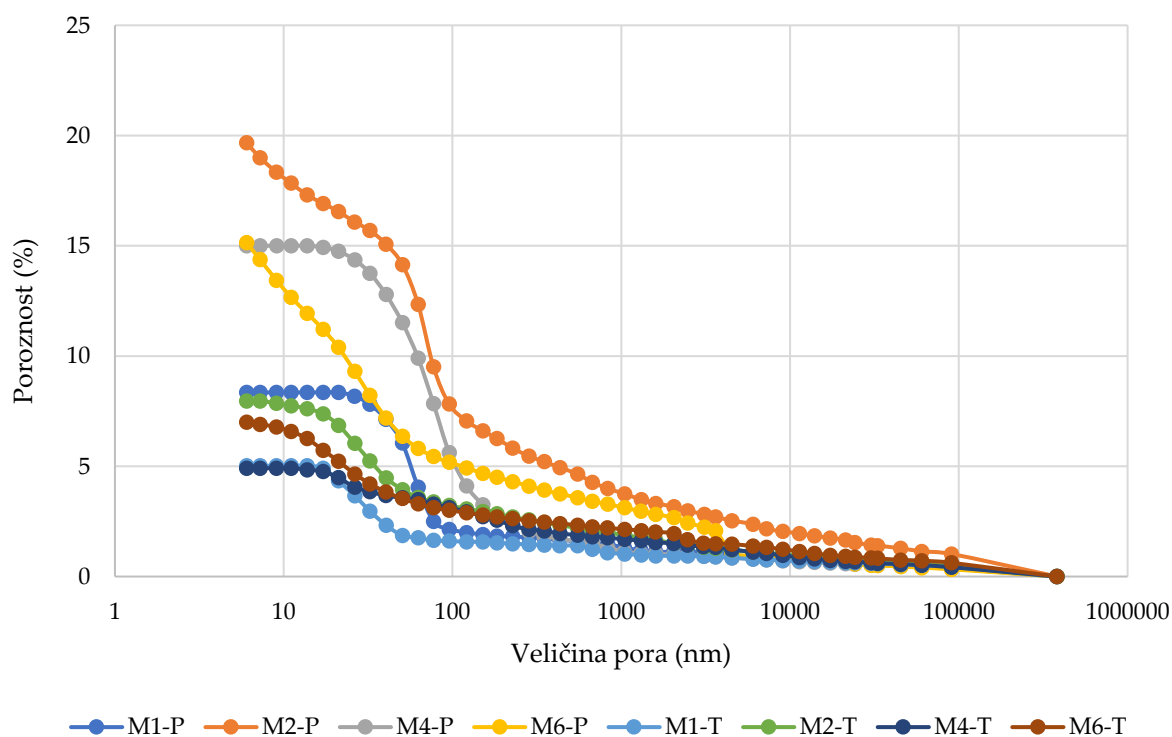
Slika 6.52. Omjer dubine prodora vode pod tlakom svih mješavina nakon i prije smrzavanja

Iz Slike 6.52. je vidljivo kako najmanji omjer dubina prodora vode nakon i prije smrzavanja ostvaruje mješavina M4, a slijede je mješavine M1, M2, M3, M7, M6 i M8. Svi omjeri prodora vode pod tlakom su manji od 1 što znači da je ovakav režim smrzavanja i odmrzavanja više pogodovao uzorcima nego izazvao oštećenja. Ne može se donijeti jednoznačan zaključak o utjecaju kristalnih hidrofilnih dodataka i mikrokapsula na otpornost betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Veći v/c omjer lošije je utjecao na otpornost betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja od manjeg v/c (mješavine M7 i M8 vs. mješavine M3 i M4).

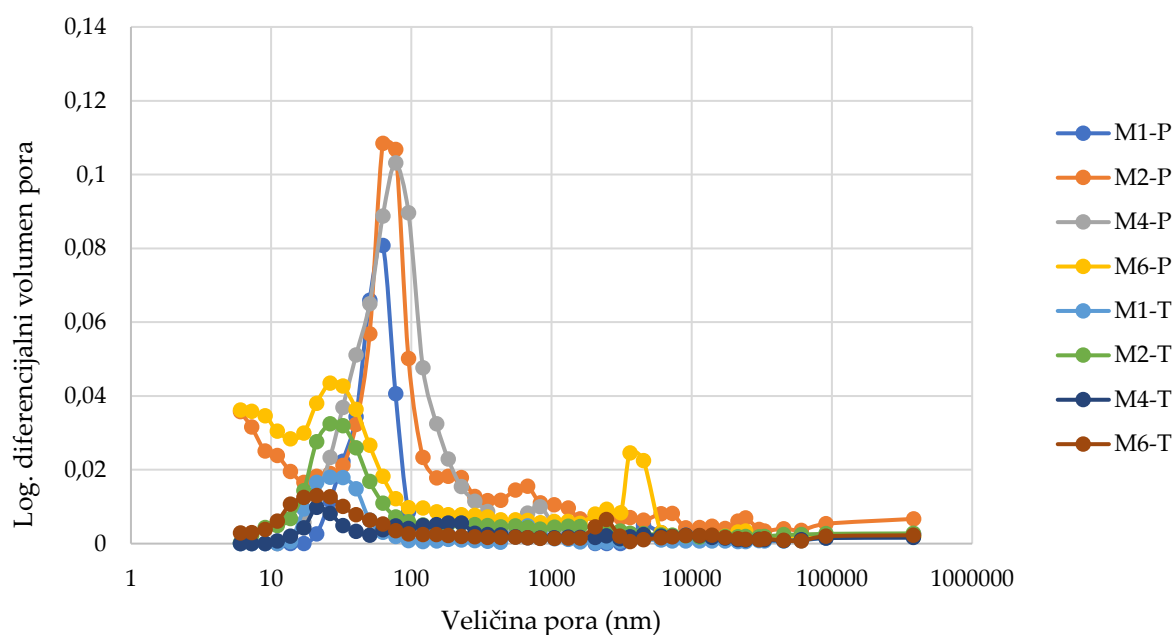
6.4. Interpretacija rezultata ispitivanja direktnih i indirektnih postupaka

6.4.1. Raspodjela pora živinom porozimetrijom

Prema Alireza Joshaghani [134] i Zhang i sur. [135], pore <20 nm se smatraju bezopasnima u kontekstu degradacije betona izloženog ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, pore 20-50 nm nešto štetnijima, pore 50-200 nm štetnima, a pore veće od 200 nm izrazito štetnima. U Tablici 6.12. su rezultati živine porozimetrije grupirani u te skupine, a na Slikama 6.53. i 6.54. su grafički prikazani rezultati ispitivanja.



Slika 6.53. Grafički prikaz poroznosti prema veličini pora



Slika 6.54. Logaritamski prikaz volumena pora u odnosu na veličinu pora

Tablica 6.12. Rezultati živine porozimetrije za nesmrzavane uzorke te smrzavane i odmrzavane uzorke

Mješavina/pore pojedine veličine	<20 nm	20-50 nm	50 – 200 nm	>200 nm
M1-P	38,2	24,0	15,7	22,1
M1-T	37,5	16,6	14,4	31,5
M2-P	34,4	20,0	20,1	25,5
M2-T	35,4	17,2	17,5	29,9
M4-P	41,2	25,5	20,6	12,8
M4-T	28,6	15,7	21,2	34,5
M6-P	38,4	17,1	18,0	26,4
M6-T	32,1	14,6	17,4	35,8

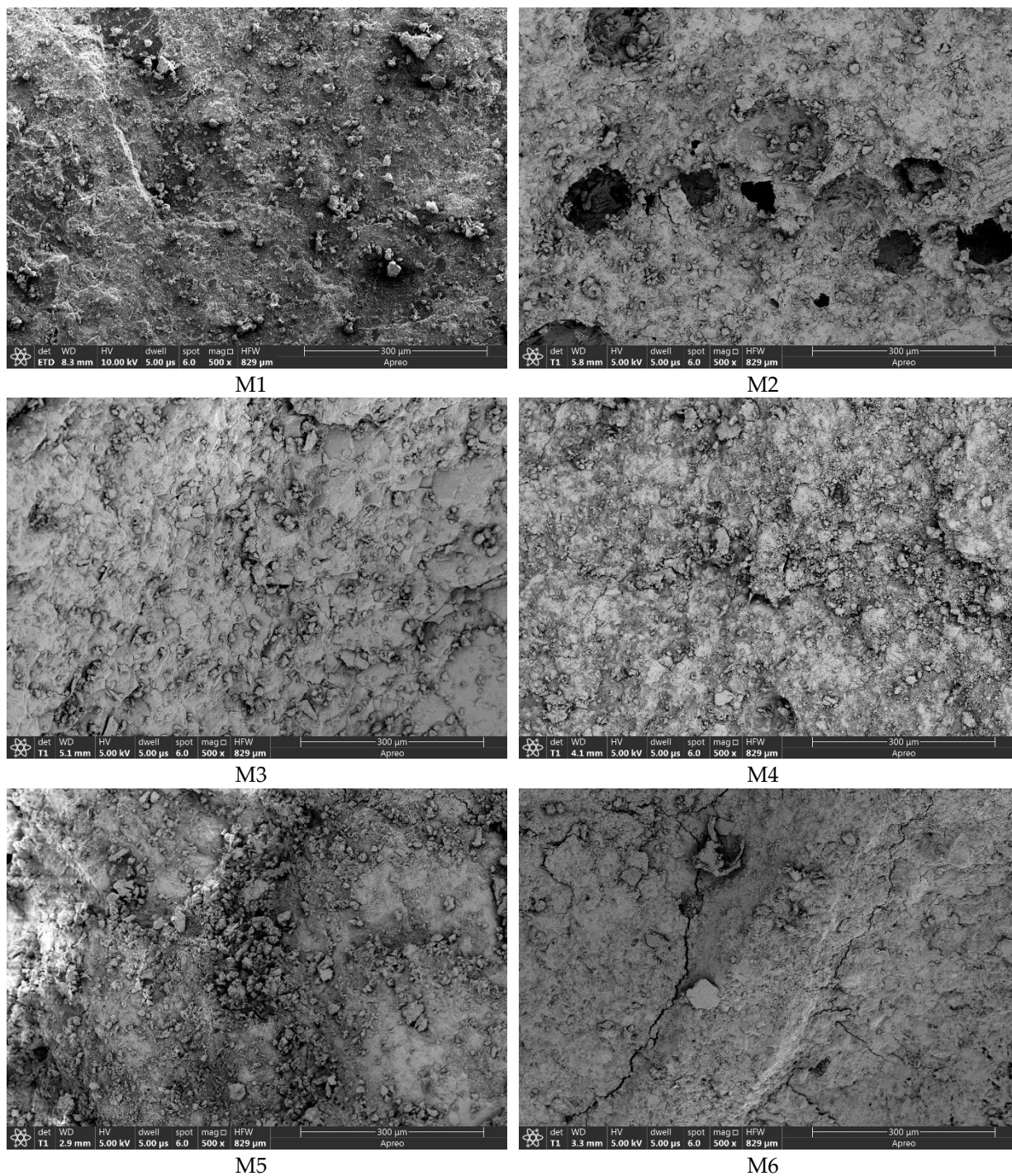
Iz Tablice 6.12. vidljivo je da mješavina M4 prije smrzavanja ima najmanji udio izrazito štetnih pora (>200 nm) što je razlog većeg omjera tlačnih i vlačnih čvrstoća, kao i manjeg omjera vdp-a nakon i prije smrzavanja u odnosu na druge mješavine betona.

Također, iz Tablice 6.12. vidljivo je da sve mješavine nakon smrzavanja i odmrzavanja imaju manji udio bezopasnih (osim M2), nešto štetnijih i štetnih pora te veći udio izrazito štetnih pora nego prije smrzavanja. Najmanja promjena u udjelu

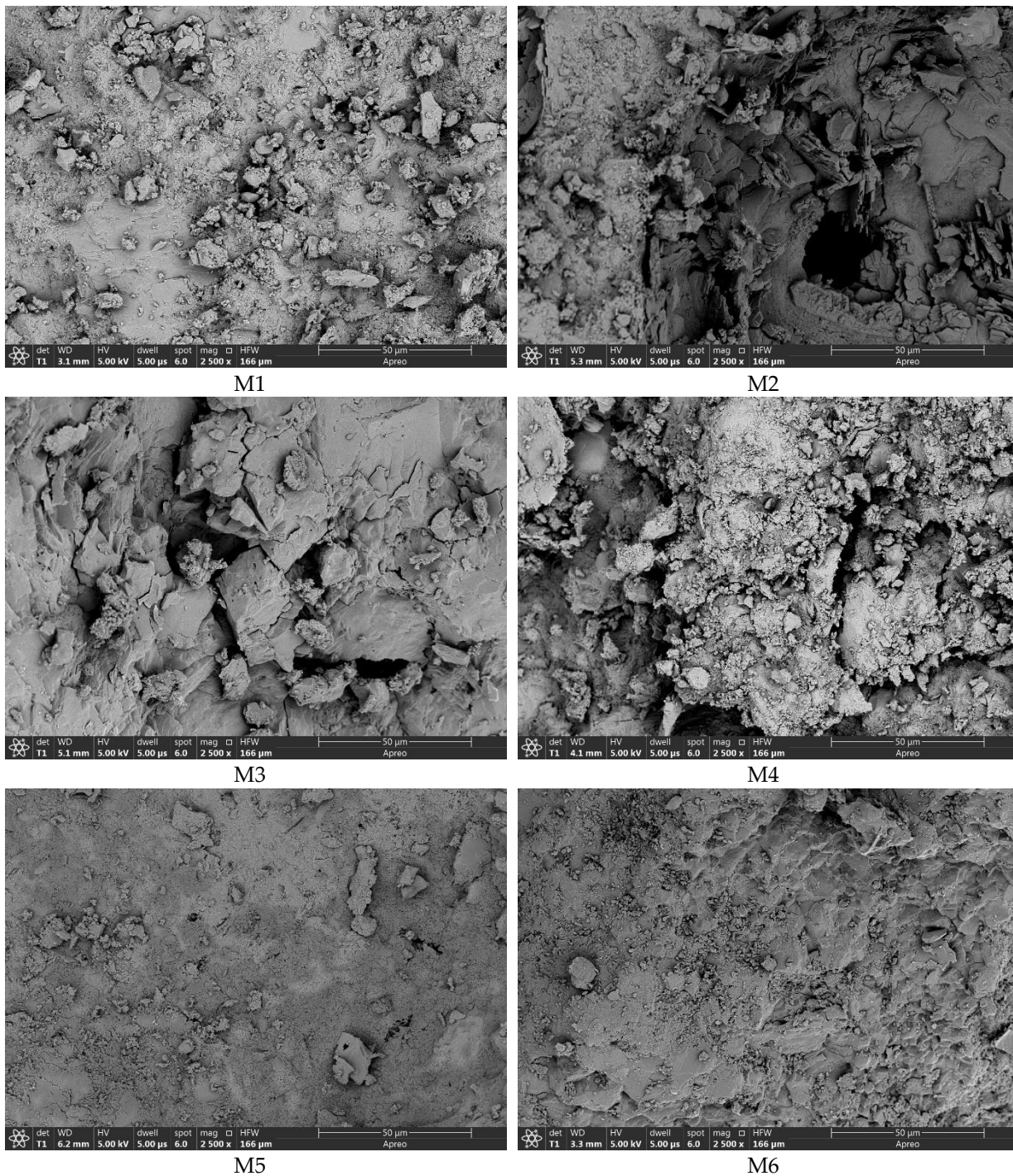
štetnih pora prije i nakon smrzavanja/odmrzavanja vidljiva je kod mješavine M2, a najveća kod mješavine M4.

6.4.2. SEM/EDS analiza

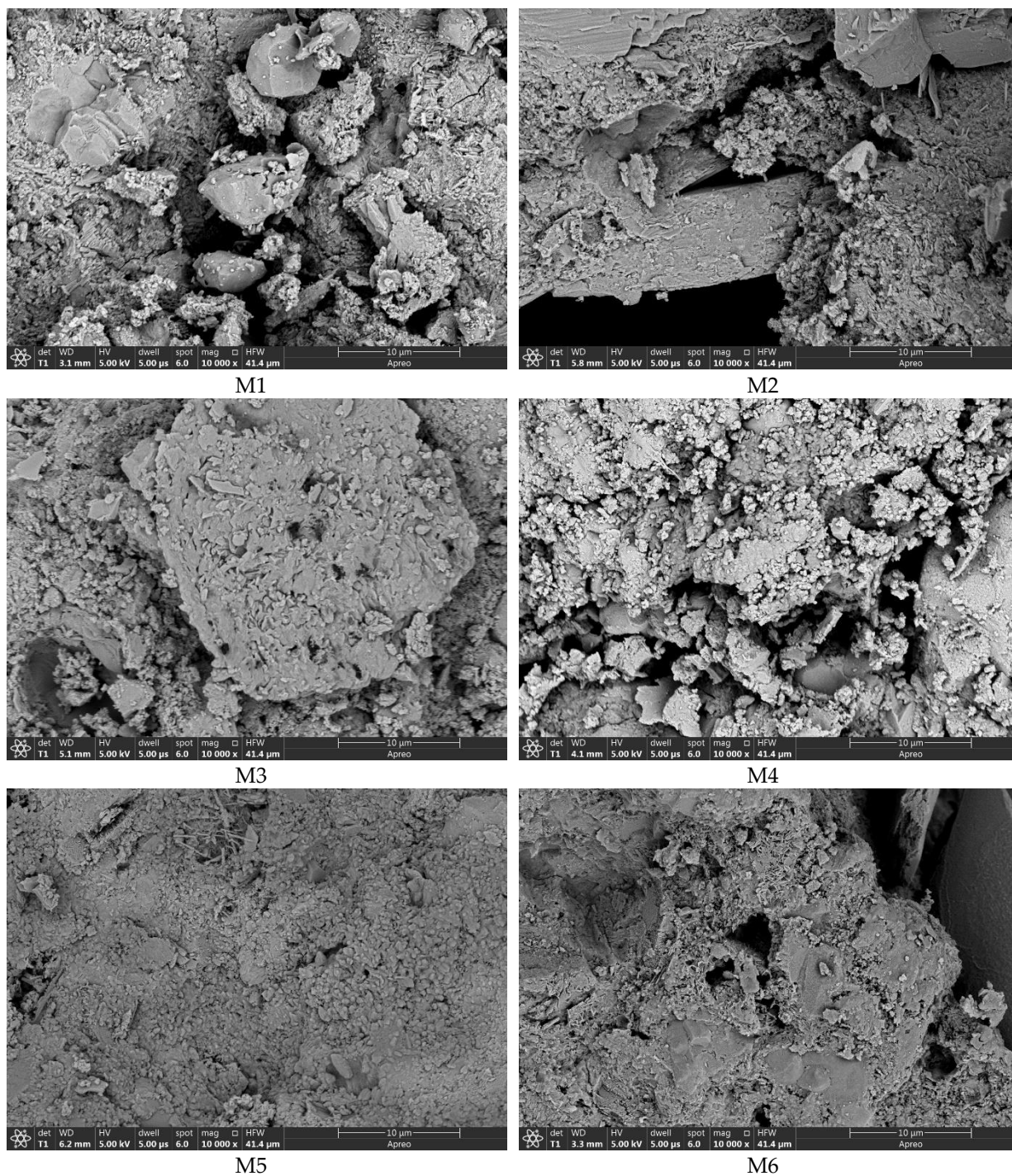
Rezultati SEM analize za uzorke betona koji nisu bili izloženi ciklusima smrzavanja/odmrzavanja prikazana je slikama 6.55.-6.57. pri različitim uvećanjima.



Slika 6.55. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 500x prije smrzavanja i odmrzavanja

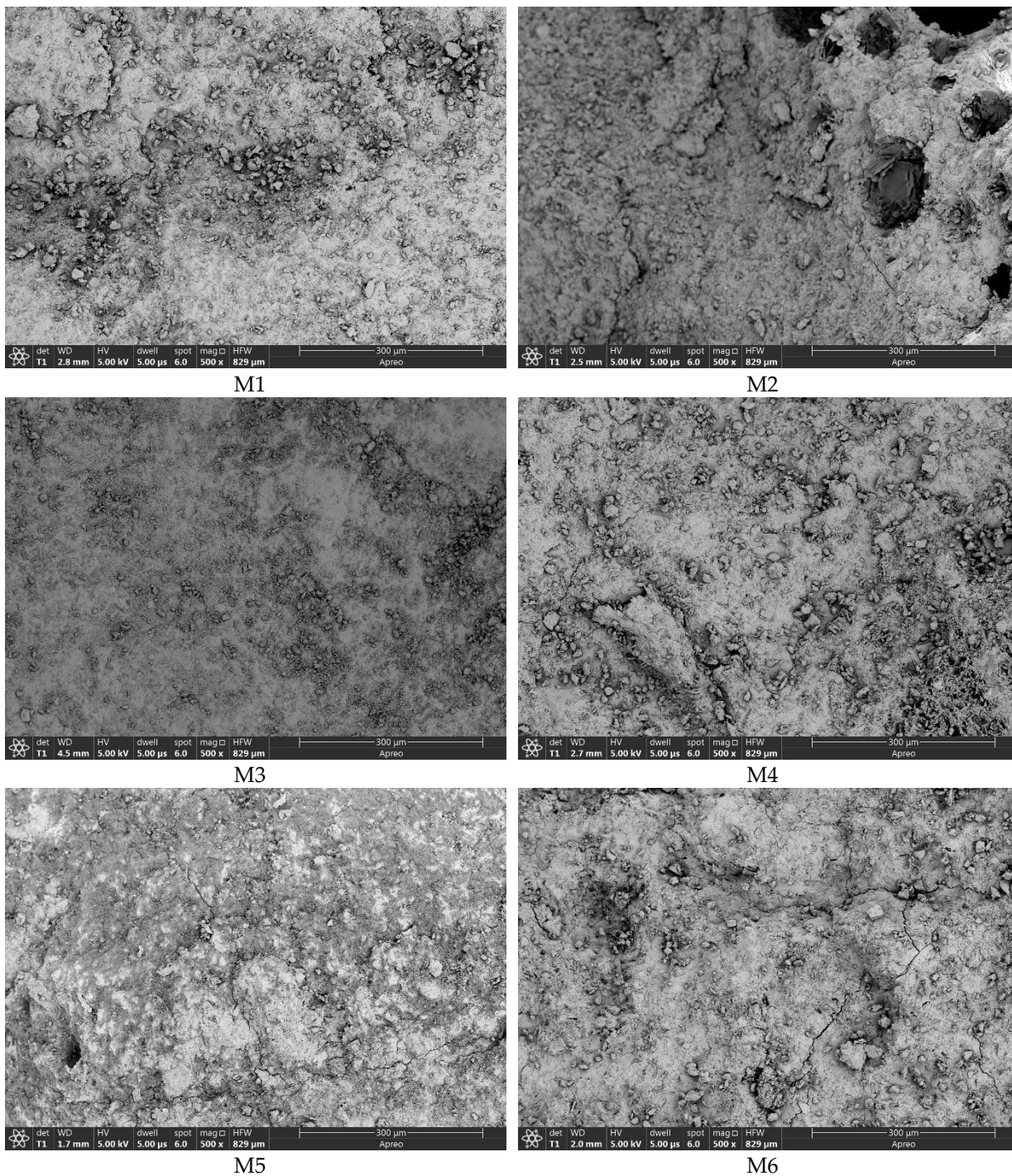


Slika 6.56. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 2500x prije smrzavanja i odmrzavanja

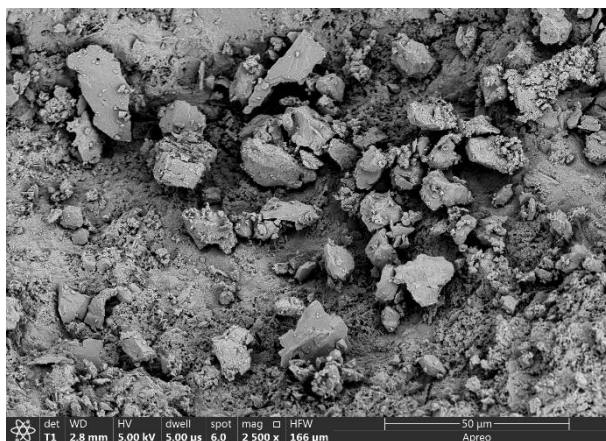


Slika 6.57. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 10000x prije smrzavanja i odmrzavanja

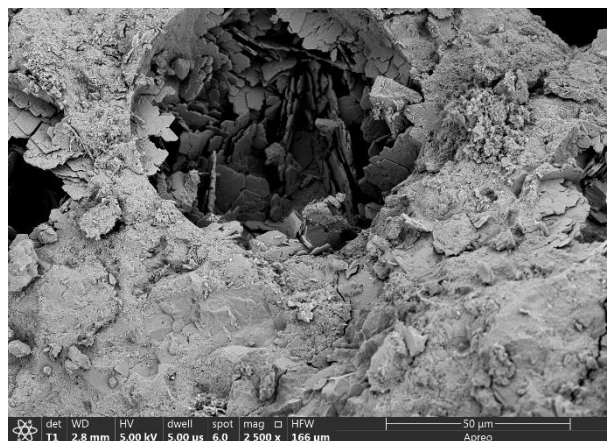
Rezultati SEM analize za uzorke betona koji su bili izloženi ciklusima smrzavanja/odmrzavanja prikazana je slikama 6.58.-6.60. pri različitim uvećanjima.



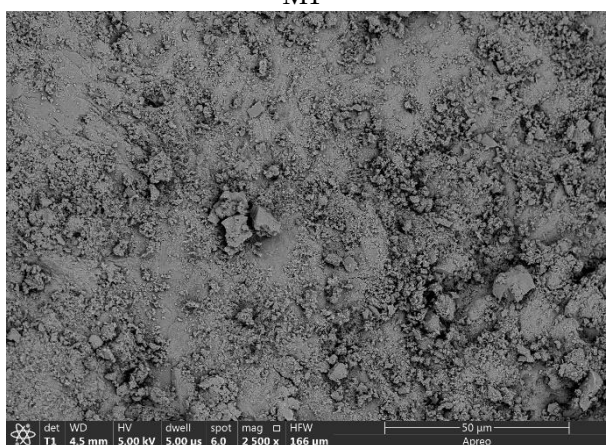
Slika 6.58. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 500x poslije smrzavanja i odmrzavanja



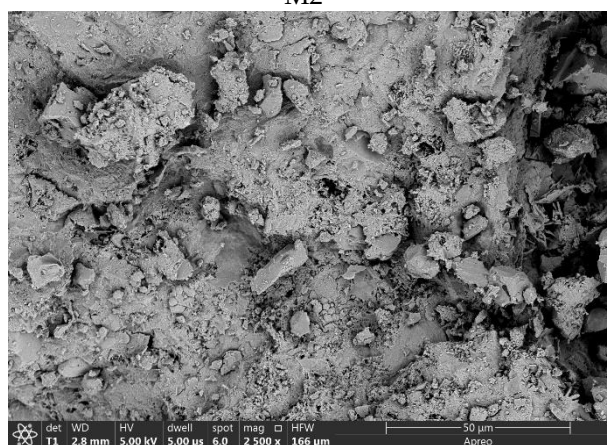
M1



M2



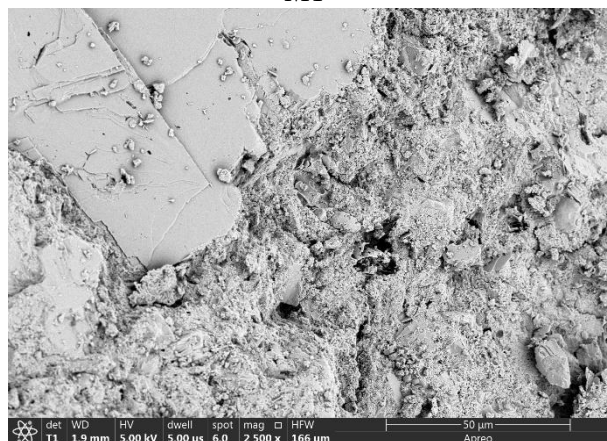
M3



M4

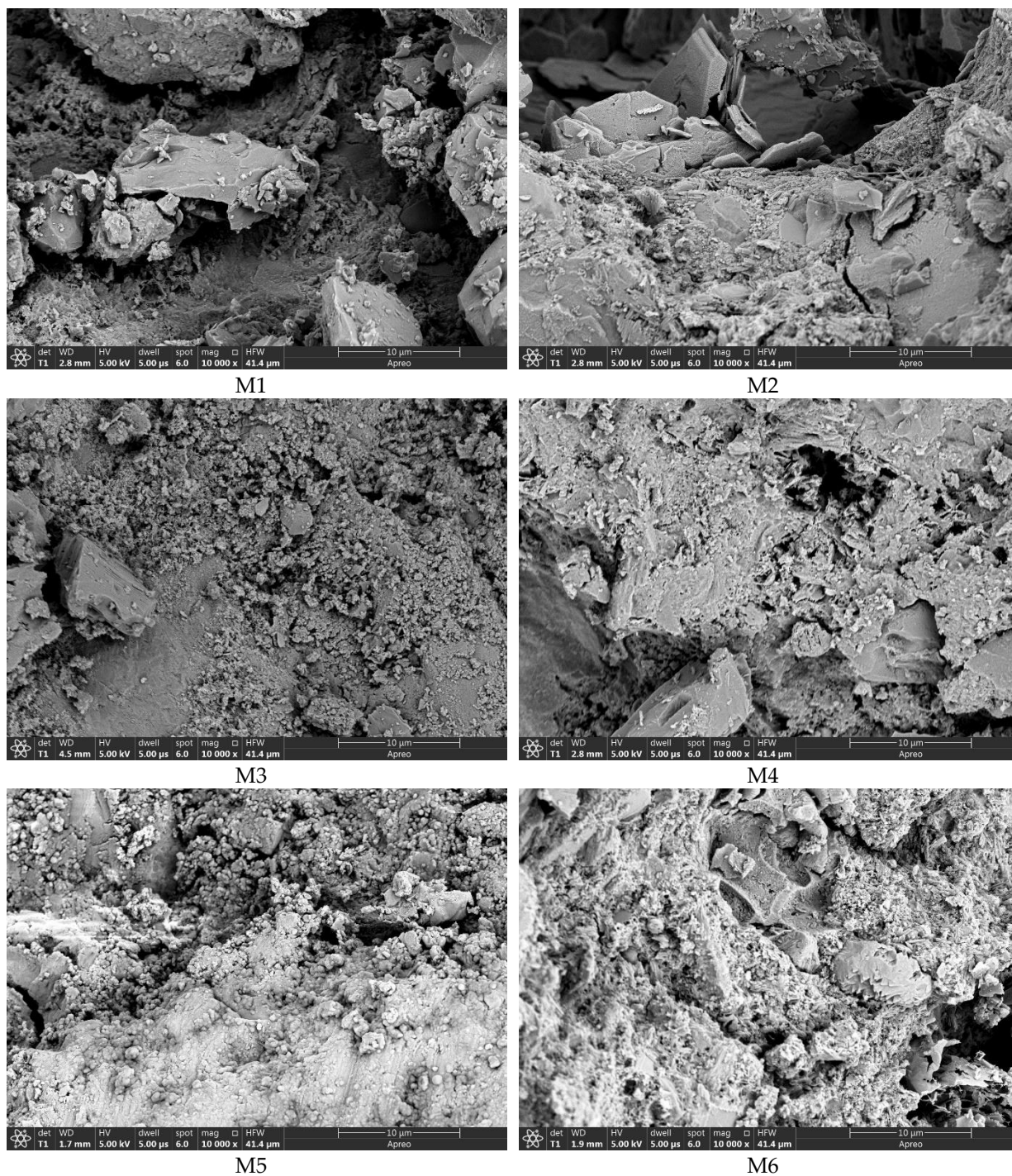


M5



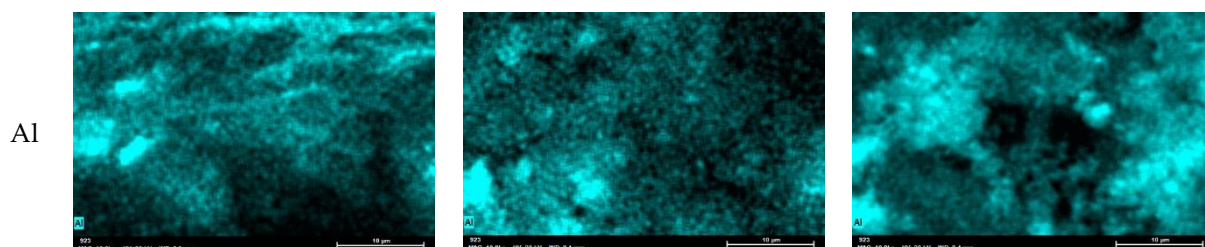
M6

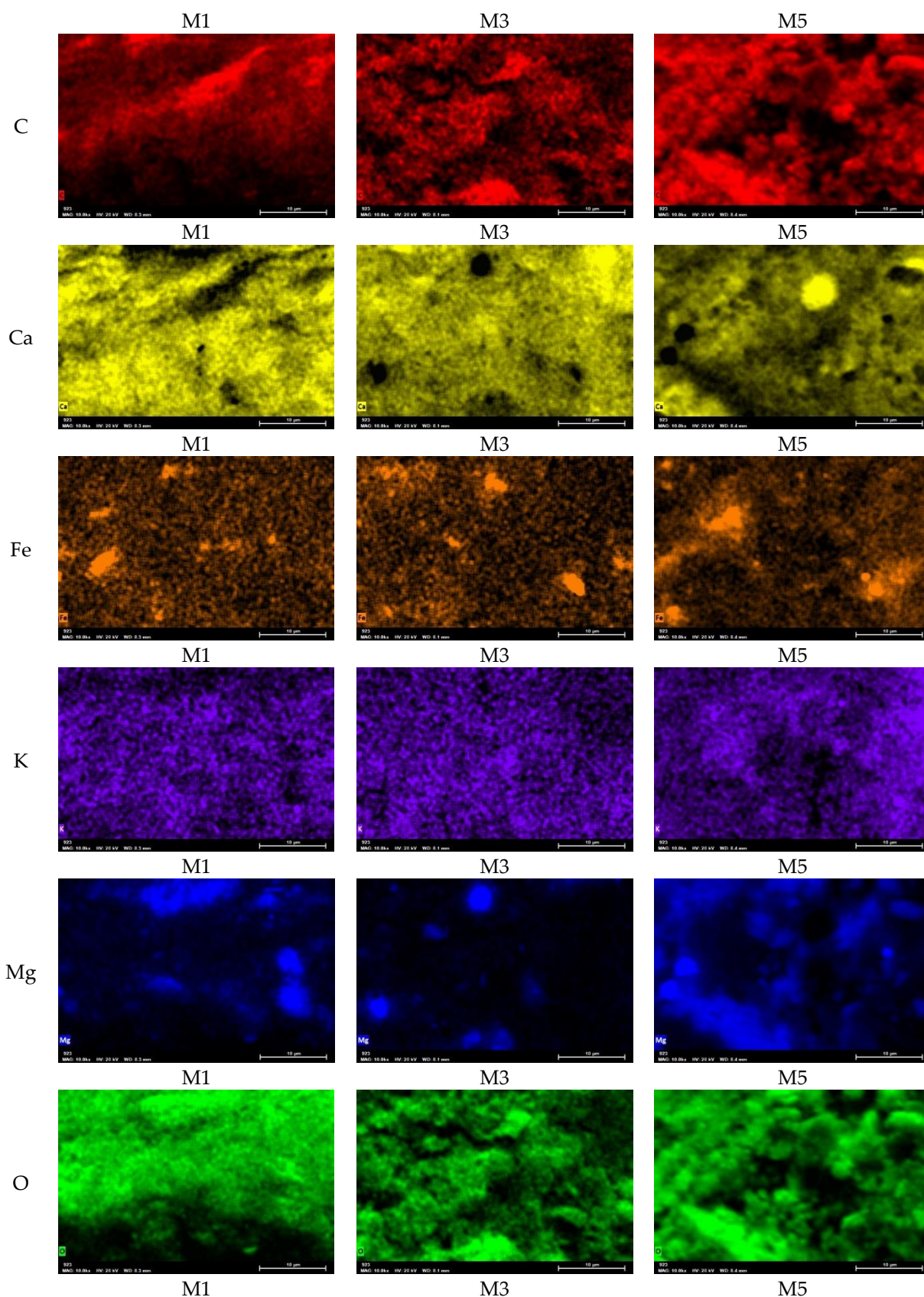
Slika 6.59. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 2500x poslije smrzavanja i odmrzavanja

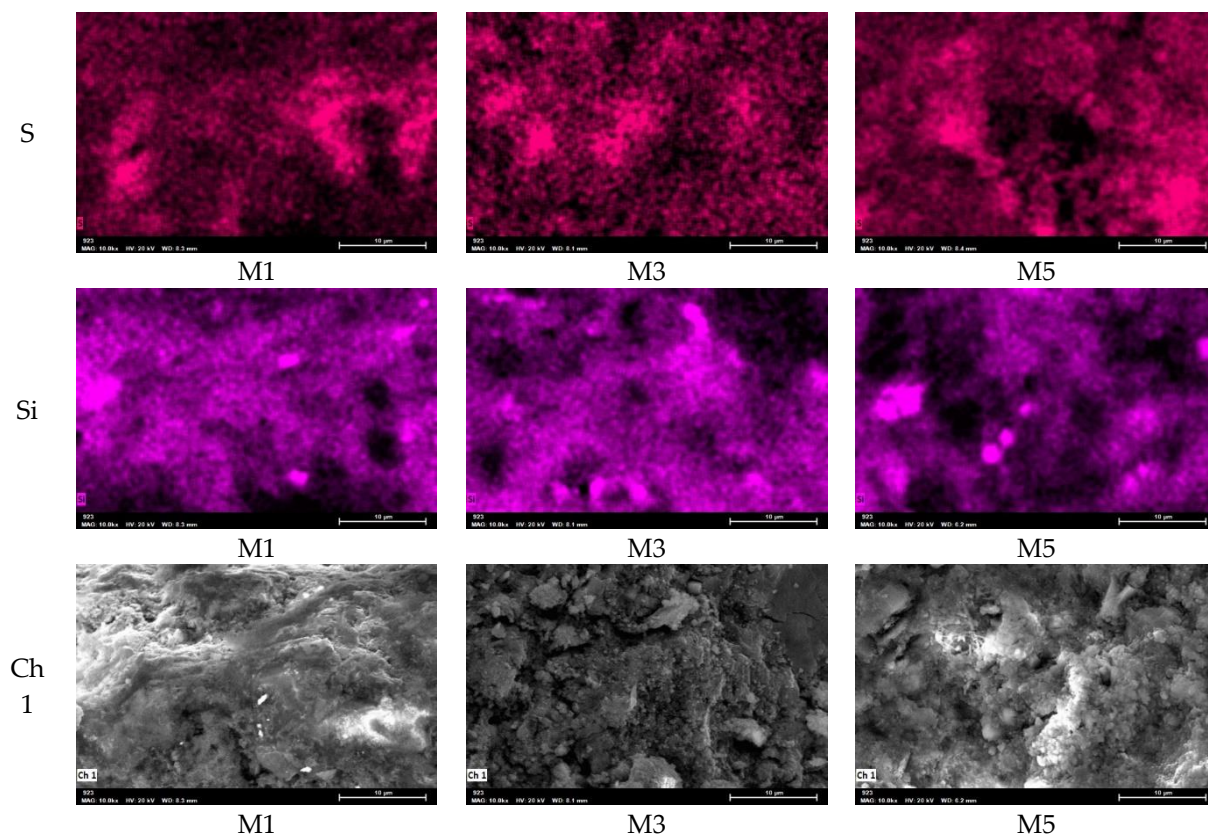


Slika 6.60. SEM snimci uzoraka betona pri uvećanju 10000x poslije smrzavanja i odmrzavanja

Rezultati EDS analize za mješavine M1, M3 i M5 prikazani su Slikom 6.61.







