

Primljen / Received: 11.7.2021.
Ispravljen / Corrected: 27.8.2022.
Prihvaćen / Accepted: 6.1.2023.
Dostupno online / Available online: 10.7.2023.

Ispitivanje primjene otpadnih mineralnih dodataka u betonu ultravisokih svojstava

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Selçuk Memiş**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Kastamonu, Turska
Odjel za građevinarstvo
smemis@kastamonu.edu.tr
Autor za korespondenciju



Ali Alshaab Ramroom, dipl.ing.građ.
Sveučilište Kastamonu, Turska
Odjel za materijale i inženjerstvo
ali.ramrom@gmail.com

Prethodno priopćenje

Selçuk Memiş, Ali Alshaab Ramroom

Ispitivanje primjene otpadnih mineralnih dodataka u betonu ultravisokih svojstava

Ovo istraživanje ispituje utjecaj različitog otpadnog materijala na svojstva betona ultravisokih svojstava (UHPC), kao i način njihova projektiranja i idealne omjere mješavine. Primjenom metode Taguchi L16 razvilo se nekoliko UHPC mješavina, a što općenito oblikuje eksperimentalne programe za procjenu svojstava UHPCA-a. Nadalje, izabrani su omjeri sastavnih materijala na temelju približnih dosegâ nađenih u literaturi. Uzorci su njegovani na dva različita načina, a to su: standardno njegovanje uranjanjem u vodu (SC) i njegovanje uranjanjem u vruću vodu (HC). Primijenjena su svojstva očvrstnulo i svježeg betona. Provedeno je ispitivanje betona u svježem stanju kako bi se odredila obradivost te se provelo standardno ispitivanje gustoće. Kako bi se ispitao očvrstnuli uzorak betona, proučene su tlačna čvrstoća i čvrstoća pri savijanju, a provedena su ispitivanja gustoće, apsorpcije i poroznosti. Rezultati tlačnih čvrstoća nakon 28 dana dobiveni Taguchijevim pristupom iznosili su 20 % u slučaju SF-a, 0 % u slučaju FA-a i 0 % u slučaju GBFS-a, a čvrstoće pri savijanju iznosile su 10 % za SF, 0 % za FA i 0 % za GBFS. Tlačna je čvrstoća bila 147.07 MPa u slučaju SC-a, 150.13 MPa u slučaju HC-a, a čvrstoća pri savijanju bila je 26.88 MPa u slučaju SC-a i 27.31 MPa u slučaju HC-a (jer se provodi nakon 28 dana u mješavini s 10 % SF i 10 % GBFS).

Ključne riječi:

beton ultravisokih svojstava (UHPC), cement, čelična vlakna, superplastifikatori na bazi polikarboksilatnog etera (PCE), tlačna čvrstoća

Research Paper

Selçuk Memiş, Ali Alshaab Ramroom

Investigation of the use of waste mineral additives in ultra-high-performance concrete

This study examined the effects of various waste materials on the properties of ultra-high-performance concrete (UHPC), along with their designs and ideal mix ratios. Several UHPC mixtures have been developed using the Taguchi L16 method, which generally forms part of the experimental programs for evaluating the properties of UHPCs. Furthermore, the proportions of the component materials were chosen based on approximate ranges found in literature. The samples were cured under two different regimes: standard immersion water curing (SC) and hot water immersion curing (HC). The properties of both hardened and fresh concretes were assessed. A flow test was conducted on the fresh concrete to determine the workability, and a standard test was conducted to assess the density. To investigate a hardened concrete sample, the compressive and flexural strengths were examined and density, absorption, and void tests were conducted. The results obtained from the Taguchi approach for the compressive strength at 28 days were found to be 20 % for SF, 0 % for FA, and 0 % for GBFS; the flexural strength was 10 % for SF, 0 % for FA, and 0 % for GBFS. The compressive strength was 147.07 MPa with SC and 150.13 MPa with HC and flexural strength was 26.88 MPa with SC and 27.31 MPa with HC (as conducted at 28 days in a mixture of 10 % SF and 10 % GBFS).

Key words:

ultra-high-performance concrete (UHPC), cement, steel fibre, polycarboxylate ether-based superplasticizers (PCEs), compressive strength

1. Uvod

Beton je materijal koji se široko primjenjuje zbog svoje dobre čvrstoće i trajnosti. To je najčešći građevni materijal koji je čovjek stvorio i koji ima potrebna mehanička i trajnosna svojstva zbog čega se mogu dobiti željeni oblici i veličine; jednako tako, to je relativno jeftin materijal [1–10]. Određeni napredni građevinski objekti (poput velikih zgrada i nuklearnih postrojenja) koji su izgrađeni s betonom ultravisokih svojstava (engl. *ultra-high performance concrete* - UHPC) posebno su projektirana uzimajući u obzir ekstremna opterećenja u slučaju nepogoda poput raketnog napada ili udara zrakoplova zbog strašnih posljedica u slučaju oštećenja takvih konstrukcija [11].

UHPC je poželjan materijal za te vrste konstrukcija. U zadnje vrijeme, UHPC se opširno proučava budući da može poboljšati trajnost i ekonomsku učinkovitost konstrukcije. Propadanje građevinske infrastrukture privuklo je pozornost diljem svijeta zbog velikih godišnjih izdataka potrebnih za popravak i rehabilitaciju, kao i apsolutno štetnog utjecaja na društvo i okoliš [11, 12]. Zato su održivi građevni materijali privukli velik interes za istraživanjem, uključujući beton sa smanjenim ugrađenim energijama, smanjenim ugljičnim otiskom te poboljšanom trajnošću [13, 14]. Ekološki ciljevi poput smanjene uporabe neobnovljivih resursa, povećanja udjela obnovljive energije, te smanjenja ostataka i otpada zahtijevaju primjenu poboljšanih građevnih materijala. Prikladna primjena sirovina ključna je u proizvodnji građevnih materijala; štoviše, potrebno je reciklirati otpad na način da udovolji budućim zahtjevima [6–9, 14]. Uza sve to, inovativni materijali i metodologije koje se razvijaju vjerojatno će produžiti uporabljivost infrastrukture. Znanstvenike zanima UHPC jer, kao inovativni cementni materijal, može poboljšati trajnost konstrukcija te povećati trajanje zgrada [15, 16]. Prvi put predstavljen u Francuskoj 1990.-ih, UHPC pokazuje veće čvrstoće nego konvencionalni betoni velikih čvrstoća [17, 18]. Zamjena konvencionalnih betona s UHPC-om omogućava razvoj manjih konstrukcijskih sastavnica/članova. Izgradnja manjih članova povezana je sa smanjenjem troškova prijevoza, oplata, radne snage i održavanja. Velika čvrstoća UHPC-a osigurava jednako tako održivost kroz izgradnju tankih i izdržljivih konstrukcija. Velika trajnost UHPC-a uglavnom proizlazi iz njegove otpornosti na koroziju; to povećava trajnost konstrukcije te smanjuje troškove održavanja [11, 19]. Primjerice, UHPC ima izrazito nisku propusnost kad je u pitanju prodiranje klorida (jedan od faktora s najjačim utjecajem na poboljšanje trajnosti). Druga svojstva koja pojačavaju trajnost UHPC-a su niska ukupna poroznost, mikroporoznost, apsorpcija vode te difuzija iona klorida [19, 20]. Alsalman i dr. [21] razvili su nekoliko UHPC mješavina primjenom lokalno dostupnih materijala te su istražili utjecaj veziva s dodatkom reduktora vode visokog raspona (engl. *High Range Water Reducer Admixture* - HRWRA), čeličnih vlakana, miksera i stvrdnjavanja na tlačnu čvrstoću. Meng i dr. [12] razvili su sustavne projekte mješavina primjenom matematičkih modela te su koristili leteći pepeo (engl. *fly ash* - FA), silicijsku prašinu (engl. *silica fume* - SF) i granuliranu zguru iz visoke peći (engl. *granulated blast furnace*

slag - GBFS) kako bi relativno jeftino dobili UHPC. Upotrijebili su pijesak koji je tradicionalni sastojak u betonu, i relativno nisku količinu vlakana te predložili nekoliko isplativih UHPC mješavina s raznim sastojcima. Tada su procijenili temeljnu obradivost, čvrstoću i trajnost tih mješavina. Hou i dr. [18] ispitali su upotrebu crvenog mulja dobivenog s odlagališta koji je pun SiO₂ (usporedivo s cementom) kao dodatka minerala u razvoju UHPC-a zajedno s silicijskom prašinom i letećim pepelom. Općenito, silicijska prašina (SF) popunjava praznine u matrici paste, pospješavajući pucolanske reakcije koje stvaraju dodatne hidrate kalcijeva sulfata. Štoviše, 4–7 puta je jeftinija nego cement. Primjena optimiziranog SF-a, kao i FA-e te GBFS-a smanjuje troškove UHPC-a, a da se pritom ne utječe na svojstva betona [12]. Hung i dr. [22] ispitali su obradivost i raspodjelu vlakana čeličnih UHPC-ova ojačanih makrovlaknima s kukastim krajem u kombinaciji s raznim finim agregatima i udjelima vlaknima. Istražili su utjecaj raznih varijabli na mehanička svojstva ove vrste UHPC-a nakon 28 i 90 dana. Memiş i Ramroom [23] proučili su utjecaj idealnog omjera mineralnih dodataka, kao što je navedeno u smjernicama vezanim uz proizvodnju UHPC-a, te utjecaj idelanog omjera čeličnih vlakana na beton. Shen i dr. [24] ispitali su utjecaj spaljivanja pepela s dna peći na mehanička svojstva UHPC-a, obradivost, hidrataciju, postojanost volumena i mikrostrukturu, i to tako što su ponovno koristili pepeo s dna peći iz spalionice gradskog krutog otpada kao fini agregat kako bi se pripremio UHPC s aditivima SF-a i FA-a.

