

Primljen / Received: 27.5.2022.

Ispravljen / Corrected: 21.11.2022.

Prihvaćen / Accepted: 29.12.2022.

Dostupno online / Available online: 10.2.2023.

Učinak recikliranog stakla kao agregata na svojstva mikrobetona

Autor:

Doc.dr.sc. **Serkan Etlî**, dipl.ing.grad.

Sveučilište Munzur, Tunceli, Turska

Odjel za hitnu pomoć i upravljanje katastrofama

serkanetli@munzur.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Serkan Etlî

Učinak recikliranog stakla kao agregata na svojstva mikrobetona

Mikrobeton je visoko učinkovit materijal na bazi cementa koji se proizvodi upotrebom mikroagregata i cementa u točno određenim omjerima. Zbog iznimno visokih performanci, taj materijal ima potencijal za korištenje kod konstrukcijskih popravaka postojećih građevinskih elemenata. U sklopu ovog rada provedena je evaluacija izradom scenarija uporabe prema kojem se staklo, koje je otpadni proizvod, može usitniti i primijeniti na način koji osigurava dovoljnu izvedbu mikrobetona. Postoje četiri različita udjela veziva u smjesama u okviru ovog istraživanja, tj. 570, 580, 599 i 658 kg/m³. U spomenutim je smjesama, kao i u kontrolnoj smjesi redom 12 %, 27 % i 50 % mikroagregata zamijenjeno recikliranim staklom, te je na taj način proizvedeno ukupno 16 različitih mješavina sa četiri različita udjela agregata. Za mehanička i fizikalna ispitivanja te ispitivanja svojstva trajnosti proizvedene su kocke veličine 50 × 50 × 50 mm i prizme veličine 40 × 40 × 160 mm. Za potrebe ovog istraživanja provedena su mehanička ispitivanja na 144 uzorka starosti 7, 28 i 56 dana. Osim toga, na 192 uzorka prizme ispitan je utjecaj smrzavanja i odmrzavanja i općenito učinka temperature na mehanička svojstva. U određivanju svojstva trajnosti ispitivana su fizikalna svojstva kao što su poroznost, sorptivnost i specifična gustoća, a određivana su testovima na uzorcima u obliku kocke. Rezultati ispitivanja pokazuju da zamjena mikroagregata s recikliranim staklom ima pozitivne učinke na sva mehanička ponašanja mikrobetona.

Ključne riječi:

reciklirano staklo, mikrobeton, smrzavanje/odmrzavanje, mehanička svojstva

Research Paper

Serkan Etlî

Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete properties

Micro-concrete (MC) can be defined as a high-performance cement-based material produced using microaggregates and cement in the required proportions. Owing to its high performance, it has the potential to be used in the structural repairs of existing building elements. Within the scope of this study, an evaluation was conducted by creating a usage scenario under which glass, which is a waste product, can be reduced and applied in a way that provides a sufficient MC performance. There are four different binder contents in the mixtures within the scope of the present study, i.e., 570, 580, 599, and 658 kg/m³. From these mixtures, together with the control mixture, 12 %, 27 %, and 50 % microaggregates were replaced with glass sand and 16 different mixtures with a total of 4 different aggregate contents were produced. For the mechanical, physical, and durability tests, 40 × 40 × 160 mm sized prisms and 50 × 50 × 50 mm sized cubes were produced. For the purposes of this research, mechanical tests were carried out on 144 7-, 28- and 56-day old prismatic specimens. In addition, the effects of a freeze-thaw and temperature on the mechanical properties were investigated on 192 prismatic samples. In determination of the durability, physical properties such as the porosity, sorptivity, and specific gravity were tested and determined using cubic samples. The test results show that the replacement of MA with GS has positive effects on all mechanical behaviours of MC.

Key words:

glass sand, micro-concrete, freezing/thawing, mechanical properties

1. Uvod

Cilj je ovog istraživanja pridonijeti zaštiti prirodnog okoliša korištenjem i apsorpcijom otpada u mikrobeton (engl. *micro concrete* - MC). Velika količina cementa upotrebljava se za poboljšanje mehaničkih svojstava i iskoristivosti materijala na bazi cementa. Portland cement, za čiju se potrošnju energije može reći da je intenzivna tijekom proizvodnje, čini približno 5 % globalnih antropogenih emisija ugljičnog dioksida. Pucolanski aditivi koji se sastoje od derivata otpadnog stakla, koji se nasumično skladište ili odlažu na odlagališta, daju značajan doprinos održivosti proizvodnje betona, a time i industrije cementa. Osim toga, proizvedeni stakleni otpad, koji ima amorfnu strukturu i nije biorazgradiv, štetno djeluje na prirodni okoliš. Staklene boce i spremnici koji se koriste za skladištenje i zaštitu hrane i pića također se nakon konzumiranja odlažu kao kućni otpad, te stakleni otpad postaje sveprisutni nusproizvod. Osim toga, fina staklena prašina, čak i u tlu, ozbiljno šteti živim organizmima. Još važnije, svojstva staklenog praha, ako ga se samelje do određenog stupnja doprinosi mogućnosti njegove nove namjene.

Razvoj materijala visokih performansi kao što su samozbijajući beton i reaktivni praškasti beton privlače pozornost znanstvenika istraživača. S obzirom na učinkovitost superplastifikatora, koji se često koriste u razvoju građevinskih materijala na bazi cementa, intenzivno se proučava još jedan proizvodni parametar, mikroagregati (MA). Samozbijajući beton i beton s reaktivnim prahom zahtijevaju upotrebu finih materijala koji se u velikim količinama dobivaju izravno iz prirode ili tla putem obrade. Zahvaljujući upotrebi superplastifikatora, aditivi se mogu dodavati u svježju smjesu bez segregacije, pa se može poboljšati gustoća pakiranja zrna te povećati mogućnosti i načini uporabe. Povećanje načina uporabe i obradivosti također pomaže u stvaranju željenih reoloških svojstava. Kod takvog materijala može se uočiti osjetno povećanje mehaničkih svojstava smanjenjem vodocementne vrijednosti koja predstavlja osnovni parametar čvrstoće. To također povećava trajnost betonskog derivata poboljšavajući raspodjelu mikropora i nanopora formiranih u matrici. Na taj način se može koristiti s betonom koji sadržava finije mikromaterijale (beton s proizvodivim materijalima) [1-4]. Dodatno se može proizvoditi i mikrobeton, koji se aplicira na željenu dubinu tijekom sanacija i površinskog nanošenja, te se mikropukotine mogu lako sanirati.

Neki od spomenutih finih ili običnih prahova dobivenih kao prirodni ili prerađeni materijal jesu neprerađeni ili industrijski proizvedeni nusproizvodi. Nusproizvodi industrijskog otpada mogu uzrokovati probleme, uključujući i skup ili nemoguć proces recikliranja. Također je važno smanjiti emisije koje se ispuštaju u atmosferu tijekom proizvodnje cementa, a koje su opasne za zdravlje ljudi i okoliš. Da biste to učinili, važno je umjesto cementa uporabiti vezivne materijale koji se odlažu kao otpad. Osim uštede energije tijekom proizvodnog procesa, takvi se materijali mogu jednostavno reciklirati, čime se smanjuje količina onečišćenja okoliša kako uštedom sirovina tako i smanjenjem onečišćenja okoliša [5-8]. Stakleni prah se

uspješno upotrebljava kao mineralni dodatak umjesto cementa (do 30 %) [8-12]. Aliabdo i sur. [13] navode da uporaba 10 % staklenog praha umjesto cementa povećava tlačnu čvrstoću morta za približno 9 %. Slične rezultate istraživanja dobili su Grdić i sur. [14], koji je pokazao gotovo 6,5 % povećanja tlačne čvrstoće korištenjem zamjene dijela cementa staklom.

Osim toga, kada se razmatraju izvedbe betona visokih performansi, treba napomenuti da se može koristiti poluinertan MA, uključujući i fino mljeveni vapnenac ili kvarc. Ova aktivnost je dosljedno promatrana u istraživanjima o reološkim svojstvima betona visoke čvrstoće primjenom MA. Što je još važnije, betonska matrica, zahvaljujući svojoj tendenciji povećanja količine MA u sustavu, može pomoći u smanjenju ili eliminaciji uporabe grubih agregata i pijeska ako se dokažu izvedivost i inženjerska prikladnost. [2, 15].

Utvrđeno je da bi se uporaba različitih prirodnih pucolanskih materijala u cementu i urbanim strukturama mogla postupno povećavati, a to vrijedi i za trajni otpad koji sadrži silikatne i aluminijske tvari koje su nastale tijekom proizvodnje kao nusproizvodi. Zbog svoje čvrstoće, podrazumijeva se da takvi materijali daju značajna poboljšanja u mehaničkim svojstvima betonskih mješavina [16]. Industrijski otpad poput troske iz visokih peći, letećeg pepela, silicijske prašine i drugih granuliranih otpada već se godinama koristi kao sirovina i komponenta u industriji cementa. Poljoprivredni ostaci, poput pepela od rižine ljuske, koriste se u proizvodnji betona i cementa te su značajan i upečatljiv primjer takve upotrebe. Međutim, postoje mnoge vrste industrijskog otpada, uključujući i staklene proizvode, koji se tek trebaju početi koristiti u ovom sektoru ili koji unatoč primjeni nisu dovoljno istraženi i o njima ne postoji dovoljno podataka. Međutim, provedena su uspješna ispitivanja o potencijalnoj upotrebi fino mljevenog otpadnog stakla i uočeno je povećanje čvrstoće betona kada se ovaj materijal koristi kao pucolanski materijal baziran na alkalno silikatnim reakcijama [17, 18]. Proučavajući njegov proizvodni postupak, takvo se staklo oblikuje pomoću agregata višestrukih sirovih anorganskih minerala koji nakon upravljanog postupka hlađenja postaju tvrda, homogena, stabilna, inertna, amorfna i izotropna građevna masa. Na temelju sastava, staklo se može podijeliti u mnogo različitih kategorija. Osim toga, natrijsko-vapneno staklo se obično koristi u proizvodnji kositra i ravnog stakla. Kao rezultat ove vrste proizvodnje, više od 80 % otpadnog stakla nastaje na kraju njegove uporabljivosti [17]. Takvo se staklo može koristiti za oštećenja (makro ili mikropukotine koje nastaju na betonskim elementima) koja nastaju na konstrukcijskim elementima armiranobetonskih sustava u određenoj fazi njihovog trajanja. Zahvaljujući uporabi tog materijala i proizvodnji mikrobetona (MC), takva se oštećenja mogu lako popraviti [19]. Osim toga, zahvaljujući svojstvu vezivanja, može se koristiti za sidrenje tijekom armiranja [20].