Slika 6.61. Rezultati EDS analize za mješavine M1, M3 i M5

Interpretacija rezultata SEM/EDS analize bit će dana s interpretacijom rezultata mikro CT analize.

6.4.3. Mikro CT analiza

Rezultati mikro CT analize očvrsljih betonskih uzoraka mješavina M1-M6 prije i nakon smrzavanja/odmrzavanja prikazani su Tablicama 6.13. i 6.14.

Tablica 6.13. Udio otvorenih i zatvorenih pora te ukupan udio pora u očvrsljim betonskim uzorcima koji nisu izloženi ciklusima smrzavanja/odmrzavanja

Poroznost/Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Otvorena poroznost (%)	0.24	1.06	0.22	0.13	0.16	0.10
Zatvorena poroznost (%)	0.12	0.33	0.41	0.16	0.11	0.47
Ukupna poroznost (%)	0.36	1.39	0.63	0.29	0.27	0.58

Tablica 6.14. Udio otvorenih i zatvorenih pora te ukupan udio pora u očvrsljim betonskim uzorcima izloženih ciklusima smrzavanja/odmrzavanja

Poroznost/Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Otvorena poroznost (%)	0.03	0.04	0.19	0.45	0.20	0.10
Zatvorena poroznost (%)	0.83	0.10	0.53	0.03	0.25	0.41
Ukupna poroznost (%)	0.86	0.13	0.72	0.48	0.44	0.51

Promjena u ukupnoj poroznosti uzrokovana ciklusima smrzavanja i odmrzavanja prikazana je Tablicom 6.15. Promjena je izračunata kao omjer ukupne poroznosti uzoraka nakon izloženosti smrzavanju/odmrzavanju i ukupne poroznosti uzoraka koji nisu izlagani ciklusima smrzavanja/odmrzavanja.

Tablica 6.15. Promjena ukupnog udjela pora u očvrslim betonskim uzorcima uzrokovana smrzavanjem/odmrzavanjem

Poroznost/Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Promjena ukupne poroznosti (%)	239	10	114	164	164	88

Usporedbom SEM prikaza s uvećanjem 500 puta prije i nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja vidljivo je da se betonu mješavine M1 povećala poroznost. Ovo je u skladu s rezultatima mikro CT analize prema kojima se betonu mješavine M1 povećala ukupna poroznost za čak 2,39 puta. Pri istom uvećanju su kod mješavine M2 vidljivi mjehurići zraka prije i nakon smrzavanja. Sukladno rezultatima mikro CT analize, betonu ove mješavine se smanjila ukupna poroznost za 10 puta nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Sukladno SEM prikazima pri povećanju od 500 puta kod mješavine M3 je nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja došlo do smanjenja poroznosti, no prema rezultatima mikro CT analize nije zapažena značajna promjena ukupne poroznosti. Kod mješavine M4 su prije i nakon smrzavanja/odmrzavanja u strukturi vidljive mikropukotine, a na mikro CT analizi je zabilježen porast ukupne poroznosti nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja za 1,64 puta. Kod mješavine M5 su prije smrzavanja/odmrzavanja na SEM prikazu vidljive mikropukotine čiji se intenzitet povećao nakon izlaganja smrzavanja/odmrzavanju, dok je mikro CT analiza zabilježila porast ukupne poroznosti s ciklusima smrzavanja/odmrzavanja za 1,64 puta. Na SEM prikazima mješavine M6 vidljive su pukotine prije i nakon smrzavanja/odmrzavanja, ali su one nakon izloženim ciklusima smrzavanja/odmrzavanja manje izražene, a ukupna poroznost nakon smrzavanja/odmrzavanja zabilježena mikro CT analizom smanjena je za 12 %.

Kod uvećanja 10000 puta kod mješavine M1 vidljiv je portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) i igličasti

etringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). EDS-om je potvrđeno značajno prisustvo Ca i O kod ove mješavine, kao i prisustvo Al i S. Struktura mješavine M2 pod mikroskopom izgleda vrlo slično strukturi mješavine M1, uz prisustvo zračnih mjehurića kao posljedica uporabe aeranta. Uvećanje na 10000 puta kod mješavina M3 i M4 pokazuje strukturu nalik strukturi brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), a EDS-om je potvrđena prisutnost Mg kod mješavine M3. Kod uvećanja pod mikroskopom na 10000 puta mješavina M5 i M6 je vidljivo prisustvo tobermorita ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ili $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O},\text{OH})_{18} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), a EDS-om je potvrđena prisutnost Si uz značajno prisustvo Al te C koji vjerojatno potječe iz toluen-diizocijanata ($\text{C}_9\text{H}_6\text{N}_2\text{O}_2$) kao jezgre kapsula.

6.4.4. Samocijeljenje pukotina

Nakon ispitivanja betonskih prizmi na vlak savijanjem (Slika 6.62.), od svake polovice ispitane prizme su ispiljene kocke dimenzija 10 x 10 cm (Slika 6.63.), kojima su potom u tlačnoj preši inicirale pukotine (Slika 6.64.). Takve označene kocke s pukotinama su ostavljene u vodi 28 dana kako bi se potaknuo proces njihovog samocijeljenja (Slika 6.65.).

Na Slici 6.66. prikazano je označavanje i mjerenje širine pukotina Penetronovim preciznim ravnom.



Slika 6.62. Ispitivanje betonske prizme na vlak savijanjem (lijevo), priprema betonskih prizmi nakon ispitivanja na vlak savijanjem za izrezivanje kocaka 10x10x10 cm (desno)



Slika 6.63. Betonske kocke mješavine M7 dimenzija 10x10 cm



Slika 6.64. Iniciranje pukotina ispitivanjem tlačne čvrstoće kocke mješavine M7 dimenzija 10x10 cm, nakon 56 ciklusa smrzavanja



Slika 6.65. Samocijeljenje uzoraka mješavine M3 u vodi



Slika 6.66. Označavanje i mjerenje širine pukotina na kockama dimenzija 10x10x10 cm – M7, nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja prije samocijeljenja

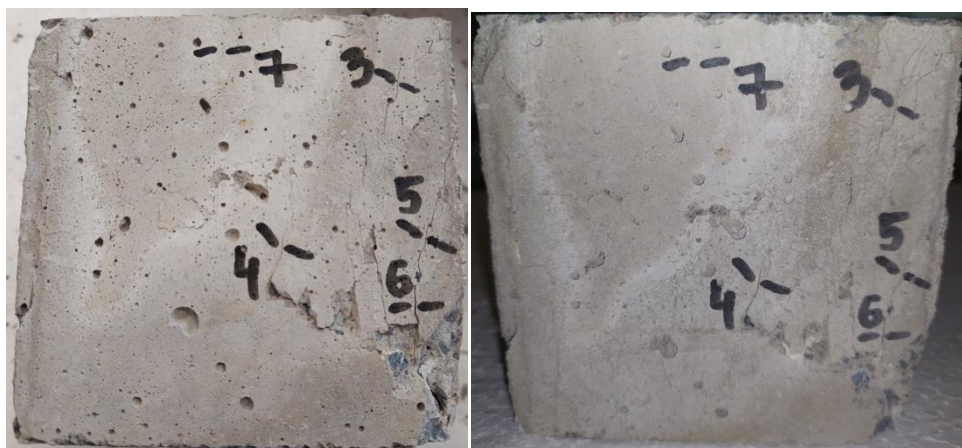
Na Slikama 6.67.-6.82. prikazane su označene širine pukotina prije i nakon samocijeljenja svih betonskih netretiranih i tretiranih mješavina.



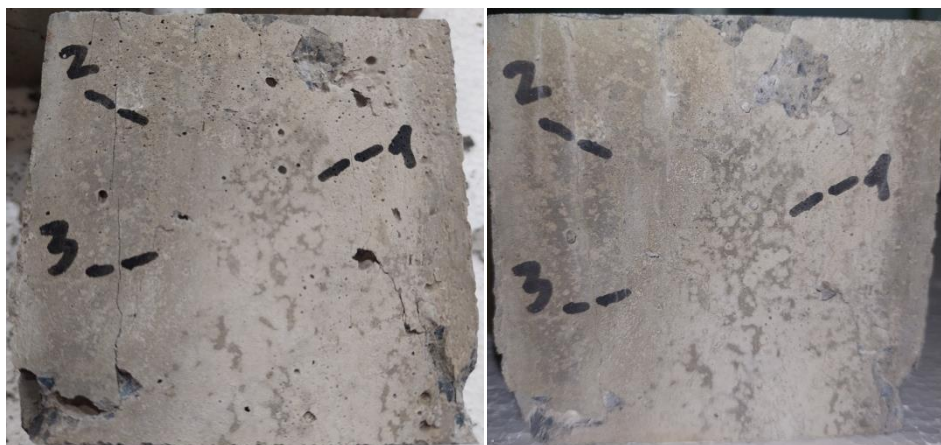
Slika 6.67. Mješavina M1 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



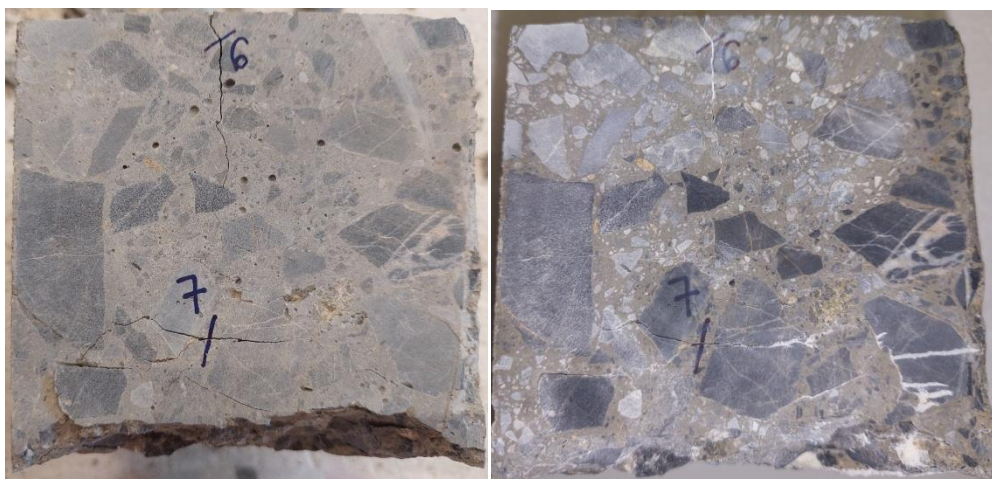
Slika 6.68. Mješavina M1 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



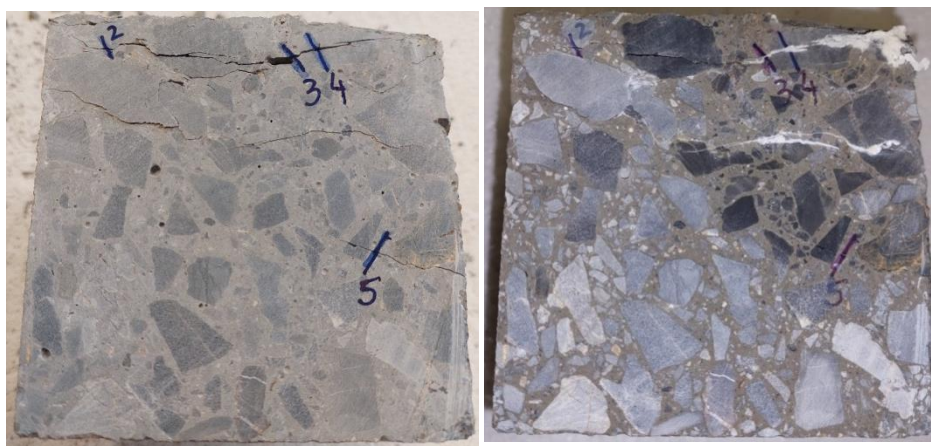
Slika 6.69. Mješavina M2 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



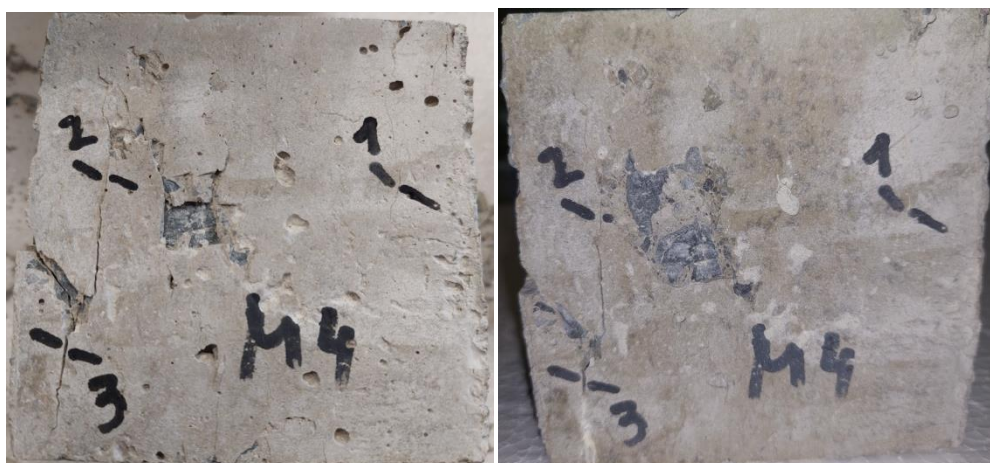
Slika 6.70. Mješavina M2 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



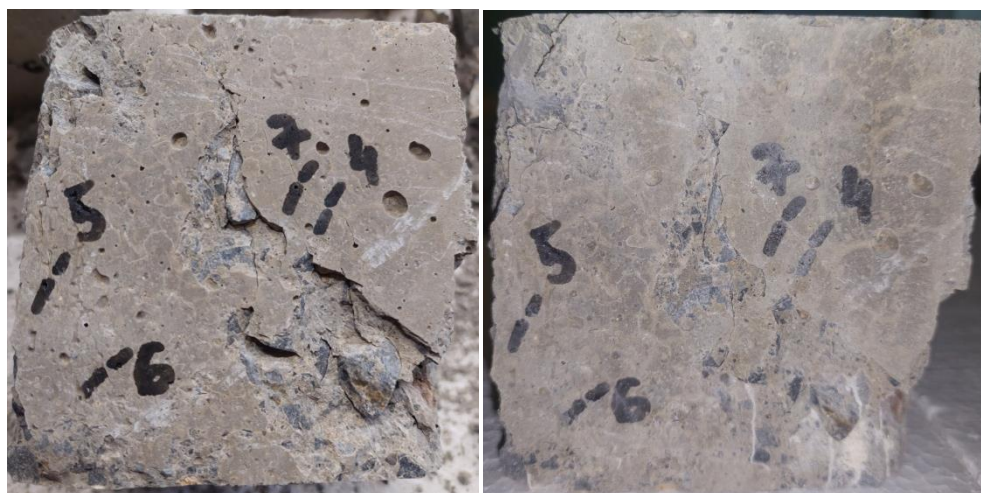
Slika 6.71. Mješavina M3 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.72. Mješavina M3 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.73. Mješavina M4 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.74. Mješavina M4 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.75. Mješavina M5 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



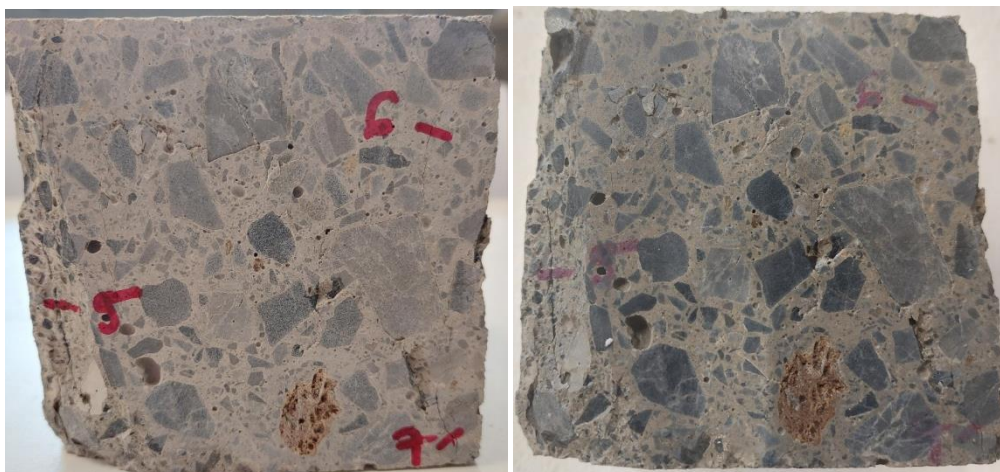
Slika 6.76. Mješavina M5 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



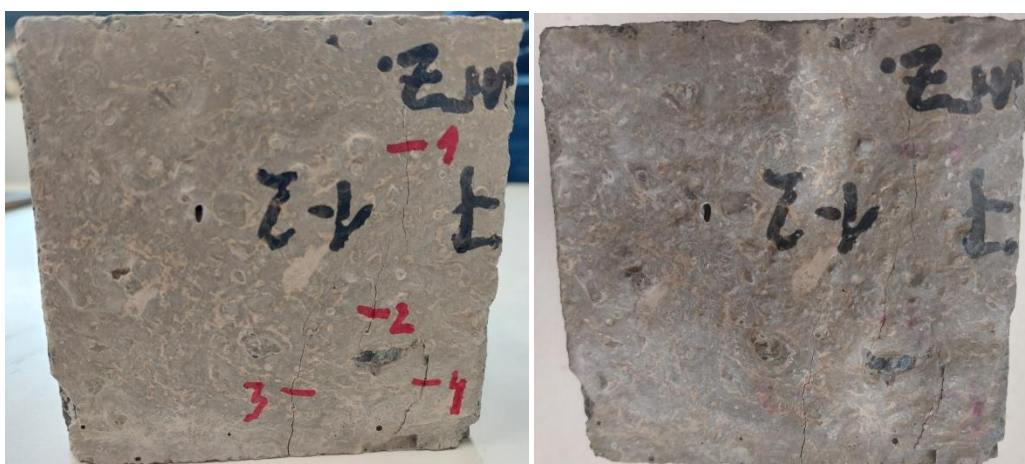
Slika 6.77. Mješavina M6 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.78. Mješavina M6 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



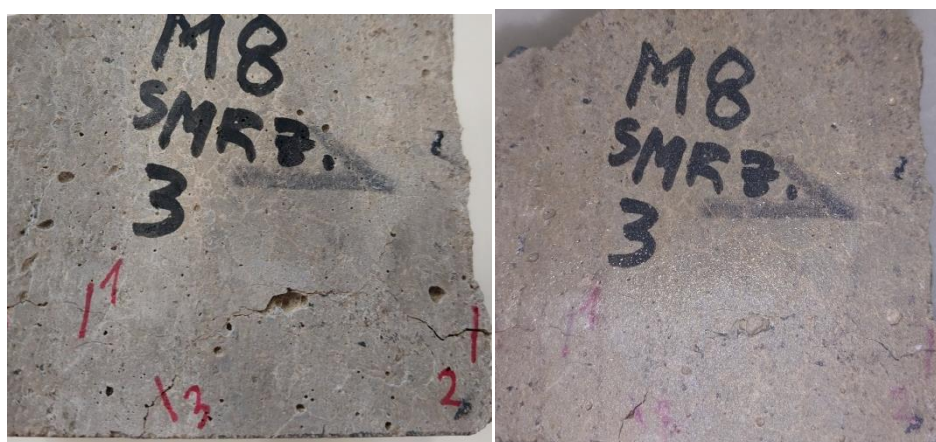
Slika 6.79. Mješavina M7 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.80. Mješavina M7 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.81. Mješavina M8 bez smrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)



Slika 6.82. Mješavina M8 nakon smrzavanja i odmrzavanja (lijevo – prije samocijeljenja, desno - nakon samocijeljenja)

Formula (6.1) za računanje postotka samocijeljenja pojedine pukotine je:

$$\text{Samocijeljenje} = 100 \% - \left(\frac{\text{širina pukotine nakon samocijeljenja}}{\text{širina pukotine prije samocijeljenja}} \right) \quad 6.1$$

Sljedeće tablice (Tablica 6.16. – 6.39.) prikazuju širine pukotina pojedinih mješavina i njihovih uzoraka prije i nakon tretiranja s 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Treća tablica svake pojedine mješavine u postotku prikazuje smanjenje širine pukotine tj. njeno samocijeljenje nakon 28 dana njegovanja u vodi.

U Tablici 6.16. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M1 u rasponu od 0,10 do 0,70 mm.

Tablica 6.16. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M1

M1						
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,15	0,10	0,10	0,10	0,20	0,15
2	0,25	0,20	0,15	0,10	0,10	0,30
3	0,10	0,25	0,25	0,15	0,70	0,25
4	0,30	0,15	0,30	0,40	0,30	0,20
5	0,35	0,10	0,15	0,10	0,15	0,20
6	0,40	0,10	0,15	0,10	0,20	0,15
7	0,15	0,20	0,10	0,20	0,25	0,25
8	-	-	-	-	-	0,70

Tablica 6.17. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M1

M1						
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,10
2	0,20	0,20	0,15	0,00	0,00	0,30
3	0,00	0,20	0,25	0,00	0,70	0,25
4	0,20	0,15	0,25	0,35	0,00	0,20
5	0,30	0,10	0,00	0,00	0,10	0,10
6	0,40	0,00	0,10	0,00	0,15	0,00
7	0,15	0,15	0,00	0,10	0,20	0,20
8	-	-	-	-	-	0,60

U Tablici 6.18. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M1. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,10 mm i dio pukotina širine 0,15 mm, 50 % su zacijelile širine pukotina 0,2 mm.

Tablica 6.18. Samocijeljenje pukotina mješavine M1

M1						
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]						
Pukotina	Smrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	100,00 %	0,00 %	100,00 %	100,00 %	50,00 %	33,33 %
2	20,00 %	0,00 %	0,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %
3	100,00 %	20,00 %	0,00 %	100,00 %	0,00 %	0,00 %
4	33,33 %	0,00 %	16,67 %	12,50 %	100,00 %	0,00 %
5	14,29 %	0,00 %	100,00 %	100,00 %	33,33 %	50,00 %
6	0,00 %	100,00 %	33,33 %	100,00 %	25,00 %	100,00 %
7	0,00 %	25,00 %	100,00 %	50,00 %	20,00 %	20,00 %
8	-	-	-	-	-	14,29 %

U Tablici 6.19. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M2 u rasponu od 0,10 do 0,45 mm.

Tablica 6.19. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M2

M2						
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
2	0,40	0,15	0,10	0,15	0,30	0,10
3	0,35	0,20	0,15	0,30	0,10	0,10
4	0,10	0,15	0,20	0,45	0,15	0,15
5	0,15	0,20	0,15	0,10	0,15	0,20
6	0,15	0,10	0,15	0,20	0,25	0,25
7	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,10

Tablica 6.20. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M2

M2						
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,15	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00
2	0,40	0,00	0,00	0,10	0,25	0,00
3	0,35	0,20	0,10	0,30	0,00	0,10
4	0,00	0,00	0,15	0,45	0,10	0,15
5	0,10	0,20	0,10	0,00	0,10	0,15
6	0,10	0,10	0,10	0,15	0,25	0,15
7	0,00	0,10	0,00	0,10	0,10	0,00

U Tablici 6.21. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M2. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,10 mm i dio pukotina širine 0,15 mm, 33 % su zacijelile preostale pukotine širine 0,15 mm.

Tablica 6.21. Samocijeljenje pukotina mješavine M2

M2						
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %	0,00 %	100,00 %
2	0,00 %	100,00 %	100,00 %	33,33 %	16,67 %	100,00 %
3	0,00 %	0,00 %	33,33 %	0,00 %	100,00 %	0,00 %
4	100,00 %	100,00 %	25,00 %	0,00 %	33,33 %	0,00 %
5	33,33 %	0,00 %	33,33 %	100,00 %	33,33 %	25,00 %
6	33,33 %	0,00 %	33,33 %	25,00 %	0,00 %	40,00 %
7	100,00 %	0,00 %	100,00 %	0,00 %	33,33 %	100,00 %

U Tablici 6.22. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M3 u rasponu od 0,10 do 0,65 mm.

Tablica 6.22. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M3

M3						
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,40	0,15	0,10	0,10	0,15	0,10
2	0,30	0,15	0,25	0,20	0,30	0,15
3	0,15	0,15	0,45	0,15	0,65	0,10
4	0,20	0,10	0,50	0,30	0,35	0,45
5	0,20	0,10	0,15	0,30	0,20	0,50
6	0,25	0,45	0,20	0,30	0,15	0,10
7	0,10	0,15	0,25	0,25	0,10	0,20

Tablica 6.23. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M3

M3						
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,20	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00
2	0,15	0,00	0,20	0,15	0,15	0,10
3	0,00	0,10	0,00	0,10	0,60	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,10	0,30	0,15
5	0,10	0,00	0,10	0,10	0,15	0,00
6	0,15	0,40	0,00	0,00	0,10	0,10
7	0,00	0,10	0,15	0,15	0,00	0,00

U Tablici 6.24. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M3. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,10 mm, 0,15, 0,20, 0,30 i 0,45 mm i dio pukotina širine 0,35 mm su zacijelile 66 %, dio pukotina širine 0,30 mm su zacijelile 50 % i dio pukotina širine 0,25 mm su zacijelile 40 %. **Kristalni hidrofilni dodatak je potaknuo samocijeljenje pukotina veće širine.**

Tablica 6.24. Samocijeljenje pukotina mješavine M3

M3						
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	50,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	33,33 %	100,00 %
2	50,00 %	100,00 %	20,00 %	25,00 %	50,00 %	33,33 %
3	100,00 %	33,33 %	100,00 %	33,33 %	7,69 %	100,00 %
4	100,00 %	100,00 %	100,00 %	66,67 %	14,29 %	66,67 %
5	50,00 %	100,00 %	33,33 %	66,67 %	25,00 %	100,00 %
6	40,00 %	11,11 %	100,00 %	100,00 %	33,33 %	0,00 %
7	100,00 %	33,33 %	40,00 %	40,00 %	100,00 %	100,00 %

U Tablici 6.25. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M4 u rasponu od 0,10 do 0,65 mm.

Tablica 6.25. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M4

M4						
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10
2	0,15	0,20	0,15	0,20	0,15	0,30
3	0,30	0,10	0,20	0,55	0,25	0,35
4	0,25	0,10	0,20	0,10	0,20	0,15
5	0,30	0,10	0,65	0,30	0,55	0,25
6	0,25	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
7	0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,65

Tablica 6.26. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M4

M4						
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,15	0,15	0,10	0,15	0,00	0,25
3	0,25	0,00	0,15	0,55	0,20	0,30
4	0,20	0,00	0,15	0,00	0,10	0,10
5	0,25	0,00	0,65	0,30	0,55	0,20
6	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,65

U Tablici 6.27. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M4. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,10 mm, 0,15, 0,20 i 0,30 mm i dio pukotina širine 0,20 mm su zacijelile 50 %. **Kristalni hidrofilni dodatak je potaknuo samocijeljenje pukotina veće širine.**

Tablica 6.27. Samocijeljenje pukotina mješavine M4

M4						
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	100,00 %	33,33 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
2	0,00 %	25,00 %	33,33 %	25,00 %	100,00 %	16,67 %
3	16,67 %	100,00 %	25,00 %	0,00 %	20,00 %	14,29 %
4	20,00 %	100,00 %	25,00 %	100,00 %	50,00 %	33,33 %
5	16,67 %	100,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	20,00 %
6	0,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
7	100,00 %	100,00 %	33,33 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %

U Tablici 6.28. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M5 u rasponu od 0,10 do 0,70 mm.

Tablica 6.28. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M5

M5						
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,15	0,10	0,10	0,30	0,10	0,10
2	0,40	0,15	0,35	0,15	0,10	0,20
3	0,10	0,20	0,15	0,20	0,30	0,15
4	0,15	0,10	0,30	0,30	0,65	0,65
5	0,25	0,40	0,70	0,15	0,10	0,25
6	0,25	0,30	0,25	0,10	0,10	0,15
7	0,10	0,10	0,20	0,10	0,70	0,10

Tablica 6.29. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M5

M5						
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
2	0,40	0,15	0,20	0,00	0,00	0,15
3	0,00	0,00	0,10	0,15	0,25	0,10
4	0,10	0,10	0,20	0,20	0,55	0,65
5	0,25	0,20	0,70	0,10	0,00	0,00
6	0,25	0,15	0,20	0,00	0,00	0,15
7	0,10	0,00	0,20	0,00	0,70	0,10

U Tablici 6.30. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M5. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,10 mm, 0,15, 0,20 i 0,25 mm, pukotine širine 0,30 mm su zacijelile 66 %. Mikro kapsule su potaknule samocijeljenje pukotina veće širine, ali nisu uspješnije u samocijeljenju od kristalnog hidrofilnog dodatka jednake dodane količine.

Tablica 6.30. Samocijeljenje pukotina mješavine M5

M5						
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	100,00 %	100,00 %	100,00 %	66,67 %	100,00 %	100,00 %
2	0,00 %	0,00 %	42,86 %	100,00 %	100,00 %	25,00 %
3	100,00 %	100,00 %	33,33 %	25,00 %	16,67 %	33,33 %
4	33,33 %	0,00 %	33,33 %	33,33 %	15,38 %	0,00 %
5	0,00 %	50,00 %	0,00 %	33,33 %	100,00 %	100,00 %
6	0,00 %	50,00 %	20,00 %	100,00 %	100,00 %	0,00 %
7	0,00 %	100,00 %	0,00 %	100,00 %	0,00 %	0,00 %

U Tablici 6.31. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M6 u rasponu od 0,10 do 0,45 mm.