Ovim se istraživanjem ispitala ekonomska proizvodnja SF-a, FA-a i GBFS-a dobivenih iz industrijskih otpada kako bi se omogućilo da UHPC-ovi imaju potrebnu veliku čvrstoću (uz svojstva normalnih betona). Taguchi L16 matrica se koristila kako bi se ispitala učinkovitost proizvodnje UHPC-a.

2. Materijali i metode

2.1. Materijali

Proizvodnja UHPC-a koji se koristio podrazumijevala je isprani silicijski pijesak veličine zrna 0-2 mm dobiven iz grada Kastamonua u Turskoj. Tablica 1. prikazuje distribuciju veličina čestica pijeska koja je primijenjena u istraživanju. Štoviše, u postupku se koristio portland cement tip 1 (PC; CEM II / A-M (P-L) 42,5R). Portland cement (PC) bio je cement opće uporabe (kompozitni Portland cement) koji je nastao prema normi TS EN 197-1 [25]. Specifična težina cementa iznosila je 2,94 g/cm³, a specifična površina cementa 4191 cm²/g. Silicijska prašina (SF) koja se koristila u proizvodnji betona dobivena je iz postrojenja Antalya Etimine Electro-Ferrochrome Plant i primijenjena je prema normi Američkog društva za ispitivanje i materijale (ASTM) C 1240 [26]. Specifična je težina SF-a iznosila 2,19, a specifična je površina cementa iznosila 23,36 m²/g. FA i GBFS su bili drugi pucolanski materijali koji su se koristili u cementu. FA se koristio kao mineralni dodatak te je klasificiran prema normi TS EN 197-1 kao tip V [25]; jednako tako, klasificiran je kao tip F prema normi ASTM C 618 [27]. GBFS se dobio iz Ereğli Iron & Steel Works Company u Kdz. Ereğli, Turska. Kemijski sastav

Tablica 1. Određivanje granulometrijskog sastava prosijavanjem kvarcnog pijeska koji se koristi u istraživanju [28]

Sito	Masa [g]	Ostatak na situ [%]	Postotak prolaska [%]	ASTMC33 [%]
9,5 mm	0	0	100	100
4,75 mm	0	0	100	95 – 100
2,36 mm	0	0	100	80 – 100
1,18 mm	35,61	7,12	92,88	50 – 85
600 µm	138,7	34,86	65,14	25 – 60
300 µm	187,42	72,35	27,65	5 – 30
150 µm	102,47	92,84	7,16	0 – 10
Dno	35,80	100	0	

Modul finoće prema normi ASTM C 136 (2014.) = 2,14 [29]

Tablica 2. Kemijski sastavi i fizikalna i mehanička svojstva materijala

Kemijski sastav [%]	Portland cement (PC)	Leteći pepeo (FA)	Silicijska prašina (SF)	Zgura iz visoke peći (GBFS)
CaO	63,59	1,77	0,44	37,79
SiO ₂	20,90	61,81	80,9	35,09
Al ₂ O ₃	5,53	9,54	0,34	17,54
Fe ₂ O ₃	3,70	7,01	0,55	
MgO	1,76	2,56	5,23	5,75
Na ₂ O	0,18	2,43	0,35	0,74
K ₂ O	0,41	0,99	4,5	0,28
SO ₃	0,73	0,31	-	0,19
Cl	0,0027	-	0,13	
Slobodni CaO	2,56	-	2,70	
Fizikalna i mehanička svojstva cementa				
Tlačna čvrstoća, 2 dana [MPa]	17,9			
Tlačna čvrstoća, 7 dana [MPa]	31,7			
Tlačna čvrstoća, 28 dana [MPa]	45,9			
Specifična težina	2,94	2,76	2,19	2,95
Početak vezivanja [min.]	177			
Kraj vezivanja [min.]	233			
Postojansot volumena [cm ² /g]	1			
Vrijednost specifične površine cementa [cm ² /g]	4191	3300	2390	3500
Prolaz kroz sito otvora 90 µm [%]	98,8			
Prolaz kroz sito otvora 32 µm [%]	88,5			

GBFS-a i FA-e prikazan je u tablici 2. PC koji je u skladu s normom TS EN 197-1 [25] dobio se iz Bolu Cement Industry Inc., Turska. Tablica 2. daje detaljne informacije vezane uz fizikalna i kemijska svojstva cementa koji se koristi u ovom istraživanju.

U ovom istraživanju koristila su se čelična vlakna promjera 0,15 mm, duljine 13 mm, specifične težine 7,8, vlačne čvrstoće od 3000 MPa, te modula elastičnosti od 200 GPa. Superplastifikatori na bazi polikarboksilatnog etera (PCE-i) adsorbirani su elektrostatički na površini cementa, pri čemu su površine polimera bile karboksilne kiseline negativnog naboja. Zbog te apsorpcije, bočni lanci polietilen glikola [30] mogu se koristiti kao superplastifikatori

u ovom istraživanju jer su se rastegli do vodene faze pri čemu je došlo do raspršivanja cementa.

2.2. Projektiranje sastava mješavine i priprema uzorka

Sastav mješavine određen je primjenom Taguchi L16 matrice [31-34]. Način imenovanja razvio se kako bi se razumjelo i uputilo na sastave tih različitih mješavina. Svakoj mješavini dodijeljen je kod (tablica 3.) sa specifičnim slovom identifikatorom. Točnije, 'S' se koristio za SF, 'F' za FA te 'G' za GBFS. Štoviše, grupni kodovi su stvoreni pisanjem primijenjenog postotka nakon svakog

slova. Na primjer, S15F20G10 označava UHPC mješavinu koja sadrži 15 % SF-a, 20 % FA-a i 10 % GBFS-a.

Tablica 3. Razmatrane razine za svaki parametar plana izvedbe eksperimenta prema Taguchi L16 matrici

Parametri	Kod	Razina [%]			
		1	2	3	4
SF	S	0	10	15	20
FA	F	0	10	15	20
GBFS	G	0	10	15	20

Tablica 4. L16 poredak koji predlaže Taguchi za tri parametra na četiri razine

	Mješavina	Parametri		
		SF	FA	GBFS
1	Referentna vrijednost	0	0	0
2	S0F10G10	0	10	10
3	S0F15G15	0	15	15
4	S0F20G20	0	20	20
5	S10F0G10	10	0	10
6	S10F10G0	10	10	0
7	S10F15G20	10	15	20
8	S10F20G15	10	20	15
9	S15F0G15	15	0	15
10	S15F10G20	15	10	20
11	S15F15G0	15	15	0
12	S15F20G10	15	20	10
13	S20F0G20	20	0	20
14	S20F10G15	20	10	15
15	S20F15G10	20	15	10
16	S20F20G0	20	20	0

Tablica 5. Omjeri mješavina [kg/m³] i svojstva svježeg betona ultravisokih svojstava (UHPC)

Mješavina	Cement	SF	FA	GBFS	Pijesak	Čelična vlakna	Voda	PE	Slijeganje [cm]		Siroma jedinična gustoća [kg/m ³]
									Statičko	Dinamičko	
Referentna vrijednost	1000	0	0	0	1000	78	190	35	200	240	2345
S0F10G10	800		100	100					210	250	2352
S0F15G15	700		150	150					240	270	2310
S0F20G20	600		200	200					250	280	2354
S10F0G10	800	100	0	100					210	240	2350
S10F10G0	800		100	0					200	230	2310
S10F15G20	550		150	200					250	270	2314
S10F20G15	550		200	150					250	280	2346
S15F0G15	700	150	0	150					200	230	2356
S15F10G20	550		100	200					200	220	2340
S15F15G0	700		150	0					210	230	2320
S15F20G10	550		200	100					240	260	2310
S20F0G20	600	200	0	200					190	220	2358
S20F10G15	550		100	150					200	230	2312
S20F15G10	550		150	100					190	220	2335
S20F20G0	600		200	0					190	220	2313

Ukupno se pripremlilo 16 skupina mješavina primjenom Taguchi L16 matrice (tablica 4.) Matrica je raspoređena u pravokutnik (tri parametra u četiri razine), pri čemu se vide svi faktori i razine [32–34] kao što je prikazano tablicom 4. Tablica 5. prikazuje količine materijala koji se koriste u ovim mješavinama.

U svim UHPC-ovima nastalim u ovom istraživanju mješavine koje su se koristile prije ispitivanja, kao i doze cementa koje su određene u literaturi (tablica 6.), bile su konstante; primjerice, težina veziva ostala je 1000 kg/m³. Štoviše, omjer vode/veziva (w/b) iznosio je 0,19, a omjer PCE/veziva iznosio je 3,5 %. I dok su mješavine imale omjer pijeska/veziva 1:1 (po težini), količina čeličnih vlakana bila je konstanta na 1 % volumena u istom volumenu. Omjer w/b prilagodio se na 0,2 samo u slučaju kontrolne mješavine. Utjecaj pijeska i vlakana ojačanja na svojstva mješavina ispitan ju u smislu izbora najboljega omjera za ovo istraživanje. U mješavinama koje su pripremljene u ovu svrhu, pijesak, SF, GBFS i FA držani su 24 sata na temperaturi od 105 °C kako bi se materijali oslobodili vlage te kako bi se mogli koristiti u suhim mješavinama. Mješavine su posebno pripremljene kao UHPC mješavine. U tu svrhu, u proizvodnji UHPC-a primijenjen je postupak miješanja, kao što je navedeno u Torregrosa (2013.) (tablica 7.) [35]. Materijali su miješani mikserom Hobart (model LTC 320) snage 1100 W i kapaciteta 10 litara. Svaki materijal koji se koristio u mješavini izdvojen je sa strane nakon postupka.