Glavna je svrha ovog istraživanja ispitati promjene u mehaničkim svojstvima i u svojstvima trajnosti mikrobetona (MC), koji sadrži četiri različita udjela recikliranog stakla koji u sitnim frakcijama nazivamo i stakleni pijesak (engl. *glass sand* - GS) i četiri različita udjela vezivnog materijala. Dodatno, utjecaj temperature na

Tablica 1. Kemijski sastav Portland cementa i kristalne silicijske prašine

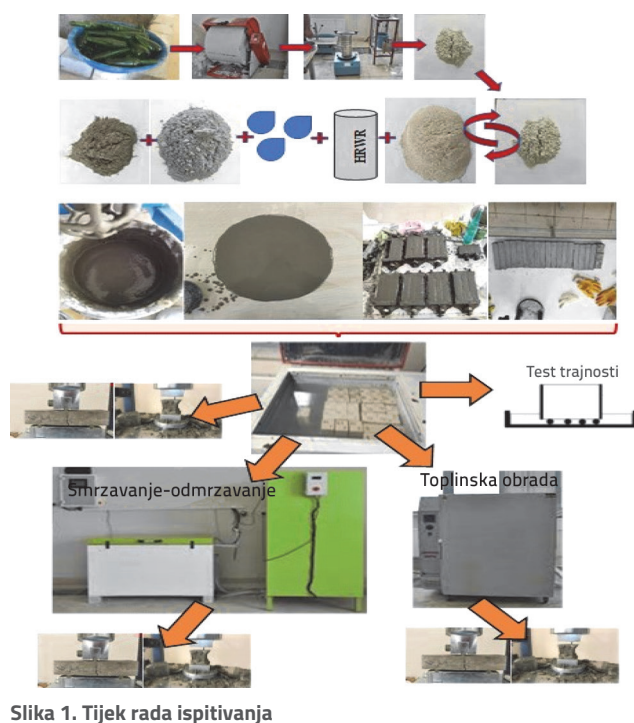
Kemijski sastav [%]	Portland cement	Silicijska prašina	Reciklirano staklo - stakleni pijesak (frakcije 0,063-0,125 mm)	Vapnenački prah (frakcije 0-1 mm)
SiO ₂	19,79	90,75	70,85	0,56
AlO ₃	3,96	-----	-----	-----
Al ₂ O ₃	3,85	0,72	0,85	0,16
Fe ₂ O ₃	4,15	2,29	0,23	0,14
CaO	61,84	0,56	8,84	57,9
MgO	3,22	-----	-----	0,7
K ₂ O	-----	1,51	0,24	-----
Na ₂ O	-----	0,55	14,41	-----
SO ₃	2,32	0,51	0,23	-----
P ₂ O ₅	-----	-----	0,55	-----
TiO	-----	-----	-----	-----
Cr ₂ O ₃	-----	-----	-----	-----
Mn ₂ O ₃	-----	-----	-----	-----
MgO	-----	-----	3,8	-----
Gubitak žarenjem	0,87	3,11	-----	-----
Blaine [m ² /kg]	326	21080	-----	-----

mehanička svojstva uzoraka također je ocijenjen za proizvedena veziva i supstitute za reciklirano staklo - stakleni pijesak. Ispitivanju je podvrgnuto ukupno 16 proizvedenih smjesa. Nakon mljevenja proizvoda od otpadnog stakla korišteno je sito s mrežom promjera od 0,063 do 0,125 mm. Kao MA korišten je pijesak dobiven drobljenjem stijena na bazi vapnenca. Međutim, MA proizveden u rasponu sita od 0-4 mm korišten je prosijavanjem ovog pijeska kroz sito od 1 mm. Ispitivanja aksijalne tlačne i vlačne čvrstoće savijanjem provedena su na uzorcima nakon 7, 28 i 56 dana. Dodatno su ispitivani učinci smrzavanja i odmrzavanja (između -18°C i 5°C) na uzorke i apsorpcija kao svojstva trajnosti. Ispitivane su promjene fizikalnih svojstava, poroznost i prividna specifična gustoća.

2. Materijali i opis eksperimentalnog dijela ispitivanja

Metodološki postupak koji se odnosi na materijale korištene u ovom ispitivanju i na udjele proizvedenih smjesa opisan je u ovom poglavlju. Tijek rada ispitivanja prikazan je na slici 1. Mješavine su proizvedene u četiri skupine. Silicijska prašina (engl. *silica fume* - SF) upotrijebljena je u količini od 18 % ukupnog udjela veziva u svakoj seriji mješavine. Odabrani udio SF bio je unutar omjera dobivenih iz drugih istraživanja opisanih u literaturi [2, 21, 22]. Udjeli veziva (cement + silicijska prašina) 570, 580, 599 i 658 kg/m³ korišteni su u svima grupama mješavina. U proizvedenim smjesama korišteno je 0 %, 12 %, 27 % i 50 % masenog udjela recikliranog stakla odnosno staklenog pijeska (engl. *glass sand* - GS, frakcije 0,063-0,125 mm) umjesto MA (frakcije 0-1 mm). Kao rezultat toga, u okviru istraživanja proizvedeno je ukupno 16 mješavina. Proizvedeni su uzorci u obliku prizme dimenzija

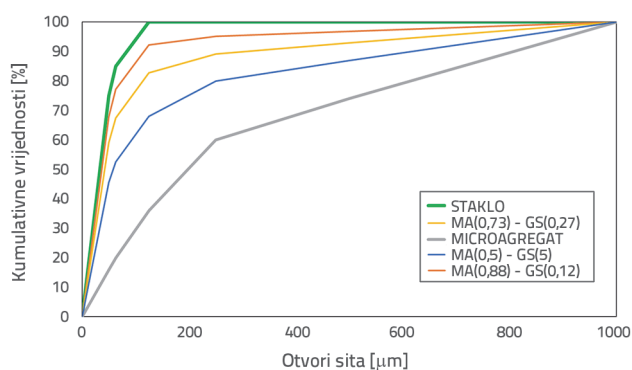
40 × 40 × 160 mm za mehaničko ispitivanje svake mješavine u grupi. Osim toga, proizvedena su i tri uzorka u obliku kocke dimenzija 50 × 50 × 50 mm za svaku mješavinu kako bi se na njima proveli testovi apsorpcije. Ispitivana su mehanička svojstva, temperaturni učinak njegovanja, učinci koji nastaju u procesu smrzavanja i odmrzavanja, sorptivnost i fizikalna svojstva. U eksperimentu je korišteno ukupno 336 uzoraka u obliku prizme i 48 uzoraka u obliku kocke.



Slika 1. Tijek rada ispitivanja

2.1. Materijali

Kao veziva u mješavinama proizvedenim u sklopu ovog istraživanja korišteni su silicijska prašina i Portland cement CEM-I 42.5R. Drobļeni pijesak dobiven iz vapnenca u smjesama prosijan je kroz sito perforacija promjera od 1 mm nakon čega je odvojen MA. Kemijska svojstva silicijske prašine, MA (vapnenačka prašina) i cementa navedena su u tablici 1. Osim toga, prikupljene su staklene boce koje su otpad iz kućanstava, a koje su se akumulirale u okolišu. Posebno se to odnosi na boce u kojima se skladište tekuće tvari (kao što su razna pića). Takve boce samljevene su u stakleni pijesak (GS). Dobiveni prah je prosijan i korišten kao MA. Analize prosijanog MA dobivenog prosijavanjem i analize recikliranog stakla tj. staklenog pijeska (GS) prikazane su na slici 2.



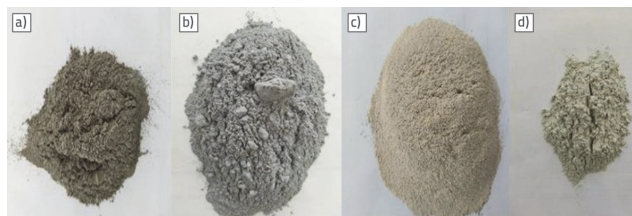
Slika 2. Granulometrijski sastav materijala

Dodatno su korišteni voda i superplastifikator, točnije kemijski aditiv za redukciju vode na bazi polikarboksilatnog etera

Tablica 2. Sastav smjese

Oznaka mješavine	Cement [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Silicijska prašina [kg/m ³]	HRWR [kg/m ³]	Mikroagregat [kg/m ³]	Stakleni pijesak [kg/m ³]
MC1	570	371,8	125	12	996,7	0
MC2	570	371,8	125	12	877,1	119,6
MC3	570	371,8	125	12	727,6	269,1
MC4	570	371,8	125	14	498,3	498,4
MC5	580	378,2	127	13	966	0
MC6	580	378,2	127	13	850,1	115,9
MC7	580	378,2	127	13	705,2	260,8
MC8	580	378,2	127	14	483	483
MC9	599	390,8	131,5	14	908,8	0
MC10	599	390,8	131,5	14	799,7	109,1
MC11	599	390,8	131,5	14	663,4	245,4
MC12	599	390,8	131,5	14	454,4	454,4
MC13	658	429,3	144,5	15	738	0
MC14	658	429,3	144,5	15	649,4	88,6
MC15	658	429,3	144,5	15	538,7	199,3
MC16	658	429,3	144,5	15	369	369

(HRWRA) za povećanje obradivosti mješavina. Na taj način se želi održati homogenost proizvedenih smjesa kao i postići visoki kapacitet fluidnosti. Cement, silicijska prašina, MA, stakleni pijesak (GS) (slika 3.) i HRWR korišteni su u mješavinama proizvedenim kao mikrobeton (MC). Vrijednosti specifične težine cementa, silicijske prašine, MA, GS i HRWR su redom 3,1, 2,2, 2,65, 2,56 i 1,055 t/m³.