Tablica 6.31. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M6

M6						
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,10	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10
2	0,15	0,10	0,10	0,15	0,20	0,35
3	0,20	0,25	0,20	0,15	0,20	0,45
4	0,20	0,10	0,20	0,10	0,25	0,15
5	0,10	0,20	0,10	0,15	0,20	0,40
6	0,30	0,45	0,10	0,20	0,30	0,15
7	0,10	0,20	0,15	0,10	0,20	0,20

Tablica 6.32. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M6

M6						
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
3	0,10	0,15	0,15	0,00	0,00	0,15
4	0,10	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,15
6	0,30	0,45	0,00	0,10	0,15	0,10
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15

U Tablici 6.33. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M6. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,1 mm, 0,15, 0,20 i 0,25 mm, pukotine širine 0,30 mm su zacijelile 50 %, pukotine širine 0,35 mm su zacijelile 42 %, pukotine širine 0,45 mm su zacijelile 66 %. Mikro kapsule su potaknule samocijeljenje pukotina veće širine, ali nisu uspješnije u samocijeljenju od kristalnog hidrofilnog dodatka jednake dodane količine.

Tablica 6.33. Samocijeljenje pukotina mješavine M6

M6						
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
2	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	42,86 %
3	50,00 %	40,00 %	25,00 %	100,00 %	100,00 %	66,67 %
4	50,00 %	100,00 %	50,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
5	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	25,00 %	62,50 %
6	0,00 %	0,00 %	100,00 %	50,00 %	50,00 %	33,33 %
7	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	25,00 %

U Tablici 6.34. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M7 u rasponu od 0,10 do 0,60 mm.

Tablica 6.34. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M7

M7					
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]					
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja	
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2
1	0,10	0,20	0,10	0,30	0,10
2	0,10	0,10	0,60	0,20	0,10
3	0,15	0,25	0,20	0,40	0,20
4	0,15	0,10	0,15	0,25	0,15
5	0,30	0,15	0,45	0,55	0,10
6	0,25	0,20	0,15	0,30	0,15
7	0,20	0,15	0,20	0,70	0,15

Tablica 6.35. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M7

M7					
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana					
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja	
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2
1	0,10	0,15	0,10	0,30	0,00
2	0,10	0,00	0,35	0,15	0,00
3	0,10	0,20	0,00	0,20	0,10
4	0,15	0,00	0,00	0,10	0,10
5	0,30	0,10	0,20	-	0,10
6	0,20	0,15	0,10	0,25	0,10
7	0,20	0,10	0,00	0,70	0,10

U Tablici 6.36. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M7. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,1 mm, 0,15, 0,20 mm, pukotine širine 0,45 mm su zacijelile 55 %, pukotine širine 0,60 mm su zacijelile 41 %.
Kristalni hidrofilni dodatak je potaknuo samocijeljenje pukotina veće širine.

Tablica 6.36. Samocijeljenje pukotina mješavine M7

M7					
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]					
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja	
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2
1	0,00 %	25,00 %	0,00 %	0,00 %	100,00 %
2	0,00 %	100,00 %	41,67 %	25,00 %	100,00 %
3	33,33 %	20,00 %	100,00 %	50,00 %	50,00 %
4	0,00 %	100,00 %	100,00 %	60,00 %	33,33 %
5	0,00 %	33,33 %	55,56 %	-	0,00 %
6	20,00 %	25,00 %	33,33 %	16,67 %	33,33 %
7	0,00 %	-	100,00 %	0,00 %	33,33 %

U Tablici 6.37. prikazane su širine pukotina prije samocijeljenja mješavine M8 u rasponu od 0,10 do 0,60 mm.

Tablica 6.37. Širina pukotina prije samocijeljenja mješavine M8

M8						
Širina pukotina prije samocijeljenja [mm]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,25	0,55	0,10	0,20	0,20	0,10
2	0,20	0,25	0,45	0,35	0,25	0,10
3	0,15	0,20	0,25	0,40	0,15	0,20
4	0,10	0,15	0,30	0,30	0,40	0,35
5	0,45	0,10	0,15	0,25	0,35	0,25
6	0,25	0,10	0,20	0,20	0,50	0,30
7	0,10	0,60	0,20	0,20	0,15	0,10

Tablica 6.38. Širina pukotina nakon samocijeljenja mješavine M8

M8						
Širina pukotina nakon samocijeljenja [mm] - 28 dana						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,25	0,50	0,10	0,15	0,15	0,10
2	0,15	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00
3	0,10	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10
4	0,10	0,00	0,10	0,10	0,25	0,00
5	0,00	0,10	0,10	0,20	0,15	0,10
6	0,15	0,10	0,00	0,15	0,40	0,15
7	0,00	-	0,10	0,15	0,10	0,00

U Tablici 6.39. prikazani su rezultati samocijeljenja pukotina mješavine M8. Iz rezultata je vidljivo da su 100 % zacijelile pukotine širine 0,1 mm, 0,15, 0,20 mm, 0,25 mm, 0,35 mm i 0,45 mm, dio pukotina širine 0,30 mm su zacijelile 66 % i dio pukotina širine 0,40 mm su zacijelile 62 %. **Kristalni hidrofilni dodatak je potaknuo samocijeljenje pukotina veće širine.**

Tablica 6.39. Samocijeljenje pukotina mješavine M8

M8						
Smanjenje širine pukotine - samocijeljenje [%]						
Pukotina	Smrzavanje i odmrzavanje			Bez smrzavanja		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
1	0,00 %	9,09 %	0,00 %	25,00 %	25,00 %	0,00 %
2	25,00 %	100,00 %	22,22 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3	33,33 %	100,00 %	20,00 %	62,50 %	100,00 %	50,00 %
4	0,00 %	100,00 %	66,67 %	66,67 %	37,50 %	100,00 %
5	100,00 %	0,00 %	33,33 %	20,00 %	57,14 %	60,00 %
6	40,00 %	0,00 %	100,00 %	25,00 %	20,00 %	50,00 %
7	100,00 %	-	50,00 %	25,00 %	33,33 %	100,00 %

6.5. Ocjena učinkovitosti betonskih mješavina po ispitanom svojstvu otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Tablica 6.40. prikazuje ocjenu učinkovitosti svake pojedine mješavine betona prema rezultatima ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja obuhvaćenih točkama 6.2 i 6.3. Mješavini koja je postigla najbolju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja po pojedinom svojstvu je pridružen redni broj 1, a onoj koja je postigla najlošiju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja je pridružen redni broj 8.

Tablica 6.40. Sumirani prikaz učinkovitosti betonskih mješavina za sve metode ispitivanja otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

Ispitano svojstvo / mješavina			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Direktni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	Smrzavanje i odmrzavanje u klima komori, tretiranje vodom sa soli	Ljuštenje	4.	1.	5.	8.	3.	2.	7.	6.
		Unutarnje oštećenje	4.	1.	3.	6.	5.	2.	7.	8.
	Smrzavanje i odmrzavanje u klima komori, tretiranje vodom bez soli	Ljuštenje	2.	1.	3.	5.	4.	6.	7.	8.
		Unutarnje oštećenje	6.	1.	3.	5.	4.	2.	7.	8.
	Faktor razmaka pora		8.	1.	6.	5.	3.	2.	4.	7.
Indirektni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	Promjena dinamičkog modula elastičnosti uslijed smrzavanja i odmrzavanja		3.	8.	5.	4.	1.	2.	6.	7.
	Tlačna čvrstoća prije smrzavanja/odmrzavanja		2.	8.	3.	4.	1.	5.	6.	7.
	Tlačna čvrstoća nakon smrzavanja/odmrzavanja		2.	3.	3.	1.	1.	6.	4.	5.
	Vlačna čvrstoća savijanjem prije smrzavanja/odmrzavanja		3.	6.	2.	5.	1.	8.	4.	7.
	Vlačna čvrstoća savijanjem nakon smrzavanja/odmrzavanja		7.	2.	3.	5.	6.	1.	4.	8.
	Dubina prodora vode pod tlakom prije smrzavanja/odmrzavanja		7.	4.	2.	5.	1.	6.	3.	8.
	Dubina prodora vode pod tlakom nakon smrzavanja/odmrzavanja		3.	4.	5.	1.	2.	7.	6.	8.

Iz prikazane tablice je vidljivo kad je riječ o direktnim postupcima ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja da je mješavina M2 prva po učinkovitosti, M6 gotovo uvijek druga, M3 gotovo uvijek treća, četvrta su mješavine M1 i M4, a najlošije su mješavine M7 i M8. Kod ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja indirektnim metodama gotovo uvijek je mješavina M5 na prvom mjestu, u dosta rezultata se mješavina M2 pokazala neučinkovitom, a najlošija se pokazala mješavina M8. Rezultati ispitivanja indirektnim metodama nemaju toliko ujednačene rezultate kao kod ispitivanja direktnim metodama.

6.6. Procjena troškova pojedine mješavine betona

U Tablicama 6.41.-6.49. prikazana je jedinična cijena svake komponente u mješavini betona koja je pomnožena s količinom komponente u toj mješavini te su zbrojene sve komponente i dobivena je ukupna cijena pojedine betonske mješavine.

Tablica 6.41. Cijena mješavine M1 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M1	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	400	76,00
Voda (kg)	0,0024	140	0,34
Superplastifikator 1 % (kg)	3,87	4	15,48
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	576,6	17,87
Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	195,6	6,06
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	469,8	14,56
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	685	21,24
Punilo 5 % (kg)	0,19	30,2	5,74
Ukupna cijena za 1 m ³ betona (€):			157,29

Tablica 6.42. Cijena mješavine M2 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M2	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	396	75,24
Voda (kg)	0,0024	140	0,34
Superplastifikator 1 % (kg)	3,87	4	15,48
Aerant 0,2 % (kg)	2,39	0,8	1,91
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	576,6	17,87
Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	195,6	6,06
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	469,8	14,56
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	685	21,24
Punilo 5 % (kg)	0,19	30,2	5,74
Ukupna cijena za 1 m³ betona (€):			158,44

Tablica 6.43. Cijena mješavine M3 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M3	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	396	75,24
Voda (kg)	0,0024	140	0,34
Superplastifikator 1 % (kg)	3,87	4	15,48
Kristalni hidrofilni dodatak (kg)	10,35	4	41,40
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	576,6	17,87
Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	195,6	6,06
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	469,8	14,56
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	685	21,24
Punilo 5 % (kg)	0,19	30,2	5,74
Ukupna cijena za 1 m³ betona (€):			197,93

Tablica 6.44. Cijena mješavine M4 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M4	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	388	73,72
Voda (kg)	0,0024	140	0,34
Superplastifikator 1 % (kg)	3,87	4	15,48
Kristalni hidrofilni dodatak (kg)	10,35	12	124,20
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	576,6	17,87
Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	195,6	6,06
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	469,8	14,56
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	685	21,24

Punilo 5 % (kg)	0,19	30,2	5,74
Ukupna cijena za 1 m³ betona (€):			279,21

Tablica 6.45. Cijena mješavine M5 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M5	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	396	75,24
Voda (kg)	0,0024	140	0,34
Superplastifikator 1 % (kg)	3,87	4	15,48
Mikrokapsule (kg)	1070,61	4	4282,44
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	576,6	17,87
Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	195,6	6,06
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	469,8	14,56
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	685	21,24
Punilo 5 % (kg)	0,19	30,2	5,74
Ukupna cijena za 1 m³ betona (€):			4438,97

Tablica 6.46. Cijena mješavine M6 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M6	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	388	73,72
Voda (kg)	0,0024	140	0,34
Superplastifikator 1 % (kg)	3,87	4	15,48
Mikrokapsule (kg)	1070,61	12	12847,32
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	576,6	17,87
Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	195,6	6,06
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	469,8	14,56
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	685	21,24
Punilo 5 % (kg)	0,19	30,2	5,74
Ukupna cijena za 1 m³ betona (€):			13002,33

Tablica 6.47. Cijena mješavine M7 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M7	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	396	75,24
Voda (kg)	0,0024	180	0,43
Kristalni hidrofilni dodatak (kg)	10,35	4	41,40
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	572,6	17,75

Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	184,8	5,73
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	443,4	13,75
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	646,4	20,04
Ukupna cijena za 1 m³ betona (€):			174,34

Tablica 6.48. Cijena mješavine M8 za 1 m³ betona

Komponente	Jedinična cijena €/kg	M8	Cijena za 1 m ³
Cement (kg)	0,19	388	73,72
Voda (kg)	0,0024	180	0,43
Kristalni hidrofilni dodatak (kg)	10,35	12	124,20
Dolomit 0-4 mm (kg)	0,031	572,6	17,75
Dolomit 4-8 mm (kg)	0,031	184,4	5,72
Dolomit 8-16 mm (kg)	0,031	443,4	13,75
Dolomit 16-31,5 mm (kg)	0,031	646,4	20,04
Ukupna cijena za 1 m³ betona (€):			255,60

Tablica 6.49. Cijene svih mješavina za 1 m³ betona

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Cijena za 1 m³ betona (€)	157,29	158,44	197,93	279,21	4438,97	13002,33	174,34	255,60

Iz prikazanih cijena svih mješavina betona, najpovoljnija mješavina je ona bez ikakvih dodataka (referentna mješavina – M1), slijede ju mješavina s dodatkom aeranta M2, zatim mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka bez superplastifikatora M7, pa mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka uz dodatak superplastifikatora M3, mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka bez superplastifikatora M8, pa mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka uz dodatak superplastifikatora M4. Najskuplje mješavine su očekivano one s dodatkom mikrokapsula.

7. Eksperimentalni dio na razini konstrukcijskog elementa

U eksperimentalnom dijelu rada izrađene su armiranobetonske grede iz odabranih mješavina betona te je dio armiranobetonskih greda izložen ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u komori velikog kapaciteta (tretirane grede), a dio ostavljen u laboratorijskim uvjetima na sobnoj temperaturi (netretirane grede). U svrhu praćenja otpornosti armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja određene su i uspoređene nosivosti i uporabljivosti tretiranih i netretiranih greda.

7.1. Izmjere armiranobetonskih greda

Prilikom određivanja izmjera armiranobetonskih greda vodilo se računa o sljedećem:

1. Duljina grede je bila ograničena unutarnjim gabaritima komore za smrzavanje i odmrzavanje te su grede skalirane na ukupnu duljinu od 100 cm.
2. Odabrane su dimenzije poprečnog presjeka greda 10x10 cm kako bi se osigurao duktilni slom grede uslijed ispitivanja čistim savijanjem. Naime, ciljani omjer statičke visine i duljine grede je 0,1 jer se s tim omjerom osigurava da greda neće doživjeti kruti posmični slom, već duktilni slom pri savijanju.

7.2. Sastav i svojstva betona armiranobetonskih greda

Sastav svih betonskih mješavina je prikazan Tablicom 7.1. R je referentna mješavina bez dodataka, M1 je mješavina s 1 % Penetronovog kristalnog hidrofilnog dodatka, a M2 je mješavina s 1 % mikrokapsula. Za izradu mješavina korištene su sve komponente koje su već prethodno opisane u poglavlju 6 uz napomenu da je korišten agregat isključivo frakcije 0-4 mm zbog malog poprečnog presjeka armiranobetonskih greda i malog zaštitnog sloja armature.

Tablica 7.1. Sastav svih betonskih mješavina za 1 m³ betona

Mješavina/Komponente	R	M1	M2
Cement (kg)	400	396	396
Voda (kg)	140	140	140
v/c	0,35	0,35	0,35
Superplastifikator 1 % (kg)	4	4	4
Kristalni hidrofilni dodatak 1 % (kg)	-	4	-
Mikrokapsule 1 % (kg)	-	-	4
Dolomit 0-4 mm (kg)	1963,1	1963,1	1961,1

U nastavku su izrađene kocke izmjera 15x15x15 cm (Slika 7.1.) za ispitivanje tlačne čvrstoće (9 kocaka od svake betonske mješavine).



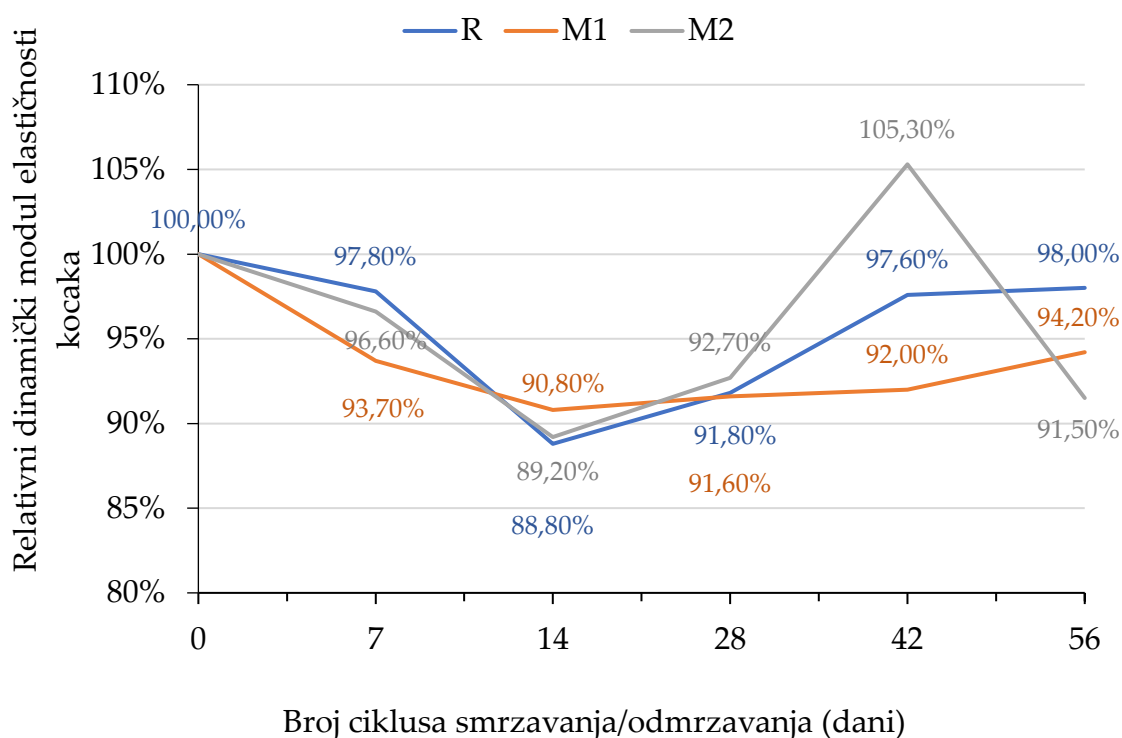
Slika 7.1. Betonske kocke izmjera 15x15x15 cm

Nakon 28 dana njege kocaka u vodi, 9 kocaka je podijeljeno u 3 skupine od po 3 kocke s kojima se postupalo kako je u nastavku navedeno:

1. skupina – kocke stare 28 dana izvađene iz vode
2. skupina – kocke stare 28 dana izložene djelovanju 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u komori sa sposobnošću primanja i otpuštanja vode prema normi CEN/TR 15177:2006 [90]. Ukupno trajanje 1 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u komori iznosi 12 sati što znači da su kocke provele u komori 28 dana te im je starost po završetku izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja iznosila 56 dana. Tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, na kockama je mjereno vrijeme prolaza ultrazvučnog vala s ciljem proračuna relativnog dinamičkog modula te je mjereno upijanje vode.

3. skupina – kocke stare 28 dana koje su izvađene iz vode te ostavljene u laboratorijskim uvjetima pri sobnoj temperaturi do trenutka dok su kocke 2. skupine završile s izlaganjem ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u komori, tj. do 56 dana njihove starosti.

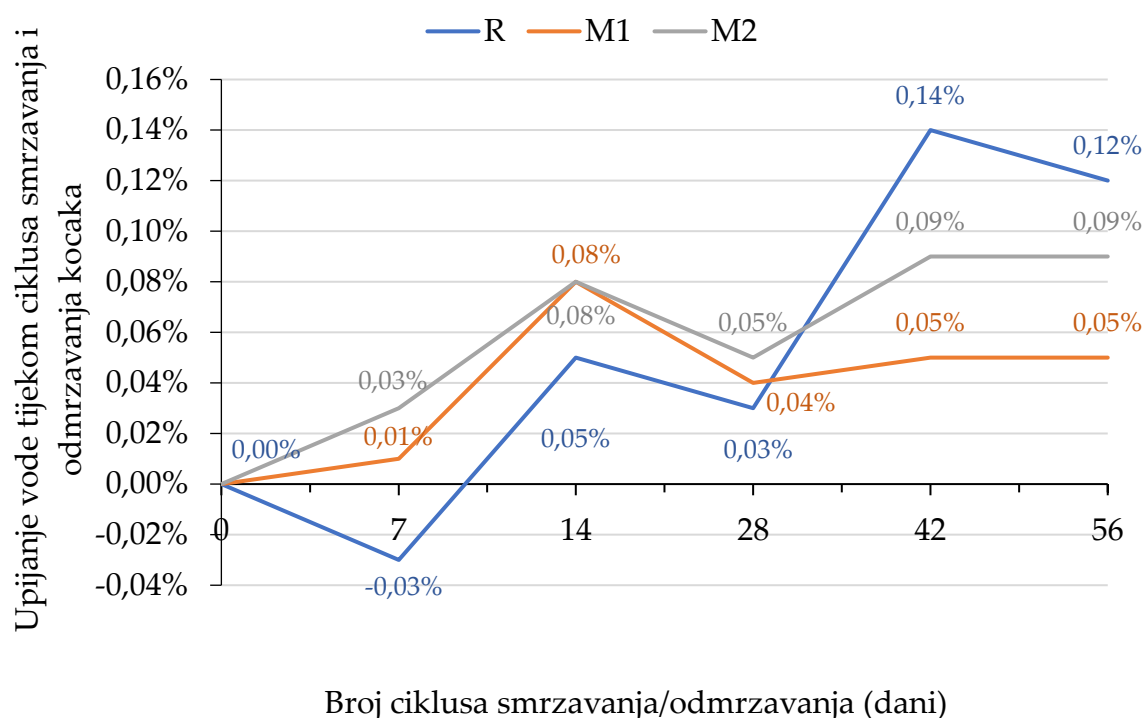
Smrzavanje i odmrzavanje uzoraka je provedeno u klima komori sa sposobnošću upijanja i otpuštanja vode Ascon instituta d.o.o. Na Slici 7.2. prikazana je promjena dinamičkog modula, a na Slici 7.3. promjena upijanja vode tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Prikazane krivulje su srednje vrijednosti tri izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskog rada.



Slika 7.2. Promjena relativnog dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na kockama

Iz Slike 7.2. vidljivo je da relativni dinamički modul kod mješavine s mikrokapsulama (M2) raste od 14. tog ciklusa te u 42. ciklusu doseže preko 100 %, no

nakon toga drastično opada, dok relativni dinamički modul referentne mješavine (R) i mješavina s primjesom kristalnog hidrofilnog dodatka (M1) raste od 14. do 56. ciklusa smrzavanja/odmrzavanja. Najveću vrijednost relativnog dinamičkog modula (a time i najmanji stupanj unutarnjeg oštećenja) nakon 56. ciklusa bilježi mješavina R, a slijede je mješavine M1 i potom mješavina M2.



Slika 7.3. Promjena upijanja vode tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na kockama

Na Slici 7.3. vidljivo je kako upijanje vode referentne mješavine opada do 7. ciklusa, zatim raste do 14. ciklusa pa opada do 28., zatim raste do 42. ciklusa i lagano opada do 56. ciklusa. Mješavine M1 i M2 pokazuju veće upijanje vode od referentne mješavine do 14. ciklusa, zatim opadanje upijanja do 28. ciklusa, pa lagani rast do 56. ciklusa. Upijanje vode dobar je dodatni podatak za procjenu oštećenja unutarnje strukture. Najveću vrijednost upijanja vode nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja ima referentna mješavina, što znači da referentna mješavina ima najveće unutarnje oštećenje nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, zatim slijedi

mješavina s mikrokapsulama (M2), a najmanju vrijednost upijanja vode nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i najmanje unutarnje oštećenje pokazuje mješavina s kristalnim hidrofilnim dodacima (M1).

Svakoj skupini kocaka je određena tlačna čvrstoća (Slika 7.4.) sukladno normi HRN EN 12390-3 [91].



Slika 7.4. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Rezultati određivanja tlačne čvrstoće 1. skupine uzoraka prikazani su Tablicom 7.2., rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće 2. skupine uzoraka prikazani su Tablicom 7.3., a rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće 3. skupine uzoraka prikazani su u Tablici 7.4.

Tablica 7.2. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka betona u starosti 28 dana (1. skupina uzoraka)

Mješavina	R	M1	M2
Tlačna čvrstoća (MPa)	49,00	57,79	49,26
	49,17	56,54	54,70
	53,00	60,16	50,69
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (MPa)	50,39	58,16	51,55

Tablica 7.3. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja starih 56 dana (2. skupina uzoraka)

Mješavina	R	M1	M2
Tlačna čvrstoća (MPa)	69,74	78,78	66,66
	67,31	73,75	65,73
	72,69	77,47	66,02
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (MPa)	69,92	76,67	66,13

Tablica 7.4. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka betona ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi starih 56 dana (3. skupina uzoraka)

Mješavina	R	M1	M2
Tlačna čvrstoća (MPa)	64,20	65,30	62,06
	62,94	65,02	65,09
	65,18	70,99	60,83
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće (MPa)	64,11	67,10	62,66

U nastavku je određen statički modul elastičnosti za uzorke betona 2. i 3. skupine koji će biti potreban kao ulazni parametar za dimenzioniranje armiranobetonskih greda.

Statički modul elastičnosti, izražen u MPa, dobiven je prema jednadžbi (7.1):

$$E_{cs} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad (7.1)$$

gdje je: f_{ck} – karakteristična tlačna čvrstoća betona u MPa.

U Tablicama 7.5. i 7.6 prikazani su rezultati proračuna statičkog modula elastičnosti betona 2. i 3. skupine uzoraka.

Tablica 7.5. Proračunati statički modul elastičnosti uzoraka betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja starih 56 dana (2. skupina uzoraka)

Mješavina	R	M1	M2
Statički modul elastičnosti betona (MPa)	40545,49	42059,80	40002,02
	40118,37	41230,03	39835,43
	41052,17	41846,18	39887,39
Srednja vrijednost statičkog modula elastičnosti betona (MPa)	40572,01	41712,00	39908,28

Tablica 7.6. Proračunati statički modul elastičnosti uzoraka betona ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi starih 56 dana (3. skupina uzoraka)

Mješavina	R	M1	M2
Statički modul elastičnosti betona (MPa)	39557,39	39758,75	39164,29
	39325,98	39707,07	39720,10
	39737,15	40761,06	38932,22
Srednja vrijednost statičkog modula elastičnosti betona (MPa)	39540,17	40075,63	39272,20

Usporedbom tlačnih čvrstoća uzoraka betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja starih 56 dana (Tablica 7.3) s tlačnim čvrstoćama uzoraka betona ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi starih 56 dana (Tablica 7.4.) vidljivo

je da su vrijednosti tlačnih čvrstoća kod uzoraka svih mješavina betona veće ako su uzorci bili izloženi ciklusima smrzavanja i odmrzavanja nego ako nisu, što još jednom potvrđuje ono što je izneseno u poglavlju 6, tj. da ovakav tretman uzoraka u komori za smrzavanja i odmrzavanje više pogoduje tlačnim čvrstoćama nego narušava unutarnju strukturu uzoraka. Omjer tlačne čvrstoće betona na kockama izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja i onih ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi iznosi 1,09 za mješavinu R, 1,14 za mješavinu M1 i 1,06 za mješavinu M2.

7.3. Svojstva armaturnog čelika armiranobetonskih greda

Uzdužna i poprečna armatura bila je jednaka je u svim izrađenim gredama. Ugrađena uzdužna armatura je B500B, nabavljena od dobavljača Brick-ing d.o.o. u Osijeku. Usvojena je poprečna armatura $\phi 6/60$ mm, glavna vlačna uzdužna armatura $2\phi 8$, te uzdužna tlačna armatura $2\phi 6$. Statička visina je 84 mm, zaštitni sloj betona je 6 mm.

Poprečna i uzdužna armatura ispitane su na kidalici Shimadzu Universal Testing Machine AG-X plus, kapaciteta 20-50 kN sukladno normi HRN EN ISO 6892-1 [136] (Slike 7.5. i 7.6.). Za oba promjera armature ispitana su po 4 uzorka armature (Slika 7.7.).



Slika 7.5. Ispitivanje poprečne armature na kidalici Shimadzu



Slika 7.6. Ispitivanje uzdužne armature na kidalici Shimadzu



Slika 7.7. Ispitani uzorci uzdužne armature

Na Slici 7.8. i 7.9. prikazani su rezultati ispitivanja modula elastičnosti ispitanog armaturnog čelika.

Formule za proračun točnog naprezanja i deformacije su:

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_I) \quad (7.2)$$

$$\sigma_t = \sigma_I(1 + \varepsilon_I) \quad (7.3)$$

gdje je:

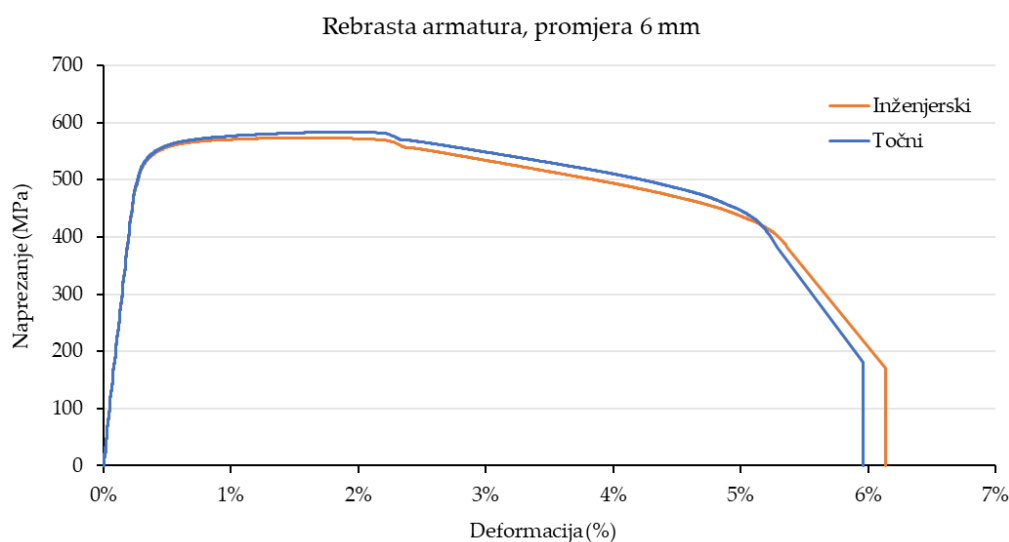
ε_t – točna deformacija

ε_I – inženjerska deformacija

σ_t – točno naprezanje

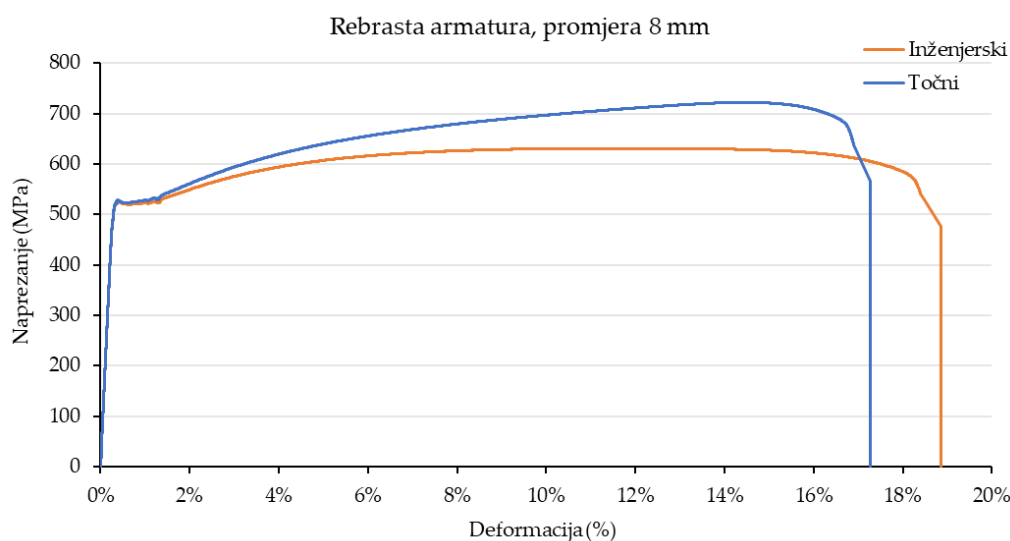
σ_I – inženjersko naprezanje.

Inženjerski podaci su dobiveni direktnim mjerenjem naprezanja (iz pretvarača sile) koristeći konstantni iznos površine poprečnog presjeka armature, te mjerenjem deformacija pomoću ekstenzometra, čija je početna baza jednaka $L=50$ mm. "Točni" podaci izvedeni su pomoću danih izraza (Formule 7.2 i 7.3) koji uzimaju u obzir smanjenje poprečnog presjeka uzorka armature tijekom ispitivanja.



Slika 7.8. Grafički prikaz prosječnih rezultata ispitivanja točnog i inženjerskog naprezanja i deformacije poprečne armature

Armaturene šipke poprečne armature izrađene su od hladnooblikovanog čelika koji je orebren naknadno hladnim postupkom. Takvi čelici nemaju izraženu granicu popuštanja što je i vidljivo iz prikazanog grafa (Slika 7.8.).



Slika 7.9. Grafički prikaz prosječnih rezultata ispitivanja točnog i inženjerskog naprezanja i deformacije uzdužne armature

Budući da se prilikom istezanja čeličnih armaturnih uzoraka njihov poprečni presjek smanjuje, točno naprezanje ne odnosi se na početnu površinu poprečnog presjeka. Spomenuto suženje poprečnog presjeka u pravilu nije moguće pouzdano mjeriti, stoga se primjenjuju gore navedeni izrazi, za procjenu točnog radnog dijagrama u odnosu na inženjerski radni dijagram (koji je često korišten u opisivanju mehaničke otpornosti). Nužno je spomenuti da je moguće koristiti oba radna dijagrama prilikom numeričkog modeliranja ponašanja ovakvog materijala, s obzirom je li smanjenje poprečnog presjeka armaturnih šipki eksplicitno uzeto u obzir ili ne.

Formula (7.4) za proračun modula elastičnosti je:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\sigma_u - \sigma_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (7.4)$$

Srednje vrijednosti modula elastičnosti korištenog armaturnog čelika su prikazane Tablicom 7.7.