Mješavine koje su se pripremile u mikseru za miješanje betona stavljene su postrance zajedno s kantom kako bi se vlakna poravnala što je duže moguće, nakon čega bi se izljevale u prizmatične kalupe dimenzija 4 x 4 x 16 cm³.

Općenito, temperatura i vlažnost važni su čimbenici u poboljšanju mehaničkih svojstava UHPC-a. Primjerice, svojstva UHPC-a mogu se poboljšati ako se primjenjuje metoda

Tablica 6. Upotreba istraživanja kako bi se odredili idealni omjeri

Odabrani omjer [%]	Referentna vrijednost
Gustoća veziva = 1000 kg/m ³	[15, 23, 35–38]
Omjer vode naspram veziva (w/b) = 0,20	[15, 23, 39, 40]
Omjer superplastifikatora na bazi polikarboksilatnog etera (PCE) naspram veziva = 3,5 %	[23, 35, 41]
Omjer SF-a naspram veziva = 20 %	[23, 36, 39, 42]
Čelična vlakna prema volumenu = (0; 0,5; 1,0; 2,0) %	[15, 43]

Tablica 7. Postupak miješanja primjenjen u istraživanju

Min	Postupak	Izgled	
0 – 1	Miješanje pijeska i veziva	Suho	
1 – 3	Dodavanje vode i 50 % PCE-a	Suho - plastično	
3 – 4	Zaustavljen rad miksera	Plastično	
4 – 6	Miješanje nakon što se dodao ostatak PCE-a	Plastično-fluidno	
6 – 7	Brzo miješanje	Fluidno	
7 – 10	Miješanje nakon dodavanja čeličnih vlakana	Fluidno	

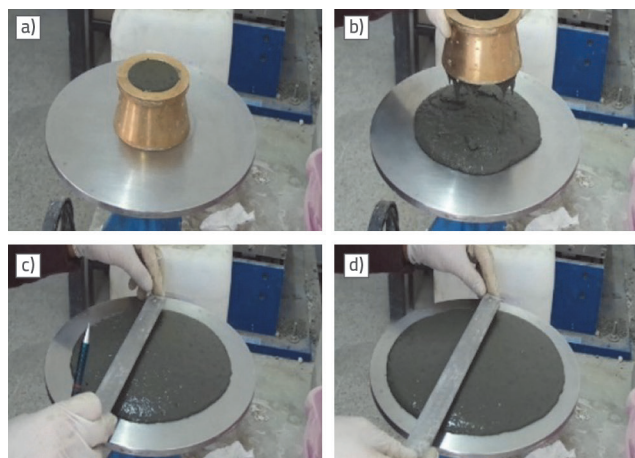
njegovanja toplinom kako bi se ubrzala rana čvrstoća betona [21, 44]. U ovom istraživanju uzorci su UHPC-a izvađeni iz kalupa 24 sata nakon što je završio postupak ugrađivanja. Nakon toga, njegovani su metodom standardnog njegovanja u vodi (SC) prema normi ASTM C192 do dana eksperimenta [45] te primjenom njegovanja uranjanjem u vruću vodu (HC) (24 sata u vruću vodu pri temperaturi 65 °C te u vodi temperature 23,0 + 2,0 °C) sve do dana ispitivanja.

2.3. Postupak ispitivanja

Važno je svojstvo UHPC-a njegova sposobnost da se samonivelira. Da bi se ispitalo njegovo svojstvo, primijenjena je modificirana norma ASTM C1437 [46] kako bi se osigurao protok UHPC materijala. Dijametar širenja (slika 1.) mjerio se nakon što se materijal stabilizirao u svim smjerovima; ta metoda mjeri stvarni dijametar (mm) materijala prije zbijanja (statički protok) i dijametar širenja (dinamički protok) i to kao rezultat zbijanja nakon 25 izbacivanja. Štoviše, gustoća se svježeg UHPC-a odredila prema normi ASTM C 138 [47] te se izračunala dijeljenjem težine materijala koji se stavio u mješavinu sa zauzetim volumenom ($T = M / V$).

Ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće pri savijanju pripadaju ispitivanjima svojstava očvrstnulo stanja; u ovom istraživanju ona su provedena na uzorcima po završetku njihovih 3, 7 i 28 dana njegovanja. Ta su se ispitivanja obavljala u eksperimentalnom postupku u skladu s normom BS EN 196-1 [48]. Točnije, uzorci dimenzija 40 × 40 × 160 mm horizontalno su postavljeni na dva nosača s razmakom od 100 mm. Kako bi se ispitala čvrstoća pri savijanju, primijenjeno je vertikalno opterećenje uz pomoć utovarnog valjka na gornju površinu prizme pri brzini 50 ± 10

N/s⁻¹ sve dok nije došlo do prijeloma. Ispitivanja tlačne čvrstoće UHPC uzoraka provedena su na dvama dijelovima dobivenim ispitivanjima čvrstoće pri savijanju. U tu svrhu koristio se uređaj marke UTEST LC815 (maksimalnog kapaciteta 250,000 lb). Primjenom dobivene sile (Fr), čvrstoća pri savijanju izračunana je uz pomoć jednadžbe $R_f = (1.5 Fr L)/b^3$.



Slika 1. Postavke za ispitivanje protoka i mjere premaza: a) Konus ispunjen materijalom; b) Konus je maknut i mješavina se rasprostire; c) Statičko rasprostiranje; d) Dinamičko rasprostiranje (nakon 25 okretaja)

U ispitivanju tlačne čvrstoće primijenjena je brzina opterećenja od 2400 ± 200 N/s na svaki dio, koji se slomio kao odgovor na čvrstoću pri savijanju, u čeljusti uređaja veličine 40 × 40 mm. Zato se vrijednost tlačne čvrstoće izračunala uz pomoć lomnog opterećenja uzorka. Štoviše, apsorpcija, gustoća i omjer

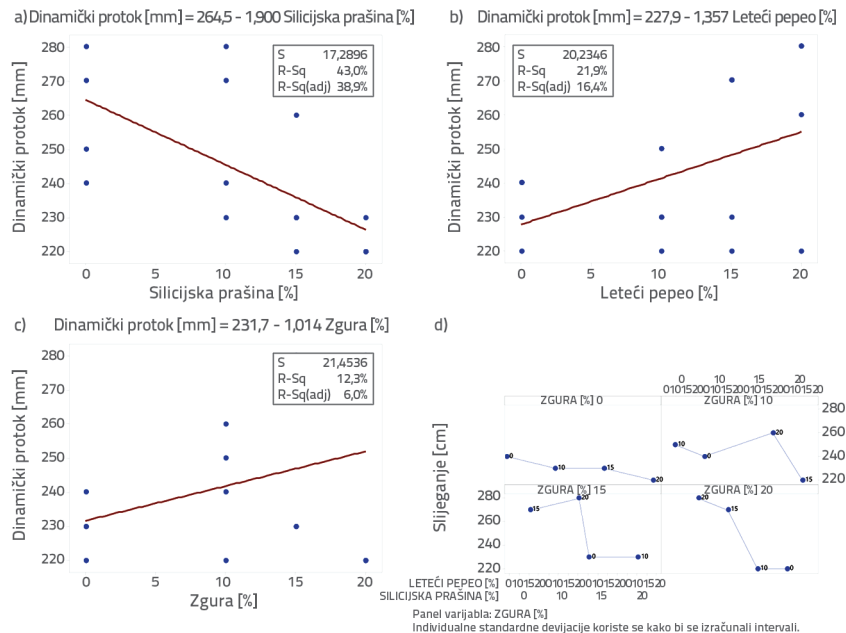
praznina određeni su prema normi ASTM C642 [49]. Ta norma jednako tako može biti korisna za razvoj podataka vezanih uz pretvorbu mase betona i volumena. Prema tome, može pomoći u određivanju specifikacija betona i u uočavanju razlika ili varijacija na različitim mjestima.

3. Rezultati i rasprava

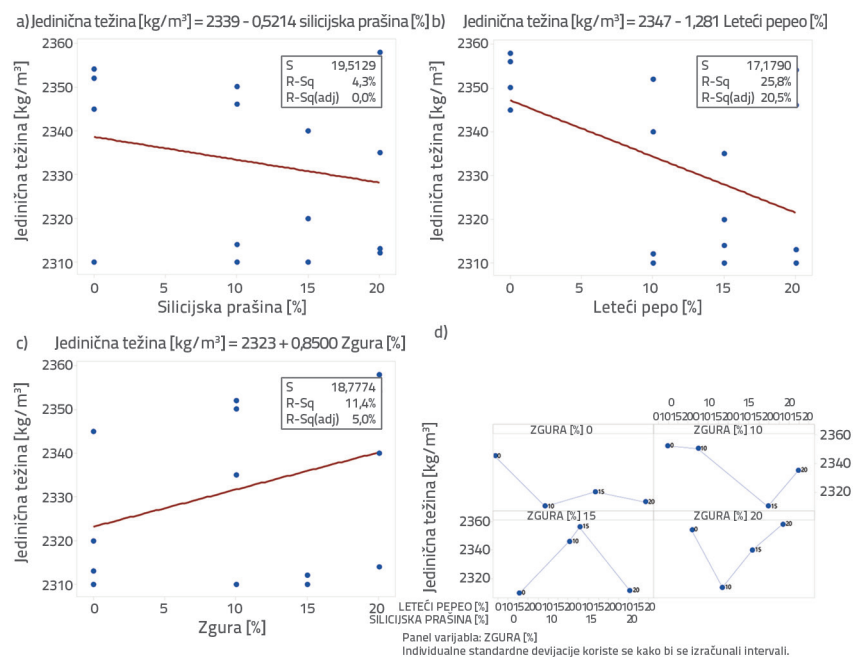
3.1. Svojstva svježeg betona

Slika 2. prikazuje rezultate dobivene ispitivanjem protoka kako bi se izmjerila obradivost. Stvarni promjer materijala izmjeren je milimetrima tijekom prednabijanja (statički protok (slika 1.c)) i post-nabijanja (dinamički protok (slika 1.d)). Općenito, pucolanske mješavine kao što su SF, GBFS i FA mogu osigurati odličnu obradivost UHPC-a. Posebno fluidne bile su mješavine UHPC-a s puno pucolanskih dodataka. Slika 2.a prikazuje odnos između udjela SF-a i dinamičkog protoka. Prethodna istraživanja pokazala su da upotreba SF-a kao ispune izaziva smanjenje brzine dinamičkog protoka. Relativno je kompliciran učinak SF-a na obradivost UHPC-a. U prethodnim istraživanjima neki znanstvenici otkrili su da SF može poboljšati obradivost UHPC-a [50, 51]. Međutim, drugi znanstvenici zaključili su da je SF smanjio obradivost UHPC-a [52, 53].