Slika 3. Materijali korišteni u mješavinama: a) cement; b) silicijska prašina; c) MA; d) reciklirano staklo - stakleni pijesak (GS)

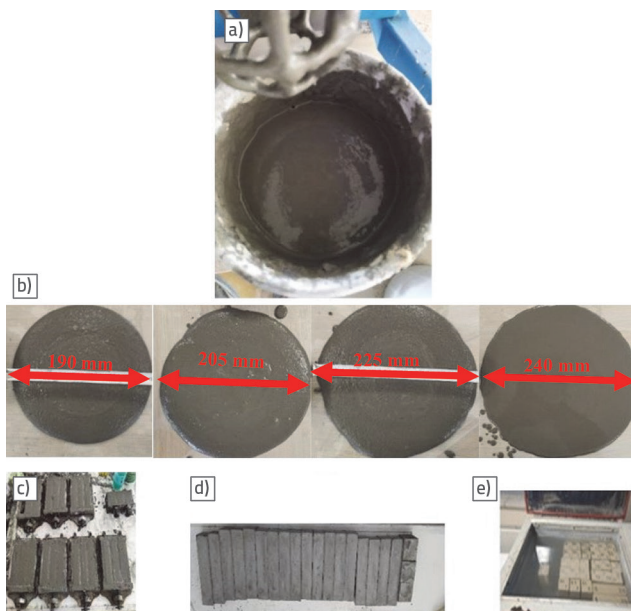
2.2. Sastav mješavina

Proizvedeni mikrobetoni (MC) homogeno su proizvedeni uz pomoć standardne miješalice za mort koja zadovoljava zahtjeve tadašnje norme [23], a miješani su do razine na kojoj se tijekom pripreme komponenata dostigla potpuna homogenost smjese. Kao što je sažeto prikazano u tablici 2., omjer vode/cementa (v/c) bio je na konstantnoj vrijednosti od 0,535 u svim mješavinama. Mješavine su se proizvodile u četiri skupine, a u tim skupinama se mijenjala doza veziva i udio agregata. Mješavine se mogu podijeliti u četiri skupine: MC1-MC4, MC5-MC8, MC9-MC12, i MC13-MC16. Količina vode izračunana je kao 371,8, 378,2, 390,8 i 429,3 kg/m³ za MC1-MC4, MC5-MC8,

MC9-MC12 i MC13-MC16. Odabrani udio veziva u mješavinama bio je redom 695, 707, 730,5 i 802,5 kg/m³. Osim toga, količina MA u smjesama varirala je te je bila 996,7, 966, 908,8 i 738 kg/m³ za MC1-MC4, MC5-MC8, MC9-MC12 i MC13-MC16, a udio zamjene između upotrijebljenih MA i recikliranog stakla - staklenog pijeska bila je 0 %, 12 %, 27 % i 50 %, u skladu sa masom mješavina u svakoj proizvedenoj skupini (tablica 2.).

2.3. Proizvodnja uzorka i postupak miješanja

Korištena je standardna miješalica za proizvodnju mikrobetona koja je prikazana na slici 4a. Tijekom proizvodnje mješavina prvi korak je bio da se napravi suha smjesa. To se je postiglo jednogminutnim miješanjem u miješalici. Zatim se smjesi dodalo 2/3 potrebne količine vode koja se miješala isto minutu. Potrebni HRWR je dodan u preostalu 1/3 vode i zatim je to dodano u smjesu i miješano još minutu. Smjesa je potom odstajala minutu, pa je miješana još minutu. Na kraju su te smjese, nakon što su ispitana njihova svojstva u svježem obliku, postavljene u kalupe. Za proizvodnju smjese bilo je potrebno ukupno 5 minuta. Osim toga, provjeravana je obradivost proizvedenih mješavina, a obradivost je mjerena testom slijeganja smjesa tzv. *mini-slump flow* testom. Ispitivanje testom slijeganja prikazano je na slici 4.b. Uređaj za test slijeganjem bio je krnji stožac visine 60 mm, gornjeg promjera 70 mm i donjeg 100 mm. Rezultati testa slijeganjem povećavali su se razmjerno s povećanjem udjela recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) unutar raspona promjera 190-240 mm. Ove vrijednosti su bliske rezultatima samozbijajuće cementne paste opisane u literaturi [24]. Dobivene mješavine ugrađene su u metalne kalupe u obliku prizme dimenzija 40 × 40 × 160 mm i u kalupe u obliku kocke dimenzija 50 × 50 × 50 mm (slika 4.c). Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata (slika 4.d) i stavljeni u spremnike za njegovanje vodom na 20±2°C (slika 4.e). Uzorci su ostavljeni da odstoje kroz različita razdoblja. Testirani su uzorci što su stajali 7 dana, u ranoj starosti, i uzorci koji su ostavljeni na sušenju 28 dana, što se smatra da je normalne starosti. Za prvu seriju testiranja, samo 7-dnevno sušeni uzorci su uklonjeni iz spremnika za njegovanje i testirani. Svi preostali uzorci uklonjeni su kada je normalno vrijeme njegovanja doseglo rok od 28 dana. Na ovim uzorcima provedena su ispitivanja starosti od 28 i 56 dana.



Slika 4. a) miješalica; b) konzistencija slijeganjem; c) ugradnja u kalupe; d) uklanjanje kalupa; e) njegovanje uzoraka

2.4. Postupak ispitivanja u očvrslom stanju

2.4.1. Postupak mehaničkog ispitivanja

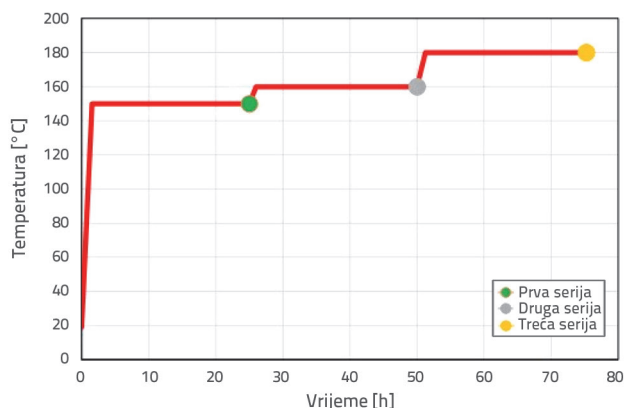
Proizvedene smjese izvađene su iz kalupa dan nakon punjenja u metalne kalupe i stavljene u vodu zasićenu vapnom na 20±2°C. U okviru ovog istraživanja uzorci stari 7, 28 i 56 dana podvrgnuti su mehaničkim ispitivanjima. Za potrebe ispitivanja i ovog istraživanja uzorci koji su stajali 7 i 28 dana uzeti su iz spremnika za njegovanje i odneseni u laboratorijsko okruženje te podvrgnuti eksperimentima. Preostali uzorci za 56-dnevno ispitivanje uklonjeni su iz spremnika za njegovanje na kraju perioda njegovanja od 28 dana i pohranjeni u laboratorijskom okruženju dok nisu navršili starost od 56 dana. Tri prizme su nasumično odabrane iz svakog seta mješavina za ispitne dobi i podvrgnute ispitivanju vlačne čvrstoće savijanjem prema normi ASTM C348 [25]. Ispitivanje aksijalne tlačne čvrstoće provedeno je na dijelovima koji se sastoje od slomljenih prizmi u skladu s normom ASTM C349 [26] (slika 5.b). Testirani pregledi očvrslulih prizmi prikazani su na slici 5.a.



Slika 5. a) Prizme pripremljene za ispitivanje čvrstoće na savijanje; b) Slomljene prizme nakon ispitivanja

2.4.2. Učinak temperature na njegovanje

Za uzorke ispitivane u drugoj skupini eksperimentalno je ispitan utjecaj temperature na uzorke koji su završili 28-dnevno razdoblje njegovanja. Devet prizmatičnih uzoraka uzeto je iz svake mješavine u spremniku za njegovanje, stavljeno u peć i izloženo toplini, kao što je prikazano na slici 6. Za toplinske učinke odabrane su temperaturne razine od 150°C, 160°C i 180°C. Tijekom eksperimenta svi uzorci su stavljani u peć istovremeno. Za procjenu utjecaja temperature uzorci su vađeni iz peći u tri faze. Prva serija uzoraka testirana je vađenjem iz pećnice 24 sata nakon što je pećnica dosegla 150°C. Drugi set uzoraka testiran je 24 sata nakon što je temperatura u pećnici dosegla 160°C. Zadnja runda je uklonjena i testirana 24 sata nakon što je temperatura u pećnici dosegla 180°C (slika 6.). Tri uzorka ekstrahirana za svaki učinak temperaturne skupine podvrgnuta su ispitivanju vlačne čvrstoće savijanjem i tlačne čvrstoće i izračunani su njihovi prosjeci.