Tablica 7.7. Pojedinačne i srednje vrijednosti modula elastičnosti poprečne i uzdužne armature

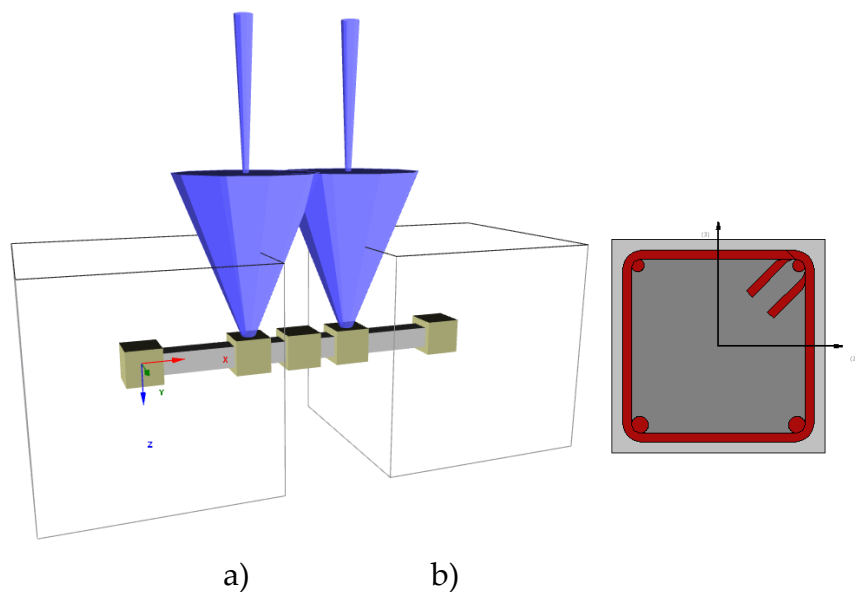
Rebrasta armatura	Modul elastičnosti E (MPa)
ϕ6	200825,50
	196465,41
	199144,93
	197169,12

	Srednja vrijednost: 198401,24
$\phi 8$	208872,33 193338,3 192459,75 193150,84 Srednja vrijednost: 196955,31

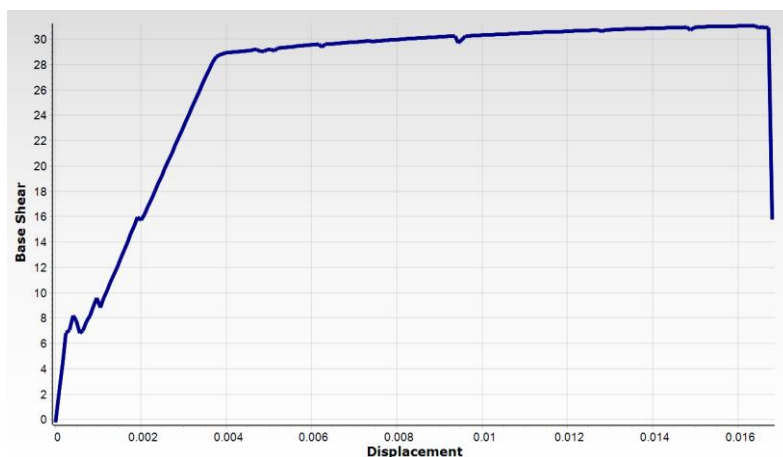
Prema modulu elastičnosti prikazanom u Tablici 7.7., vidljivo je da je poprečna armatura kruća od glavne uzdužne armature, stoga je i manje duktilna, što je u skladu s ponašanjem hladnooblikovanog čelika, koje je vidljivo iz gore prikazanih radnih dijagrama (Slika 7.8. i 7.9.).

7.4. Dimenzioniranje armiranobetonskih greda

Za usvojeni poprečni presjek količina vlačne (uzdužne) armature za poznate mehaničke karakteristike usvojena je pomoću iterativnog numeričkog proračuna (Seismo Struct), za kontrolu odnosa ukupne vertikalne sile i progiba u polovini raspona elementa grede. Prilikom proračuna poprečnog presjeke usvojene su karakteristike armature klase B500B za svu uzdužnu armaturu, dok je za beton usvojen radni dijagram koji sekantnim modulom i tlačnom čvrstoćom odgovara referentnoj mješavini betona ($f_c=64,11$ MPa, $E_c=39540,17$ MPa). Shema numeričkog modela u Seismo Struct-u prikazana je na Slici 7.10. a) i shema poprečnog presjeka greda s usvojenom armaturom prikazane su na Slici 7.10. b), a odnos ukupne vertikalne sile i progiba na polovini raspona (preliminarni nelinearni numerički model upotrijebljen za dimenzioniranje i proračun) prikazan je na Slici 7.11.



Slika 7.10. a) Shema numeričkog modela u Seismo Struct-u, b) shema poprečnog presjeka greda s usvojenom armaturom

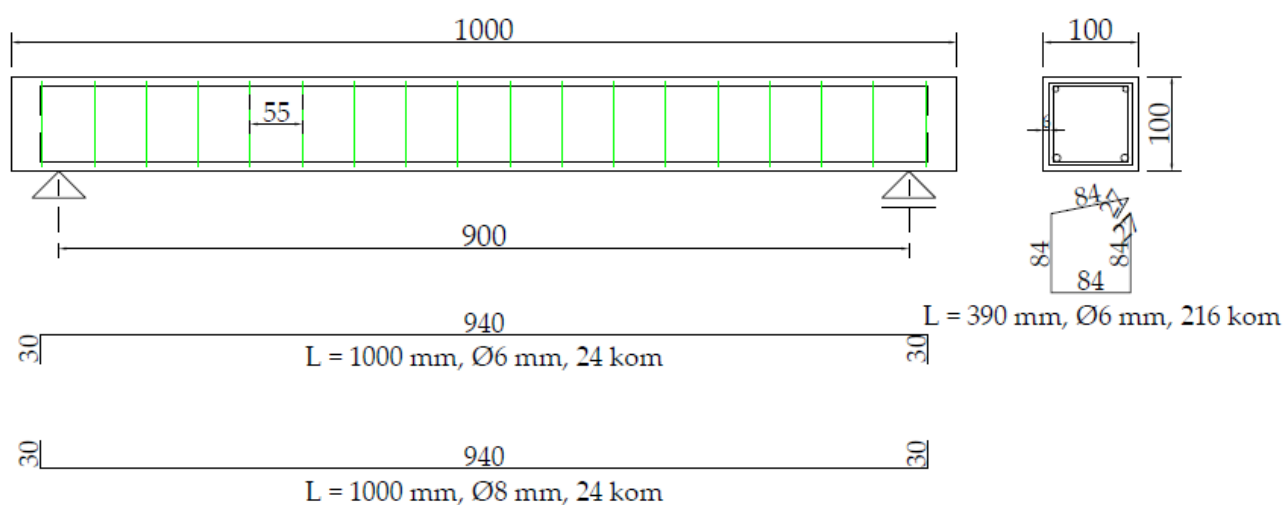


Slika 7.11. Odnos ukupne vertikalne sile i progiba na polovini raspona (preliminarni nelinearni numerički model upotrijebljen za dimenzioniranje i proračun; Base shear – smicanje baze, displacement - pomak)

Količina i razmak poprečne armature (60 mm) određena je prema maksimalnim očekivanim vrijednostima poprečnih sila u ispitivanju (sve s ciljem izbjegavanja posmičnog sloma grede).

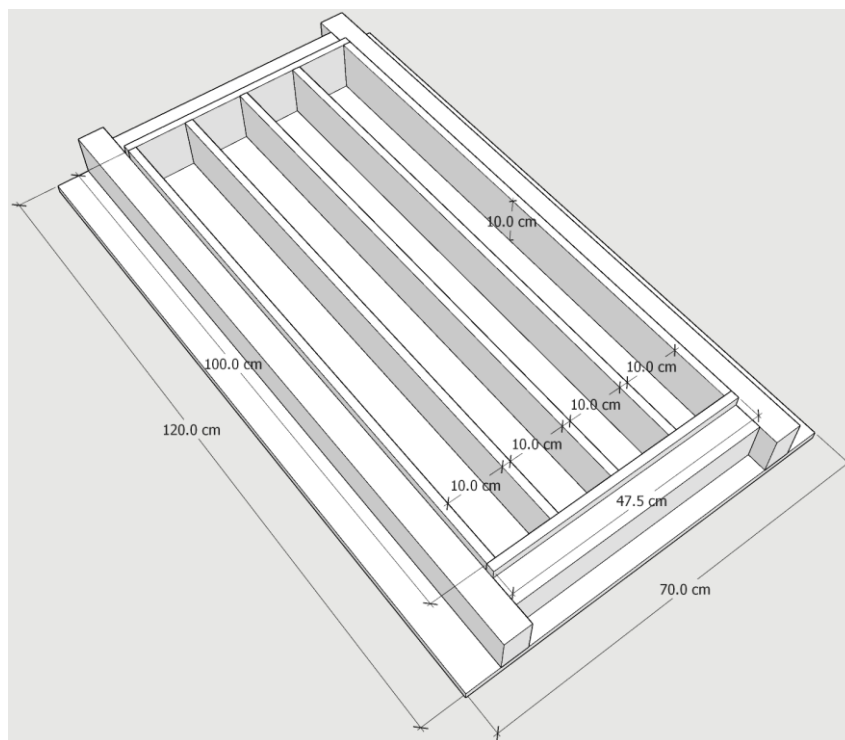
7.5. Izrada armiranobetonskih greda

Količina uzdužne i poprečne armature jednaka je za sve grede svih mješavina betona te prikazana Slikom 7.12.



Slika 7.12. Shema uzdužnih i poprečnih šipki armature za izvedbu greda (prikazane količine su za svih 12 greda)

Izrađene su četiri armiranobetonske grede (AB) od svake mješavine betona u oplati izgleda prema Slici 7.13.



Slika 7.13. 3D prikaz oplata

Na Slici 7.14. prikazani su armaturni koševi i oplata armiranobetonskih greda. Sve grede su dimenzija 10x10x100 cm (širina x visina x duljina).



Slika 7.14. Oplata i armaturni koševi gredica

Slika 7.15. prikazuje svježe izrađene armiranobetonske grede.



Slika 7.15. Svježi beton u oplati

Oplata armiranobetonskih greda uklonjena je 24 h nakon betoniranja. Izgled greda neposredno nakon raskalupljivanja je prikazan Slikom 7.16.



Slika 7.16. Raskalupljene grede referentne mješavine

Zbog procesa hidratacije cementa grede su u cijelosti bile prekrivene najlonom te su po potrebi zalijevane vodom.

7.6. Otpornost armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja

7.6.1. Izlaganje armiranobetonskih greda ciklusima smrzavanja i odmrzavanja

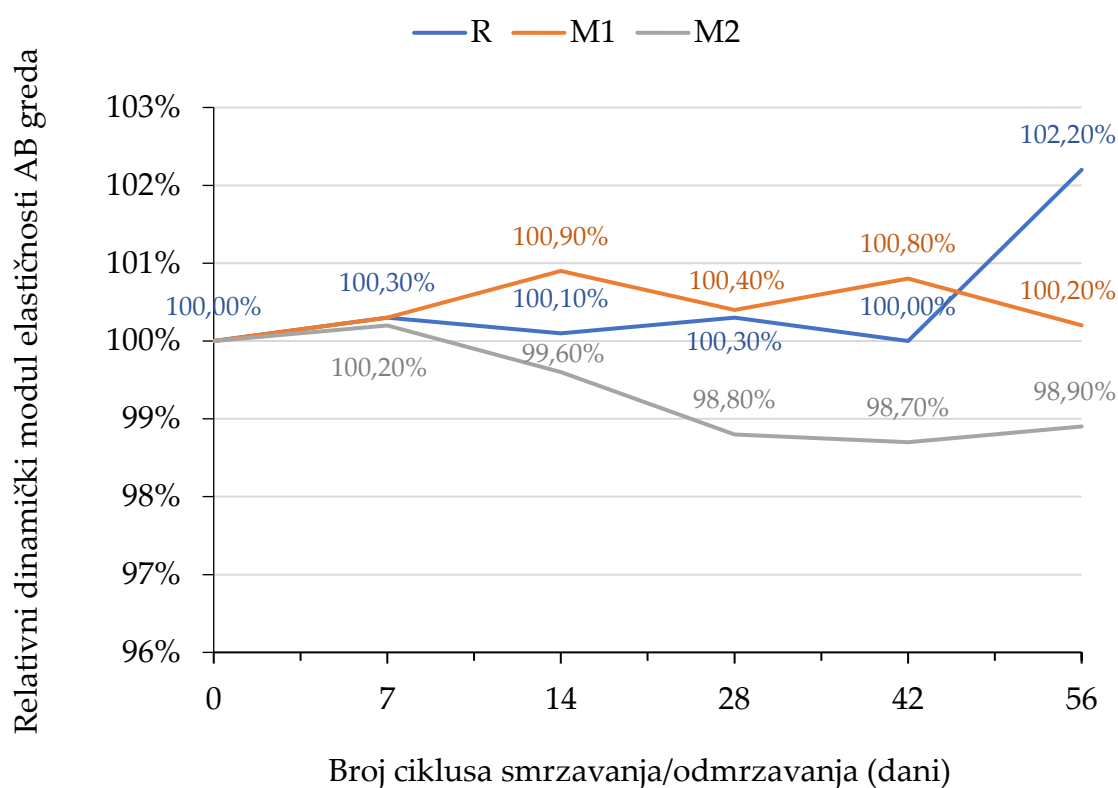
Nakon 28 dana njege greda, 12 greda (4 od po svake mješavine) je podijeljeno u 2 skupine od po 2 grede od svake betonske mješavine u skupini s kojima se postupalo kako je u nastavku navedeno:

1. skupina – grede stare 28 dana izložene djelovanju 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u komori sa sposobnošću primanja i otpuštanja vode prema normi CEN/TR 15177:2006 [90]. Ukupno trajanje 1 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u komori iznosi 12 sati, što znači da su grede provele u komori 28 dana te im je starost po završetku izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja iznosila 56 dana. Tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja na armiranobetonskim gredama mjereno je vrijeme prolaza ultrazvučnog vala s ciljem proračuna relativnog dinamičkog modula te je mjereno upijanje vode.
2. skupina –grede stare 28 dana ostavljene u laboratorijskim uvjetima pri sobnoj temperaturi do trenutka dok su grede 1. skupine završile s izlaganjem ciklusima smrzavanja i odmrzavanja u komori, tj. do 56 dana njihove starosti.

Smrzavanje i odmrzavanje uzoraka je provedeno u klima komori sa sposobnošću upijanja i otpuštanja vode Ascon instituta d.o.o. Nakon izlaganja armiranobetonskih greda ciklusima smrzavanja i odmrzavanja provedena su mjerenja preostale nosivosti i uporabljivosti.

7.6.2. Promjena dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

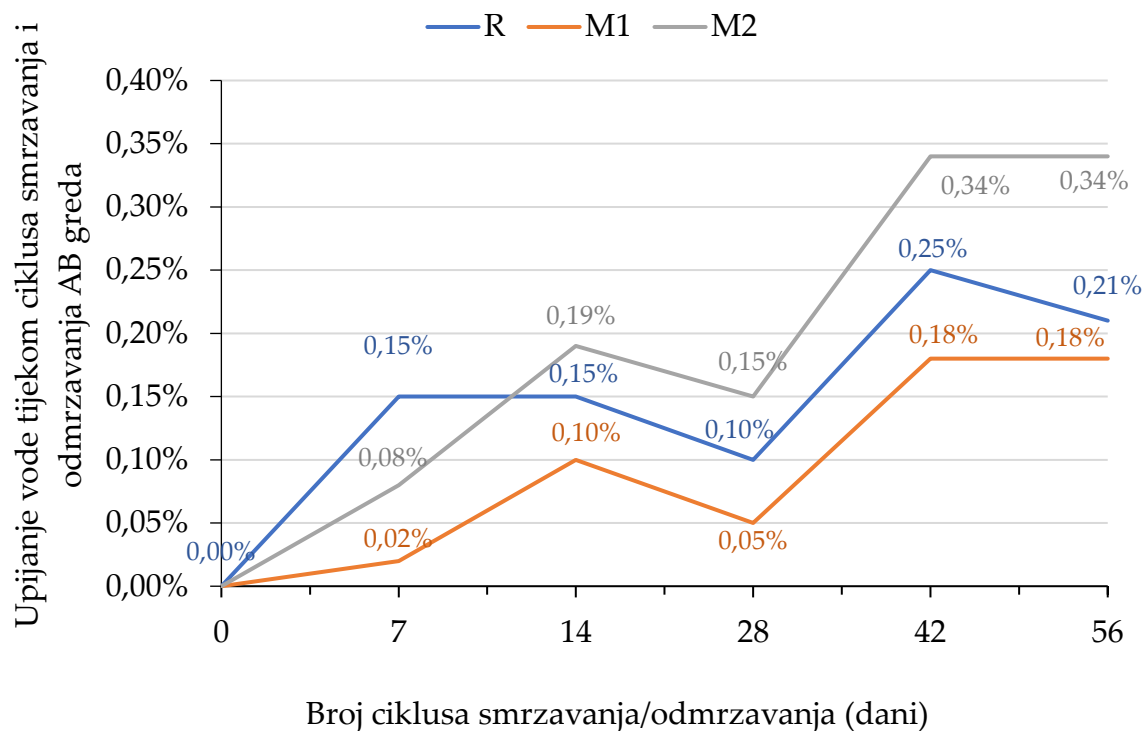
Na Slici 7.17. prikazana je promjena dinamičkog modula, a na Slici 7.18. promjena upijanja vode tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Prikazane krivulje su srednje vrijednosti dvije izmjerene pojedinačne vrijednosti. Pojedinačne vrijednosti po svakom svojstvu su dane u Prilogu doktorskog rada.



Slika 7.17. Promjena relativnog dinamičkog modula elastičnosti tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na armiranobetonskim gredama

Iz Slike 7.17. je vidljivo da najveću vrijednost relativnog dinamičkog modula do 42. ciklusa bilježi mješavina s kristalnim hidrofilnim dodacima (M1), dok najmanju vrijednost relativnog dinamičkog modula do 56. ciklusa bilježi mješavina s mikrokapsulama (M2). Najveću vrijednost relativnog dinamičkog modula nakon 56. ciklusa bilježi mješavina R, a slijede je mješavine M1 i potom mješavina M2. Ovakvi

rezultati ostvareni na armiranobetonskim gredama prate rezultate ostvarene na kockama.



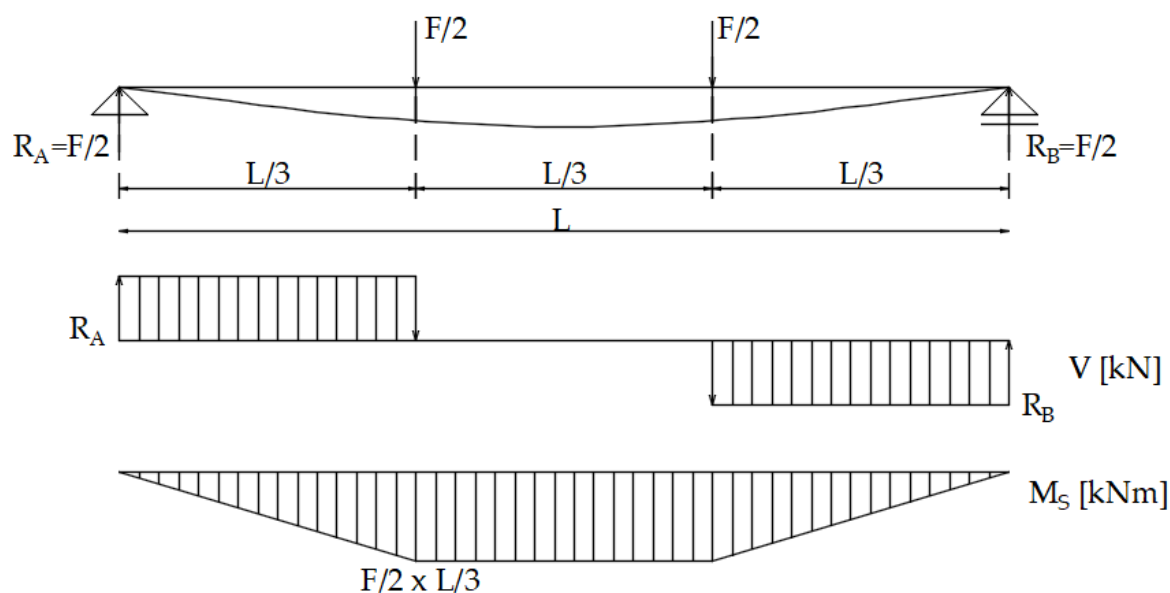
Slika 7.18. Promjena upijanja vode tijekom ciklusa smrzavanja i odmrzavanja na armiranobetonskim gredama

Iz Slike 7.18. vidljivo je da sve tri mješavine armiranobetonskih greda imaju rast upijanja vode do 14. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, zatim opadanje do 28. ciklusa, pa rast do 42. ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, koji tako ostaju do 56. ciklusa, osim referentne mješavine koja bilježi blagi pad upijanja. Najveću vrijednost upijanja vode nakon 56. ciklusa bilježi mješavina M2, a slijedi je mješavina R. Najmanju vrijednost upijanja vode nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i najmanje unutarnje oštećenje ima mješavina s kristalnim hidrofilnim dodacima M1, što se također pokazalo i na kockama.

7.6.3. Određivanje preostale nosivosti i uporabljivosti armiranobetonskih greda nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja

7.6.3.1. Detalji nanošenja opterećenja

Ispitivanje slobodno oslonjenih armiranobetonskih greda provedeno je u Laboratoriju za materijale i konstrukcije Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Uzorci su opterećivani s pomoću univerzalnog uređaja za vlačno-tlačno ispitivanje materijala i elemenata (kidalica) koji može postići maksimalnu silu od 300 kN, Shimadzu AG-X, 250-300 kN. Koncentrirana sila koju nanosi kidalica posredno se prenosila na gornju površinu grede kako bi se simuliralo čisto savijanje u srednjoj trećini grede (unos dvije identične sile u dvije točke). Dvije identične koncentrirane sile djelovale su na trećinama raspona grede. Shema statičkog sustava za eksperimentalno ispitivanje armiranobetonskih greda prikazana je na Slici 7.19., a samo ispitivanje na kidalici prikazano je na Slikama 7.20. a) i b).



Slika 7.19. Statički sustav ispitivanja armiranobetonskih greda



a) prikaz sprijeda

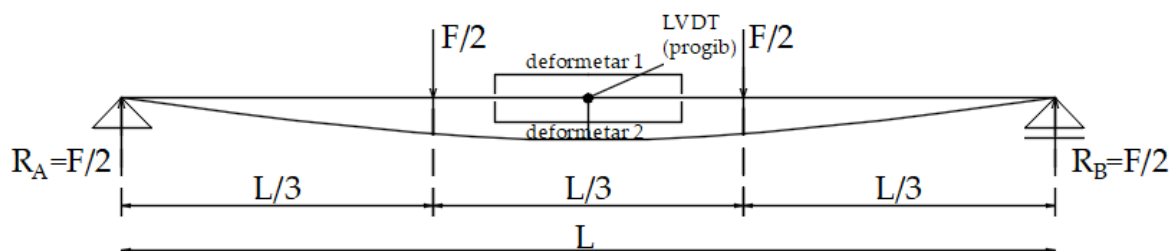


b) prikaz bočno

Slika 7.20. Ispitivanje grede na savijanje s pomoću Shimadzu kidalice

Budući da su dimenzije grede manje od tipičnih dimenzija greda u prirodnoj veličini, dimenzioniranje ovih greda nije temeljeno na unutarnjim silama neke hipotetske građevine. Prvo je ograničenje bila duljina uzoraka greda, budući da je komora za smrzavanje uzoraka ograničena na maksimalnu duljinu uzorka od 1 metar. Kako bi osigurali duktilno ponašanje grede, bilo je potrebno ograničiti statičku visinu poprečnog presjeka za duljinu uzorka od 1 metra, te minimalno armirati presjek kako bi iskoristili puni kapacitet betona kao najvažnije varijable u eksperimentalnim ispitivanjima. Prilikom ispitivanja greda cilj je bio ispitati mehaničku otpornost grede do sloma, što je definirano protokolom opterećenja (FEMA 461 u nastavku), zbog čega je bilo nužno dimenzioniranje temeljiti na nelinearnom numeričkom modelu (poprečnog presjeka i grede) kako bi se utvrdila krajnja granična stanja do sloma.

S pomoću tri LVDT-a (engl. *Linear Variable Differential Transformer*) mjerene su deformacije i vertikalni progib. Shematski prikaz mjernih uređaja na gredama prikazan je na Slici 7.21.



Slika 7.21. Plan – pozicija mjernih uređaja na gredama

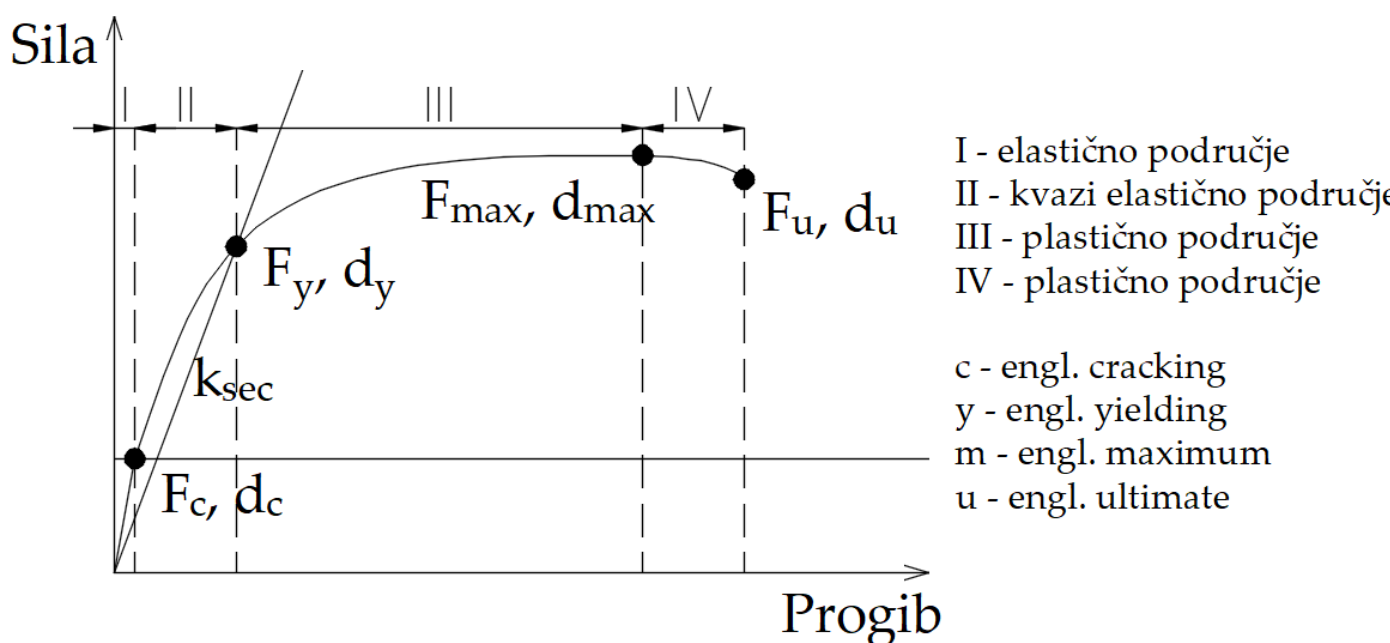
U nastavku je opisan slom i „opterećenje“ (kontrola prirasta pomaka u točkama hvatišta sila) koje je nanošeno na grede – **FEMA protokol opterećenja**.

Svi uzorci podvrgnuti su cikličkom opterećenju kontroliranom deformacijom prema postupku koji preporučuje FEMA 461 iz 2007 [137]. Ovaj se protokol naširoko primjenjuje za procjenu potresnog ponašanja konstrukcijskih, nekonstrukcijskih elemenata i opreme budući da omogućuje kvantifikaciju svih razina oštećenja za razvoj povezanih modela oštetljivosti. Proces opterećenja uključuje niz ponavljajućih ciklusa s inkrementalno rastućom amplitudom, gdje se svaki korak povećava za faktor 1,4. Svaka razina amplitude pomaka podvrgava se dvama ciklusima opterećenja.

Brzina prirasta opterećenja kontrolirana je pomakom traverze kidalice u polovini raspona grede, što je omogućilo pouzdanije praćenje ponašanja grede nakon izlaska iz elastičnog područja ponašanja. Ispitivanje greda provedeno je za 13 ciljanih vrijednosti pomaka traverze kidalice sa sljedećim koracima: $D_v = \{0,494; 0,683; 0,963; 1,351; 1,889; 2,652; 3,719; 5,191; 7,277; 10,194; 14,258; 19,956; 27,959\}$ [mm]. Svaki ciljani korak ponovljen je 2 puta ciklusom opterećenja i rasterećenja kontrolirajući tako degradacijska svojstva betonske mješavine. Time je ispitivanje svake grede provedeno kroz ukupno 26 ciklusa tijekom kojih je praćen ciklički odziv greda na zadano opterećenje, tj. vertikalni pomak.

Iskazi kvantitativnih pokazatelja potrebnih za definiranje ponašanja armiranobetonskih greda uvjetovani su pojavom 3 područja ponašanja karakterističnih za armiranobetonske grede (Slika 7.22.):

- područje I (elastično područje) – prije nastanka prvih pukotina, tj. prije prekoračenja vlačne čvrstoće betona (engl. cracking – trenutak nastajanja prve značajne vlačne pukotine)
- područje II (kvazi elastično područje) – nakon pojave prve pukotine, a prije dosezanja granice popuštanja armaturnog čelika u vlačnoj zoni, (engl. yielding – trenutak tečenja vlačne armature)
- područje III (plastično područje) – nakon dosezanja granice popuštanja armaturnog čelika u vlačnoj zoni; u ovom području armatura popušta, neutralna se os pomiče prema tlačnom rubu poprečnog presjeka (prema gore uslijed progibanja prema dolje), sve dok ne nastupi početak drobljenja betona u tlačnoj zoni (prekoračenje tlačne čvrstoće betona), (engl. maximum – maksimalna nosivost grede)
- područje IV (plastično područje) – nakon potpunog drobljenja tlačne zone betona, s minimalnim doprinosom betona u otporu grede na čisto savijanje (prekoračenje granične deformacije betona od 3,5–4 ‰), (engl. ultimate – trenutak sloma grede).



Slika 7.22. Karakteristična ovojnica ponašanja armiranobetonskih greda u obliku sila-progib, s naznačenim ključnim točkama ponašanja

Kvantitativni pokazatelji prikazani na Slici 7.22. su sljedeći:

- F_c, d_c - sila pri prijelazu iz elastičnog u plastično ponašanje uz pripadni progib, tj. sila i progib pri pojavi prve pukotine, dosezanje; prekoračenje vlačne čvrstoće betona; $\geq f_{ct}$
- F_y, d_y - sila i progib u trenutku značajne promjene krutosti elementa koja je u direktnoj vezi s pojavom popuštanja armaturnog čelika (dosezanje i prekoračenje granice tečenja glavne vlačne (uzdužne) armature); $\geq f_y$
- F_{max}, d_{max} - maksimalna dosegnuta sila i pripadni pomak; $\geq f_c$ zaštitnog sloja i dijela jezgre presjeka
- F_u, d_u - najveći ostvareni pomak pri slomu i pripadna sila; dosezanje ultimativne čvrstoće betonskog zaštitnog sloja i dijela jezgre betona; $\geq f_u$

Krutost na savijanje svake pojedine grede proračunata je kao nagib pravca u linearnom području F-d krivulje. Tako je sekantna krutost izračunata prema jednadžbi (7.5):

$$k_{sec} = \frac{F_y}{d_y} \quad (7.5)$$

Važna karakteristika armiranobetonskih greda jest njihova duktilnost, tj. njihovo svojstvo podnošenja plastične deformacije do momenta sloma, što je bitno radi mogućnosti predviđanja istog. Faktor duktilnosti (μ) u ovome radu izražen je kao omjer progiba grede pri najvećoj (graničnoj) sili (d_u) i progiba grede pri pojavi popuštanja čelika (d_y) te je korišten kako bi se procijenilo duktilno ponašanje i deformabilnost ispitanih greda. Svim gredama slom je nastao preko tlačne zone betona (gornje lice grede), time iscrpivši potpuno sposobnost nosivosti betona u smislu njegove tlačne nosivosti. Nakon područja IV (granično stanje) glavna vlačna armatura još uvijek je ostala cjelovita čime nije doživljen slom grede niti u jednom ispitivanju.

7.6.3.2. Rezultati ispitivanja armiranobetonskih greda

Slikom 7.23. prikazan je karakterističan izgled sloma kod svih ispitanih armiranobetonskih greda.



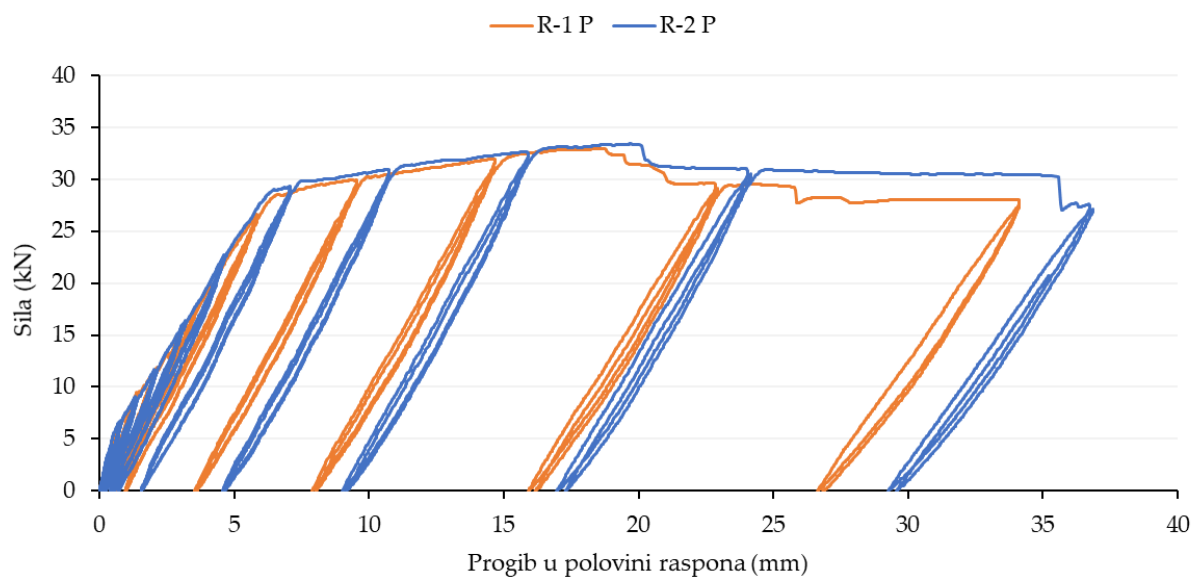
Slika 7.23. Izgled grede nakon sloma uslijed čistog savijanja

Iz detalja sloma grede prikazane na Slici 7.23. vidljivo je da je za svih dvanaest greda karakteristično drobljenje betona u tlačnoj zoni i to u području između hvatišta dviju jednakih sila, odnosno u srednjoj trećini raspona grede.

