

Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona visokih uporabnih svojstava

Džido, Miranda

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:853886>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

DIPLOMSKI RAD

Miranda Džido

Split, 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Miranda Džido

**Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona
visokih uporabnih svojstava**

Diplomski rad

Split, 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Miranda Džido

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083232010

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali 2

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona visokih uporabnih svojstava

Opis zadatka: Zadatak diplomskog rada je istražiti utjecaj mineralnih dodataka na fizikalno – mehanička svojstva betona visokih uporabnih svojstava. Potrebno je opisati pojam betona visokih uporabnih svojstava, principe projektiranja sastava i metode njihove izrade. Analizirati sastav UHPC betona i utjecaj mineralnih dodataka na njihova svojstva.

Projektirati sastave mješavina betona visokih performansi s varijacijom količine i tipa mineralnih dodataka. U radu je potrebno provesti relevantna laboratorijska ispitivanja betona u svježem i očvrslom stanju UHPC betona. Sve dobivene rezultate potrebno je analizirati i dati najvažnije zaključke rada.

U Splitu, 27.veljače 2023.

Voditelj Diplomskog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Komentor:

izv.prof.dr.sc. Nikola Grgić

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Izv. prof. dr. sc. Ivo Andrić

Zahvala

Prvenstveno se zahvaljujem svojim roditeljima na razumijevanju i beskrajnoj ljubavi tijekom pruženog školovanja. Hvala mojoj braći koji su mi tijekom cijelog školovanja pružili podršku i bili veliki oslonac. Veliku zahvalnost dugujem i svom mentoru doc. dr. sc. Goranu Baloeviću na izrazitom strpljenju te predanoj pomoći i savjetima pri izradi diplomskog rada.

Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona visokih uporabnih svojstava

Sažetak:

Beton ultravisokih performansi je superplastificirana smjesa silicijevog dioksida i cementa s vrlo niskim vodocementnim omjerom, koju karakterizira prisutnost finog kvarcnog pijeska. Postiže tlačne čvrstoće veće od 200 MPa te izvrsnu izdržljivost. Njegova proizvodnja zahtjeva veliku količinu cementa, koja se smanjuje upotrebom mineralnih dodataka. Upotrebom velikih količina vrlo finih mineralnih dodataka, kao što su silikatna prašina i metakaolin postiže se vrlo visoka čvrstoća i trajnost u betonu ultravisokih performansi što je povezano s vrlo gustom matricom.

Ključne riječi:

Beton ultravisokih performansi, mineralni dodaci, fizikalno - mehanička svojstva, silikatna prašina, metakaolin, gusto zbijena cementna matrica

The influence of mineral additives on the properties of concrete with high performance properties

Abstract:

Ultra-high performance concrete is a superplasticized mixture of silica and cement with a very low water-cement ratio, characterized by the presence of fine quartz sand. It achieves compressive strength greater than 200 MPa and excellent durability. Its production requires a large amount of cement, which is reduced by the use of mineral additives. The use of large amounts of very fine mineral additives, such as silicate dust and metakaolin, achieves very high strength and durability in ultra-high performance concrete, which is associated with a very dense matrix.

Keywords:

Ultra-high performance concrete, mineral additives, physical - mechanical properties, silicate dust, metakaolin, densely compacted cement matrix

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PRIMJENA BETONA ULTRAVISOKIH PERFORMANSI.....	3
3. PRINCIPI BETONA VISOKIH PERFORMANSI.....	7
3.1. SASTAVI UHPC SMJESA	8
3.2. Proizvodnja UHPC betona	10
4. UTJECAJ MINERALNIH DODATAKA.....	12
4.1. Vrste mineralnih dodataka	12
4.1.1. Silikatna prašina.....	12
4.1.2. Leteći pepeo	14
4.1.3. Metakaolin	16
4.1.4. Kameno brašno	17
4.1.5. Granulirana zgora visokih peći	17
4.1.6. Mljeveni kvarcni pijesak.....	19
4.2. Sile među sitnim česticama betona	19
5. EKSPERIMENTALNI DIO	24
5.1. PLAN I PROGRAM ISPITIVANJA	24
5.2. Korišteni materijali.....	24
5.2.1. Cement	25
5.2.2. Agregat.....	27
5.2.3. Aditiv	30
5.2.4. Metakaolin	31
5.2.5. Silikatna prašina.....	32
5.2.6. Leteći pepeo	33
5.2.7. Kameno brašno	34
5.3. Sastav ispitnih mješavina	34
5.4. Postupak miješanja.....	36
5.5. KORIŠTENE METODE ISPITIVANJA	39
5.5.1. Ispitivanje konzistencije morta	39
5.5.2. Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa	40
5.5.3. Tlačna i savojna čvrstoća prema EN 196-1	43