Povećanje omjera FA-a i GBFS-a rezultira poboljšanjem dinamičke obradivosti mješavine UHPC-a, kao što prikazuje slika 2. Obratno, povećanje omjera mikrosilike (SF) rezultira smanjenjem obradivosti. Utjecaj dinamičkog protoka na obradivost sličan je onome koji su opisali Bajaber i Hakeem [53], odnosno, FA i GBFS pozitivno utječu na povećanje obradivosti. Različiti zaključci mogu se pripisati različitim karakteristikama materijala i utjecaju superplastifikatora u SF-u. Moguće je da primjena superplastifikatora u SF-u sa svojom malom veličinom čestice, velikom specifičnom površinom i velikom potrebom za vodom, smanjuje fluidnost mješavine UHPC-a. Kada se pomiješaju sa superplastifikatorom, sitne i okrugle čestice SF-a prekrivene su slojem površinski aktivne mješavine koja rezultira odbojnom električnom silom između čestica cementa i dodatka. Kako su SF čestice mnogo manje od onih cementnih, ponašaju se kao



Slika 2. Odnos između dinamičkog protoka i udjela mineralnih dodataka



Slika 3. Odnos između jedinične težine i udjela mineralnih dodataka: a) Specifična težina – SF; b) Specifična težina – FA; c) Specifična težina – GBFS; d) Utjecaj dodataka na specifičnu težinu

kuglični ležajevi između čestica cementa povećavajući fluidnost cementne paste. [54]. Slike 2.b i 2.c pokazuju poboljšanja protoka mješavine UHPC-a u slučaju kad im je dodan FA i GBFS. Kako se udio tih materijala u mješavinama povećava od 0 % do 20 %, protoka mješavine također se povećava (slika 2.d). Sferični oblik čestica FA pomaže u smanjenju potrebe za vodom zbog čega se povećava obradivost. Štoviše, sferični oblik smanjuje trenje

između čestica što vodi do boljeg podmazivanja i poboljšano protoka betona. Što je veći postotak FA-e u betonskoj pasti, bolje je podmazivanje čestica, te je bolji protok betona [55].

Slika 3. prikazuje rezultate ispitivanja za specifičnu težinu svježeg betona. Specifična težina varira od 2310 do 2356 kg/m³. Dodavanje SF-a i FA-a u mješavine UHPC-a smanjuje specifičnu težinu u svježem stanju, kao što je prikazano na slici 3., a dodavanje GBFS-a povećava ju (slika 3.c). To je zato što su specifične težine pucolanskih mineralnih mješavina (2,26 kg/m³ za SF, 2,75 kg/m³ za FA i 2,95 kg/m³ za GBFS) manje nego specifična težina cementa (3,15 kg/m³); zato je volumen mješavine veći nego onaj u slučaju paste dobivene zamjenskim cementom [54].

3.2. Svojstva u očvrslulom stanju

3.2.1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Ispitivanja tlačne čvrstoće provedena su 3., 7. i 28. dana standardnog njego vanja uranjanjem u vodu te 28. dana uranjanjem u vruću vodu, a u skladu s normom BS EN 196-1 [48], kao što prikazuje tablica 8. Tlačna čvrstoća 28. dana njego vanja uranjanjem u vruću vodu bila je značajno veća nego u svim razdobljima njego vanja standardnim uranjanjem. Najveći je postotak povećanja iznosio 21 % u grupi mješavine S15F10G20, a najniži 0,9 % u kontrolnoj mješavini. To se može pripisati učinku koji ima ubranu hidrataciju na tlačnu čvrstoću u betonu zbog veće topline u odnosu na standardno uranjanje. Štoviše,

pucolanske reakcije također se ubrzavaju uz pomoć viših temperatura njego vanja. U literaturi je poznato da temperatura njego vanja ima ključnu ulogu u povećanju čvrstoće (slika 4.a). Zbog velikog udjela cementa u UHPC-u, visoka temperatura vodi do brze hidratacije cementa, a to vodi do visokog udjela produkata hidratacije, što za posljedicu ima veliku čvrstoću [56]. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pokazuju tlačnu čvrstoću od 147,07 MPa kad su izloženi SC, odnosno 150,13 MPa kad su izloženi HC. Slika 4. prikazuje promjenu temperature na temelju statističkih prosjeka.

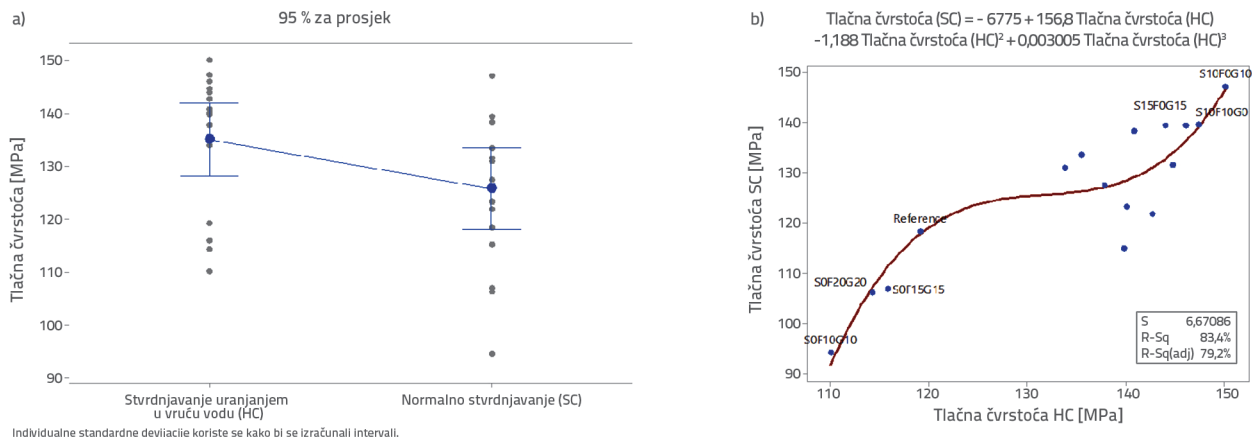
Upotreba FA-a i GBFS-a u odnosu na masu veziva između 20 % do 35 % smanjuje tlačnu čvrstoću UHPC-a u ranoj dobi. Međutim, SF značajno poboljšava tlačnu čvrstoću. Usporedba tlačne čvrstoće nakon 28 dana pokazuje da dodavanje 10 % SF-a i 10 % GBFS-a poboljšava tlačnu čvrstoću za 24 % u odnosu na kontrolnu mješavinu. Utjecaj dodavanja SF-a može se procijeniti usporedbom tlačnih čvrstoća nakon 28 dana, kao što prikazuje slika 5. U slučaju njego vanja standardnim uranjanjem, čvrstoća se povećava povećanjem količine SF-a. Slična pojava uočava se i pripisuje ispuni i pucolanskim utjecajima SF-a [50, 51].

Tlačna čvrstoća kao rezultat njego vanja standardnim uranjanjem smanjuje se nakon 28 dana s povećanjem količine FA-a i GBFS-a, kao što pokazuje slika 5b i slika 5c. Ta se pojava može pripisati upotrebi FA koja rezultira smanjenjem čvrstoće betona u ranoj dobi, do 28 dana [55]. Maltais i Marchand (1997) su tvrdili da kad se njego vanja provodi pri 20 °C, u ovisnosti o razini zamjenskog cementa i vrsti FA, može biti potrebno 25 do 50 dana da tlačne čvrstoće mortova s FA dosegnu vrijednosti

Tablica 8. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće pri savijanju

Mješavina br.	Kod mješavine	Tlačna čvrstoća [MPa]				Čvrstoća pri savijanju [MPa]			
		3 dana (SC)	7 dana (SC)	28 dana (SC)	28 dana (HC)	3 dana (SC)	7 dana (SC)	28 dana (SC)	28 dana (HC)
1	Referentna vrijednost	97,62	109,69	118,35	119,13	14,65	21,27	22,66	23,05
2	S0F10G10	74,85	92,60	94,28	110,05	15,38	18,33	22,03	22,59
3	S0F15G15	66,55	88,59	106,84	115,84	12,61	20,70	22,08	22,84
4	S0F20G20	64,16	79,25	106,21	114,25	13,53	16,48	21,94	22,05
5	S10F0G10	93,36	114,66	147,07	150,13	16,46	18,19	26,88	27,26
6	S10F10G0	87,85	112,74	139,32	146,05	16,29	22,99	26,27	27,31
7	S10F15G20	71,24	92,70	127,43	137,88	11,11	16,39	18,28	19,92
8	S10F20G15	72,63	94,12	121,83	142,70	10,78	14,79	18,31	21,00
9	S15F0G15	95,39	117,66	139,35	144,04	15,63	18,96	23,25	24,18
10	S15F10G20	68,81	91,09	115,05	139,78	14,46	15,64	19,48	21,34
11	S15F15G0	86,9	109,63	131,46	144,74	15,29	16,31	22,76	22,97
12	S15F20G10	72,58	89,71	123,17	140,07	12,42	13,55	15,89	18,30
13	S20F0G20	81,25	110,04	139,48	147,36	14,95	19,32	22,64	22,98
14	S20F10G15	75,65	100,48	130,91	133,87	13,69	18,21	21,75	23,23
15	S20F15G10	74,07	99,47	138,34	140,83	17,53	17,95	21,12	23,78
16	S20F20G0	81,9	110,17	133,50	135,51	16,55	17,21	22,52	23,33