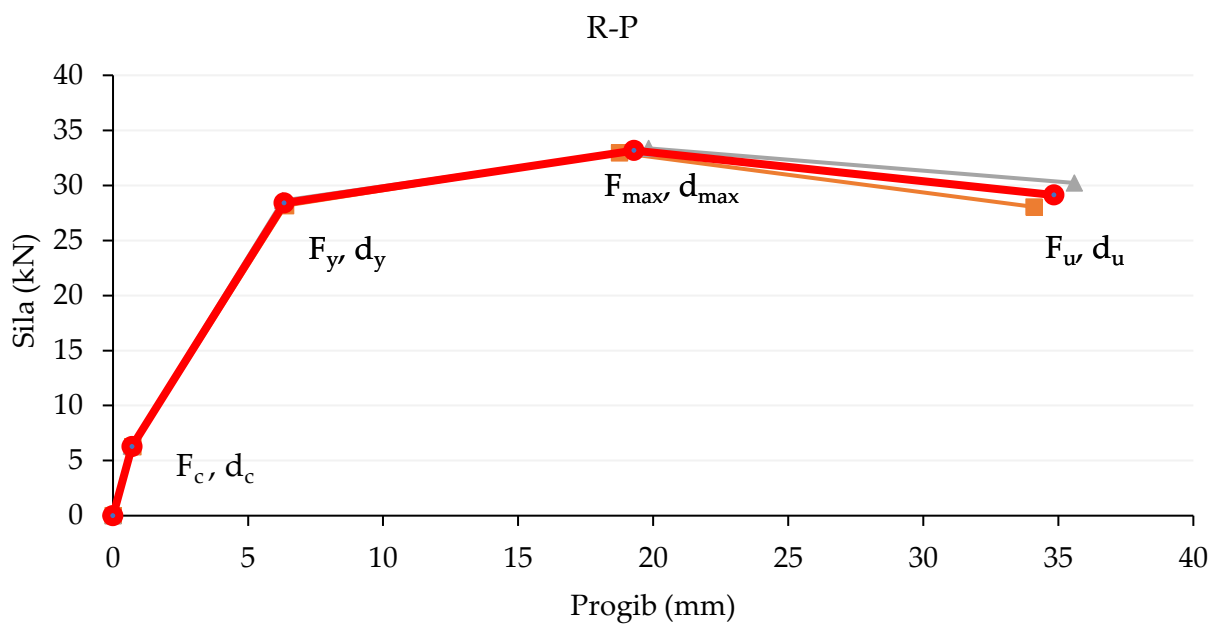
Na Slici 7.24. grafički je prikazan odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja za netretiranu referentnu mješavinu (R), a na Slici 7.25. prikazane su ključne točke ponašanja za navedenu betonsku mješavinu. Narančasto i sivo označene krivulje pripadaju pojedinačnim mjerenjima svake od dvije grede, a crvena je srednja vrijednost ta dva pojedinačna mjerenja. Na Slici 7.26. grafički je prikazan odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja za tretiranu referentnu mješavinu, a na Slici 7.27. prikazane su ključne točke ponašanja za navedenu mješavinu. Na Slici 7.28. grafički je prikazan odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja za netretiranu mješavinu M1, a na Slici 7.29.

prikazane su ključne točke ponašanja za navedenu betonsku mješavinu. Na Slici 7.30. grafički je prikazan odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja za tretiranu mješavinu M1, a na Slici 7.31. prikazane su ključne točke ponašanja za navedenu mješavinu. Na Slici 7.32. grafički je prikazan odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja za netretiranu mješavinu M2, a na Slici 7.33. prikazane su ključne točke ponašanja za navedenu betonsku mješavinu. Na Slici 7.34. grafički je prikazan odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja za tretiranu mješavinu M2, a na Slici 7.35. prikazane su ključne točke ponašanja za navedenu mješavinu.

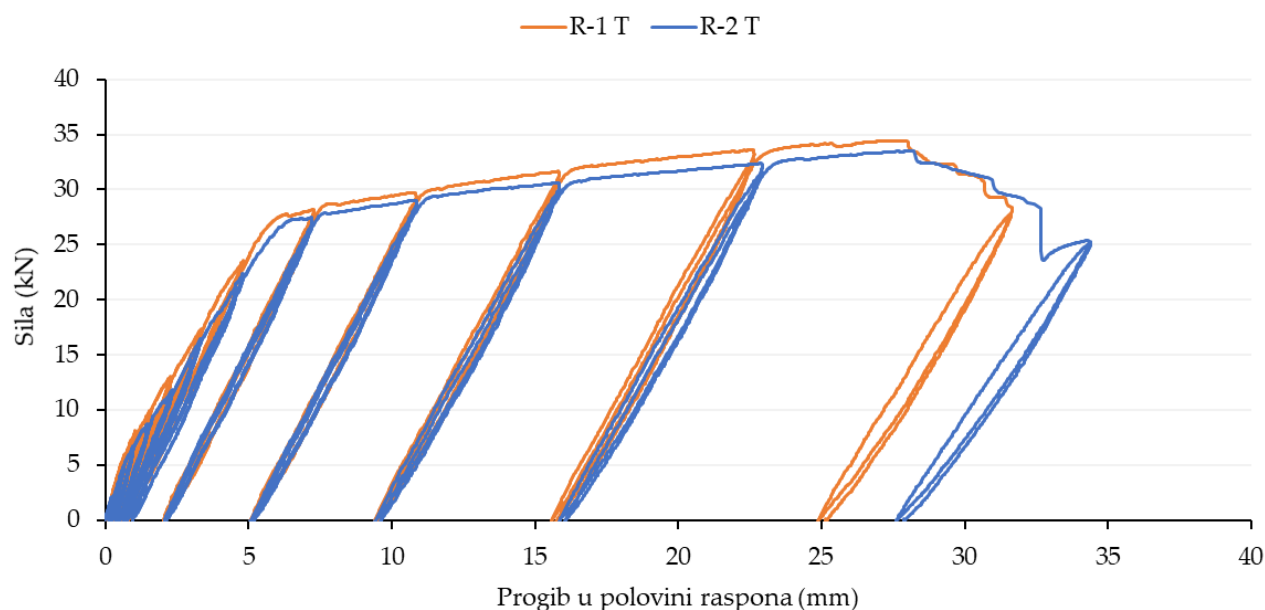
Pojašnjenja oznaka za sljedeće dijagrame su: 1 i 2 (prva i druga AB greda pojedine mješavine, P – netretirana (nesmrzavana) mješavina, T – tretirana (smrzavana) mješavina).



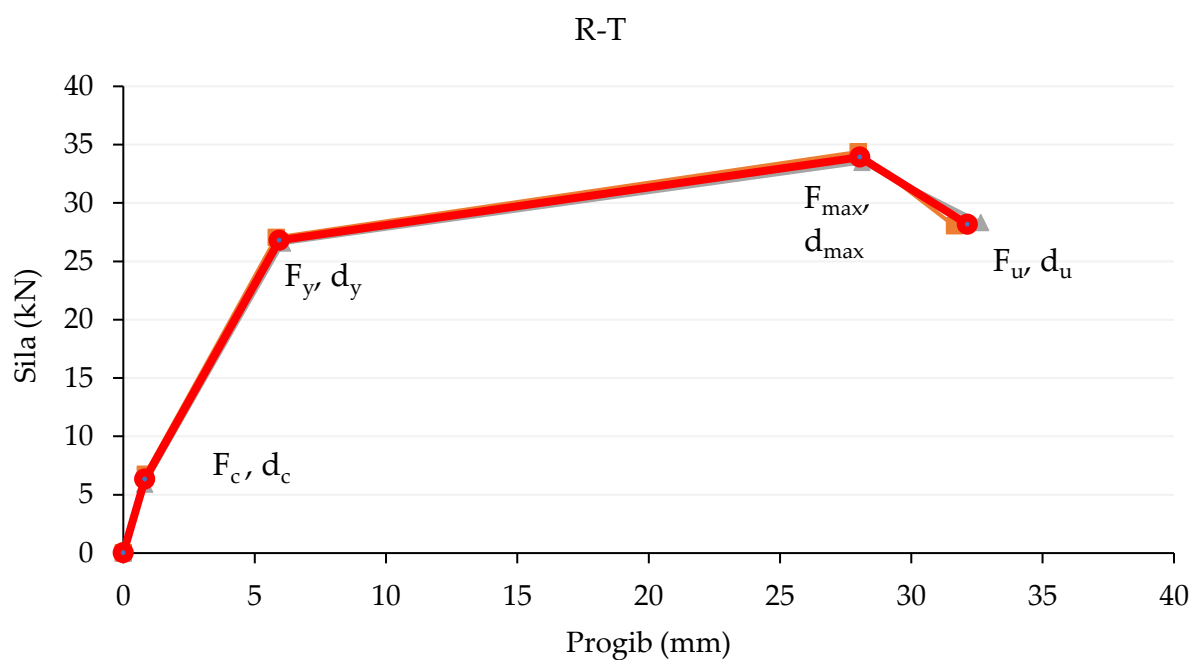
Slika 7.24. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (netretirana mješavina R)



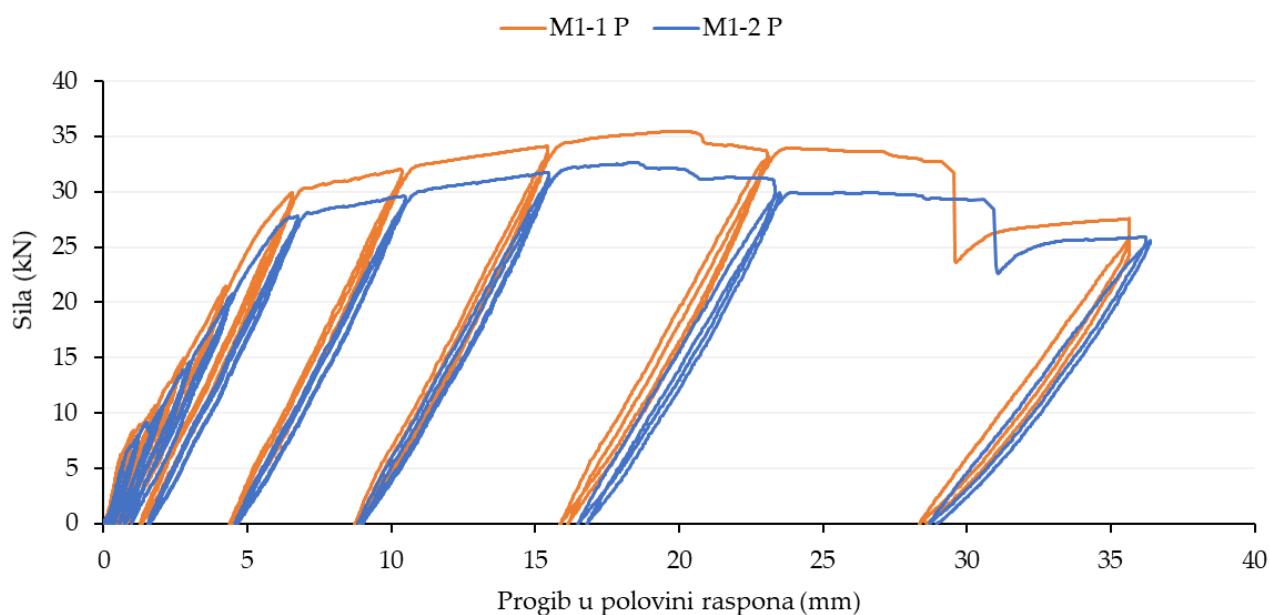
Slika 7.25. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (netretirana mješavina R)



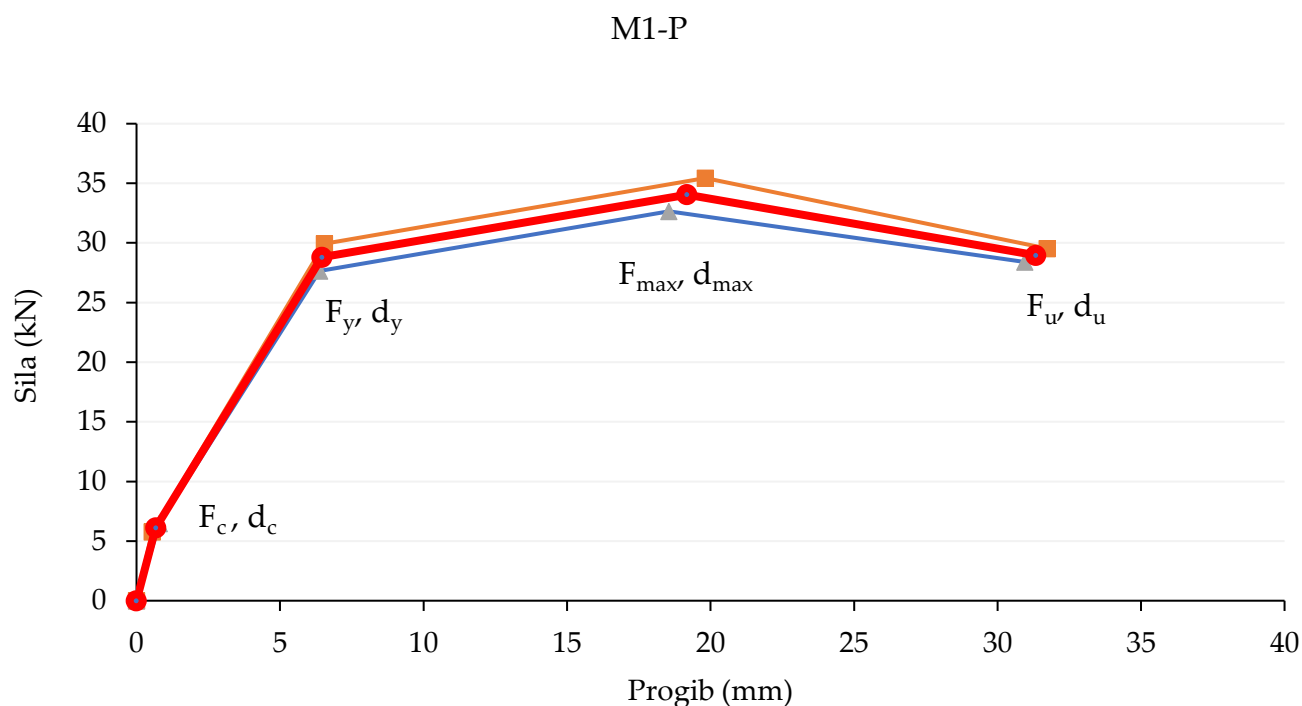
Slika 7.26. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina R – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)



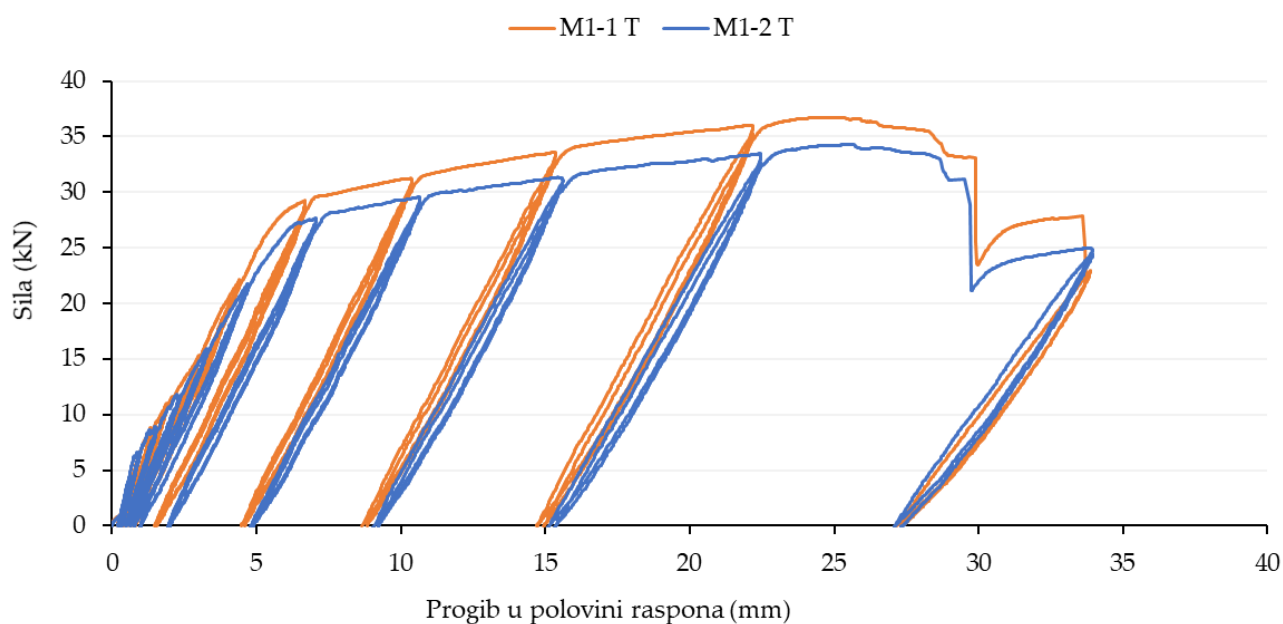
Slika 7.27. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina R– nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)



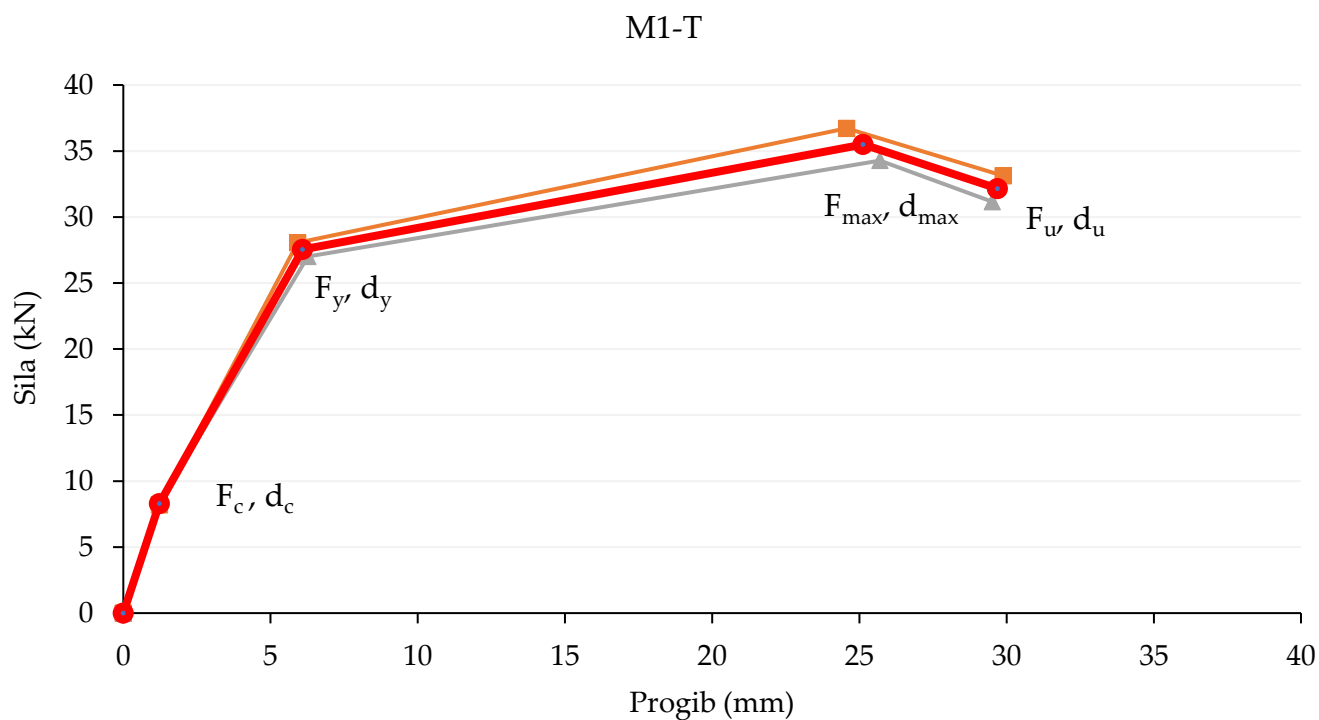
Slika 7.28. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M1 - netretirana)



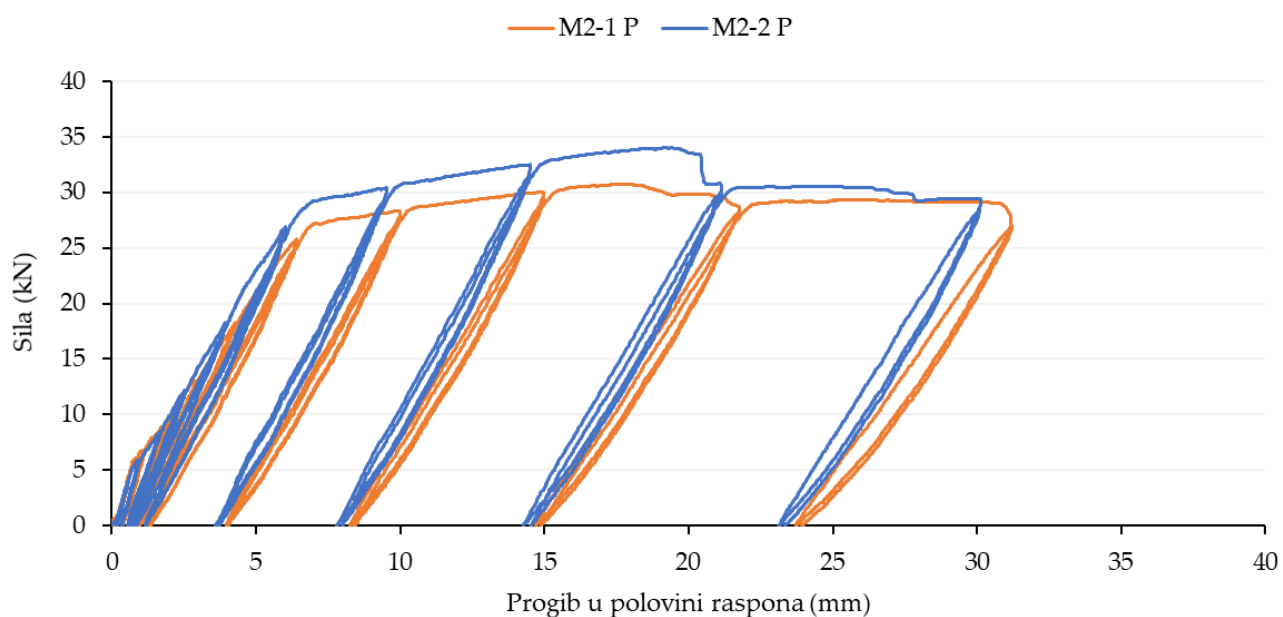
Slika 7.29. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M1- netretirana)



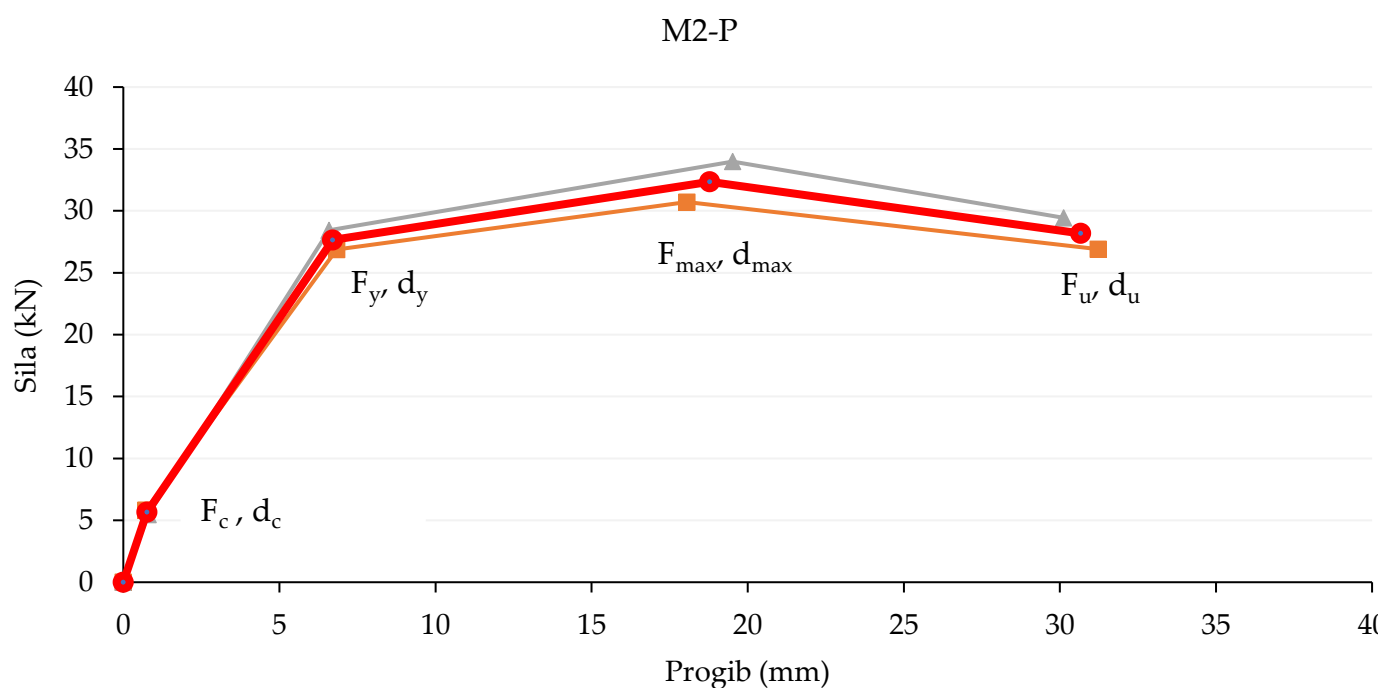
Slika 7.30. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M1 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)



Slika 7.31. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M1 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)

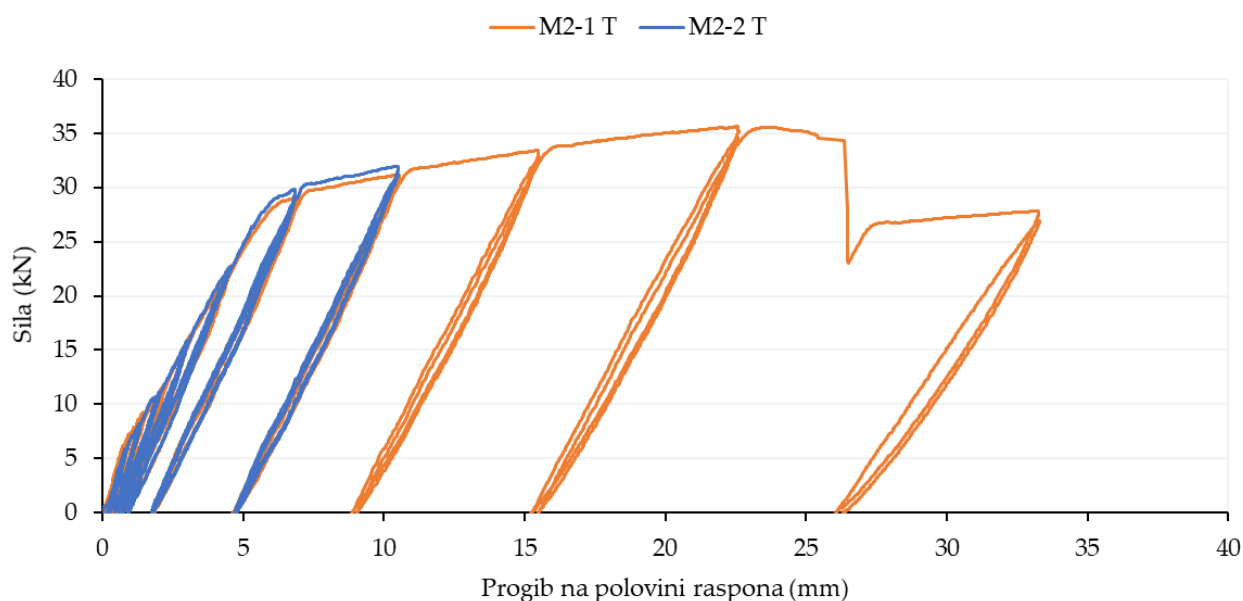


Slika 7.32. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M2- netretirana)

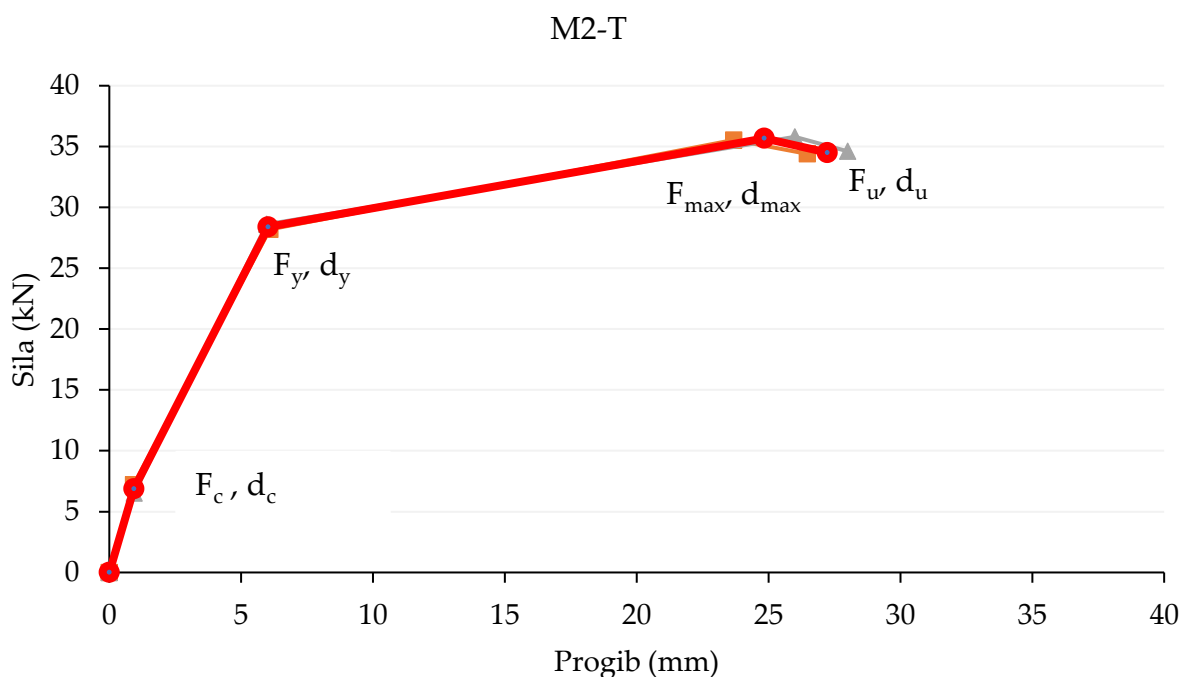


Slika 7.33. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M2- netretirana)

Na Slici 7.34. prikazan je odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja za mješavinu M2 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Uslijed nanošenja opterećenja na drugu AB gredu iste mješavine, došlo je do gubitka kontakta s uređajem za prikupljanje podataka uslijed kratkotrajnog nestanka električne energije, pa je iz tog razloga samo dio krivulje za koji su podaci bili prikupljeni nacrtan na dijagramu.



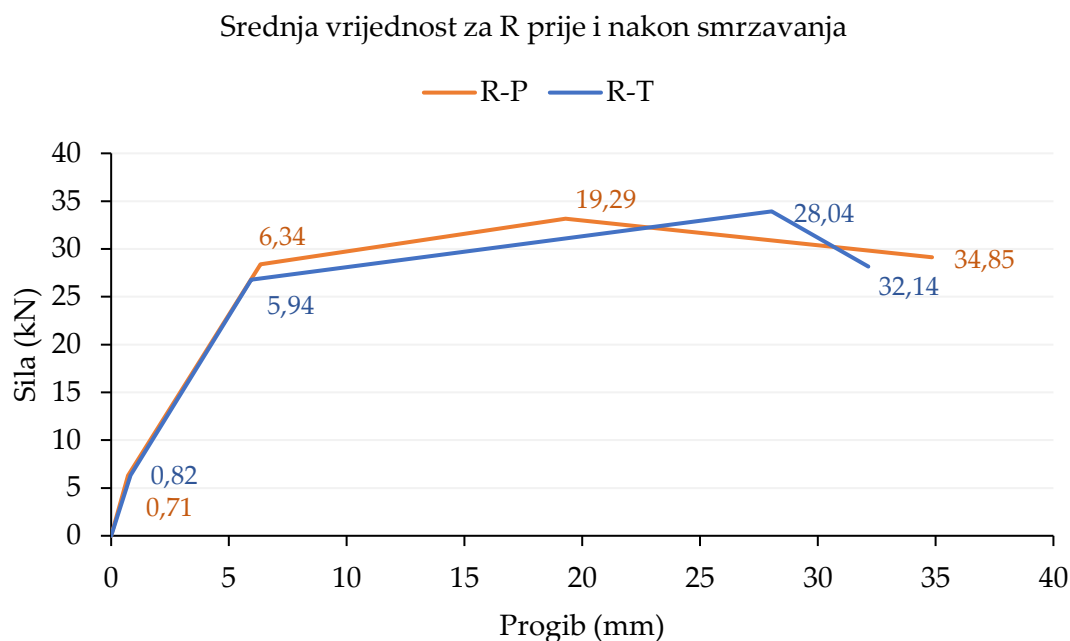
Slika 7.34. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona za sve cikluse opterećenja i rasterećenja (mješavina M2 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)



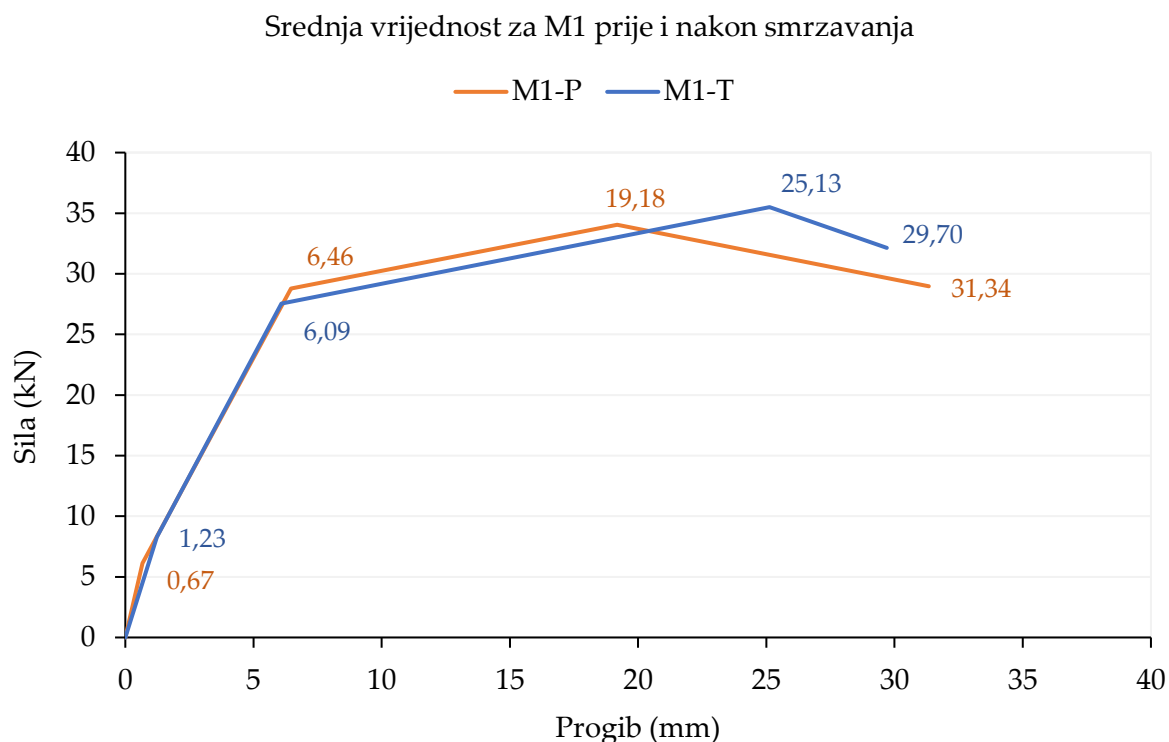
Slika 7.35. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz ključnih točaka ponašanja (mješavina M2 – nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)

Dokazana veća tlačna čvrstoća tretiranog u odnosu na netretirani beton ostvarena na kockama odgovorna je za značajnu razliku u maksimalnoj nosivosti tretiranih u odnosu na netretirane grede, kao što je i vidljivo iz grafova na Slikama 7.24.–7.35.