6.	REZULTATI ISPITIVANJA BETONA.....	45
6.1.	REZULTATI ISPITIVANJA OBRADLJIVOSTI PREMA EN 1015 – 3.....	45
6.2.	Rezultati ultrazvučnog ispitivanja.....	47
6.3.	Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće.....	49
6.4.	Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće.....	51
7.	ZAKLJUČAK.....	53
8.	LITERATURA.....	55
9.	POPIS SLIKA.....	56
10.	POPIS TABLICA.....	57
11.	PRILOZI.....	58

1. UVOD

Beton kao osnovni građevinski materijal bit će tražen i u budućnosti. Svjetska proizvodnja betona se procjenjuje oko 6 milijardi kubnih metara godišnje. Čvrstoća betona i njegova trajnost, mogućnost ugradnje u više oblika te niska cijena, razlog su zbog kojeg se beton smatra najpoznatijim i najvažnijim materijalom u građevinarstvu. Ovim radom opisan će se materijal „budućnost“, beton ultravisokih performansi. Beton ultravisokih performansi je materijal tlačne čvrstoće veće od 200 MPa i izvrsne izdržljivosti koji ima potencijal da postane rješenje za poboljšanje održivosti zgrada i drugih infrastrukturnih komponenti. Tlačna čvrstoća betona ultravisokih performansi čini ga idealnim materijalom za primjenu u situacijama u kojima je tlačno naprezanje prevladavajući faktor dizajna. Beton ultravisokih performansi ima vrlo posebna svojstva koja se značajno razlikuju od svojstava normalnog betona. Za potpuno iskorištavanje njegovih vrhunskih svojstava potrebno je posebno znanje za proizvodnju, konstrukciju i dizajn.

Beton ultravisokih performansi je vlaknima ojačana, superplastificirana smjesa silicijevog dioksida i cementa s vrlo niskim omjerom vode i cementa, koju karakterizira prisutnost vrlo finog kvarcnog pijeska u rasponu od 0,15–0,60 mm promjera, umjesto običnog agregata. Koriste se jači agregati, mikrosilika i sredstava za reduciranje vode kako bi se povećala njegova čvrstoća, čelična vlakna za sprječavanje krhkog loma i polipropilenskih vlakna za povećanje otpornosti na vatru, i tako dalje. Beton ultravisokih performansi se može miješati u konvencionalnim miješalicama, ali njegovo vrijeme miješanja je dulje nego za konvencionalni beton. Način postavljanja betona ultravisokih performansi utječe na orijentaciju i disperziju vlakana, što utječe na njegova vlačna svojstva. Na njegova svojstva također utječu i metoda, trajanje i vrsta stvrdnjavanja.

Posljednja dva desetljeća beton ultravisokih performansi koristi se u mnogim zemljama za građevinske komponente, mostove, sanacije, vertikalne komponente kao što su tornjevi vjetrenjača i komunalni tornjevi te u industriji nafte i plina i hidrotehničkim konstrukcijama. Najveću primjenu ipak ima u konstrukcijama cesta i mostova. Beton ultravisokih performansi pokazuje izvrsna reološka ponašanja uključujući obradivost, svojstva samo-ugradnje i samozbijanja, poboljšana mehanička i izdržljiva svojstva s vrlo visokom tlačnom čvrstoćom i ponašanjem bez lomljivosti. On ima nekoliko prednosti u odnosu na konvencionalni beton, ali njegova je uporaba ograničena zbog visoke cijene i jednostavnosti primjene. Međutim,

trebalo bi uzeti u obzir sve troškove povezane s upotrebom betona ultravisokih performansi na projektu, a ne samo jediničnu cijenu materijala. U mnogim slučajevima, njegova uporaba može dopustiti redizajn konstrukcije, čime utječe na mnoge aspekte ukupnih troškova.

U ovom radu opisat će se principi betona ultravisokih performansa (UHPC beton) te njegov sastav i proizvodnja. Posvetit će se pažnja utjecaju mineralnih dodataka na svojstva betona. Zatim će se iznijeti eksperimentalni dio rada koji će obuhvaćati projektiranje sastava mješavine, korištene materijale, ispitivanja obradljivosti svježeg i očvrslog UHPC betona te na samom kraju rada i dobiveni rezultati. Ovim radom cilj je i pomoći proizvođačima, inženjerima, arhitektima i investitorima da prošire svijest o betonu ultravisokih performansi radi boljeg prihvaćanja.

2. PRIMJENA BETONA ULTRAVISOKIH PERFORMANSI

Bliska je veza između dostupnog građevinskog materijala i vrste građevina koje gradimo. Određene vrste konstrukcija se mogu graditi tek nakon što se razvije odgovarajući materijal za gradnju. Kroz povijest se pokazalo da postoji međuodnos između oblika konstrukcije i novog materijala za koji se koristi. Čovječanstvo oduvijek traži građevinske materijale sa boljim performansama kako bi mogli graditi više, duže i bolje konstrukcije. Danas u osnovi koristimo drvo, beton i čelik u praktički svim našim konstrukcijama. Iako se naziva betonom, beton ultra visokih performansi, sa svojom izuzetno velikom čvrstoćom u rasponu od 200 MPa i izdržljivošću, u osnovi je novi materijal. [1]

Ranih 1960-ih na području Chicaga, beton visoke čvrstoće se prvi put počeo koristiti u značajnim količinama u velikim strukturama. Većini inženjera tada nije bilo očito da će beton jednog dana istisnuti čelik u izgradnji visokih zgrada. U to vrijeme konvencionalna mudrost bila je da je beton dobar samo za korištenje u visokim zgradama za temelje i konstrukciju podova ili za zaštitu konstrukcijskih čeličnih elemenata od požara.