(SC) Standardno njego vanje, (HC) Njego vanje uranjanjem u vruću vodu



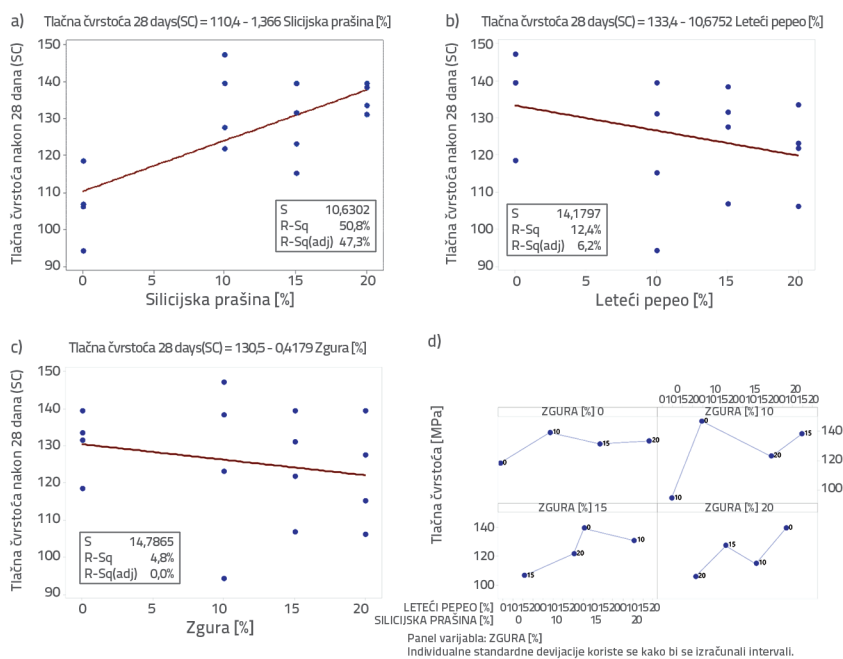
Slika 4. Raspodjela raspona tlačne čvrstoće u svakoj fazi ispitivanja

tlačne čvrstoće referentne mješavine [57]. Općenito, pucolanske reakcije FA-e u cementnim sustavima izloženim njegovanju standardnim uranjanjem postaju dominantne nakon 28 dana [58]. Prema Wangu i dr. aktivnost FA-e nije završena do 365, od kojih samo 36.56 % reagira [59]. To ovisi o dva važna faktora: o samoj aktivnosti FA-e te ulozi FA-e u unapređenju hidratacije cementa. Neizvjesno je hoće li se pucolanska reakcija nastaviti pojavljivati za sve aktivne FA-e u sustavu; to ovisi o $Ca(OH)_2$ (kojeg unapređuje cementna hidratacija) te je važan za nastavak pucolanske aktivnosti. Povećanje udjela FA rezultira smanjenjem ukupne hidratacije sustava budući da je aktivnost FA-e manja nego što je aktivnost cementa.

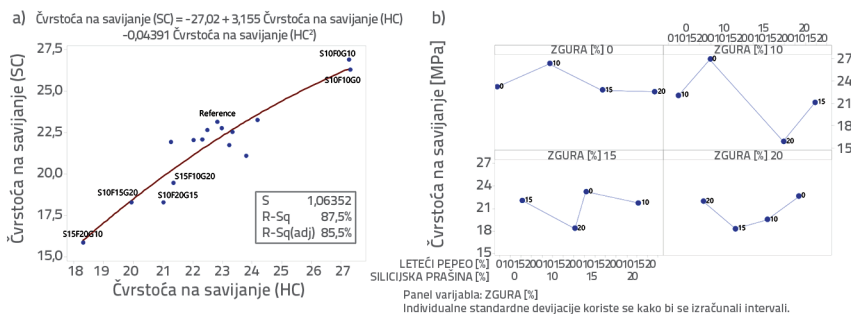
3.2.2. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri savijanju

Čvrstoće UHPC-a pri savijanju nakon različitih uvjeta njegovanja (SC i HC) 3., 7. i 28. dana prikazane su u tablici 8., što je u skladu s normom BS EN 196-1 [48]. Rezultati upućuju na to da se najveća čvrstoća pri savijanju uočila u mješavini S10F0G10, čija je vrijednost iznosila 26.88 MPa nakon 28 dana njegovanja standardnim uranjanjem, a to predstavlja povećanje čvrstoće od približno 118 % u usporedbi s referentnom mješavinom. Najniža čvrstoća pri savijanju uočena je u mješavini S15F20G10 čija je vrijednost iznosila 15,89 MPa, što je bilo manje od referentne mješavine, kao što prikazuje slika 6. Nadalje, čvrstoća pri savijanju svake grupe s vremenom

se povećava u slučaju njegovanja standardnim uranjanjem, neovisno o vrsti betona. To poboljšanje posebno je očito od 7. do 28. dana



Slika 5. Utjecaj mineralnih dodataka na rezultate tlačnih čvrstoća



Slika 6. Raspodjela raspona čvrstoće pri savijanju u svakoj fazi ispitivanja

Tablica 9. Rezultati ispitivanja apsorpcije vode, poroznosti i gustoće

Kod mješavine	Apsorpcija nakon uranjanja [%]	Apsorpcija nakon uranjanja i ključanja [%]	Volumen otvorenih pora [%]	Gustoća u suhom stanju [kg/m ³]	Gustoća nakon uranjanja [kg/m ³]	Gustoća nakon uranjanja i ključanja [kg/m ³]	Prividna gustoća [kg/m ³]
Referentna vrijednost	3,10	1,10	2,49	2335	2407	2351	2374
S0F10G10	2,49	0,96	2,25	2342	2400	2364	2396
S0F15G15	2,44	1,05	2,47	2351	2408	2376	2410
S0F20G20	2,06	0,72	1,68	2344	2393	2361	2385
S10F0G10	1,22	0,59	1,41	2388	2417	2402	2422
S10F10G0	1,30	0,68	1,60	2357	2387	2373	2395
S10F15G20	1,45	0,59	1,41	2389	2424	2403	2423
S10F20G15	1,29	0,65	1,54	2383	2413	2398	2420
S15F0G15	1,38	0,65	1,55	2385	2418	2401	2423
S15F10G20	1,23	0,57	1,34	2356	2385	2370	2388
S15F15G0	1,16	0,56	1,31	2362	2389	2375	2393
S15F20G10	1,00	0,42	0,99	2368	2392	2378	2392
S20F0G20	1,29	0,71	1,67	2354	2384	2371	2394
S20F10G15	1,29	0,73	1,72	2342	2372	2359	2383
S20F15G10	1,26	0,70	1,64	2330	2359	2346	2369
S20F20G0	1,19	0,66	1,53	2326	2353	2341	2362

3.2.3. Određivanje gustoće, apsorpcije i poroznosti

Tablica 9. prikazuje rezultate ispitivanja gustoće, apsorpcije i udjela pora u očvrslulom betonu na temelju norme ASTM C642 [49]. Prikazano je da se apsorpcija vode i udio pora u UHPC-u s FA-om i GBFS-om smanjuju u odnosu na one u kontrolnoj mješavini. Smanjenje apsorpcije vode može biti rezultatom pucolanskih reakcija koje smanjuju veličine pora betona. Ispitivanjem utjecaja SF-a, FA-a i GBFS-a na brzinu apsorpcije vode, poroznost i prividnu gustoću (slika 7.), može se uočiti da je SF učinkovitiji u UHPC-u u odnosu na druge dodatke. Štoviše, ovisno o omjeru njegova povećanja, može jednako tako uzrokovati smanjenje u brzini apsorpcije vode (slika 7a) i poroznosti (slika 7b). To može biti zbog vrlo sitnih čestica SF-a koji ispunjava pore u betonu. Osim toga, slika 7.a, 7.d, 7.g i 7.j pokazuju odnos između apsorpcije vode i postotka FA u mješavinama; apsorpcija vode mijenja se za približno 1.0 % do 1.8 %. Poroznost (slika 7.b, 7.h, 7.k) uzrokuje promjenu od približno 1.4 % do 1.8 %, ovisno o omjeru povećanja SF-a, FA-e i GBFS-a. Ti podaci pokazuju da se apsorpcija vode i poroznost UHPC-a smanjuju s povećanjem koncentracije mikročestica kompozitnog materijala zbog smanjenog udjela otvorenih pora u krutom UHPC-u. Otvorena pora sadrži zrak i iste je veličine kao mikročestice (čestice ispunje). Iz tog razloga, a kako apsorpcija vode ovisi o broju komunicirajućih otvoreno povezanih stanica, ispunjavanje otvorenih pora mikročesticama smanjuje apsorpciju vode.