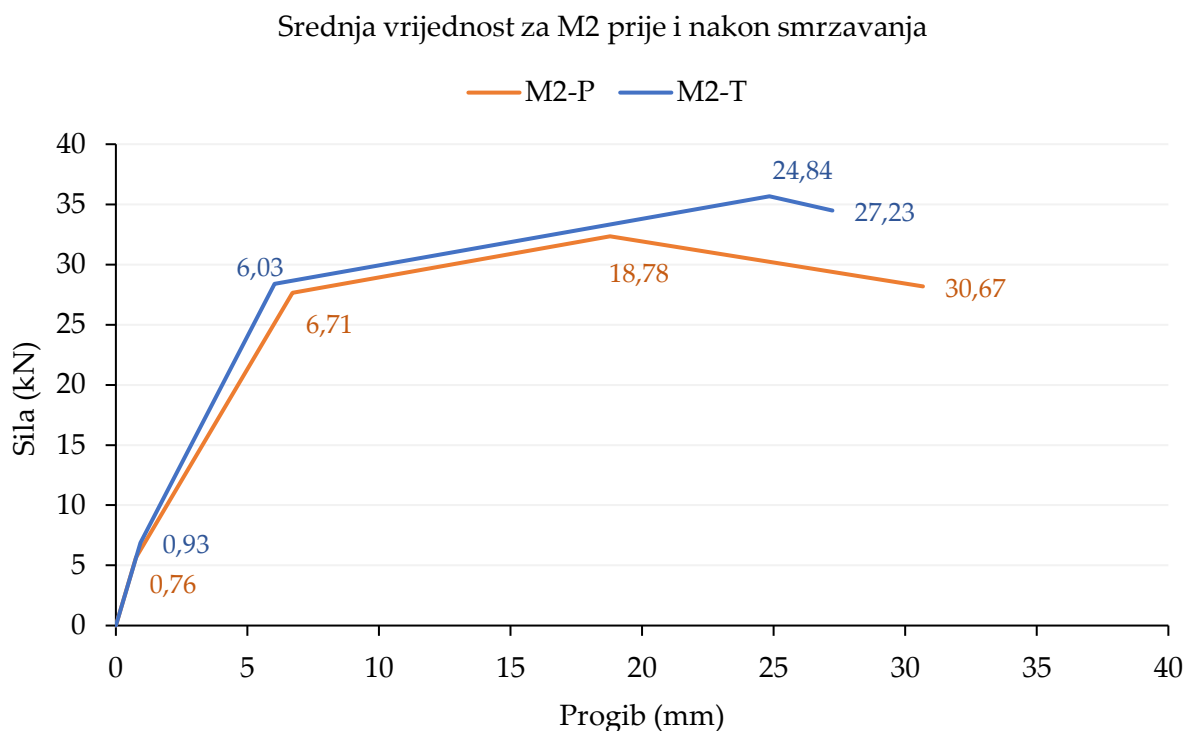
Srednja vrijednost odnosa sile i progiba prije i nakon tretiranja referentne mješavine R prikazana je na Slici 7.36., mješavine M1 na Slici 7.37., a mješavine M2 na Slici 7.38.



Slika 7.36. Usporedba ponašanja AB greda uslijed čistog savijanja za referentnu mješavinu R i grede R-P (netretirani uzorak) i R-T (tretirani uzorak) s prikazom karakterističnih točaka ponašanja



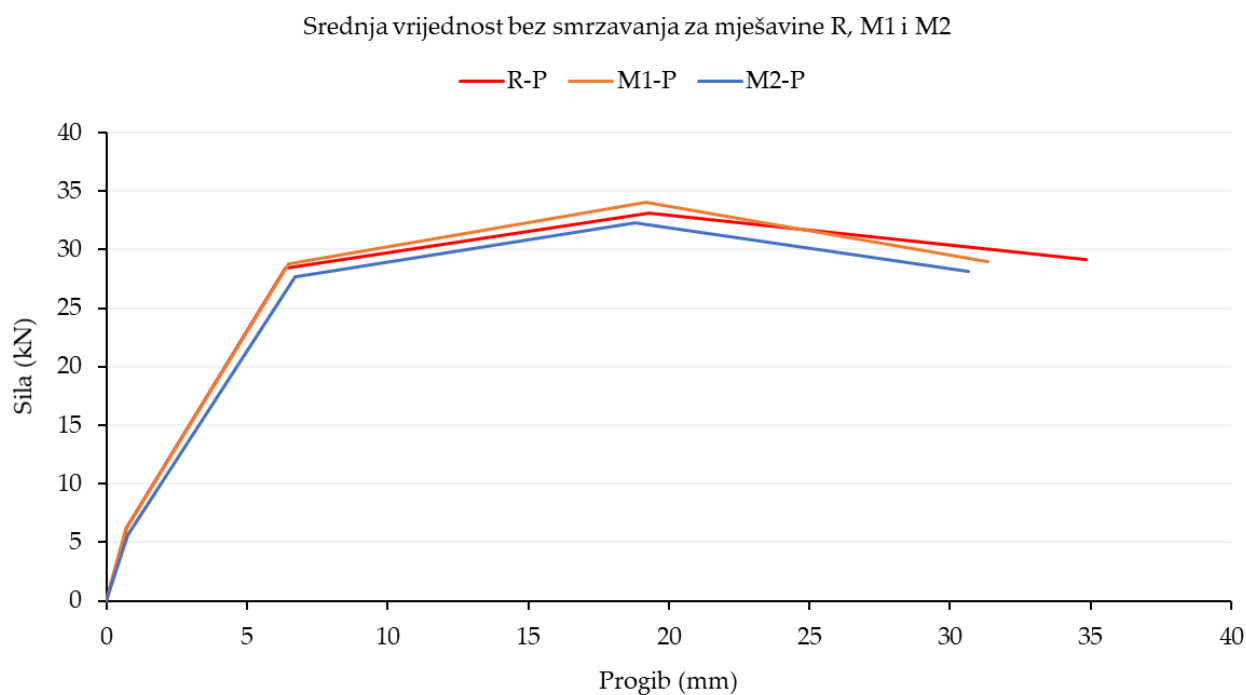
Slika 7.37. Usporedba ponašanja AB greda uslijed čistog savijanja za mješavinu M1 i grede M1-P (netretirani uzorak) i M1-T (tretirani uzorak) s prikazom karakterističnih točaka ponašanja



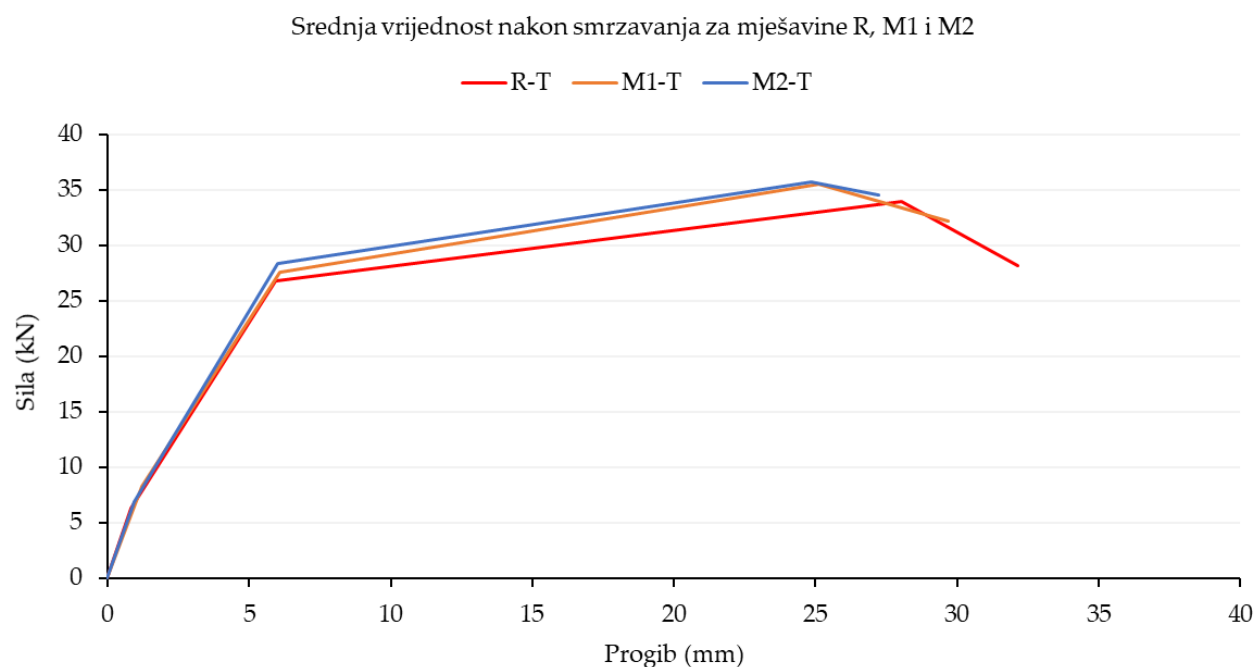
Slika 7.38. Usporedba ponašanja AB greda uslijed čistog savijanja za mješavinu M2 i grede M2-P (netretirani uzorak) i M2-T (tretirani uzorak) s prikazom karakterističnih točaka ponašanja

Iz Slika 7.36. do 7.38. vidljivo je da sve armiranobetonske grede ostvaruju veće progibe nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja nego bez izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja što još jednom potvrđuje da ovakav režim tretiranja uzoraka više pogoduje nego što štetno utječe na unutarnju strukturu armiranobetonskih greda. Omjer maksimalnih progiba tretiranih i netretiranih greda kod R grede iznosi 0,92; kod M1 greda 0,95; a kod M2 greda 0,89. Najbolje ponašanje je kod mješavine s kristalnim hidrofilni dodacima – M1, koja ima najveći omjer progiba nakon i prije tretiranja.

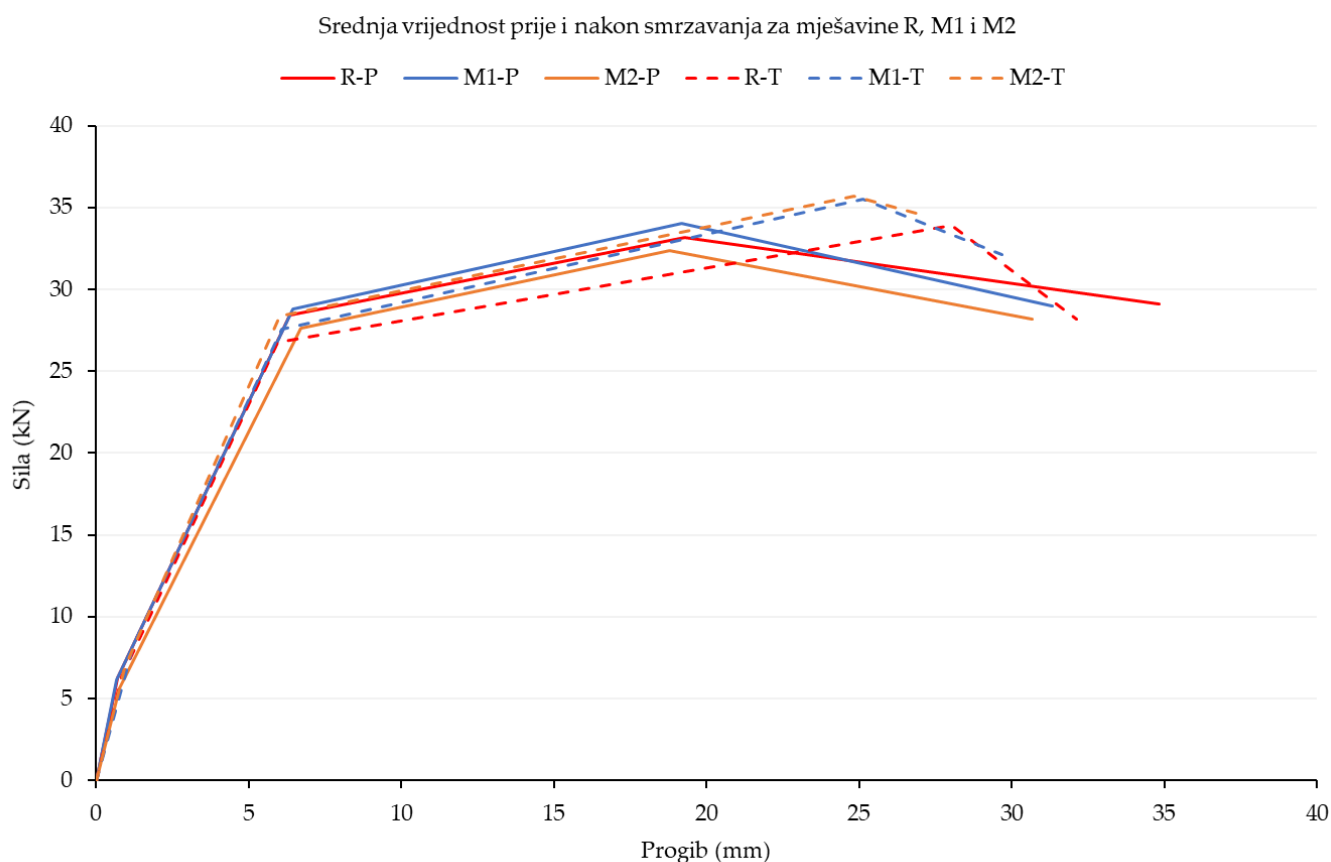
Srednje vrijednosti odnosa sile i progiba svih netretiranih mješavina prikazana je na Slici 7.39., a srednje vrijednosti odnosa sile i progiba svih tretiranih mješavina prikazana je na Slici 7.40. Srednje vrijednosti odnosa sile i progiba svih netretiranih i tretiranih mješavina prikazana je na Slici 7.41.



Slika 7.39. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz srednje vrijednosti ključnih točaka ponašanja (za sve tri mješavine)



Slika 7.40. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz srednje vrijednosti ključnih točaka ponašanja (za sve tri mješavine nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)

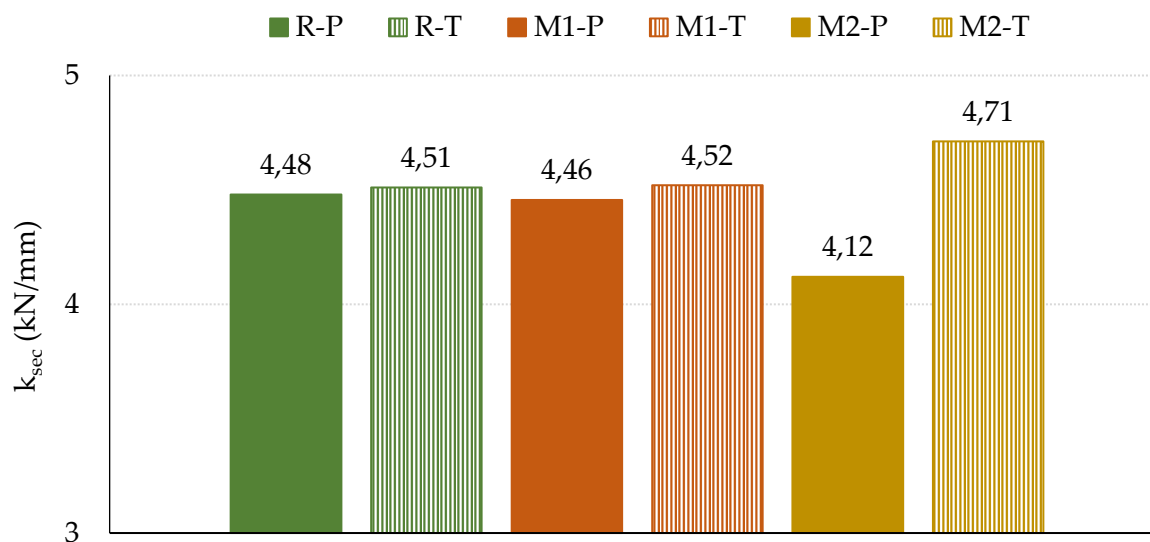


Slika 7.41. Odnos ukupne sile i progiba grede na polovini raspona – prikaz srednje vrijednosti ključnih točaka ponašanja (za sve tri mješavine prije i nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja)

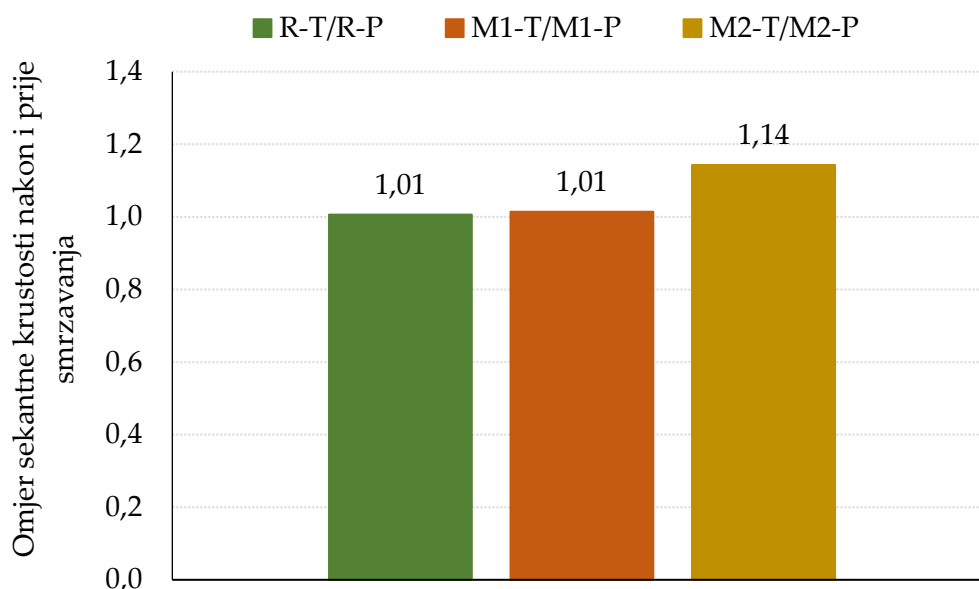
Najveća dosegnuta sila postignuta je na gredama mješavine M2 nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, zatim na gredama mješavine M1, pa na tretiranim gredama referentne mješavine. Sve grede pokazuju bolje rezultate nakon provedenih 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kao što je vidljivo na Slikama 7.39.–7.41.

Sekantna krutost zbog nelinearnog ponašanja greda prikazana je grafički na Slici 7.42. Kao što je vidljivo sa Slike 7.42. vrijednosti sekantne krutosti su podjednake za sve tretirane i netretirane mješavine. Prema dobivenim rezultatima, kod referentne i mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom tretiranje mješavina ne utječe na promjenu sekantne krutosti armiranobetonskih greda, međutim znatno utječe za mješavinu s dodatkom mikrokapsula. Dodatak mikrokapsula smanjuje sekantnu krutost armiranobetonskih greda, ali ciklusi smrzavanja i odmrzavanja pozitivno utječu i malo povećavaju sekantnu krutost (4 %) armiranobetonskih greda u odnosu na referentne grede (iako su to male promjene).

Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja pozitivno utječu i povećavaju sekantnu krutost. Vrijednost veća od 1 znači povećanje sekantne krutosti. Na Slici 7.43. iz omjera sekantne krutosti nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja vidljivo je kako su za mješavine R i M1 vrijednosti neznatno veće nakon tretiranja, a najviše vrijednosti sekantne krutosti vidljivo je kod mješavina s dodatkom mikrokapsula, gdje je povećanje zamjetno (14 %).



Slika 7.42. Sekantna krutost tretiranih i netretiranih greda



Slika 7.43. Omjer sekantne krutosti tretiranih i netretiranih greda

Duktilnost μ_1 (Slika 7.44.) iskazana je (7.6) odnosom progiba pri maksimalnoj nosivosti grede (d_{max}) u odnosu s progibom pri granici tečenja glavne uzdužne armature (d_y). Duktilnost μ_2 (Slika 7.46.) iskazana je (7.7) odnosom progiba pri ultimativnoj nosivosti grede (d_u) koja predstavlja točku potpunog gubitka nosivosti grede, u odnosu s progibom pri granici tečenja glavne uzdužne armature (d_y).

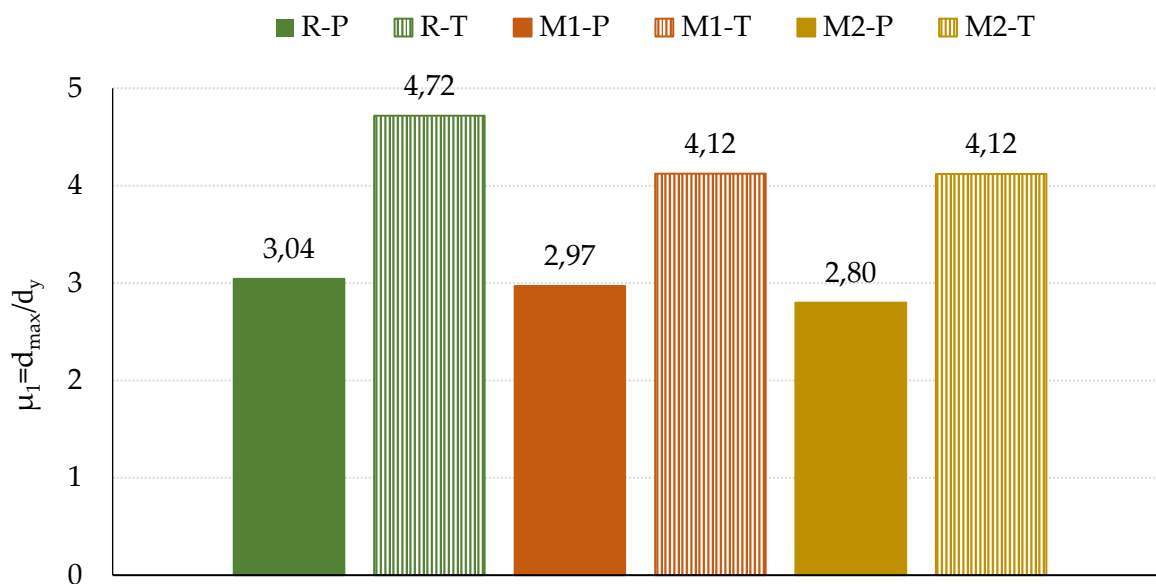
$$\mu_1 = \frac{d_{max}}{d_y} \quad (7.6)$$

$$\mu_2 = \frac{d_u}{d_y} \quad (7.7)$$

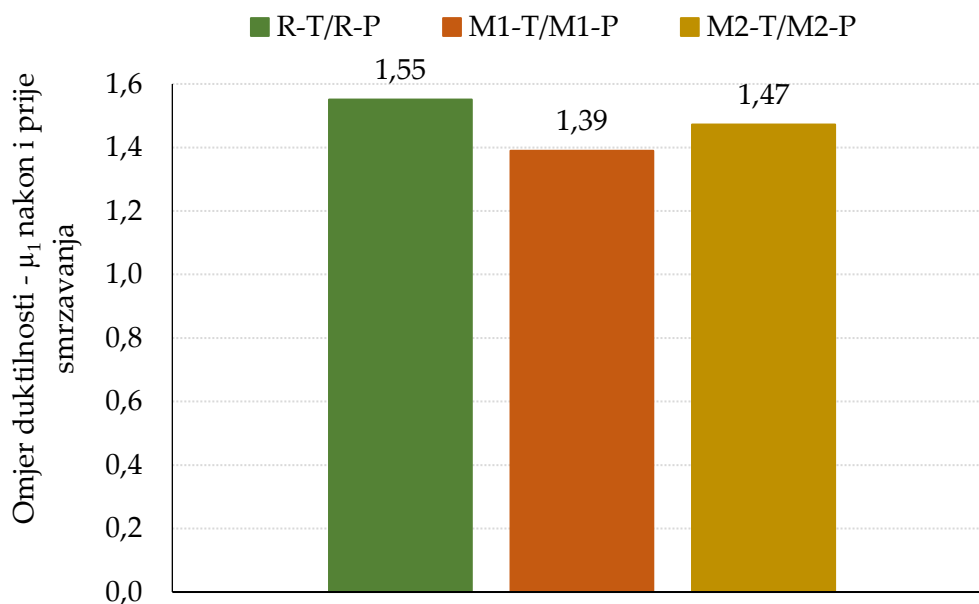
Budući da je ponašanje svih mješavina u gredama jednako samo do maksimalne nosivosti, relevantnija je usporedba duktilnosti s pomoću parametra μ_1 , gdje je doprinos duktilnosti betona zbog smrzavanja/odmrzavanja očigledno značajan.

Na Slikama 7.44. prikazane su duktilnosti μ_1 tretiranih i netretiranih greda, a na Slici 7.45. njihovi omjeri nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Vrijednosti duktilnosti nakon tretiranja su veće kod sve 3 mješavine, a prije tretiranja su gotovo jednaki rezultati kao za referentnu mješavinu. Tretirani uzorci imaju povećanje duktilnosti za 55 % u odnosu na netretirane, M2 za 47 %, a M1 za 39 %. Iz navedenog

se može zaključiti da ovakav režim tretiranja pogoduje uzorcima u ostvarivanju duktilnosti.



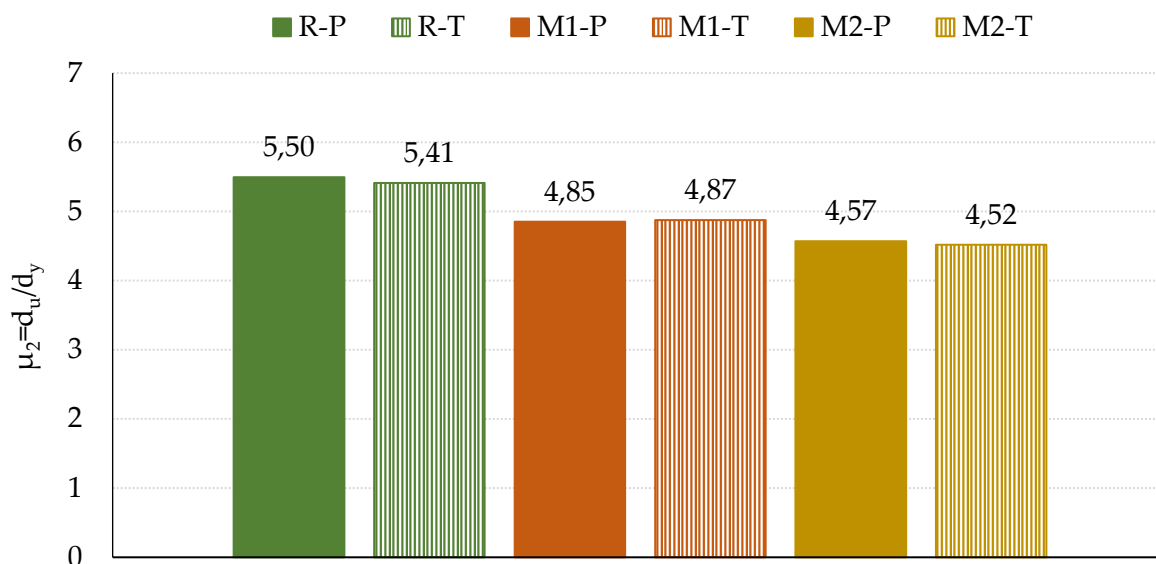
Slika 7.44. Duktilnost μ_1 tretiranih i netretiranih greda



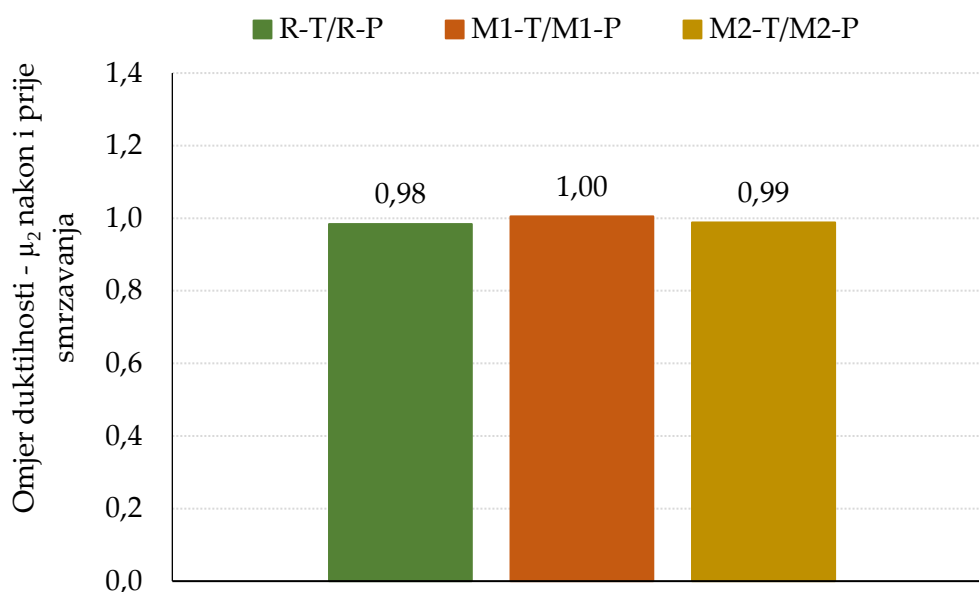
Slika 7.45. Omjer duktilnost μ_1 tretiranih i netretiranih greda

Na Slikama 7.46. prikazana je duktilnost μ_2 tretiranih i netretiranih greda, a na Slici 7.47. njihovi omjeri. Mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom i dodatkom

mikrokapsula utječu na smanjenje vrijednosti duktilnosti u odnosu na referentnu mješavinu. Rezultati ispitivanja greda nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pojedinih mješavina su gotovo jednaki.

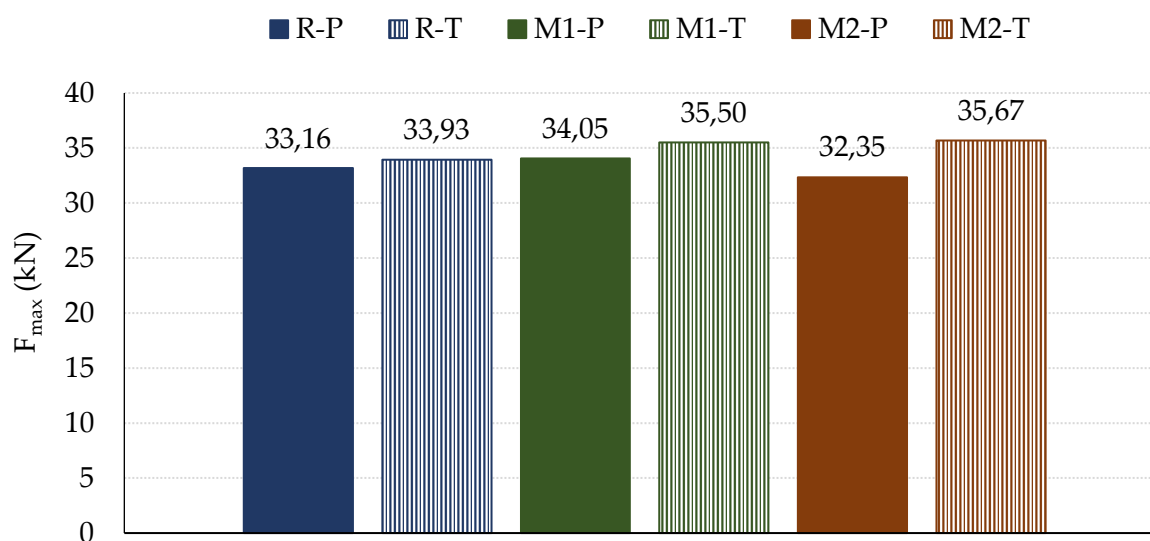


Slika 7.46. Duktilnost μ_2 tretiranih i netretiranih greda

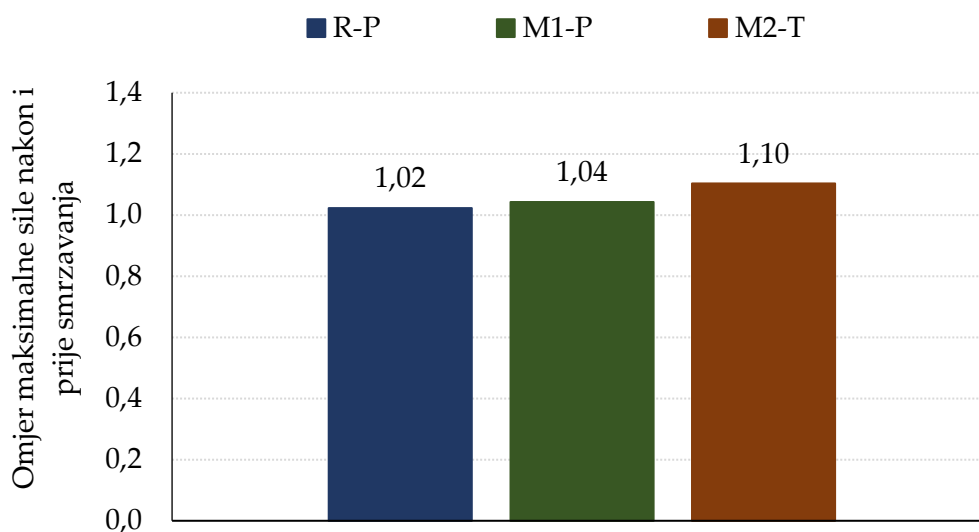


Slika 7.47. Omjer duktilnost μ_2 tretiranih i netretiranih greda

Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja imaju pozitivan učinak, jer povećavaju maksimalnu silu. Što je veći omjer, to je utjecaj tretiranja veći. Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja znatno utječu kod greda izrađenih od betona s dodatkom mikrokapsula te u konačnici dostižu veću silu nego referentne mješavine. Na Slici 7.48. prikazane su maksimalne sile tretiranih i netretiranih greda, a na Slici 7.49. njihovi omjeri. Povećanje maksimalne sile od 10 % nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja je kod mješavine M2, povećanje od 4 % kod greda mješavine M1, a grede mješavine R ostvarile su povećanje od 2 % u odnosu na netretirane grede.