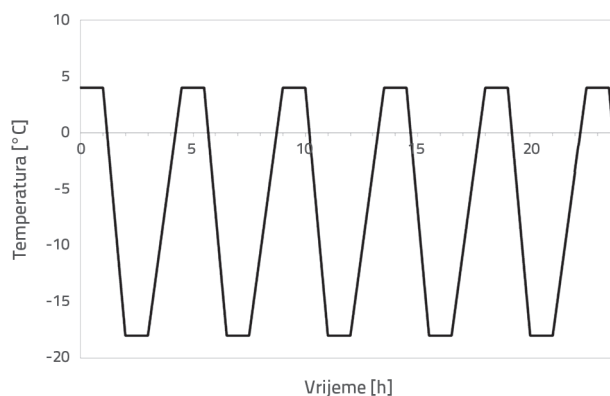


Slika 6. Promjena temperature

2.4.3. Učinak smrzavanja-odmrzavanja

Ispitivane su promjene čvrstoće MC smjesa nakon utjecaja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. U tu svrhu korišten je uređaj za smrzavanje i odmrzavanje s kapacitetom ciklusa smrzavanja na zraku i otapanja u vodi. Unutar opsega istraživanja za ispitivanje smrzavanjem-odmrzavanjem uzoraka mikrobetona (MC) primjenjena je norma ASTM C666-97 "Standardna ispitna metoda za otpornost betona na brzo smrzavanje i odmrzavanje" [27]. Postupak ispitivanja zahtijeva da se uzorci betona podvrgnu metodi brzog smrzavanja i odmrzavanja i to u vodi (postupak A) ili na zraku (postupak B). U okviru ovog ispitivanja, temperatura tijekom faze smrzavanja varira između 4°C i -18°C, a tijekom faze otapanja varira između -18°C i 4°C. Ovi ciklusi, koji se sastoje od faza smrzavanja i odmrzavanja, odvijaju se u razdoblju od 2 do 5 sati (slika 7.). Nakon što su uzorci završili 28-dnevno njegovanje u vodi, iz svake su smjese uzeta tri uzorka u obliku prizme i stavljena u uređaj. Nakon 100 ciklusa, uzorci su uklonjeni iz uređaja. Za svaku skupinu mješavina tri su uzorka prizme podvrgnuta ispitivanju njihove

vlačne čvrstoće savijanjem, a formirani slomljeni komad prizme zatim je podvrgnut ispitivanju tlačne čvrstoće uzoraka.



Slika 7. Ciklusi smrzavanja i odmrzavanja

2.4.4. Sorptivnost

Test sorptivnosti primjenjuje se za mjerenje kapilarne apsorpcije vode za mort ili beton. Drugim riječima, to je mjerenje prolaska vode kroz kapilarne strukture nastale između unutarnje strukture i površine u suhom betonu ili njegovim derivatima. Mjerenje takvog prolaska vode, također poznatog i kao apsorpcija vode, postiže se mjerenjem promjena tijekom vremena i njihovim iscrtavanjem na grafikonu. U proizvodima kao što je žbuka, ovo ispitivanje obično se provodi na uzorcima u obliku kocke. Test sorptivnosti odnosi se na mjerenja promjena vode koja se apsorbira u kapilarne strukture s površine elemenata kroz vrijeme, a kapilarne strukture se sastoje od makro i mikrošupljina u materijalima kao što su beton ili mort. [28, 29] Ispitivanje apsorpcije provedeno je prema normi ASTM C1585-13 [30], a proizvedeni uzorci uklonjeni su iz spremnika za njegovanje nakon 28 dana njegovanja vodom i potom podvrgnuti ovom ispitivanju. Navedeni uzorci uzeti iz spremnika za njegovanje stavljani su u pećnicu na $100 \pm 2^\circ\text{C}$ tijekom 24 sata sve, dok masa uzorka nije postala konstantna. Glavni razlog sušenja u pećnici je isparavanje postojeće količine vode u uzorku nakon čega može uslijediti kapilarna apsorpcija vode. Uzorci su uzeti iz peći i ohlađeni na sobnoj temperaturi. Zatim su četiri stranice svih uzoraka obložene vodootpornim materijalom (npr. parafinom). Gornja i donja površina obloženih uzoraka nisu premazane. Jedna od te dvije otvorene površine u kontaktu je s vodom, a druga površina ostaje u kontaktu sa zrakom. Zatim se mjerila masa apsorbirane vode dobivena apsorpcijom vode kroz kapilarni sustav (slika 8.).



Slika 8. Priprema za ispitivanje sorptivnosti

Nakon što je uzorak postavljen u vodu, vađen je iz spremnika u 5., 10., 30., 60., 240. i 1440. minuti i vagan vagom s preciznošću od 0,01 g. Odnos između upijanja vode Q (m^3) i kvadratni korijen vremena mjerenja prikazan je kao grafikon koji pokazuje gotovo linearnu varijaciju. Koeficijent kapilarne apsorpcije (k) prikazan je u obliku izraza (1) [30, 31]:

$$k = \frac{Q}{A \times \sqrt{t}} \quad (1)$$

Za određivanje koeficijenta sorptivnosti, masa vode apsorbirane na površini prema promjeni utvrđenih vremena apsorpcije vode ucrtana je na graf. Uz pomoć ovog dijagrama, koeficijenti sorpcije su određeni pomoću vrijednosti prikazane u izrazu (2):

$$\frac{W}{A \times \rho} = S \cdot \sqrt{t} + I_0 \quad (2)$$

gdje su W , A i t dani kao povećanje mase (kg), testirane površine (m^2), i vremenske varijable (min), dok je S koeficijent sorptivnosti u kratkom razdoblju ($mm/min^{1/2}$), a vrijednost t je između 1 min i 7 h. Koeficijent sorptivnosti za dugo razdoblje koristi se kada je t -vrijednost veća od 1 dan. U izrazu (2), I_0 definira se kao početna sorptivnost (mm), a ρ je gustoća vode (kg/m^3) [31].

2.4.5. Ispitivanja poroznosti, prividne specifične gustoće i specifične gustoće u suhom stanju

U prethodnim ispitivanjima pokazalo se da su poroznost i gustoća bili učinkoviti u procjeni svojstava, što se odnosi i na koheziju, diskontinuitet i poroznost elemenata proizvedenih s materijalima dobivenim od betona [32, 33]. Mikrobeton (MC) je proizveden u ukupno 16 različitih mješavina, te su poroznost, prividne specifične gustoće i specifične gustoće u suhom stanju izračunani pomoću metoda prema normi ASTM C-642 [34] te su tri kocke proizvedene za svaku smjesu. Da bi se izračunale vrijednosti poroznosti, specifične gustoće i specifične gustoće u suhom stanju, najprije su izmjerene mase uzoraka u obliku kocke proizvedenih za sve mješavine u zasićenoj vodi, a zatim mase uzoraka zasićenog površinski suhog uzorka, potom su uzorci stavljeni na sušenje u pećnicu na $100 \pm 2^\circ C$ tijekom 24 sata, te je ovaj proces sušenja nastavljen dok se mase nisu stabilizirale. Eksperimentalna mjerenja pomoću spomenutog standarda proveli su i istraživači u drugim studijama [35]. Za izračunavanje poroznosti korištene su izrazi (3), specifične gustoće u suhom stanju, zatim specifične gustoće u suhom stanju, izraz (4), i prividne specifične gustoće, izraz (5), uzoraka prema normi ASTM C-642 [34].

$$\text{Poroznost [\%]} = \frac{w_3 - w_1}{w_3 - w_2} \quad (3)$$

$$\text{Specifična gustoća u suhom stanju} = \frac{w_1}{w_3 - w_2} \quad (4)$$

$$\text{Prividna specifična gustoća} = \frac{w_1}{w_1 - w_2} \quad (5)$$

U ovom slučaju je w_1 konačna masa uzorka na zraku osušenog u pećnici, w_2 je izmjerena masa potpuno zasićenog uzorka, a w_3 je masa zasićenog površinski suhog uzorka, izrazi (3) do (5).

3. Rezultati i rasprava

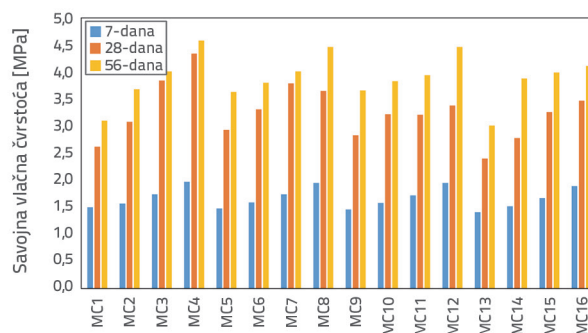
3.1. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

3.1.1. Vlačna čvrstoća savijanjem za standardne starosti

U okviru ovog istraživanja ocjenjivani su uzorci izrađeni od mikrobetona (MC) u tri skupine. Svrha ovog testa bila je ispitivanje uporabljivosti proizvedenih uzoraka procjenom učinaka okolišnih faktora i utjecaja na te proizvedene uzorke. U prvoj skupini su testirani uzorci stari 7, 28 i 56 dana, ispitana je njihova vlačna čvrstoća savijanjem te je evaluirana u ovisnosti o njihovoj starosti. Za drugu skupinu, 28-dnevni uzorci bili su izloženi temperaturama između $150^\circ C$ i $180^\circ C$, a zatim je ispitana njihova vlačna čvrstoća savijanjem. Za treću skupinu ispitana je vlačna čvrstoća savijanjem nakon utjecaja smrzavanja i odmrzavanja, a promjene čvrstoće uspoređene su s promjenama kod uzoraka starosti 28 dana.