Međutim, povećanje udjela GBFS-a izaziva blago povećanje prividne gustoće (slika 7.i). U onoj mjeri u kojoj slične promjene

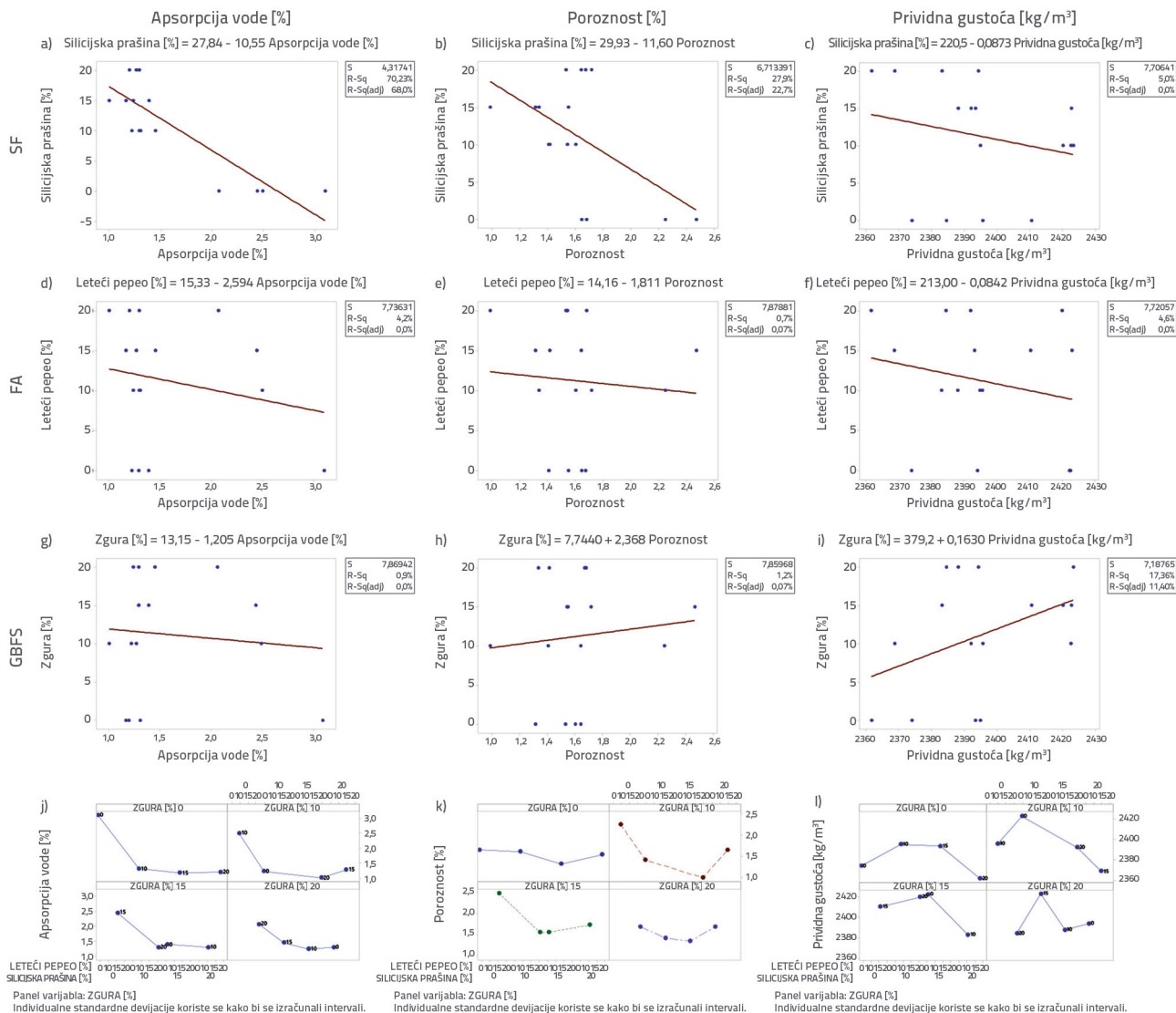
prividne gustoće koje se temelje na dodatku (slike 7.c, 7.f, 7.i, 7.l), povećanjem udjela SA-a, FA-a i GBFS-a rezultiraju promjenom između 2360 i 2425 kg/m³ (ovisno o udjelima). Dodavanje SF-a i FA-a u mješavine UHPC-a vode do smanjenja gustoće u suhom stanju, a dodavanje GBFS-a to povećava. To se može pripisati činjenici da je specifična težina pucolanskih mineralnih mješavina niža nego ona u slučaju cementa [54]. Ti rezultati u skladu su s onima koje su dobili Sunil i dr. koji su otkrili da se gustoća smanjuje povećanjem količine FA, jer je specifična težina FA niža nego ona u slučaju cementa [60].

3.3. Taguchi optimizacija

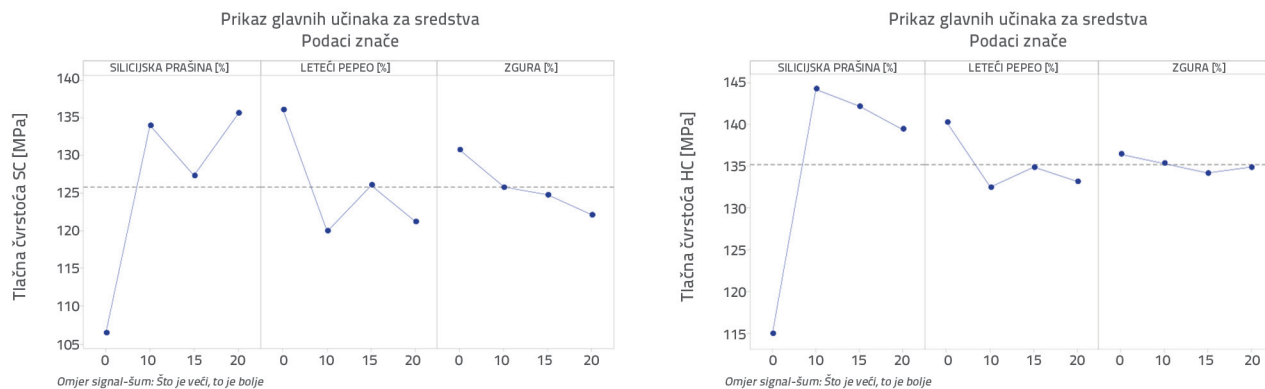
3.3.1. Taguchi analiza za čvrstoće

Kako bi se odredila idealna mješavina koja se temelji na rezultatima dobivenim primjenom Taguchi L16 matrice za ispitivanje, optimalni rezultati za tlačne čvrstoće i čvrstoće pri savijanju prema učincima uvjeta njegovanja prikazani su na slici 8. Tablica 10. prikazuje optimalne razine tih rezultata.

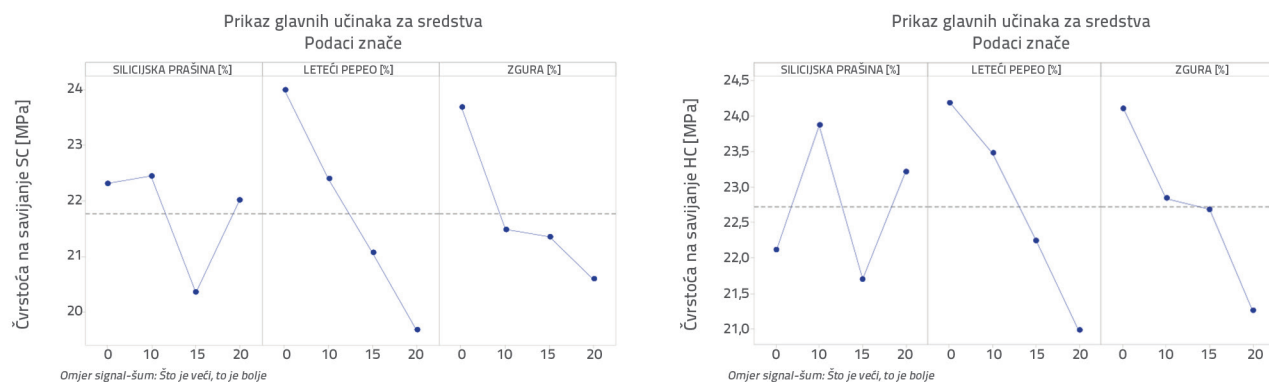
Kao rezultat optimizacijske analize, određeno je da je jedna grupa u L16 mješavini bila ista mješavina te nije bila odsutna u toj mješavini u dvjema različitim mješavinama. Idealni je optimalni rezultat tlačne čvrstoće onaj kada se koristi mješavina S20F0G0, odnosno 20 % SF-a, 0 % FA-a i 0 % GBFS-a izloženi raznim SC uvjetima. Nasuprot tome, u slučaju kad su izloženi HC uvjetima, najbolja tlačna čvrstoća i čvrstoća pri savijanju mogla se naći u grupi S10F0G0, odnosno 10 % SF-a, 0 % FA-a i 0 % GBFS-a. Rezultati dobiveni



Slika 7. Učinak mineralnih dodataka na brzinu apsorpcije vode, poroznost i prividnu gustoću



Slika 8. Grafikoni koji prikazuju Taguchi optimizaciju kontrolnih faktora - I. dio



Slika 8. Grafikoni koji prikazuju Taguchi optimizaciju kontrolnih faktora - II. dio

Tablica 10. Optimalne Taguchi razine i vrijednosti za čvrstoće koje ovise o uvjetima njegovanja