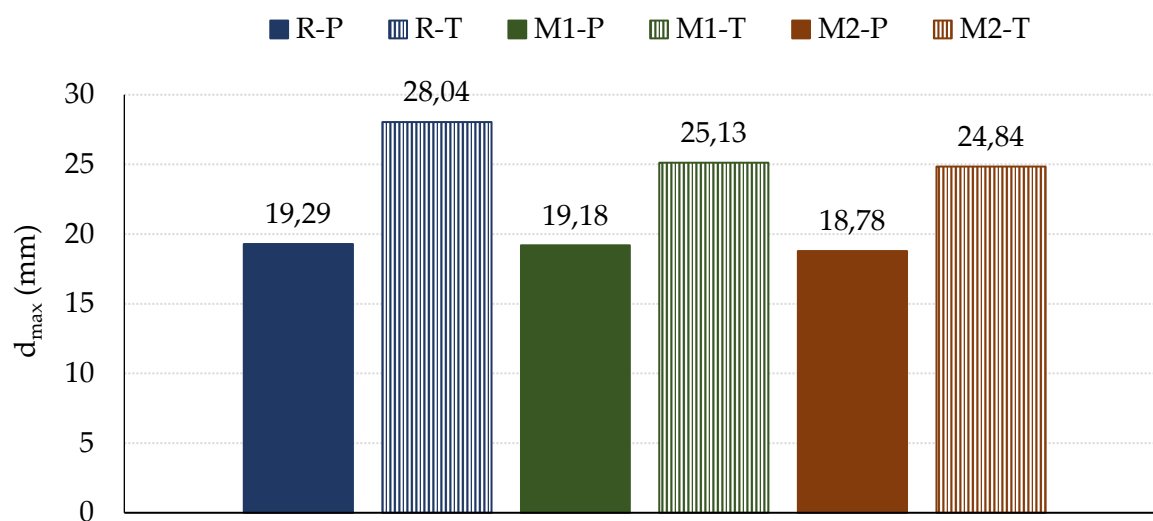
Slika 7.48. Maksimalna sila tretiranih i netretiranih greda



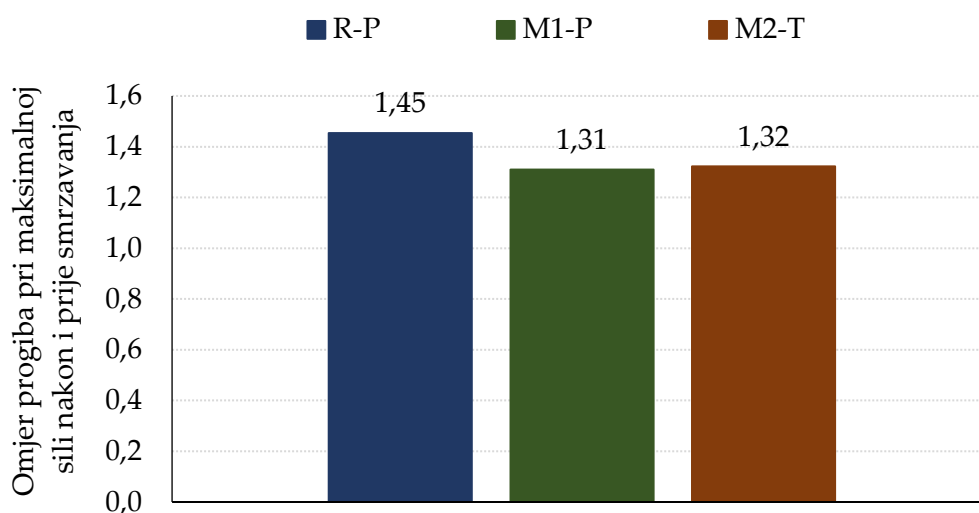
Slika 7.49. Omjer maksimalne sile tretiranih i netretiranih greda

Iako razlika u nosivosti nije značajna (Slika 7.49.), za tretirane grede ova razlika je dovoljna da se značajno veći progib (Slika 7.50.) ostvari prije prekoračenja tlačne čvrstoće betona i potom njegovog drobljenja. Posljedica spomenutih većih progiba je značajno veća duktilnost tretiranih u odnosu na netretirane grede.

Na Slikama 7.50. prikazan je progib pri maksimalnoj sili tretiranih i netretiranih greda, a na Slici 7.51. njihovi omjeri. Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja najveći utjecaj imaju na referentnu mješavinu. Iz Slike 7.51. vidljivo je kako je povećanje progiba pri maksimalnoj sili tretiranih greda u odnosu na netretirane grede veći za 45 % kod referentne mješavine i veći za 31 % i 32 % kod mješavina M1 i M2.



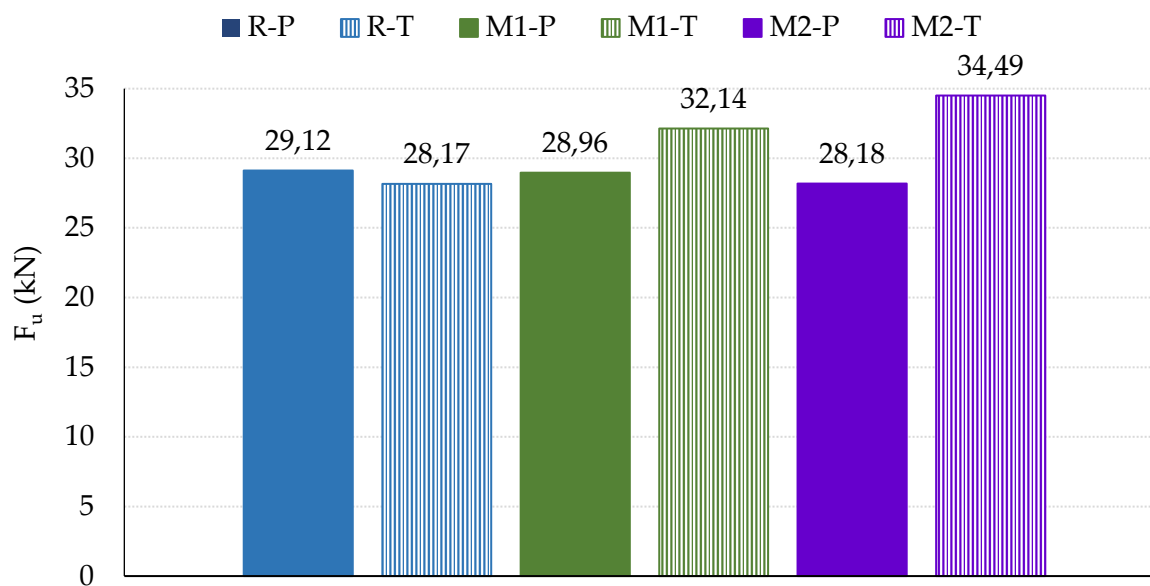
Slika 7.50. Progib pri maksimalnoj sili tretiranih i netretiranih greda



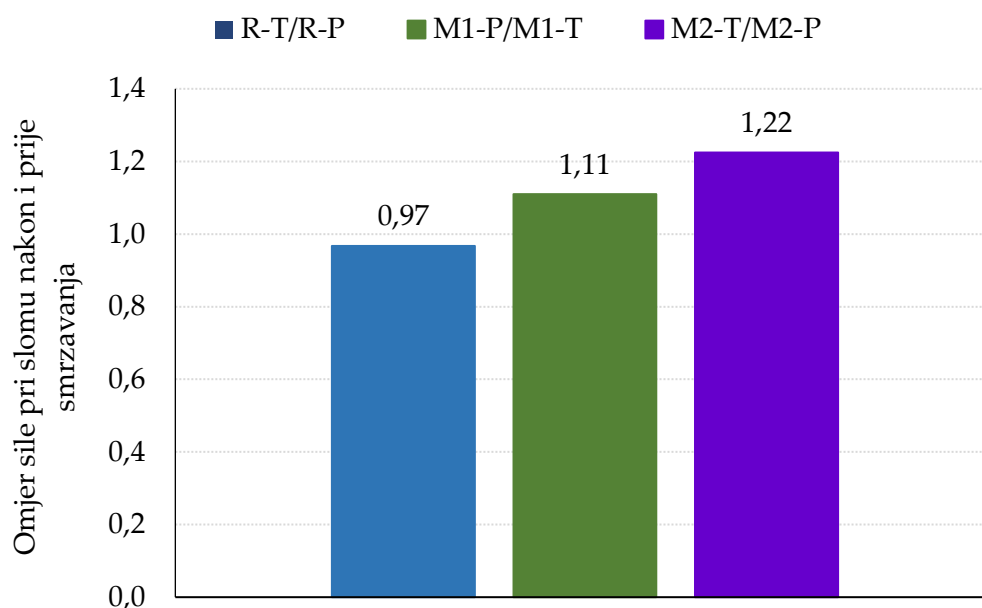
Slika 7.51. Omjer progiba pri maksimalnoj sili tretiranih i netretiranih greda

Vrijednost omjera manja od 1 znači da je ciklusima smrzavanja i odmrzavanja došlo do smanjenja sile pri slomu, a vrijednosti veće od 1 znače da su ciklusi smrzavanja i odmrzavanja pozitivno utjecali. Došlo je do povećanja sile pri slomu. Osobit je utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kod greda izrađenih od betona s dodatkom mikrokapsula. Postignute su veće vrijednosti sile pri slomu od referentnih greda. Na Slici 7.52. prikazane su sile pri slomu tretiranih i netretiranih greda, a na Slici 7.53. njihovi omjeri nakon i prije smrzavanja. Iz Slike 7.52. vidljivo je kako sve tri mješavine imaju približno jednaku vrijednost postignute sile pri slomu, dok je kod

sila pri slomu nakon tretiranja postignuto povećanje te sile, za 22 % kod greda mješavine M2 i 11 % kod greda mješavine M1, a kod greda referentne mješavine smanjenje za 3 % (Slika 7.53.), što dovodi do zaključka da ciklusi smrzavanja i odmrzavanja imaju pozitivan učinak, jer povećavaju silu pri slomu (kod mješavina M1 i M2).

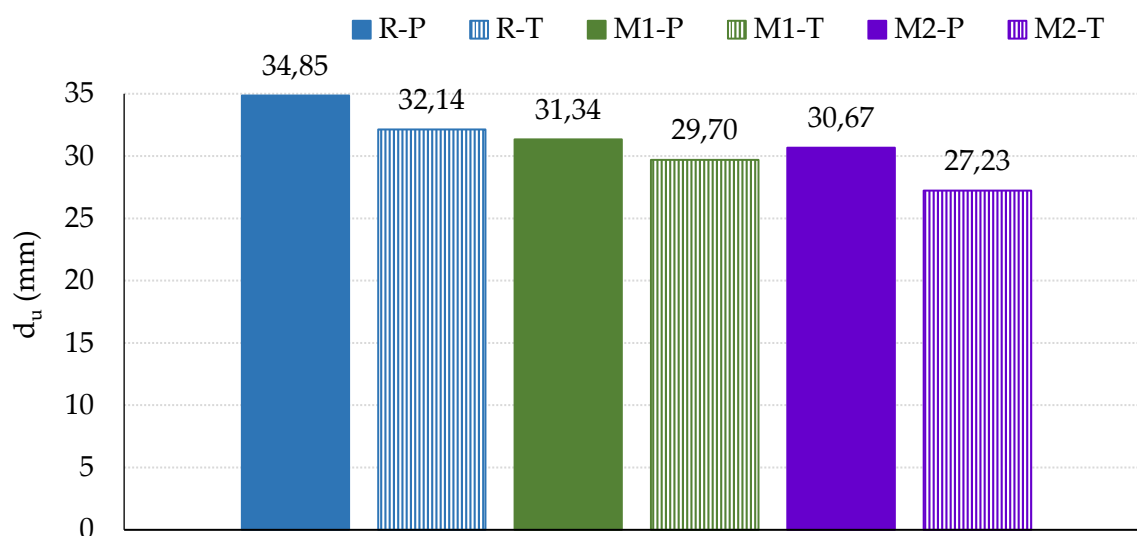


Slika 7.52. Sila pri slomu tretiranih i netretiranih greda

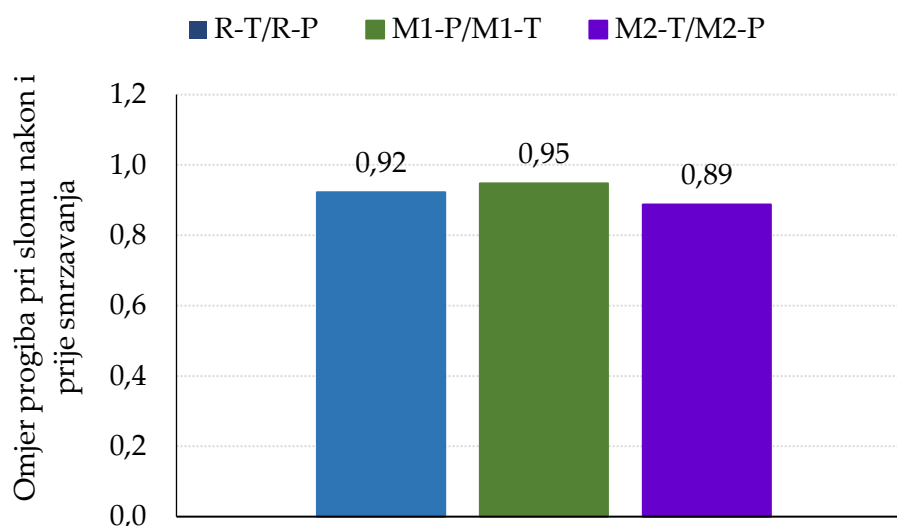


Slika 7.53. Omjer sila pri slomu tretiranih i netretiranih greda

Na Slikama 7.54. prikazan je progib pri slomu tretiranih i netretiranih greda, a na Slici 7.55. njihovi omjeri. Iz Slike 7.55. vidljivo je kako je progib pri slomu tretiranih greda u odnosu na netretirane grede manji za 8 % kod referentne mješavine te manji za 5 % i 11 % kod mješavina M1 i M2. Rezultati dovode do zaključka kako kristalni hidrofilni dodaci i mikrokapsule smanjuju silu pri slomu, ali i progibe pri slomu. Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja još više smanjuju progibe.



Slika 7.54. Progib pri slomu tretiranih i netretiranih greda



Slika 7.55. Omjer progiba pri slomu tretiranih i netretiranih greda

U pravilu betoni većih čvrstoća imaju i proporcionalno veći modul elastičnosti, što je prikazano u tablicama na početku poglavlja. Stoga je i očekivano da mješavina M2-T, koja ima najveću tlačnu čvrstoću posjeduje i najveći modul elastičnosti i time doseže najveću nosivost grede uz najmanji pripadajući progib u odnosu na sve ostale tretirane i netretirane mješavine što je i vidljivo iz grafova prikazanih na Slikama 7.54. i 7.55.

7.7. Ocjena učinkovitosti svake pojedine mješavine betona prema ispitanom svojstvu otpornosti betona i armiranobetonskih greda

Tablica 7.8. prikazuje ocjenu učinkovitosti svake pojedine mješavine betona i armiranobetonskih greda od najbolje (broj 1) do najlošije (broj 3) prema svim ranije navedenim ispitanim svojstvima.

Tablica 7.8. Sumirani prikaz učinkovitosti betona i armiranobetonskih greda za sve metode

Ispitano svojstvo / mješavina		R	M1	M2
Indirektni postupci ispitivanja otpornosti kocaka i armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	Omjer tlačne čvrstoće nakon 56 dana ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kocaka i kocaka ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi (max.)	2	1	3
	Relativni dinamički modul elastičnosti na kockama nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (max.)	1	2	3
	Upijanje vode kocaka nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (min.)	1	3	2
	Relativni dinamički modul elastičnosti na armiranobetonskih gredama nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (max.)	1	2	3
	Upijanje vode armiranobetonskih greda nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (min.)	2	1	3
Direktni postupci ispitivanja otpornosti armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja	Omjer sekantne krutosti tretiranih i netretiranih greda	3	2	1
	Omjer duktilnost μ_1 tretiranih i netretiranih greda	1	3	2
	Omjer duktilnost μ_2 tretiranih i netretiranih greda	3	1	2
	Omjer najvećih sila tretiranih i netretiranih greda	3	2	1
	Omjer progiba pri najvećoj sili tretiranih i netretiranih greda (min.)	3	1	2
	Omjer sila pri slomu greda tretiranih i netretiranih greda	3	2	1

	Omjer progiba pri slomu tretiranih i netretiranih greda (min.)	2	3	1
--	--	---	---	---

Tablica 7.8. pokazuje da je u pogledu omjera tlačne čvrstoće smrzavanih i nesmrzavanih uzoraka mješavina M1 pokazuje najbolju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, a slijede je mješavine R i M2. U pogledu relativnih dinamičkih modula elastičnosti rezultati ostvareni na kockama su sukladni onima na gredama i rangiraju mješavinu R kao mješavinu najbolje otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja a slijede je mješavine M1 i M2. Upijanje vode na kockama rangira mješavinu R kao najotporniju a slijede je mješavine M2 i M1, dok upijanje vode na gredama rangira mješavinu M1 kao najotporniju na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, a slijede je mješavine R i M2.

Sekantna krutost najveća je kod mješavine R, a najmanja kod mješavine M2. Međutim, ciklusi smrzavanja i odmrzavanja povoljno utječu i povećavaju sekantnu krutost te su rezultati kod tretiranih greda suprotni, tj. najveća sekantna krutost je dostignuta kod mješavine M2, a najmanja kod R. To je vidljivo omjerom sekantne krutosti tretiranih i netretiranih greda, koji je najveći kod mješavine M2, a najmanji kod mješavine R.

Isti rezultati su postignuti i kod duktilnosti μ_1 iako je najveća duktilnost dobivena kod greda R, a najmanja kod M2, nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja dobiveni su najveći omjeri duktilnost μ_1 tretiranih i netretiranih greda za M2, a najmanji za R.

Međutim, kod duktilnost μ_2 nisu dobiveni ovakvi rezultati. Najveće vrijednosti duktilnosti dostignute su kod greda R, a najmanje kod M2, međutim ciklusi smrzavanja i odmrzavanja smanjili su vrijednosti duktilnosti μ_2 , osim kod greda M1. Stoga je omjer duktilnost μ_2 tretiranih i netretiranih greda najbolji za grede M1. Iako je duktilnost greda M2 manja od duktilnosti greda R, smanjenje nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja je manje kod greda M2.

Najveće vrijednosti maksimalne sile dostignute su kod greda R, a najmanje kod M2, međutim ciklusi smrzavanja i odmrzavanja povećali maksimalnu silu i postignuta je

najveća kod greda M2, a najmanja kod greda R. Progib pri maksimalnoj sili najmanji je kod greda M1, zatim slijede R i M2.

Isti rezultati kao kod maksimalne sile dobiveni su i kod sile pri slomu. Najveće vrijednosti sile pri slomu dostignute su kod greda R, a najmanje kod M2, dok su ciklusi smrzavanja i odmrzavanja povećali silu pri slomu i postignuta je najveća kod greda M2, a najmanja kod greda R. Progib pri slomu najmanji je kod greda M2, zatim slijede R i M1.

Iz svega navedenog, opći zaključak je da ciklusi smrzavanja i odmrzavanja pozitivno utječu na svojstva koja utječu na nosivost armiranobetonskih greda te da ih utjecaj dodataka neće narušiti ako konstrukcijski element bude izložen ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

8. Zaključak

U eksperimentalnom dijelu rada na razini materijala spravljeno je 8 betonskih mješavina, prvih šest mješavina je s dodatkom superplastifikatora (referentna mješavina, mješavina s aerantom, mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka, mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka, mješavina s 1 % mikrokapsula, mješavina s 3 % mikrokapsula, mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka bez dodatka superplastifikatora, mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka bez dodatka superplastifikatora). Procjena otpornosti betonskih mješavina na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ispitana je direktnim postupcima ispitivanja otpornosti s pomoću: mjerenjem ljuštenja i unutarnjeg oštećenja betona pri njegovoj izloženosti djelovanju smrzavanja i odmrzavanja uz prisustvo vode te vode i soli uz mjerenje temperature u uzorku te faktorom razmaka pora. Indirektni postupci ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ispitani su s pomoću: promjene dinamičkog modula elastičnosti uslijed smrzavanja i odmrzavanja, određivanjem tlačne i vlačne čvrstoće betona prije i nakon smrzavanja te određivanjem dubine prodora vode pod tlakom prije i nakon smrzavanja. Za potrebe interpretacije rezultata određeni su udio pora pojedine veličine živinom porozimetrijom, raspodjela pora i njihova povezanost mikrotomografijom te SEM/EDS analiza na uzorcima tretiranim i netretiranim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja kao i praćenje širine pukotina tijekom procesa samocijeljenja na uzorcima tretiranim i netretiranim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

Mjerenje temperature u uzorcima betona tijekom 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja s pomoću termoparova tip T pokazalo je kako su odstupanja u temperaturi tijekom ciklusa u betonskim mješavinama zanemariva.

Rezultati ispitivanja gubitka mase betona ljuštenjem bez soli kao i rezultati ispitivanja količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez dodatka soli pokazuju najmanje ljuštenje kod mješavine s aerantom. Manji vodocementni omjer pokazao je bolje rezultate ljuštenja

od mješavina s većim vodocementnim omjerima. Također manji udjeli kristalnog hidrofilnog dodatka i mikrokapsula pokazali su manje ljuštenje od onih mješavina s većim udjelima navedenih dodataka. Rezultati ispitivanja gubitka mase betona ljuštenjem sa soli kao i rezultati ispitivanja količine oljuštenog materijala po jedinici površine uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli pokazuju najmanje ljuštenje također kod mješavine s aerantom, zatim kod mješavina s 1 % i 3 % mikrokapsula. Također manji udjeli kristalnog hidrofilnog dodatka pokazali su puno manje ljuštenje od onih mješavina s većim udjelima navedenog dodatka.

Oštećenje unutarnje strukture betona pratilo se mjerenjem vremena prolaska ultrazvučnog impulsa s pomoću kojeg se računa relativni dinamički modul elastičnosti koji služi kao mjera oštećenja unutarnje strukture betona. Ovo oštećenje pratilo se na istim šnitama betona na kojima je praćeno i ljuštenje. Najveći relativni dinamički modul elastičnosti nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja bez soli je kod mješavine s aerantom, zatim kod mješavine s 3 % mikrokapsula, zatim kod mješavine s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka, zatim kod mješavine s 1 % mikrokapsula, pa mješavine s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka. Najlošije rezultate otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja uslijed unutarnjeg oštećenja betonske strukture bilježe mješavine s većim vodocementnim omjerom bez dodatka superplastifikatora s kristalnim hidrofilnim dodatkom i referentna mješavina. Ispitivanje relativnog dinamičkog modula elastičnosti nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa soli pokazuju najbolje rezultate kod mješavine s aerantom, zatim kod mješavine s 3 % mikrokapsula, zatim kod mješavine s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka, zatim kod referentne mješavine pa kod mješavine s 1 % mikrokapsula. Najlošije rezultate otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja uslijed unutarnjeg oštećenja betonske strukture kao i kod ispitivanja bez soli bilježe mješavine s većim vodocementnim omjerom (bez dodatka superplastifikatora) s kristalnim hidrofilnim dodatkom. Rezultati ispitivanja unutarnjih oštećenja uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pokazuju jednake rezultate neovisno o tome jesu li uzorci bili

prekriveni slojem vode s ili bez soli.

Otpornost betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja procijenjena je i s pomoću faktora razmaka pora. Ovaj faktor se više koristi za predviđanje ponašanja betona u uvjetima smrzavanja/odmrzavanja, nego za praćenje stvarnog ponašanja betona u takvim uvjetima. Na temelju dobivenih rezultata zaključeno je da najučinkovitiju zaštitu od površinskih i unutarnjih oštećenja betona osigurava standardno korišteni aerant i dodatak mikrokapsula u doziranju od 3 % mase cementa, dok kristalni hidrofilni dodatak ima potencijal poboljšati otpornost betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja u kontekstu smanjenja unutarnjeg oštećenja samo ako se koristi u masenom doziranju od 1 % mase cementa. Zamjena cementa od 3 % s kristalnim hidrofilnim aditivom pokazala je negativan učinak na otpornost betona na cikluse smrzavanja/odmrzavanja u smislu povećanja površinskih i unutarnjih oštećenja.

Osim na šnitama betona, dinamički modul elastičnosti ispitan je na kockama i prizmama svih betonskih mješavina. Kocke betona od mješavine s 1 % zamjene mase cementa s mikrokapsulama ima povećanje relativnog dinamičkog modula elastičnosti nakon izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Kocke mješavine s 3 % zamijene mase cementa s mikrokapsulama imaju gotovo jednak rezultat relativnog dinamičkog modula elastičnosti kao i prije izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, dok preostale mješavine betona bilježe trend smanjivanja relativnog dinamičkog modula elastičnosti tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Najlošije rezultate pokazali su se na kockama mješavine s 3 % zamijene mase cementa s kristalnim hidrofilnim dodatkom bez superplastifikatora, s većim vodocementnim omjerom te kocke referentne mješavine. Ispitivanje relativnog dinamičkog modula elastičnosti betonskih prizmi pokazali su kako sve betonske mješavine pokazuju lošiji rezultat od početnog tijekom izlaganja ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, najmanji pad relativnog modula elastičnosti zabilježen je kod mješavine s 1 % zamijene mase cementa s mikrokapsulama, a najveći kod

mješavine s 3 % zamijene mase cementa s kristalnim hidrofilnim dodatkom bez superplastifikatora i s većim vodocementnim omjerom.

Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti kocaka i prizmi nakon i prije 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pokazuju najbolji rezultat kod mješavine s 1 % zamijene mase cementa s mikrokapsulama, zatim kod mješavine s 3 % zamijene mase cementa s mikrokapsulama. Najlošije rezultate pokazuju mješavine s aerantom i mješavine s većim vodocementnim omjerom.

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pokazuju kako veći udio dodatka (3 % mikrokapsula, 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka i dodatak aeranta) umanjuju tlačnu čvrstoću betonskih uzoraka. Uspoređujući omjere tlačnih čvrstoća nakon i prije ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, najbolji rezultat ostvaruju mješavine s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka i mješavina s 1 % mikrokapsula, zatim referentna mješavina te mješavina s aerantom i s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka. Najlošije rezultate ostvarile su mješavine s većim vodocementnim omjerom bez superplastifikatora uz kristalni hidrofilni dodatak i mješavina s 3 % mikrokapsula. Veliki dio ukupno ispitanih mješavina ostvaruju bolji rezultat ispitivanja tlačne čvrstoće nakon izloženosti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja što znači kako im ovakvo tretiranje pomaže u razvoju većih tlačnih čvrstoća.

Za razliku od tlačne čvrstoće, rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem betonskih prizmi, uslijed izloženosti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja imaju manje dobivene rezultate od onih koji nisu bili izloženi ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

Rezultati ispitivanja prodora dubine vode pod tlakom pokazuju kako mješavine s 1 % mikrokapsula, s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka i s dodatkom aeranta smanjuju dubinu prodora vode, a rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom nakon izloženosti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja su kod svih mješavina manji nego prije izloženosti tim ciklusima. To dovodi do zaključka kako ovakav tretman smrzavanja i odmrzavanja doprinosi boljim rezultatima prodora vode pod tlakom.

Iz rezultata ispitivanja živine porozimetrije vidljivo je da mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka prije smrzavanja ima najmanji udio izrazito štetnih pora (>200 nm) što je rezultiralo većim omjerom tlačnih i vlačnih čvrstoća, kao i manjim omjerom dubine prodora vode pod tlakom nakon i prije smrzavanja u odnosu na druge mješavine betona. Sve mješavine betona nakon izloženosti ciklusima smrzavanja i odmrzavanja imaju manji udio bezopasnih (osim mješavina s dodatkom aeranta), nešto štetnijih i štetnih pora te veći udio izrazito štetnih pora nego prije smrzavanja. Najmanja promjena u udjelu štetnih pora prije i nakon smrzavanja/odmrzavanja vidljiva je kod mješavine s dodatkom aeranta, a najveća ujedno i najbolja kod mješavine s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka, što potvrđuje kako izloženost ciklusima smrzavanja i odmrzavanja više pogoduje nego što razara unutarnju strukturu betona.

Usporedbom SEM prikaza prije i nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja vidljivo je da se betonu mješavine M1 povećala poroznost što je u skladu s rezultatima mikro CT analize prema kojima se betonu mješavine M1 povećala ukupna poroznost za čak 2,39 puta. Pri istom uvećanju su kod mješavine M2 vidljivi mjehurići zraka prije i nakon smrzavanja. Sukladno rezultatima micro CT analize, betonu ove mješavine se smanjila ukupna poroznost za 10 puta nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Sukladno SEM prikazima kod mješavine M3 je nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja došlo do smanjenja poroznosti no prema rezultatima mikro CT analize nije zapažena značajna promjena ukupne poroznosti. Kod mješavine M4 su prije i nakon smrzavanja/odmrzavanja u strukturi vidljive mikropukotine a na mikro CT analizi je zabilježen porast ukupne poroznosti nakon ciklusa smrzavanja/odmrzavanja za 1,64 puta. Kod mješavine M5 su prije smrzavanja/odmrzavanja na SEM prikazu vidljive mikropukotine čiji se intenzitet povećao nakon izlaganja smrzavanja/odmrzavanju dok je mikro CT analiza zabilježila porast ukupne poroznosti s ciklusima smrzavanja/odmrzavanja za 1,64 puta. Na SEM prikazima mješavine M6 su vidljive pukotine prije i nakon

smrzavanja/odmrzavanja ali su one nakon smrzavanja/odmrzavanja manje izražene a ukupna poroznost nakon smrzavanja/odmrzavanja zabilježena mikro CT analizom je smanjena za 12 %.

Kod SEM analize mješavine M1 je vidljiv portlandit i igličasti etringita EDS-om je potvrđeno značajno prisustvo Ca i O kod ove mješavine kao i prisustvo Al i S. Struktura mješavine M2 pod mikroskopom izgleda vrlo slično strukturi mješavine M1, uz prisustvo zračnih mjehurića kao posljedica uporabe aeranta. SEM analiza mješavina M3 i M4 pokazuje strukturu nalik strukturi brucita, a EDS-om je potvrđena prisutnost Mg kod mješavine M3. Kod SEM analize mješavina M5 i M6 je vidljivo prisustvo tobermorita a EDS-om je potvrđena prisutnost Si uz značajno prisustvo Al te C koji vjerojatno potječe iz toluene-diisocijanata kao jezgre mikrokapsula.

Nakon iniciranja pukotina na betonskim kockama i nakon njihovog samocijeljenja u vodi 28 dana, s pomoću preciznog ravnala izmjerene su i označene pukotine na kockama pojedine betonske mješavine. Izračunat je postotak samocijeljenja širine pukotine. Najbolje rezultate popunjavanja pukotina, tj. njihovog samocijeljenja očekivano imaju betonske mješavine s 1 % i 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka, zatim mješavine s dodatkom mikrokapsula (1 % i 3 %). Najlošije rezultate samocijeljenja imaju referentna i mješavina s dodatkom aeranta.

Iz svih obrađenih ispitivanja na razini materijala kod direktnih postupaka ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja mješavina s dodatkom aeranta se pokazala najučinkovitija, zatim mješavine s 3 % mikrokapsula i 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka, slijede ih referentna mješavina i mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka. U indirektnim metodama ispitivanja najučinkovitija se pokazala mješavina s 1 % mikrokapsula. Za razliku od direktnih metoda ispitivanja, u indirektnima se mješavina s dodatkom aeranta pokazala neučinkovitom, dok je najslabije rezultate u indirektnim metodama pokazala mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka bez superplastifikatora i s većim vodocementnim

omjerom.

Uspoređujući cijene svih osam betonskih mješavina, očekivano, najpovoljnija je ona bez ikakvih dodataka, zatim slijede mješavina s dodatkom aeranta, zatim mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka bez superplastifikatora, zatim mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka sa superplastifikatorom, pa mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka bez superplastifikatora, zatim mješavina s 3 % kristalnog hidrofilnog dodatka sa superplastifikatorom. Najskuplje mješavine su mješavine s dodatkom mikrokapsula. Ovisno o ocjeni učinkovitosti svake ispitane metode, projektiranom vijeku trajanja, vrsti betonske konstrukcije i agresivnosti okoliša kojemu je izložena cijena betonske mješavine je opravdana.

Opći zaključak bio bi kako ovisno o okolišu u kojem će se beton nalaziti i režimu pod kojim će najviše biti treba odabrati odgovarajuću betonsku mješavinu od svih ovdje pobrojanih direktnih i indirektnih metoda ispitivanja betona kojima betonska konstrukcija može biti izložena, a sve kako bi dobili što trajniju i pouzdaniju betonsku konstrukciju uz prihvatljivo investiranje u ove nove dodatke betonu.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivanja na konstruktivnom elementu spravljeno je 12 armiranobetonskih greda, po četiri od svake betonske mješavine, referentna mješavina bez dodataka, mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka i mješavina s 1 % mikrokapsula. Armiranobetonske grede, po dvije od svake mješavine betona, su izložene ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Kako bi se usporedila otpornost armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja i armiranobetonskih greda koje nisu bile izložene ciklusima smrzavanja i odmrzavanja ispitane su i uspoređene nosivosti i uporabljivosti smrzavanih i nesmrzavanih greda.

Od indirektnih postupaka ispitivanja otpornosti kocaka i armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja ispitani su omjeri tlačne čvrstoće nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja kocaka i kocaka ostavljenih u laboratoriju na sobnoj temperaturi, relativni dinamički modul elastičnosti na kockama nakon 56

ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, upijanje vode kocaka nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, relativni dinamički modul elastičnosti na armiranobetonskih gredama nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja i upijanje vode armiranobetonskih greda nakon 56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. U pogledu omjera tlačne čvrstoće smrzavanih i nesmrzavanih uzoraka mješavina s kristalnim hidrofilnim dodacima pokazuje najbolju otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, zatim referentna i mješavina s dodatkom mikrokapsula. Omjeri tlačne čvrstoće kocaka nakon smrzavanja i nesmrzavanih kocaka najbolji su kod mješavine s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka. Relativni dinamički moduli elastičnosti ispitani na kockama jednaki su onima na gredama i svrstavaju referentnu mješavinu s najvećom otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, zatim mješavina s 1 % kristalnog hidrofilnog dodatka te mješavina s 1 % mikrokapsula. Rezultati upijanja vode na kockama su pokazali kako je referentna mješavina upila najmanje vode, zatim mješavina s mikrokapsulama te mješavina s kristalnim hidrofilnim dodatkom. Upijanje vode na gredama pokazalo je kako je mješavina s kristalnim hidrofilnim dodatkom najotpornija na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, zatim referentna mješavina te mješavina s mikrokapsulama.