Rezultati vlačne čvrstoće savijanjem u laboratorijskim uvjetima za prvu skupinu uzoraka ispitani su u okviru ovog odjeljka. Da bi se to postiglo, testovi su provedeni na tri uzorka proizvedena za svaku mješavinu u starosti od 7, 28 i 56 dana. Rezultati iz tih uzoraka prikazani su na slici 9. kao srednja vrijednost sva tri uzorka za sve mješavine mikrobetona (MC).

Mješavina MC13 imala je najnižu vlačnu čvrstoću savijanjem među uzorcima koji su testirani čije su starosti bile 7, 28 i 56 dana. Vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem dobivene za smjesu MC13 za ispitivanja na uzorcima od 7, 28 i 56 dana bile su redom 1,41, 2,88 i 3,01 MPa. U ovoj mješavini udio MA je najniži i iznosi $726 kg/m^3$, a udio veziva je najveći $803 kg/m^3$. Sukladno rezultatima ispitivanja provedenih za starosti od 7, 28 i 56 dana među proizvedenim mješavinama maksimalne vlačne čvrstoće savijanjem pokazali su uzorci proizvedeni od smjese MC4. Kao što pokazuju rezultati pokusa provedenih na mješavini MC4 nakon 7, 28 i 56 dana, vlačna čvrstoća savijanjem pri tim starostima iznosila je 1,97, 4,34 i 4,58 MPa. Mješavina MC4 ima najveći udio MA od $985 kg/m^3$ i sadrži 50 % GS-a. Osim toga, ova mješavina ima najniži udio veziva od $701 kg/m^3$ (slika 9.).

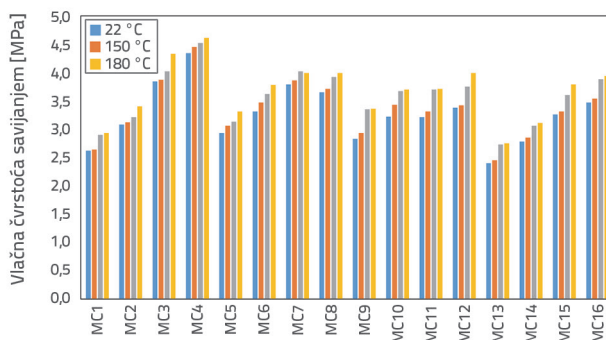


Slika 9. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

Proizvedeno je ukupno 16 mješavina primjenom četiri različita omjera supstitucije GS i MA i četiri različita udjela veziva. Proizvedene skupine označene su kao mješavine MC1-MC4, MC5-MC8, MC9-MC12 i MC13-MC16, a smjese MC1, MC5, MC9 i MC13 oblikovane su kao kontrolne smjese unutar svake skupine. U okviru ovog ispitivanja uzorci proizvedeni od svih mješavina ispitivani su na vlačnu čvrstoću savijanjem. Unatoč povećanom udjelu veziva u 7-dnevnim eksperimentima, kontrolne mješavine pokazale su smanjenje od 1,3 %, 2,7 %, odnosno 6 % u mješavinama MC5, MC9 i MC13 u usporedbi s MC1. U 28-dnevnim eksperimentima, mješavine MC5 i MC9 pokazale su povećanje od 12 % odnosno 8 %, u usporedbi s mješavinom MC1, dok je smanjenje od 8,4 % izračunano za mješavinu MC13. U 56-dnevnim starostima, povećanje u mješavinama MC5 i MC9 doseglo je 17 % odnosno 18 %, u usporedbi s mješavinom MC1, dok je izračunano smanjenje od 3 % u mješavini MC13 (slika 9.). Mješavine u kojima je bio GS kao supstituit u skupinama MC1-MC4, MC5-MC8, MC9-MC12 i MC13-MC16 uspoređene su s kontrolnom mješavinom u smislu njihove odgovarajuće vlačne čvrstoće na savijanje dobivene iz pokusa. U 7-dnevnim eksperimentima izračunana su povećanja od 16 % do 31 %, 18 % do 32 %, 18 % do 34 % i 18 % do 34 %, a u 28-dnevnim ispitivanjima povećanja od 47 %-66 %, 25 % do 29 %, 13 % do 19 %, odnosno 36 % do 45 % za gore navedene skupine. Rezultati 56-dnevnog eksperimenta također su pokazali porast od 29 % do 48 %, 10 % do 23 %, 8 % do 22 %, odnosno 33 % do 37 % u odnosu na kontrolne mješavine.

3.1.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem uz utjecaj temperature

Za procjenu vlačne čvrstoće savijanjem uzoraka pod utjecajem temperature, uzorci ostavljeni na u vodi nakon 28 dana uzeti su iz spremnika za njegovanje i izloženi temperaturnom utjecaju u peći. Nakon što su uzorci bili izloženi temperaturama od 150 °C, 160 °C i 180 °C, uspoređivane su vrijednosti testova provedenih s uzorcima uzetim iz spremnika za njegovanje (pri sobnoj temperaturi od 22 °C). Najniže vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem uzoraka pod utjecajem temperatura od 150 °C, 160 °C i 180 °C izračunane su na 2,45, 2,73 i 2,75 MPa (slika 10.). Ove vrijednosti dobivene su iz mješavine MC13, koja je kontrolna mješavina s najvećim udjelom veziva. Pri maksimalnim vlačnim čvrstoćama savijanjem, vlačne čvrstoće izračunane su na 4,45, 4,52 i 4,61 MPa za 150 °C, 160 °C, odnosno 180 °C (slika 10.). Ove vrijednosti dobivene su u mješavini MC4 koja ima najmanji udio veziva i najveći udio agregata. Osim toga, promjena omjera zamjene agregata i GS u ovoj mješavini je 50 %. U usporedbi s kontrolnim uzorkom koji nije bio izložen toplini, uočeno je da se minimalna vlačna čvrstoća savijanjem povećala za 2 % do 15 % pri 150 °C, 160 °C i 180 °C. Uočeno je da su se maksimalne vlačne čvrstoće savijanjem pri 150 °C, 160 °C i 180 °C povećale za 3 % do 6 % u usporedbi s kontrolnim uzorkom koji nije bio izložen toplini (slika 10.).

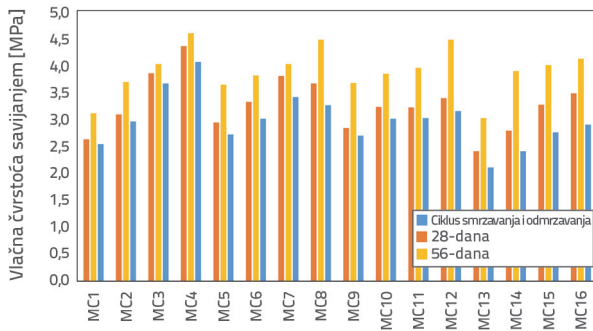


Slika 10. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću pri savijanju

Skupine mješavina MC1-MC4, MC5-MC8, MC9-MC13 i MC14-MC16 podvrgnute su temperaturama od 150 °C, 160 °C i 180 °C, a rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem zatim su uspoređeni s uzorcima testiranim pod laboratorijskim uvjetima. Prosječna povećanja od 1,4 %, 3,2 %, 3,5 % i 2,0 % izračunana su za skupine mješavina MC1-MC4, MC5-MC8, MC9-MC13, odnosno MC14-MC16, za uzorke izložene temperaturi na 150 °C. Na kraju 160 °C izračunana su prosječna povećanja od 5,5 %, 7,3 %, 14,6 %, odnosno 11,4 % za istu skupinu mješavina. Prosječna povećanja od 10,1 %, 10,2 %, 16,8 %, odnosno 14,1 % izračunana su nakon izlaganja konačnom temperaturnom koraku od 180 °C (slika 10). Rezultati ispitivanja, s obzirom na to što nehidratizirana voda u smjesi povećava hidrataciju cementa, pokazuju da adhezija i tlačna čvrstoća rastu zajedno s porastom temperature (25 °C do 180 °C) zahvaljujući vezivnoj strukturi formiranoj između cementa i korištenog recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) i mikroagregata (MA). To pokazuje da se iznad 200 °C ova struktura veze može smanjiti s povećanjem temperature [36].

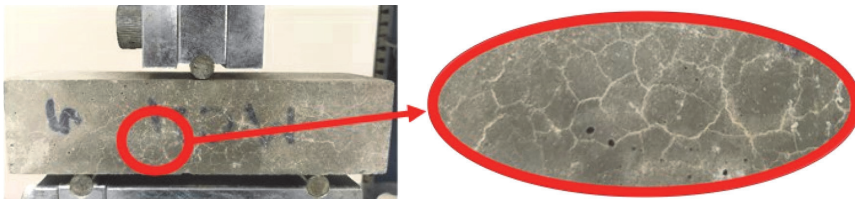
3.1.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem nakon smrzavanja i odmrzavanja

Usporedba rezultata vlačne čvrstoće na savijanje dobivenih na kraju ispitivanja smrzavanjem i odmrzavanjem i rezultata vlačne čvrstoće savijanjem nakon 28 i 56 dana za svaki set uzoraka prikazana je na slici 11. Izračunano je da mješavine MC13 i MC4 imaju najnižu i najveću vlačnu čvrstoću savijanjem u odnosu na sve ostale uzorke na kojima su provedena i dovršena ispitivanja smrzavanjem i odmrzavanjem. Mješavina MC4 ima najmanji udio veziva, ali najveći udio mikroagregata. Nasuprot tome, udio recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) u ovoj mješavini je 50 %. Mješavina MC13 ima najveći udio veziva, ali nema recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS). Na kraju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, gubitak čvrstoće varira između 3 % i 17 % u usporedbi s uzorcima od 28 dana. Najmanja izračunana promjena bila je za MC1, a najveća promjena dogodila se za MC16. Uzorak MC1 imao je najmanju količinu veziva, dok je uzorak MC16 imao najveću količinu veziva. MC1 nema u svom udjelu recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS), a MC16 ima najveći udio recikliranog stakla - staklenog pijeska u smislu supstitucijskog modela iz skupine uzoraka MC13-MC16 (slika 11.).