Ispitivanje	Kontrolni faktori	Jedinica	Optimalna razina	Optimalna vrijednost
Tlačna čvrstoća za SC	SF	%	3	20
	FA	%	1	0
	GBFS	%	1	0
Tlačna čvrstoća za HC	SF	%	2	10
	FA	%	1	0
	GBFS	%	1	0
Čvrstoća pri savijanju za SC	SF	%	2	10
	FA	%	1	0
	GBFS	%	1	0
Čvrstoća pri savijanju za HC	SF	%	2	10
	FA	%	1	0
	GBFS	%	1	0

Tablica 11. Optimalni rezultati i eksperimenti validacije za kontrolni faktor 1

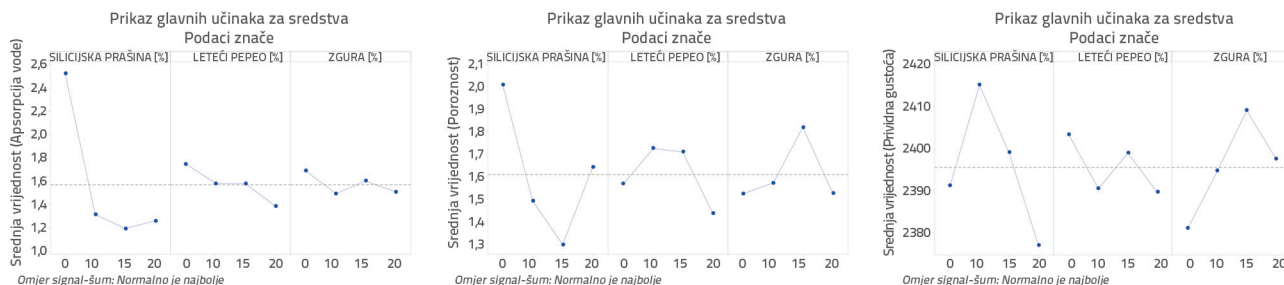
Ispitivanje	Taguchi optimizacija	Predviđena vrijednost			Stvarna vrijednost		
		SF	FA	GBFS	SF	FA	GBFS
Tlačna čvrstoća za SC	Razina	3	1	1	3	1	1
	Vrijednost	20	0	0	20	0	0
	Rezultat	150,70 MPa			148,37 MPa		
Tlačna čvrstoća za HC	Razina	2	1	1	2	1	1
	Vrijednost	10	0	0	10	0	0
	Rezultat	150,43 MPa			147,58 MPa		
Čvrstoća pri savijanju za SC	Razina	2	1	1	2	1	1
	Vrijednost	10	0	0	10	0	0
	Rezultat	26,36 MPa			24,78 MPa		
Čvrstoća pri savijanju za HC	Razina	2	1	1	2	1	1
	Vrijednost	10	0	0	10	0	0
	Rezultat	26,63 MPa			25,98 MPa		

na temelju eksperimenata potvrđivanja odražavaju uspjeh optimizacije kada se kontroliraju vrijednosti dobivene kao posljedica Taguchi optimizacije. Optimalni su se uvjeti

procijenili, a vrijednosti dobivene kao rezultat izračuna te one dobivene kao rezultat eksperimenata potvrđivanja prikazane su u tablici 11.

Tablica 12. Optimalne Taguchi razine i vrijednosti za fizička svojstva koje ovise o uvjetima njegovanja

Ispitivanje	Kontrolni faktori	Jedinica	Optimalna razina	Optimalna vrijednost
Apsorpcija vode [%]	SF	%	3	15
	FA	%	4	20
	GBFS	%	2	10
Propusnost [%]	SF	%	3	15
	FA	%	4	20
	GBFS	%	1	0
Prividna gustoća [kg/m ³]	SF	%	1	0
	FA	%	3	15
	GBFS	%	2	10



Slika 9. Prikaz Taguchi optimizacije kontrolnih faktora

3.3.2. Taguchi analiza za fizikalna svojstva

U smislu fizikalnih svojstava, optimalni rezultati u slučaju brzine apsorpcije vode, poroznosti i prividne gustoće koji se temelje na eksperimentalnoj matrici L16 prikazani su na slici 9. Tablica 12. prikazuje optimalne razine tih rezultata.

Dobiveni rezultati pokazuju da se dvije različite mješavine ne uklapaju u grupu L16 u smislu poroznosti i prividne gustoće. Rezultati brzine apsorpcije vode i poroznosti isti su kao i oni u grupi S15F20G10, odnosno 15 % SF-a, 20 % FA-a i 10 % GBFS-a. Idealni optimalni rezultat za poroznost je iz mješavine S15F20G0 (15 % SF-a, 20 % FA-a i 0 % GBFS-a), dok je idealni optimalni rezultat za prividnu gustoću iz mješavine S0F15G10 (0 % SF-a, 15 % FA-a, i 10 % GBFS-a). Optimalni su uvjeti procijenjeni na

temelju rezultata provedenih eksperimenata potvrđivanja za vrijeme kontroliranja vrijednosti dobivenih kao rezultat Taguchi optimizacije. Vrijednosti dobivene kao rezultat tih izračuna, kao i one dobivene kao rezultat eksperimenata potvrđivanja, prikazane su u tablici 13.

4. Zaključak

Rezultati dobiveni za UHPC, a koji su proizvedeni dodavanjem čeličnih vlakana, GBFS-a, FA-a i SF-a u ovom istraživanju navode se kako slijede.

Dodavanje SF-a rezultira smanjenjem promjera protoka. Međutim, uočava se povećanje promjera protokau slučaju primjene FA-a i GBFS-a u mješavinama.

Tablica 13. Optimalni rezultati i validacije eksperimenta za kontrolne faktore

Ispitivanje	Taguchi optimizacija	Predviđena vrijednost			Stvarna vrijednost		
		SF	FA	GBFS	SF	FA	GBFS
Upijanje vode [%]	Razina	3	4	2	3	4	2
	Vrijednost	15	20	10	15	20	10
	Rezultat	0,93			0,93		
Propusnost [%]	Razina	3	4	1	3	4	1
	Vrijednost	15	20	0	15	20	0
	Rezultat	1,03			1,12		
Prividna gustoća [kg/m ³]	Razina	1	3	2	2	1	3
	Vrijednost	0	15	10	10	0	15
	Rezultat	2393,63			2389		

Dodavanje SF-a i FA-a u UHPC mješavine rezultira smanjenjem specifične težine svježeg betona, primjerice, smanjenje od 2339 do 2329 kg/m³ uočava se kad se poveća količina SF-a, odnosno 2347 do 2321 kg/m³ kad se poveća količina FA-a. Ipak, dodavanje GBFS-a povećava jediničnu volumensku težinu svježeg betona (od 2323 kg/m³ do 2340 kg/m³).

U UHPC mješavinama, HC rezultira većim vrijednostima mehaničkih čvrstoća u usporedbi s onima u slučaju SC; zato se HC može koristiti kao faktor ubrzanja kako bi poboljšao tlačnu čvrstoću. U postupku njegovanja uranjanjem u vruću vodu tlačna čvrstoća nakon 28 dana značajno je veća nego ona u uzorcima koji su se njegovali standardnim uranjanjem. U ispitivanjima tlačne čvrstoće, najveće čvrstoće iznose 147,07 MPa u normalnim uvjetima u slučaju mješavine S10G10 bez dodatka FA-a; u uvjetima njegovanja uranjanjem u vruću vodu ta vrijednost iznosi 150,13 MPa.

Povećanje količina FA-a i GBFS-a smanjuje tlačnu čvrstoću UHPC-a u svim mješavinama. Omjeri FA-a i GBFS-a u odnosu na vezivo, a koji se dodaju mješavinama u različitim omjerima može se povećati i 20 do 35 % ukupno, no to povećanje rezultira smanjenjem rane tlačne čvrstoće UHPC-a. Nasuprot tome, dodavanje SF-a mješavinama značajno povećava tlačnu čvrstoću. Štoviše, najbolji rezultati za čvrstoće pri savijanju su slični (26,88 MPa do 27,31 MPa) u oba režima njegovanja u vodi kad je u pitanju grupa S10G10, dok su najniže čvrstoće dobivene u grupi S15F20G10 u čijoj je mješavini dodan GBFS.

Upotreba GBFS-a, SF-a, FA-a u UHPC mješavinama kako bi se zamijenilo vezivo može doprinijeti smanjenju apsorpcije vode. Utjecaj SF-a na poroznost može doprinijeti proizvodnji manje poroznih materijala. Dodavanje SF-a, FA-a UHPC mješavinama također može utjecati na smanjenje nasipne gustoće i to povećanjem omjera dodavanja, dok dodavanje GBFS-a utječe na povećanje gustoće.

Na temelju Taguchi analize svojstava betona s obzirom na tlačnu čvrstoću, dobiven je utjecaj omjera signal-šum na otpornost betona na zbijanje i to u uvjetima njegovanja standardnim uranjanjem. Maksimalna tlačna čvrstoća betona dobivena je dodavanjem 20 % SF-a, 0 % FA-a i 0 % GBFS-a mješavini. Taguchi analiza za čvrstoću pri savijanju dobivena je istim njegovanjem u vodi i to u mješavini s 10 % SF-a, 0 % FA-a i 0 % GBFS-a. Pokazalo se da je dodatak SF-a bio najkorisniji materijal za dodavanje UHPC-u.

Vrijednosti rezultata dobivenih ispitivanjem verifikacije pouzdanosti dostatne su za tlačne čvrstoće i čvrstoće pri savijanju te za fizikalna svojstva pri izlaganju različitim uvjetima njegovanja; zato se Taguchi optimizacija može uspješno primijeniti.

Zahvala

Ali Alshaab Ramroom je izložio ovo istraživanje kao diplomski rad na Institutu znanosti Sveučilišta Kastamonu.