Direktni postupci ispitivanja otpornosti armiranobetonskih greda na cikluse smrzavanja i odmrzavanja podrazumijevali su uspoređene omjere sekantne krutosti smrzavanih i nesmrzavanih greda, omjere duktilnost μ_1 smrzavanih i nesmrzavanih greda, omjere duktilnost μ_2 smrzavanih i nesmrzavanih greda, omjere najvećih sila smrzavanih i nesmrzavanih greda, omjere progiba pri najvećoj sili smrzavanih i nesmrzavanih greda, omjere sila pri slomu greda smrzavanih i nesmrzavanih greda i omjere progiba pri slomu tretiranih i netretiranih greda.

Dobivenom većom tlačnom čvrstoćom ispitanih smrzavanih kocaka u odnosu na nesmrzavane, posljedično je dobivena velika razlika u najvećoj nosivosti smrzavanih u odnosu na nesmrzavane grede. Armiranobetonske grede nakon smrzavanja ostvaruju veće progibe u odnosu na nesmrzavane grede, što dovodi do zaključka

kako takvo tretiranje greda ne utječe štetno na unutarnju strukturu betona. Najveći omjer progiba nakon i prije smrzavanja ostvaruje mješavina s kristalnim hidrofilnim dodacima. Maksimalna dosegnuta sila ostvarena je na gredama mješavine s mikrokapsulama, zatim na gredama s kristalnim hidrofilnim dodacima, pa na smrzavanim gredama referentne mješavine. Sve smrzavane grede ostvaruju bolje rezultate od nesmrzavanih greda u odnosu ukupne sile i progiba grede na polovini raspona. Prema dobivenim rezultatima ispitivanja sekantne krutosti armiranobetonskih greda vidljivo je kako su dobivene vrijednosti podjednake za referentnu i mješavinu s kristalnim hidrofilnim dodacima nakon i prije smrzavanja, dok ciklusi smrzavanja uvelike utječu na povećanje sekantne krutosti kod mješavine s dodatkom mikrokapsula. Duktilnost μ_1 prikazana je omjerom progiba pri maksimalnoj nosivosti grede i progibom pri granici tečenja glavne uzdužne armature. Duktilnost μ_2 prikazana je omjerom progiba pri ultimativnoj nosivosti grede koja predstavlja točku potpunog gubitka nosivosti grede i progiba pri granici tečenja glavne uzdužne armature. Kako je ponašanje svih betonskih mješavina u armiranobetonskim gredama isto do maksimalne nosivosti, mjerodavnije je uspoređivati duktilnost s μ_1 . Grede nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja imaju veliko povećanje duktilnosti za sve tri mješavine, što dovodi do zaključka kako ovakvo tretiranje armiranobetonskih greda doprinosi značajnom povećanju duktilnosti. Kao što je ranije rečeno kako ciklusi smrzavanja i odmrzavanja povećavaju tlačnu čvrstoću betona, tako je i najveća dosegnuta sila pri ispitivanju armiranobetonskih greda nešto veća u odnosu na nesmrzavane grede. Taj učinak najveći je kod mješavine s mikrokapsulama, zatim kod mješavine s kristalnim hidrofilnim dodatkom, a najmanji kod referentne mješavine. Unatoč tome što razlika u nosivosti nije značajna, za smrzavane grede takvo povećanje nosivosti tj. maksimalne sile znatno utječe na povećanje progiba i ostvarenje puno veće duktilnosti u odnosu na nesmrzavane grede. Što se tiče vrijednosti sile pri slomu za nesmrzavane grede one su bile približno jednake, dok su rezultati nakon ciklusa

smrzavanja i odmrzavanja bolji za mješavine s dodatkom mikrokapsula i s dodatkom kristalnih hidrofilnih dodataka, a za referentnu mješavinu dobivena sila pri slomu je manja nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. To dovodi do zaključka kako dodaci mikrokapsula i kristalni hidrofilni dodaci pospješuju stabilnost unutarnje strukture betona u odnosu na referentnu mješavinu uslijed tretiranja greda ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Rezultati ispitivanja na armiranobetonskim gredama pokazali su da grede s dodatkom mikrokapsula imaju najveću tlačnu čvrstoću, najveći modul elastičnosti, najveću nosivost greda uz najmanji pripadajući progib u odnosu na sve ostale smrzavane grede.

Uslijed ciklusa smrzavanja i odmrzavanja betoni imaju veću tlačnu čvrstoću, proporcionalno i veći modul elastičnosti, time dosežu maksimalnu nosivost greda uz najmanji pripadajući progib, što je pokazatelj toga da ispitani dodaci betonu pokazuju puno bolje rezultate u odnosu na grede s betonom bez dodataka u agresivnim tretmanima kao što su smrzavanje i odmrzavanje.

Zaključno, kristalni hidrofilni dodatak i mikrokapsule imaju potencijal za primjenu u betonu s ciljem poboljšanja njegove otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Iako takvi dodaci povećavaju cijenu betona, preporučljivo ih je koristiti u betonima građevinama teško pristupnim za održavanje gdje će nedostatak povećane cijene izgradnje objekta biti tijekom vremena biti nadjačan manjim troškovima održavanja takvog objekta.

Bibliografija

- [1] Diane Gardner, Robert Lark, Tony Jefferson, Robert Davies; *A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials*, Case Studies in Construction Materials, Vol. 8 (2018), pp. 238–247
- [2] Grzegorz Ludwik Golewski; *The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection – A Review*, Buildings Vol. 13 (2023)
- [3] Amir Poursaei i Brandon Ross; *The Role of Cracks in Chloride-Induced Corrosion of Carbon Steel in Concrete – Review*, corrosion and materials degradation, Vol. 3 (2022), pp. 258-269
- [4] ACI. ACI 224.1R: Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, (2007)
- [5] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications; American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, USA, (2017)
- [6] CEN. EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, (2004)
- [7] CEB. CEB-FIP: Model Code for Service Life Design; International Federation for Structural Concrete (fib): Lausanne, Switzerland, (2006)
- [8] BS. BS 8110-1: Structural Use of Concrete—Part 1: Code of Practice for Design and Construction; British Standards Institution: London, UK, (1997)

[9] Surej Raghavan Koroth; *Evaluation and Improvement of Frost Durability of Clay Bricks - A Thesis in The Centre for Building Studies*, doktorska disertacija, Montreal, Quebec, Sveučilište Concordia, Canada, (1997)

[10] Shima Pilehvar, Anna M. Szczotok, Juan Francisco Rodríguez, Luca Valentini, Marcos Lanzón, Ramón Pamies, Anna-Lena Kjøniksen; *Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials*, Construction and Building Materials, Vol. 200 (2019), pp. 94-103

[11] Mark G. Richardson, *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, First Edition, Spon Press, (2002), pp. 51, 77, 101, 133, 160-179, 194

[12] Mario de Rooij, Kim Van Tittelboom, Nele De Belie, Erik Schlangen; *Self-healing phenomena in cement-Based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: self-Healing phenomena in cement-Based materials*, Springer Science & Business Media, Vol. 11 (2013)

[13] Daniel Lahman, Carola Edvardsen, Sylvia Kessler; *Autogenous self-healing of concrete: Experimental design and test methods—A review*, Engineering Reports, Vol. 5 (2023)

[14] Carola Edvardsen; *Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete*, doktorska disertacija, RWTH Aachen, (1996)

[15] Magdalena Rajczakowska, Lennart Nilsson, Karin Habermehl-Cwirzen, Hans Hedlund, Andrzej Cwirzen; *Does a High Amount of Unhydrated Portland Cement Ensure an Effective Autogenous Self-Healing of Mortar?*, Materials, Vol. 12 (2020)

[16] Lianwang Yuan, Shuaishuai Chen, Shoude Wang, Yongbo Huang, Qingkuan Yang, Shuai Liu, Jinbang Wang, Peng Du, Xin Cheng, Zonghui Zhou; *Research on the*

improvement of concrete autogenous self-healing based on the regulation of cement particle size distribution (PSD), Materials, Vol. 12 (2019)

[17] Heinz Meichsner, Stefan Röhling; *Die Selbstdichtung (Selbstheilung) von Trennrissen - ein Risiko in der WU-Richtlinie*, Der Bausachverständige, Vol. 11 (2015)

[18] Aamar Danish, Mohammad Ali Mosaberpanah, Muhammad Usama Salim; *Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments*, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9 (2020), pp. 6883-6899

[19] Marta Roig-Flores i Pedro Serna; *Concrete Early-Age Crack Closing by Autogenous Healing*, Sustainability, Vol. 12 (2020)

[20] Natalya Hearn, Chris T. Morley; *Self-sealing property of concrete – experimental evidence*, Materials and Structures, Vol. 30 (1997)

[21] Sina Mahmoodi i Pedram Sadeghian; *Self-Healing Concrete: A Review of Recent Research Developments and Existing Research Gaps*, CSCE Annual Conference, Laval (Greater Montreal), (2019)

[22] Ahmed Ramadan Suleiman i Moncef L. Nehdi; *Efect of autogenous crack self-healing on mechanical strength recovery of cement mortar under various environmental exposure*, Scientific reports, Vol. 11 (2021)

[23] Geuntae Hong, Chiwon Song i Seongcheol Choi; *Autogenous Healing of Early-Age Cracks in Cementitious Materials by Superabsorbent Polymers*, Materials, Vol. 13 (2020)

[24] Didier Snoeck i Nele De Belie; *Autogenous Healing in Strain-Hardening Cementitious Materials With and Without Superabsorbent Polymers: An 8-Year Study*, Frontiers in Materials, Vol. 6, (2019)

[25] Youxu Zeng, Qingyuan Zuo, Sheng Jiang, Ming-Zhi Guo, Tao Wang, Hongqiang Chu; *Effect of CTAB on the healing of concrete cracks repaired by electrodeposition and the durability of repaired concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 326 (2022)

[26] Aamar Danish, Mohammad Ali Mosaberpanah, Muhammad Usama Salim; *Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments*, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9 (2020)

[27] Peter H. Emmons i Douglas J. Sordyl; *The state of the concrete repair industry, and a vision for its future*, Concrete repair bulletin, Vol.19 (2006)

[28] Wei Du, Jianying Yu, Yi Gu, Ying Li, Xiaobin Han, Quantao Liu; *Preparation and application of microcapsules containing toluene diisocyanate for self-healing of concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 202 (2019), pp.762–769

[29] Diane Gardner, Robert Lark, Tony Jefferson, Robert Davies; *A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials*, Case studies in construction materials, Vol.8 (2018), pp. 238-247

[30] Kunamineni Vijay, Meena Murmu, Shirish V. Deo; *Bacteria based selfhealing concrete – A review*, Construction and Building Materials, Vol. 152 (2017), pp. 1008-1014

[31] Pavan Kumar Jogi, T.V.S.Vara Lakshmi; *Selfhealing concrete based on different bacteria: A review*, Materials Today: Proceedings, (2020)

[32] Ruoting Pei, Jun Liu, Shuangshuang Wang, Mijia Yang; *Use of bacterial cell walls to improve the mechanical performance of concrete*, Cement & Concrete Composites, Vol. 39 (2013), pp. 122-130

[33] Hassan Amer Algaifi, Suhaimi Abu Bakar, Rayed Alyousef, Abdul Rahman Moh Sam, M.H. Wan Ibrahim, Shahiron Shahidan, Mohammed Ibrahim, Babatunde

Abiodun Salami; *Bio-inspired self-healing of concrete cracks using new B. Pseudomy coides species*, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 12 (2021), pp. 967-981.

[34] Mohammed Safiuddin, Shaik Ithshaam, Rizwan Abudl Kareem Shalam; *A study on self-healing concrete*, Materials Today: Proceedings, Vol. 52 (2022), pp. 1175-1181

[35] Yusuf Çağatay Erşan, Hilke Verbruggen, Iris De Graeve, WillyVerstraete, Nico Boon; *Nitrate reducing CaCO₃ precipitating bacteria survive in mortar and inhibit steel corrosion*, Cement and Concrete Research, Vol. 83 (2016), pp. 19-30

[36] Lu Jiang, Guanhua Jia, Chen Jiang, Zhu Li; *Sugar-coated expanded perlite as a bacterial carrier for crack-healing concrete applications: highlights*, Construction and Building Materials, Vol. 232 (2020), 117222

[37] Wasim Khaliq, Muhammad Basit Ehsan; *Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques*, Construction and Building Materials, Vol. 102 (2016), pp. 349-357

[38] Jianyun Wang, Jan Dewanckele, Veerle Cnudde, Sandra Van Vlierberghe, Willy Verstraete, Nele De Belie; *X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete*, Cement & Concrete Composites, Vol. 53 (2014), pp. 289-304

[39] Lei V. Zhang, Moncef L. Nehdi, Ahmed R. Suleiman, Malihe Mehdizadeh Allaf, Manguang Gan, Afshin Marani, Murat Tuyan; *Crackself-healing in bio-green concrete*, Composites Part B, Vol. 227 (2021)

[40] Maria Kanwal, Rao Arslan Khushnood, Wasim Khaliq, Abdul Ghafar Watoo, Tauseef Shahid; *Synthesis of pyrolytic carbonized bagasse to immobilize Bacillus subtilis; application in healing micro-cracks and fracture properties of concrete*, Cement & Concrete Composites, Vol. 126 (2022)

- [41] Varenym Achal, Abhijeet Mukerjee, M. Sudhakara Reddy; *Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures*, Construction and Building Materials, Vol. 48 (2013), pp. 1-5
- [42] Jianguang Zhang, Yuanzhen Liu, Tao Feng, Mengjun Zhou, Lin Zhao, Aijuan Zhou, Zhu Li; *Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 148 (2017), pp. 610-617
- [43] Yusuf Çağatay Erşan, Emma Hernandez-Sanabria, Nico Boon, Nele de Belie; *Enhanced crack closure performance of microbial mortar through nitrate reduction*, Cement & Concrete Composites, Vol. 70 (2016), pp. 159-170
- [44] José Luis García Calvo, Mercedes Sánchez Moreno, Pedro Carballosa, Filipe Pedrosa, Fabiano Tavares; *Improvement of the Concrete Permeability by Using Hydrophilic Blended Additive*, Materials, Vol. 12 (2019), 2384
- [45] Aline de Souza Oliveira, Otávio da Fonseca Martins Gomes, Liberato Ferrara, Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Romildo Dias Toledo Filho; *An overview of a two fold effect of crystalline admixtures in cement-based materials: from permeability-reducers to self-healing stimulators*, Journal of Building Engineering, Vol. 41 (2021) 102400
- [46] HRN EN 934-2:2012 Dodaci betonu, mortu i smjesi za injektiranje -- 2. dio: Dodaci betonu -- Definicije, zahtjevi, sukladnost, označivanje i obilježavanje (EN 934-2:2009+A1:2012)
- [47] Američko Izvješće o kemijskim dodacima betonu - ACI 212.3R-16 , American Concrete Institute, ožujak 2016, ISBN: 978-1-942727-80-4
- [48] Xiaoyan Hu, Jia Xiao, Zedi Zhang, Conghao Wang, Congyun Long, Liang Dai; *Effectsof CCCW on properties of cement-based materials: A review*, Journal of Building Engineering, Vol. 50 (2022) 104184

- [49] Yagang Zha, Jianying Yu, Ruiyang Wang, Peng He, Zhilong Cao; *Effect of ion chelating agent on self-healing performance of Cement-based materials*, Construction and Building Materials, Vol. 190 (2018), pp. 308-316
- [50] Povindar Kumar Mehta, Paulo Monteiro; *Concrete: structure, properties and materials*, Prentice Hall, Englewood, America, 1986.
- [51] Marta Roig-Flores, Simone Moscato, Pablo Serna, Liberato Ferrara; *Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments*, Construction and Building Materials, Vol. 86 (2015), pp. 1-11
- [52] Byoungsun Park, Young Cheol Choi; *Effect of healing products on the self-healing performance of cementitious materials with crystalline admixtures*, Construction and Building Materials, Vol. 270 (2021), 121389
- [53] T. Chandra Sekhara Reddy, A. Ravitheja; *Macromechanical properties of selfhealing concrete with crystalline admixture under different environments*, Ain Shams Engineering Journal, Vol. 10 (2019), pp. 23-32
- [54] Pejman Azarsa, Rishi Gupta, Alireza Biparva; *Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement*, Cement and Concrete Composites, Vol. 99 (2019), pp. 17–31
- [55] ASTM C39 - Standardna metoda ispitivanja tlačne čvrstoće cilindričnih betonskih uzoraka, American Society for Testing and Materials
- [56] DIN 1048 - Ispitivanje betona; ispitivanje svježeg betona, Deutsches Institut fur Normung, lipanj 1991.
- [57] AASHTO TP95 - Standardna metoda ispitivanja površinske otpornosti Indikacija sposobnosti betona da se odupre prodoru kloridnih iona, American Association of Highway and Transportation Officials, siječanj 2014.

[58] ASTM C1202 - Standardna ispitna metoda za električnu indikaciju sposobnosti betona da se odupre prodoru kloridnih iona, American Society for Testing and Materials

[59] ASTM C1556 - Standardna ispitna metoda za određivanje prividnog koeficijenta difuzije klorida u cementnim mješavinama skupnom difuzijom, American Society for Testing and Materials

[60] Mona Elsalamawy, Ashraf Ragab Mohamed, Abdel-latif Ehab Abosen; *Performance of crystalline forming additive materials in concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 230 (2020), 117056

[61] Kim Seang Lauch, Clelia Desmettre, Jean Philippe Charron; *Self-healing of concrete containing different admixtures under laboratory and long-term real outdoor expositions based on water permeability test*, Construction and Building Materials, Vol. 324 (2022), 126700

[62] Desheng Li, Bing Chen, Xihui Chen, Bing Fu, Hongchao Wei, Xiaorui Xiang; *Synergetic effect of super absorbent polymer (SAP) and crystalline admixture (CA) on mortar macro-crack healing*, Construction and Building Materials, Vol. 247 (2020), 118521

[63] Byoungsun Park, Young Cheol Choi; *Investigating a new method to assess the self-healing performance of hardened cement pastes containing supplementary cementitious materials and crystalline admixtures*, Journal of Materials Research and Technology, (2019), 8(6), 6058-6073

[64] Pierre Escoffres, Clelia Desmettre, Jean-Philippe Charron; *Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions*, Construction and Building Materials, Vol. 173 (2018), 763-774

[65] Aline de Souza Oliveira, Romildo Dias Toledo Filho, Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, Luiz Fernando Cappa de Oliveira, Otávio da Fonseca Martins Gomes; *Microstructural characterization of self-healing products in cementitious systems containing*

crystalline admixture in the short- and long-term, Cement and Concrete Composites, Vol. 126 (2022), 104369

[66] Chenchun Zhang, Rongwei Lu, Yazhao Li, Xinchun Guan; *Effect of crystalline admixtures on mechanical, self-healing and transport properties of engineered cementitious composite*, Cement and Concrete Composites, Vol. 124 (2021), 104256

[67] Guangyan Li, Xiaofeng Huang, Jiesheng Lin, Xiang Jiang, Xinya Zhang; *Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour*, Construction and Building Materials, Vol. 200 (2019), 36-45

[68] Marta Roig-Flores, Francesco Piritano, Pablo Serna, Liberato Ferrara; *Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests*, Construction and Building Materials, Vol. 114 (2016), 447-457

[69] Anita Gojević, Vilma Ducman, Ivanka Netinger Grubeša, Ana Baričević, Ivana Banjad Pečur; *The Effect of Crystalline Waterproofing Admixtures on the Self-Healing and Permeability of Concrete*, Materials, Vol. 14 (2021) 1860

[70] Wei Du, Jianying Yu, Bianyang He, Yanheng He, Peng He, Ying Li, Quantao Liu; *Preparation and characterization of nano-SiO₂/paraffin/PE wax composite shell microcapsules containing TDI for self-healing of cementitious materials*, Construction and Building Materials, Vol. 231 (2020), 117060

[71] Gupta Souradeep and Harn Wei Kua; *Encapsulation Technology and Techniques in Self-Healing Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 28, (2016), 12

[72] Tassiane Apolinário de Oliveira, Mariana D'Orey Gaivão Portela Bragança, Igor Miguel Pinkoski, Gilberto Carrera; *The effect of silica nanocapsules on self-healing concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 300 (2021), 124010

[73] Jianhang Feng, Hua Dong, Ruixing Wang, Yilin Su; *A novel capsule by poly (ethyleneglycol) granulation for self-healing concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 133 (2020), 106053

[74] Stamatoula Papaioannou, Maria Amenta, Vassilis Kilikoglou, Dimitrios Gournis, Ioannis Karatasios; *Synthesis and integration of cement-based capsules modified with sodium silicate for developing self-healing cements*, Construction and Building Materials, Vol. 316 (2022), 125803

[75] Ying Li, Jianying Yu, Zhilong Cao, Peng He, Quantao Liu, Xiaobin Han, Yang Wan; *Preparation and application of novel microcapsules ruptured by microwave for self-healing concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 304 (2021), 124616

[76] Xianfeng Wang, Shaocong Chen, Zhenhong Yang, Jun Ren, Xiaogang Zhang, Feng Xing : *Self-healing concrete incorporating mineral additives and encapsulated lightweight aggregates: Preparation and application*, Construction and Building Materials, Vol. 301

[77] Jose Milla, Marwa M. Hassan, Tyson Rupnow, William H. Daly; *Measuring the crack-repair efficiency of steel fiber reinforced concrete beams with microencapsulated calcium nitrate*, Construction and Building Materials, Vol. 201 (2019) 526–538

[78] Xianfeng Wang, Yijiao Huang, Yingxin Huang, Jiaheng Zhang, Cheng Fang, KunYu, Qi Chen, Taoran Li, Rui Han, Zhenhong Yang, Ping Xu, Guanxi Liang, Dashi Su, Xiaobo Ding, Dawang Li, Ningxu Han, Feng Xing; *Laboratory and field study on the performance of microcapsule-based self-healing concrete in tunnel engineering*, Construction and Building Materials, Vol. 220 (2019) 90–101

[79] Xianfeng Wang, Jiaheng Zhang, Rui Han, Ningxu Han, FengXing; *Evaluation of damage and repair rate of self-healing microcapsule-based cementitious materials using electrochemical impedance spectroscopy*, Journal of Cleaner Production, Vol. 235 (2019) 966-976

[80] Biqin Dong, Guohao Fang, Weijian Ding, Yuqing Liu, Jianchao Zhang, Ningxu Han, Feng Xing; *Self-healing features in cementitious material with urea-formaldehyde/epoxy microcapsules*, Construction and Building Materials, Vol. 106 (2016) 608–617

[81] Wei Du, Jianying Yu, Shunjie Gu, Ruiyang Wang, Jiangting Li, Xiaobin Han, Quantao Liu; *Effect of temperatures on self-healing capabilities of concrete with different shell composition microcapsules containing toluene-di-isocyanate*, Construction and Building Materials, Vol. 247 (2020) 118575
(2021), 124119

[82] Mingyue Wu, Xiang-Ming Hu, Zun-Xiang Hu, Yanyun Zhao, Wei-Min Cheng, Wei Lu; *Two-component polyurethane healing system: Effect of different accelerators and capsules on the healing efficiency of dynamic concrete cracks*, Construction and Building Materials, Vol. 227 (2019) 116700

[83] Francisco Antonio Gilabert, Kim Van Tittelboom, Jeroen Van Stappen, Veerle Cnudde, Nele De Belie, Wim Van Paeppegem; *Integral procedure to assess crack filling and mechanical contribution of polymer-based healing agent in encapsulation-based self-healing concrete*, Cement and Concrete Composites, Vol. 77 (2017) 68-80

[84] Zun-Xiang Hu, Xiang-Ming Hu, Wei-Min Cheng, Yan-YunZhao, Ming-Yue Wu; *Performance optimization of one-component polyurethane healing agent for self-healing concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 179 (2018) 151–159

[85] Kim Van Tittelboom, Jianyun Wang, Maria Araújo, Didier Snoeck, Elke Gruyaert, Brenda Debbaut, Hannelore Derluyn, Veerle Cnudde, Eleni Tsangouri, Danny Van Hemelrijck, Nele De Belie; *Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test*, Construction and Building Materials, Vol. 107 (2016), pp. 125–137

[86] Benoit Hilloulin, Kim Van Tittelboom, Elke Gruyaert, Nele De Belie, Ahmed Loukili; *Design of polymeric capsules for self-healing concrete*, Cement & Concrete Composites, Vol. 55 (2015) 298–307

[87] Maria Araújo, Sutima Chatrabhuti, Stijn Gurdebeke, Natalia Alderete, Kim Van Tittelboom, Jean-Marie Raquez, Veerle Cnudde, Sandra Van Vlierberghe, Nele De Belie, Elke Gruyaert; *Poly(methylmethacrylate) capsules as an alternative to the "proof-of-concept" glass capsules used in self-healing concrete*, Cement and Concrete Composites, Vol. 89 (2018) 260-271

[88] Abir Al-Tabbaa, Chrysoula Litina, Petros Giannaros, Antonios Kanellopoulos, Livia Souza; *First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 208 (2019) 669–685

[89] HRS CEN/TS 12390-9:2016, Ispitivanje očvrsloga betona - 9. dio: Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje – Ljuštenje, CEN: Brussels, Belgija, (2016)

[90] HRN CEN/TR 15177:2006, Ispitivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje – Oštećenje unutarnje strukture, CEN: Brussels, Belgija, (2006)

[91] HRN EN 12390-3:2019, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 3. dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka; CEN: Brussels, Belgija, (2019)

[92] HRN EN 12390-5:2019, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje; CEN: Brussels, Belgija, (2019)

[93] HRN EN 12390-6:2019, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 6. dio: Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitnih uzoraka; CEN: Brussels, Belgija, (2019)

[94] HRN EN 12390-8:2019, Ispitivanje očvrsluloga betona -- 8. dio: Dubina prodora vode pod tlakom, CEN: Brussels, Belgija, (2019)

- [95] Yuetao Qiu, Hetang Peng, Haineng Zhao; *Study on New Type of Concrete Air-Entraining Agent*, International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA), Tianjin, China, (2020)
- [96] Liliana Maria Nicula, Ofelia Corbu, Mihai Iliescu; *Influence of Blast Furnace Slag on the Durability Characteristic of Road Concrete Such as Freeze-Thaw Resistance*, Procedia Manufacturing, Vol. 46, (2020), 194-201
- [97] Md. Mohaiminul Islam, Mohammad Tarequl Alam, Md. Moinul Islam; *Effect of fly ash on freeze-thaw durability of concrete in marine environment*, Australian Journal of Structural Engineering, Vol. 19(2), (2018), 1-16
- [98] Peng Zang, Qing-Fu Li; *Freezing-thawing durability of fly ash concrete composites containing silica fume and polypropylene fiber*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 228(3), (2013)
- [99] Jisong Zhang, Y. Fan, N. Li; *Pore structure and freezing resistance of nanoclay modified cement based materials*, Materials Research Innovations, Vol. 18(S2), (2014), 18, 358-362
- [100] Xuemiao Li, Tung-Chai Ling, Kim Hung Mo; *Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review*, Construction and Building Materials, Vol. 240, (2020), 117869
- [101] Rahul Kumar, Nirendra Dev; *Effect of acids and freeze-thaw on durability of modified rubberized concrete with optimum rubber crumb content*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 139(21), (2022), 52191
- [102] Yang He, Fei Xu, Hua Wei; *Effect of Particle Size on Properties of Concrete with Rubber Crumbs*, American Journal of Civil Engineering, Vol. 10(3), (2022), 79-87

- [103] Phuong Ngoc Pham, Ahmed Toumi, Anaclet Turatsinze; *Effect of an enhanced rubber-cement matrix interface on freeze-thaw resistance of the cement-based composite*, Construction and Building Materials, Vol. 207, (2019), 528–534
- [104] Maria Ribeiro, Luís Filipe Pereira Juvandes, José Dias Rodrigues, Antonio Ferreira, António Teixeira Marques; *Behaviour of Cement and Polymer Mortar Materials to Rapid Freeze-Thaw Cycling*, Materials Science Forum , Vol. 636-637, (2010), 1329-1335
- [105] Khashayar Jafari, Fatemeh Heidarneshad, Omid Moammer, Majid Jarrah; *Experimental investigation on freeze – thaw durability of polymer concrete*, Frontiers of Structural and Civil Engineering, Vol. 15, (2021), 1038–1046
- [106] Zhengyao Qu, Shuaiqi Guo, Christian C. M. Sproncken, Romà Surís-Valls, Qingliang Yu, and Ilja K. Voets; *Enhancing the Freeze–Thaw Durability of Concrete through Ice Recrystallization Inhibition by Poly(vinylalcohol)*, ACS Omega, Vol. 5(22), (2020), 12825-12831
- [107] Yinchuan Guo, Aiqin Shen, Xiaohui Sun; *Exploring Polymer-Modified Concrete and Cementitious Coating with High-Durability for Road side Structures in Xinjiang, China*, Advances in Materials Science and Engineering, (2017), 9425361:9
- [108] Waseem Wathiq Hammodat; *Investigate road performance using polymer modified concrete*, Materials Today: Proceedings, Vol. 42, (2021), 2089–2094
- [109] Haitham Saeed; *Properties of polymer impregnated concrete spacers*, Case Studies in Construction Materials, Vol. 15, (2021), e00772
- [110] Wu Caiyun, Weihong Li, Cheng Zhang and Fan Jinpeng; *Effect of Protective Coatings on Frost Resistance of Concrete Structures in North east Coastal Areas*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 678, (2019), 012108

- [111] Taoying Liu, Chaoyang Zhang, Keping Zhou, Yonggang Tian; *Freeze-thaw cycling damage evolution of additive cement mortar*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 25(11), (2021), 2089-2110
- [112] Max Josef Setzer, Göran Fagerlund, David J. Janssen; *CDF test - Test Method for the Freeze-Thaw Resistance of Concrete-Tests with Sodium Chloride Solution (CDF)*, Materials and Structures, Vol. 29, (1996), 523-528
- [113] Mohammad G. Matar, Anastasia N. Aday, Wil V. Srubar III; *Surfactant properties of a biomimetic antifreeze polymer admixture for improved freeze-thaw durability of concrete*, Construction and Building Materials, Vol. 313, (2021), 125423
- [114] Yongcheng Ji, Yunfei Zou, Yulong Ma, Haoxiang Wang, Wei Li, Wenyuan Xu; *Frost Resistance Investigation of Fiber-Doped Cementitious Composites*, Materials, Vol. 15(6), (2022), 2226
- [115] Ronald S. Harichandran, Imad Baiyasi, Goli Nossoni; *Freeze-thaw Durability of Concrete Columns Wrapped with FRP and Subject to Corrosion-Like Expansion*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 29(1) (2016)
- [116] Shuo Liu, Maohua Du, Yubin Tian, Xuanang Wang, Guorui Sun; *Bond Behavior of Reinforced Concrete Considering Freeze-Thaw Cycles and Corrosion of Stirrups*, Materials, Vol. 14, (2021), 4732
- [117] Zaiping Zeng, Xiuli Wang, Shirong Li, Genli Ren; *Experimental and Theoretical Research on Low-Strength Concrete Beams Reinforced with Basalt Fibre-Reinforced Plastic Sheets in a Freeze-Thaw Environment*, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 46, (2021), pp. 5121–5134
- [118] Qing Qin, Shansuo Zheng, Lei Li, Liguo Dong, Yixin Zhang, Sha Ding; *Experimental Study and Numerical Simulation of Seismic Behavior for RC Columns Subjected to Freeze-Thaw Cycles*, Advances in Materials Science and Engineering, (2017), 7496345

- [119] Dafu Cao, Wenjie Ge, Biyuan Wang, Yongming Tu; *Study on the flexural behaviors of RC beams after freeze-thaw cycles*, International Journal of Civil Engineering, Vol. 13(1), (2015)
- [120] Marta Kosior-Kazberuk i Rafał Wasilczyk; *Influence of static long-term loads and cyclic freezing/thawing on the behaviour of concrete beams reinforced with BFRP and HFRP bars*, MATEC Web of Conferences, Vol.174(2018), 04013
- [121] An Duan, Zhi-Yuan Li, Wen-Chao Zhang, Wei-Liang Jin; *Flexural behaviour of reinforced concrete under freeze-thaw cycles and sustained load*, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 13(10), (2017), pp. 1350-1358
- [122] Fuyuan Gong, Zhao Wang, Jin Xia, Koichi Maekawa; *Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of reinforced concrete beams under the effect of frost damage and sustained load*, Structural Concrete, (2021), pp. 1–16
- [123] Hamid Y. Omran i Raafat El-Hacha; *Effects of Sustained Load and Freeze-Thaw Exposure on RC Beams Strengthened with Prestressed NSM-CFRP Strips*, Advances in Structural Engineering, Vol. 17 (12), (2014)
- [124] Dafu Cao, Kaifu Zhou, Min Zhou, Wenjie Ge, Biyuan Wang; *Study on the shear behaviors of RC beams after freeze-thaw cycles*, Applied Mechanics and Materials Vol. 488-489 (2014), pp. 750-754
- [125] HRN EN 1097-6:2013 - Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata -- 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode (EN 1097-6:2013)
- [126] HRN EN 933-1:2012 - Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava -- Metoda sijanja (EN 933-1:2012)
- [127] HRN ISO 9277 - Određivanje specifične površine krutina adsorpcijom plina pomoću BET metode
- [128] HRN EN 196-6:2019 - Metode ispitivanja cementa -- 6. dio: Određivanje finoće

- [129] HRN EN 12350-2:2019 - Ispitivanje svježega betona -- 2. dio: Ispitivanje slijeganjem (EN 12350-2:2019)
- [130] HRN EN 12350-6:2019 - Ispitivanje svježega betona -- 6. dio: Gustoća (EN 12350-6:2019)
- [131] HRN EN 12350-7:2019 - Ispitivanje svježega betona -- 7. dio: Sadržaj pora -- Tlačne metode (EN 12350-7:2019)
- [132] HRN EN 206:2021 - Beton -- Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A2:2021)
- [133] HRN EN 480-11:2005 - Dodaci betonu, mortu i mortu za injektiranje -- Ispitne metode -- 11. dio: Određivanje značajka zračnih pora u očvrslom betonu (EN 480-11:2005)
- [134] Alireza Joshaghani; *Evaluating the effects of titanium dioxide (TiO₂) and carbon-nanofibers (CNF) as cement partial replacement on concrete properties*, MOJ Civil Engineering, 2018; 4(1), pp 29–38
- [135] S. Zhang, Y. Fan, N. Li; *Pore structure and freezing resistance of nanoclay modified cement based materials*, Materials Research Innovations, 2014, 18, pp 358-362, DOI 10.1179/1432891714Z.000000000434
- [136] HRN EN ISO 6892-1:2019 - Metalni materijali -- Vlačno ispitivanje -- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi (ISO 6892-1:2019; EN ISO 6892-1:2019)
- [137] Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components FEMA 461, APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL 201 Redwood Shores Parkway, Suite 240 Redwood City, California 94065, 2007