Slika 11. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

U uzorcima s najvećim udjelom recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) postoje površinske pukotine koje se mogu uočiti na vanjskim površinama uzoraka zbog ciklusa smrzavanja-odmrzavanja (slika 12.). Međutim, gubitak čvrstoće na kraju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja varirao je između 9 % i 38 % u usporedbi s uzorcima starosti od 56 dana. Najmanja promjena izračunana je u MC3, a najveća u MC14. Međutim, MC3 je oblikovan s najmanjim udjelom veziva, a MC14 koristio je najveći udio veziva. Mješavina MC3 udio recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) 27 %. Mješavina MC13 ima najveći udio veziva među skupinama mješavina proizvedenih s 12 % recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) (slika 12.).



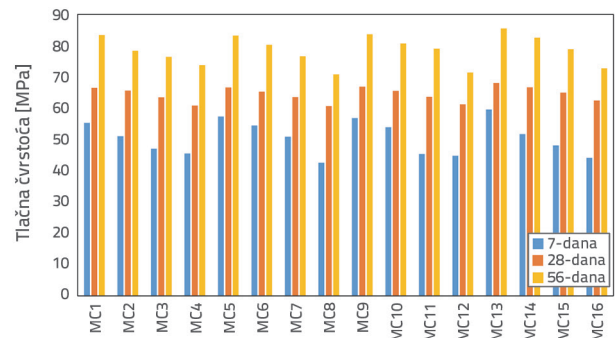
Slika 12. Uzorci nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja

3.2. Tlačna čvrstoća

3.2.1. Tlačna čvrstoća za standardne starosti

Nakon ispitivanja vrijednosti vlačne čvrstoće na savijanje, mješavina uzoraka starosti 7, 28 i 56 dana, na dijelovima dobivenim iz uzoraka isti dan je provedeno i ispitivanje tlačne čvrstoće. Podaci koji su dobiveni u ispitivanju prikazani su na slici 13. Minimalne tlačne čvrstoće dobivene za uzorke nakon 7, 28 i 56 dana su 42,57, 60,69 i 70,82 MPa. Te tlačne čvrstoće dobivene su iz uzoraka proizvedenih iz mješavine MC8. U toj mješavini korištena stopa supstitucije recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) bila je 50 %. Maksimalne tlačne čvrstoće dobivene za uzorke nakon 7, 28 i 56 dana su 59,58, 68,07, 75,49 i 85,5 MPa (slika 13.). Te dobivene čvrstoće izračunane su za mješavinu MC13 i, premda ima najveći omjer veziva u ovoj smjesi, u njoj nije bilo GS supstitucije. Promjene tlačne čvrstoće procijenjene su na temelju kontrolnih mješavina (MC1, MC5, MC9 i MC13) u skupinama mješavina. Promjene u tlačnoj čvrstoći dobivene za starost od 7 dana

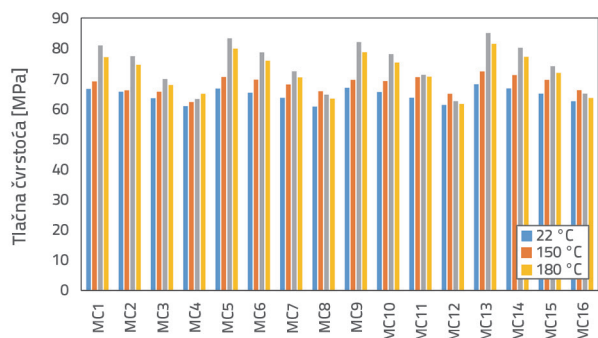
smanjile su se između 4 % i 26 % razmjerno povećanju GS supstitucije. Međutim, te su vrijednosti varirale između 1 % i 9 % za skupinu starosti od 28 dana te između 3 % i 15 % za skupinu starosti od 56 dana. Što je još važnije, primijećeno je prosječno smanjenje tlačne čvrstoće od 15 % u mješavinama s 50 % GS zamjene (MC4, MC8, MC12 i MC16) (slika 13.).



Slika 13. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

3.2.2. Tlačna čvrstoća i temperaturni učinak

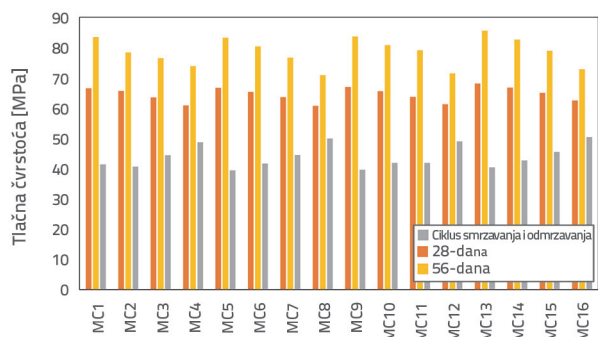
Na uzorcima dobivenim iz proizvedenih smjesa ispitivala se promjena tlačne čvrstoće nakon utjecaja temperature od 150 °C, 160 °C i 180 °C. Promjene tlačne čvrstoće na uzorcima starim 28 dana, koje su testirane u laboratoriju, prikazane su na slici 14. Najmanja tlačna čvrstoća od 62,22 MPa postignuta je na uzorku MC4 pri 150 °C. Najmanje tlačne čvrstoće pri 160 °C i 180 °C zabilježene su u mješavini MC12. Zajednička značajka mješavina MC4 i MC12 jest ta da obje imaju najveći udio recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS). Najveće tlačne čvrstoće dobivene su u uzorcima mješavine MC13 testiranim nakon utjecaja temperatura od 150 °C, 160 °C i 180 °C. Te su čvrstoće izračunane na 72,34, 85,01 i 81,46 MPa (slika 14.). Uzorci koji su osušeni u laboratorijskim uvjetima prihvaćeni su kao kontrolni uzorci unutar svake skupine. Ti su uzorci procijenjeni u usporedbi s temperaturnim učinkom. U tom kontekstu, uočeno je povećanje u uzorcima od 1 %-11 %, 2 %-25 % i 1 %-20 % na 150 °C, 160 °C, odnosno 180 °C. Kako se udio recikliranog stakla - staklenog pijeska povećavao na 160 °C i 180 °C, opažena povećanja tlačne čvrstoće smanjivala su se s 20 %-25 % na 2 %-6 % (slika 14.). To bi moglo biti zbog reakcije $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kemijskog spoja, koji se može formirati iz CaCO_3 u vapnenačkom pijesku, sa spojem SiO_2 u pucolanima (u staklenom pijesku i dodatkom silicijeve prašine). Kao posljedica toga, očekuje se stvaranje hidrata kalcijevog silikata, nusproizvoda reakcije hidratacije. Kao ishod ovih kemijskih reakcija je to da se $\text{Ca}(\text{OH})_2$ može smanjiti, a raspoloživi CSH porasti [37-39]. Smatra se da poboljšanje ove situacije s učinkom temperature može povećati učinkovitost mikrobetona unutar određenih temperaturnih raspona.



Slika 14. Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću

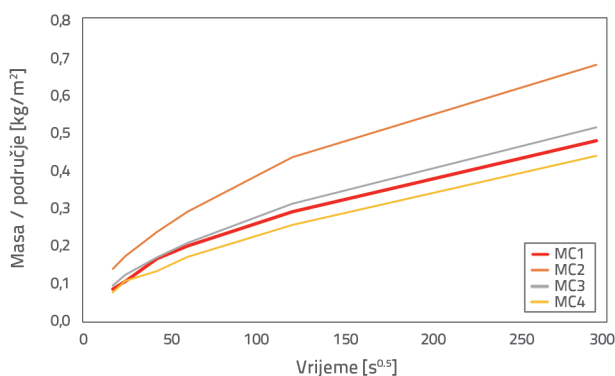
3.2.3. Tlačna čvrstoća i učinak smrzavanja-odmrzavanja

Uzorci u obliku prizme dobiveni iz proizvedenih smjesa podvrgnuti su ispitivanju vlačne čvrstoće savijanjem koje je opisano u prethodnom odjeljku i to nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, nakon čega su provedena ispitivanja tlačne čvrstoće na dobivenim slomljenim prizmama. Rezultati tlačne čvrstoće prikazani su na slici 15., zajedno s rezultatima nakon 28 i 56 dana starosti.



Slika 15. Ispitivanje tlačne čvrstoće nakon ciklusa smrzavanja-odmrzavanja

Rezultati tlačne čvrstoće dobiveni nakon ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pokazali su 19 % do 41 % gubitaka tlačne čvrstoće u usporedbi s uzorcima testiranim nakon 28 dana. Nasuprot



Slika 17. Rezultati testa sorptivnosti, 1. dio slike

tome, kada je ista procjena napravljena prema rezultatima 56-dnevnih uzoraka, izračunan je gubitak tlačne čvrstoće između 31 % do 53 %. Nadalje, promjena tlačne čvrstoće uzoraka proizvedenih iz mješavina koje sadrže 50 % recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) (MC4, MC8, MC12 i MC16) izračunana je redom kao 20 % do 34 %, 18 % do 30 %, 20 % do 31 % i 19 % do 31 % manje od ostalih mješavina u skupini. Izračunano je da te promjene imaju najmanji gubitak tlačne čvrstoće zbog smrzavanja i odmrzavanja u svojim skupinama. Slike uzoraka koji su ispitivani nakon razbijanja prikazane su na slici 16.