LITERATURA

- [1] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M.: An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Constr. Build. Mater.*, 35 (2012), pp. 1023–1033, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038>.
- [2] Eskandari, H., Vaghefi, M., Kowsari, K.: Investigation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Influenced by Hybrid Nano Silica and Micro Zeolite, *Procedia Mater. Sci.*, 11 (2015), pp. 594–599, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.084>.
- [3] Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C.A., Skoczylas, F., Corvez, D.: Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) under progressive aging, *Cem. Concr. Res.*, 55 (2014), pp. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.09.008>.
- [4] Yoo, D.Y., Banthia, N.: Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review, *Cem. Concr. Compos.*, 73 (2016), pp. 267–280, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>.
- [5] Yu, R., Van Beers, L., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H.: Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) under pendulum impact loadings, *Constr. Build. Mater.*, 107 (2016), pp. 203–215, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157>.
- [6] Memiş, S., Şahin, S., Şirin, Ü.: Some properties of prefabricated building materials produced from ground diatomite and hydrophone clay, *Pamukkale Univ. Muh. Bilim. Derg.*, 23 (2017), pp. 245–249, <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.34467>.
- [7] Kaplan, G., Yıldız, S.A., Memiş, S., Öztürk, A.U.: The Optimization of Calcareous Fly Ash-Added Cement Containing Grinding Aids and Strength-Improving Additives, *Adv. Civ. Eng.*, (2018), <https://doi.org/10.1155/2018/8917059>.
- [8] Memiş, S., Şahin, S.: Investigation of the effect of press compaction and the use of zeolite on mechanical properties in the production of low strength Reactive Powder Concrete (RPC), *Fresenius Environ. Bull.*, 28 (2019).
- [9] Kaplan, G., Yaprak, H., Memiş, S., Alnkaa, A.: Artificial neural network estimation of the effect of varying curing conditions and cement type on hardened concrete properties, *Buildings*, 9 (2019), <https://doi.org/10.3390/buildings9010010>.
- [10] Liang, X., Wu, C., Yang, Y., Li, Z.: Experimental study on ultra-high performance concrete with high fire resistance under simultaneous effect of elevated temperature and impact loading, *Cem. Concr. Compos.*, 98 (2019), pp. 29–38, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.017>.
- [11] Yu, R.: Development of sustainable protective ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC): Design, assessment and modeling, *Technische Universiteit Eindhoven*, 2015.
- [12] Meng, W., Valipour, M., Khayat, K.H.: Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete, *Mater. Struct. Constr.*, 50 (2017), pp. 1–16, <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0896-3>.

- [13] ACI 233R-03: Slag Cement in Concrete and Mortar, Am. Concr. Inst., (2003), pp. 1–19
- [14] Liu, Z., El-Tawil, S., Hansen, W., Wang, F.: Effect of slag cement on the properties of ultra-high performance concrete, *Constr. Build. Mater.*, 190 (2018), pp. 830–837, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.173>.
- [15] Chun, B., Yoo, D.Y.: Hybrid effect of macro and micro steel fibers on the pullout and tensile behaviors of ultra-high-performance concrete, *Compos. Part B Eng.*, 162 (2019), pp. 344–360, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.026>.
- [16] Yang, Y., Wu, C., Liu, Z., Liang, X., Xu, S.: Experimental investigation on the dynamic behaviors of UHPFRC after exposure to high temperature, *Constr. Build. Mater.*, 227 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116679>.
- [17] Zhang, X., Zhao, S., Liu, Z., Wang, F.: Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness, *Constr. Build. Mater.*, 214 (2019), pp. 28–36, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.106>.
- [18] Hou, D., Wu, D., Wang, X., Gao, S., Yu, R., Li, M., Wang, P., Wang, Y.: Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC): Design and performance evaluation, *Cem. Concr. Compos.*, 115 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103862>.
- [19] Moallem, M.R.: Flexural Redistribution in Ultra-High Performance Concrete Lab Specimens, Ohio University, 2010.
- [20] Zhang, Y., Cai, S., Zhu, X., Fan, L., Shao, X.: Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment, *Eng. Struct.*, 206 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110134>.
- [21] Alsaman, A., Dang, C.N., Martí-Vargas, J.R., Micah Hale, W.: Mixture-proportioning of economical UHPC mixtures, *J. Build. Eng.*, 27 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100970>.
- [22] Hung, C.C., Chen, Y.T., Yen, C.H.: Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers, *Constr. Build. Mater.*, 260 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119944>.
- [23] Memiş, S., Ramroom, A.A.: Investigation of the ideal mixing ratio and steel fiber additive in ultra high performance concrete, *Rev. Rom. Mater. Rom. J. Mater.*, 50 (2020), pp. 403–410
- [24] Shen, P., Zheng, H., Xuan, D., Lu, J.X., Poon, C.S.: Feasible use of municipal solid waste incineration bottom ash in ultra-high performance concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 114 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103814>.
- [25] TS EN 197-1: Cement--Part 1: Compositions and conformity criteria for common cements, Turkish Stand. Inst., 2002.
- [26] ASTM C 1240: Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, American society for testing and materials, 2 (2020).
- [27] ASTM C618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, American society for testing and materials, 2003.
- [28] ASTM C33 / C33M – 18: Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM Int., 2018.
- [29] ASTM C 136 / C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM Int., 2014.
- [30] Hirata, T., Ye, Z., Brancio, J.P., Zheng, J., Lange, A., Plank, J., Sullivan, M.: Adsorbed Conformations of PCE Superplasticizers in Cement Pore Solution Unrevealed by Molecular Dynamics Simulations, *Sci. Rep.*, 7 (2017), <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16048-3>
- [31] Roy, R.K.: A Primer on the Taguchi Method, Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [32] Nuruddin, M., Bayuaji, R.: Application of Taguchi's approach in the optimization of mix proportion for Microwave Incinerated Rice Husk Ash foamed concrete, *IJCEE*, 9 (2009), pp. 121–129
- [33] Nuruddin, M.F.B., Bayuji, R.: Optimum Mix Proportioning of Mirha Foamed Concrete Using Taguchi's Approach, *Apsec-Eacef*, (2009), pp. 694–700
- [34] Türkmen, I., Gül, R., Çelik, C.: A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures, *Build. Environ.*, 43 (2008), pp. 1127–1137, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.005>
- [35] Torregrosa, E.C.: Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties, Master Thesis, Riunet, 2013., pp. 1–276
- [36] Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S.: Ultra High Performance Concrete (UHPC), *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2008.
- [37] Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z., Fang, Z.: A review on ultra high performance concrete: Part II - Hydration, microstructure and properties, *Constr. Build. Mater.*, 96 (2015), pp. 368–377, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>.
- [38] Christ, R., Pacheco, F., Ehrenbring, H., Quinino, U., Mancio, M., Muñoz, Y., Tutikian, B.: Study of mechanical behavior of ultra - High performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption, *Rev. Ing. Constr.*, 34 (2019), pp. 159–168, <https://doi.org/10.4067/S0718-50732019000200159>.
- [39] Toutlemonde, F., Resplendino, J.: *Designing and Building with UHPFRC*, Wiley, 2013., <https://doi.org/10.1002/9781118557839>.
- [40] Li, P.P., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H.: Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC), *Constr. Build. Mater.*, 153 (2017), pp. 740–750, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.145>.
- [41] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., Pu, X.: Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials, *Cem. Concr. Compos.*, 34 (2012), pp. 538–544, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>.
- [42] Shi, C., Mo, Y.L.: *High-performance Construction Materials: Science and Applications*, World Scientific, 2008.
- [43] Chu, S.H., Kwan, A.K.H.: Mixture design of self-levelling ultra-high performance FRC, *Constr. Build. Mater.*, 228 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116761>.
- [44] Prem, P.R., Bharatkumar, B.H., Iyer, N.R.: Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete, *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, 38 (2013), pp. 1421–1431, <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0159-8>.
- [45] ASTM C192 / C192M-19: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM Int., 2019.
- [46] ASTM C1437-20: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM Int., 2020.
- [47] ASTM C138 / C138M-17a: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM Int., 2017.
- [48] BS EN 196-1: British Standard Methods of testing cement, 3 (2005).
- [49] ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete 1, 1997., pp. 1–3.
- [50] Lamond, J.F., Pielert, J.H.: *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making STP 169D*, 2006.
- [51] ACI 234R-06, 234R-06: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, *Acı 234R-06*, 96 (2006), pp. 1–64

- [52] Schmidt, M., Fehling, E., Glotzbach, C., Fröhlich, S., Piotrowski, S.: Heft 19 Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology, 2012.
- [53] Bajaber, M.A., Hakeem, I.Y.: UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review, *J. Mater. Res. Technol.*, 10 (2021), pp. 1058–1074, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.051>
- [54] Xincheng, P.: Super-High-Strength High Performance Concrete, Taylor & Francis, 2012.
- [55] Zulu, S.N.F.: Optimizing the usage of fly ash in concrete mixes, Durban University of Technology, 2017.
- [56] Hiremath, P., Yaragal, S.C.: Investigation on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete under Different Curing Regimes, *Mater. Today*, 4 (2017), pp. 9758–9762, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.262>.
- [57] Maltais, Y., Marchand, J.: Influence of curing temperature on cement hydration and mechanical strength development of fly ash mortars, *Cem. Concr. Res.*, 27 (1997), pp. 1009–1020, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00098-7).
- [58] Gonen, T., Yazicioglu, S.: The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete, *Build. Environ.*, 42 (2007), pp. 3080–3085, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.019>
- [59] Wang, A., Zhang, C., Sun, W.: Fly ash effects: II. The active effect of fly ash, *Cem. Concr. Res.*, 34 (2004), pp. 2057–2060, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.03.001>.
- [60] Kumar, S.: Fly ash-lime-phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions, *Build. Environ.*, 38 (2003), pp. 291–295, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00068-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00068-9).