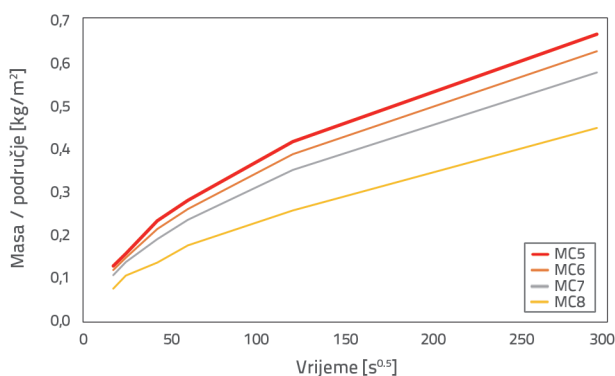
Slika 16. Uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće nakon ciklusa smrzavanja-odmrzavanja

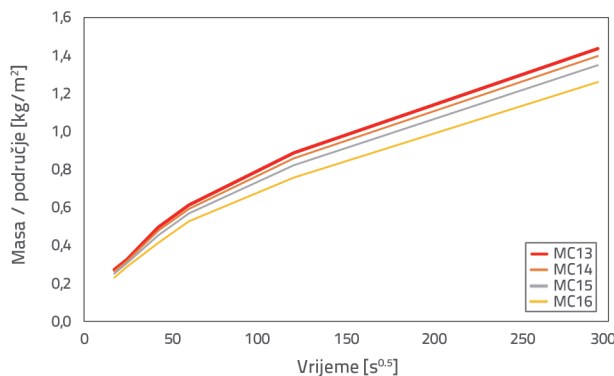
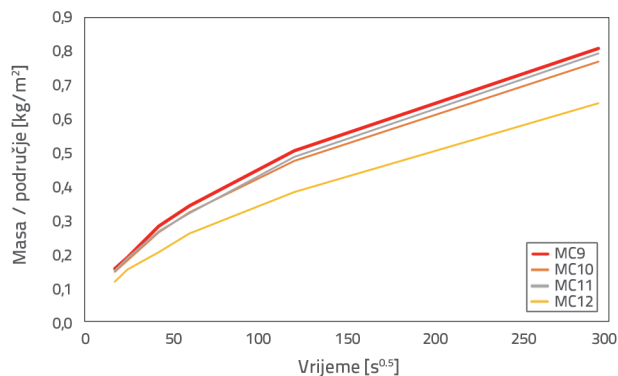
3.3. Rezultati ispitivanja svojstva trajnosti

3.3.1. Sorptivnost

U testu kapilarne apsorpcije vode mjereno je kretanje vode od površine betona prema unutrašnjosti kapilarnih sustava formiranih od šupljina mikroveličina. Ovo ispitivanje je važan čimbenik koji neizravno pokazuje propusnost betona, odnosno u konačnici trajnost tog betona. Grafikonci upijanja - apsorpcije za skupine mješavina MC1-MC4, MC5-MC8, MC9-MC12 i MC13-MC16 prikazani su na slici 17. Vrijednosti S i I_0 izračunavaju se na dobivenim grafikonima. Rezultati dobivenih vrijednosti prikazani su na slici 18.

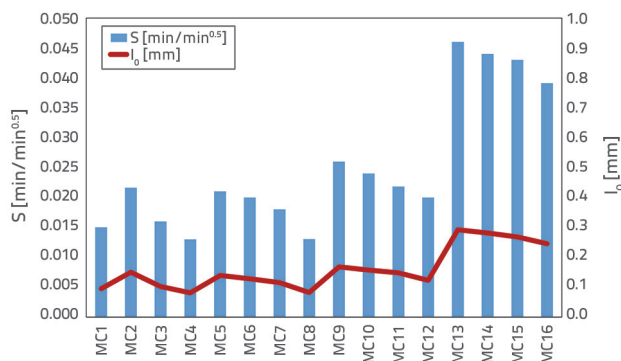
Regresijski koeficijenti izračunani su između 0,953 i 0,982. Najniži i najviši koeficijent sorptivnosti za ranu dob (S) jednak je 0,013 odnosno 0,046 ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$). Osim toga, za drugi izračunani parametar, prva sorpcija (I_0), izračunano je





Slika 17. Rezultati testa sorptivnosti, 2. dio slike

da ima najnižu i najveću vrijednost od 0,081 odnosno 0,292 (mm) (slika 18.).



Slika 18. Rezultati testa sorptivnosti (S i I₀)

Mješavine s najnižim i najvišim vrijednostima su MC4 odnosno MC16. Obje mješavine imale su najveći udio recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) (50 % supstitucije), dok je druga mješavine imala najveću dozu veziva između svih skupina smjesa.

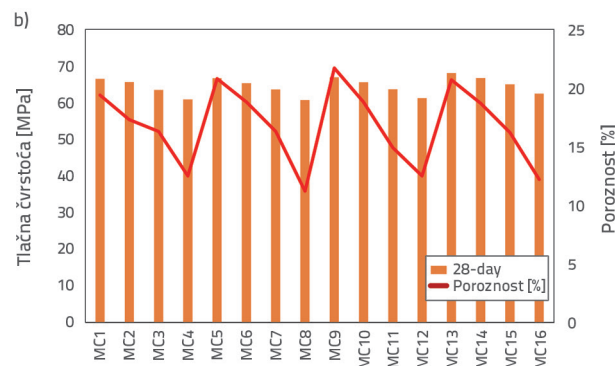
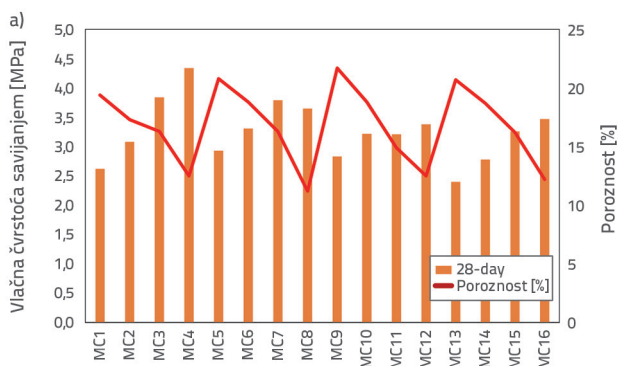
3.3.2. Poroznost i prividna specifična gustoća

Vrijednosti poroznosti izračunane su dijeljenjem razlike između mase zasićenog površinski suhog uzorka i mase osušenog

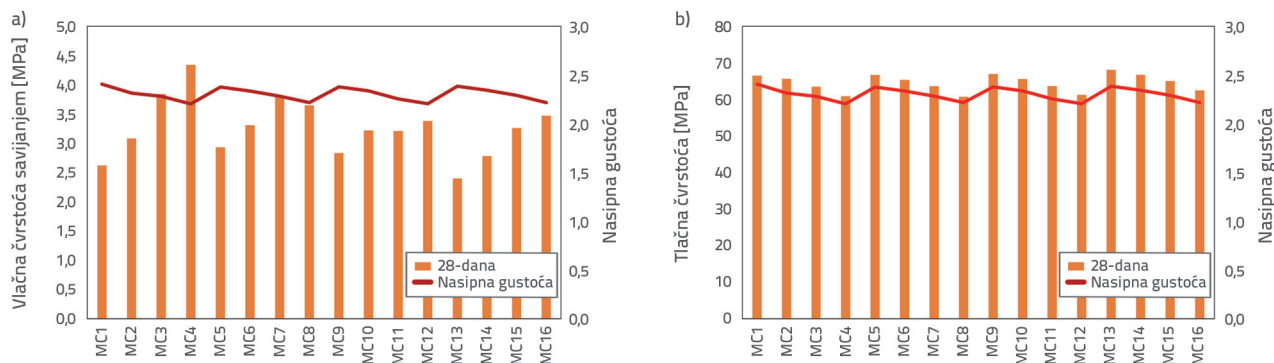
u pećnici te mase potpuno zasićenog uzorka u vodi. Te su vrijednosti izračunane uzimanjem prosjeka od tri uzorka u obliku kocke za svaku mješavinu u okviru ovog istraživanja. Dobiveni rezultati uspoređeni su s vlačnom čvrstoćom na savijanje 28-dnevnih uzoraka te su prikazani na slici 19.a. Nakon što su rezultati proučeni, utvrđeno je da najveća vlačna čvrstoća iznosi 4,34 MPa za 28-dnevne uzorke, s vrijednošću poroznosti od 12,5 %. Također se pokazalo da najmanje vrijednosti vlačne čvrstoće na savijanje odgovara najvećim vrijednostima poroznosti među skupinama mješavina, a najveće vrijednosti vlačne čvrstoće odgovaraju najnižim vrijednostima poroznosti (slika 19.a).

Grafikon na slici 19.b prikazuje odnos između tlačne čvrstoće i promjena u poroznosti. Također pokazuje da se među rezultatima u skupinama mješavina smanjuje poroznost paralelno sa smanjenjem tlačne čvrstoće. Mješavina MC13, koja ima najveću tlačnu čvrstoću od 68,07 MPa, ima poroznost od 20,7 %; međutim, ta poroznost odgovara najnižoj vlačnoj čvrstoći savijanjem (slike 19.a i 19.b).

Uz ispitivanje poroznosti, proračuni prividne specifične gustoće također su provedeni i na uzorcima proizvedenim u okviru ovog istraživanja. Dobivene vrijednosti prividne specifične gustoće varirale su između 2,2 i 2,41. Na slici 19.a nalazi se grafikon na kojem su zajedno prikazane vlačna čvrstoća savijanjem i prividna specifična gustoća, mješavina MC13 pokazuje najnižu vlačnu čvrstoću savijanjem, dok prividna specifična gustoća konvergira na 2,4. U mješavini



Slika 19. Ovisnost poroznosti u odnosu na: a) vlačnu čvrstoću savijanjem; b) tlačnu čvrstoću



Slika 20. Pravidna specifična gustoća u odnosu na: a) vlačnu čvrstoću savijanjem; b) tlačnu čvrstoću

MC4, gdje je izračunana najveća vlačna čvrstoća savijanjem, prividna specifična gustoća se približava 2,2 (slika 20.a). Nadalje, prividna specifična gustoća konvergira na 2,4 za mješavinu MC13 koja ima najveću tlačnu čvrstoću, dok za mješavinu MC8 konvergira na 2,2 koja ima najmanju tlačnu čvrstoću (slika 20.b). Vrijednosti prividne specifične gustoće smanjuju se paralelno sa smanjenjem tlačne čvrstoće među skupinama mješavina.

4. Zaključak

U ovom eksperimentalnom istraživanju o upotrebi recikliranog stakla - staklenog pijeska (GS) umjesto MA u mikrobetonu ispitane su promjene u čvrstoći na savijanje i tlačnoj čvrstoći u različitim starostima, pod utjecajem različitih temperatura i učinka smrzavanja i odmrzavanja te su postignuti sljedeći rezultati:

- Iako ima isti w/b omjer pod visokim udjelom veziva, primijećeno je da je zamjena sa staklenim pijeskom učinkovita u vlačnoj čvrstoći savijanja u gotovo svim starosnim skupinama. Štoviše, kod uzorka s povećanjem udjela veziva, dolazi do blagog smanjenja u usporedbi s uzorcima s niskim udjelom veziva.
- GS kao supstitucija poboljšava vlačnu čvrstoću na savijanje kako se stopa supstitucije povećava u smjesama unutar grupa koje imaju isti udio veziva.
- Na temperaturama od 150°C, 160°C i 180°C primijećena su značajna povećanja vlačne čvrstoće na savijanje, osobito na temperaturama od 160°C i 180°C.

- Nakon 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, izračunano je da se vlačna čvrstoća na savijanje uzoraka izloženih ovom učinku smanjuje u prosjeku za 10 % u usporedbi s uzorcima od 28 dana starosti. Osim toga, vlačna čvrstoća na savijanje smanjila se u prosjeku za 25 % u usporedbi s uzorcima starim 56 dana.
- Unatoč smanjenju tlačne čvrstoće unutar skupine u mješavinama s visokim udjelom veziva i recikliranog stakla, uočena su značajna povećanja tlačne čvrstoće u različitim skupinama.
- Iako se pokazalo povećanje tlačne čvrstoće pod utjecajem primijenjenih temperatura od 150°C, 160°C i 180°C, posebno na 150°C i 160°C, negativni učinci na tlačnu čvrstoću su se pojavili na 180°C. Ova se promjena dogodila nakon postizanja 160°C pri primjeni recikliranog stakla od 27 % i više, posebno u smjesama s visokim udjelima veziva.
- Kada se uzmu u obzir tlačne čvrstoće dobivene iz uzoraka starih 28 i 56 dana, 100 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja rezultiralo je prosječnim gubicima tlačne čvrstoće od 32 % odnosno 42 %. Najveće promjene dogodile su se u kontrolnim smjesama. Primjena recikliranog stakla pokazala je pozitivan učinak i smanjila stopu pada tlačne čvrstoće.
- Korištenje recikliranog stakla rezultiralo je smanjenjem poroznosti i prividne specifične gustoće uz smanjenje apsorpcije.
- Prema rezultatima ispitivanja, mješavine koje sadrže MA i reciklirano staklo mogu se koristiti za postavljanje armaturna sidra u područjima koja zahtijevaju ojačanje, u premazima podnih površina u lakim i srednjim industrijskim konstrukcijama te u procesima izvođenja popravaka površinskih oštećenja.

LITERATURA

- [1] Long, G., Wang, X., Xie, Y.: Very-high-performance concrete with ultrafine powders, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002), pp. 601-605.
- [2] Felekoclu, B.: Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007), pp. 481-489.
- [3] Mittal, M., Basu, S., Sofi, A.: Effect of Sika viscocrete on properties of concrete, *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 2 (2013), pp. 61-66.
- [4] Karpuz, O., Akpınar, M.V., Aydin, M.M.: Effects of fine aggregate abrasion resistance and its fineness module on wear resistance of Portland cement concrete pavements, *Revista de La Construcción*, 16 (2017), pp. 126-132.

- [5] Cemalgil, S., Etlı, S., Onat, O.: Mechanical and Physical Properties of Self-Compacting Concrete Produced with Glass Powder, in: Int. Conf. Innov. Eng. Appl., Sivas, Turkey, 2018: pp. 371-376.
- [6] Gesoglu, M., Güneysi, E., Hansu, O., Etlı, S., Alhassan, M.: Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder, *Construction and Building Materials*, 140 (2017), pp. 562-569.
- [7] Aitcin, P.C.: Developments in the application of high-performance concretes, *Construction and Building Materials*, 9 (1995), pp. 13-17.
- [8] Öz, H.Ö.: Fresh, Mechanical and Durability Properties of Self-Compacting Mortars Incorporating Waste Glass Powder and Blast Furnace Slag, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (2017), pp. 9-22.
- [9] Zidol, A., Tognonvi, M.T., Tagnit-Hamou, A.: Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability, *New Journal of Glass and Ceramics*, 07 (2017), pp. 34-47.
- [10] Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A.: Use of waste glass in cement-based materials, *Environnement, Ingénierie & Développement*, N°57-Jan (2010).
- [11] Shayan, A., Xu, A.: Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, *Cement and Concrete Research*, 36 (2006), pp. 457-468.
- [12] Schwarz, N., Cam, H., Neithalath, N.: Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008), pp. 486-496.
- [13] Aliabdo A.A., Elmoaty A.M., Aboshama A.Y.: Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Construction and Building Materials*, 124 (2016),.
- [14] Grdić, D., Ristić, N., Topličić-Čurčić, G., Đorđević, D., Krstić, N.: Effects of addition of finely ground CRT glass on the properties of cement paste and mortar, *Gradjevinar*, 72 (2020), pp. 1-10.
- [15] Artigas, V.F., Positieri, M.J., Quintana, M.V., Oshiro, Á., Cortez, F.R.: Self-compacting mortars with mineral additions: perlite and limestone filler, *Revista de La Construcción*, 20 (2021), pp. 479-490.
- [16] Papadakis, V., Tsimas, S.: Supplementary cementing materials in concrete Part I efficiency and design, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002), pp. 1525-1532.
- [17] Matos, A.M., Sousa-Coutinho, J.: Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement, *Construction and Building Materials*, 36 (2012), pp. 205-215.
- [18] Sarıbiyik, A., Gurbuz, G.: Effects of glass fiber reinforced polymer pipe waste powder usage on concrete properties, *Revista de La Construcción*, 20 (2021), pp. 463-478.
- [19] Gupta, N., Gupta, A.: Condition assessment of the structural elements of a reinforced concrete structure using non-destructive techniques, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1116 (2021), pp. 012164.
- [20] Garg, S., Bajpai, K.K., Misra, S.: Rectification of a large vertical wall surface for flatness, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48 (2021), pp. 584-593.
- [21] Felekoğlu, B.: High Performance Micro Concrete Design, (2009),.
- [22] Felekoğlu, B.: Rheological behaviour of self-compacting micro-concrete, *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 39 (2014), pp. 1471-1495.
- [23] ASTM C305/C305-20: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM International, 04 (2009), pp. 3.
- [24] Schwartzentruber, L.D.A., Le Roy, R., Cordin, J.: Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC), *Cement and Concrete Research*, 36 (2006), pp. 1203-1213.
- [25] ASTM C348-02: ASTM C348-02 Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars, (2002), pp. 7.
- [26] ASTM C349-08: Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), ASTM International, (2008), pp. 1-4.
- [27] ASTM: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 03 (2003), pp. 2-7.
- [28] Leung, H.Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., Anwar, M.P.: Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume, *Construction and Building Materials*, 113 (2016), pp. 369-375.
- [29] Hall, C.: Water sorptivity of mortars and concretes: A review, *Magazine of Concrete Research*, 41 (1989), pp. 51-61.
- [30] ASTM C1585-13: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, ASTM International, 41 (2013), pp. 1-6.
- [31] Bentz, D.P., Ferraris, C.F., Wingpigler, J.: Service Life Prediction for Concrete Pavements and Bridge Decks Exposed to Sulfate Attack and Freeze-Thaw Deterioration, Volume II- Technical Basis for CONCLIFE- Sorptivity Testing and Computer Models, (2001),.
- [32] Cemalgil, S., Onat, O., Tanaydin, M.K., Etlı, S.: Effect of waste textile dye adsorbed almond shell on self compacting mortar, *Construction and Building Materials*, 300 (2021),.
- [33] Torres, M.L., García-Ruiz, P.A.: Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption, *Cement and Concrete Composites*, 31 (2009), pp. 114-119.
- [34] ASTM C642-97: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM, (1997),.
- [35] Galle, C.: Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying, *Cement and Concrete Research*, 31 (2001), pp. 1467-1477.
- [36] Ahmed, T.U., Shafiuddin Miah, Akhtar Hossain, Bari, N., Sazzad, M.: Effect of elevated temperature on the strength of cement mortar with the inclusion of fly ash, 29th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, (2004), pp. 135-141.
- [37] Rostásy, F.S., Weiß, R., Wiedemann, G.: Changes of pore structure of cement mortars due to temperature, *Cement and Concrete Research*, 10 (1980), pp. 157-164.
- [38] Lin, W.M., Lin, T.D., Powers-Couche, L.J.: Microstructures of fire-damaged concrete, *ACI Materials Journal*, 93 (1996), pp. 199-205.
- [39] Khurram, N., Khan, K., Saleem, M.U., Amin, M.N., Akmal, U.: Effect of Elevated Temperatures on Mortar with Naturally Occurring Volcanic Ash and Its Blend with Electric Arc Furnace Slag, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018 (2018), pp. 1-11.