Iako se čvrstoća prvih betona visoke čvrstoće koje su koristili čini prilično skromnom prema sadašnjim standardima, u to vrijeme uobičajeni beton u građevinarstvu koji se koristio imao je tlačnu čvrstoću od samo 15 do 30 MPa. Također, cementi i dodaci koji su bili dostupni u to vrijeme nisu nužno bili prikladni za proizvodnju betona visoke čvrstoće kao neki od onih koji su dostupni danas. Većina komercijalnih cemenata bila je mnogo grublje mljevena nego sada, a komercijalni reduktori vode u to vrijeme bili su uglavnom na bazi lignosulfonata. Uz to, lignosulfonati znatno su varirali u svom sastavu i "čistoći", što je također dovelo do značajne varijabilnosti u karakteristikama učinka. Reduktori vode na bazi lignosulfonata imali su snažnu tendenciju hvatanja ili povlačenja zraka, kao i usporavanja stvrdnjavanja, kada su se koristili u visokim dozama. 1960-ih proizvođači letećeg pepela tek su počeli osiguravati kvalitetu i postojanost svojih proizvoda, a proizvođači betona još nisu shvatili puni ekonomski potencijal letećeg pepela dobre kvalitete.

U takvom je okruženju razvijen prvi beton visoke čvrstoće. Kako bi ovaj beton visoke čvrstoće pokazao svoju vrijednost kad god se planirala visoka zgrada, proizvođač betona tražio je dopuštenje vlasnika da jedan ili dva stupa izgradi od eksperimentalnog betona koji imaju tlačne čvrstoće 10 do 15 MPa iznad onih koje je projektant već odabrao za glavne stupove. Nakon što je dokazano da je moguće proizvesti, isporučiti i ugraditi beton koji ima

tlačnu čvrstoću od 10 do 15 MPa iznad onoga što se obično isporučuje, bez ikakvih pritužbi i ikakve strukturne katastrofe, bilo je jednostavno vidjeti korištenje takvog betona u izgradnji sljedeće zgrade. Tijekom razdoblja od otprilike 10 godina, podizala se tlačna čvrstoća s 15–20 MPa do 45–60 MPa više od običnog betona. Ovim korakom povećanje tlačne čvrstoće betona rezultiralo je uštedom troškova, u smislu povećanog prostora na katovima ureda i parkirališta dostupnim za iznajmljivanje zbog smanjenja veličine stupova, posebno u nižim katovima koji su obično najprofitabilniji.

Na Slici 1 prikazana je zgrada Water Tower Place od 86 katova u Chicagu izgrađena 1970. Iako se prema sadašnjim standardima tlačna čvrstoća betona od 60 MPa koji su se koristili u stupovima najnižih katova ove zgrade, ne čini kao veliko postignuće, treba imati na umu da je ta tlačna čvrstoća postignuta u vrijeme kada se superplastifikatori još nisu koristili u proizvodnji betona visokih svojstava. Najveća moguća tlačna čvrstoća postizala se kroz smanjenje vodocementnog omjera što je više moguće. Scotia Plaza je zgrada visine 275 m, izgrađena 1987. godine u centru Toronta (Slika 2). Ova zgrada projektirana je korištenjem betona specificirane čvrstoće od 70 MPa. Beton razvijen za ovaj specifični projekt zapravo je bio mješavina portland cementa, fino mljevene troske iz visoke peći i silikatne prašine. [2]



Slika 1. Water Tower Place, Chicago [3]

Slika 2. Scotia Plaza, Toronto [4]

U svom sadašnjem obliku beton ultravisokih performansi (engl. Ultra-High Performance Concrete UHPC) postao je komercijalno dostupan u Sjedinjenim Državama oko 2000. Savezna uprava za autoceste (engl. Federal Highway Administration FHWA) istraživala je upotrebu UHPC-a za infrastrukturu autocesta 2001.te od 2002-e počela surađivati s državnim transportnim odjelom za implementaciju tehnologije. To je dovelo do upotrebe UHPC-a u nekoliko primjena mostova, uključujući montažne, prednapete nosače, predgotovljene ploče od vafla za mostove i kao spojni materijal između predgotovljenih betonskih palubnih ploča i nosača te između rubova susjednih nosača.

Pretraživanje literature identificiralo je i ostale zemlje s mostovima koji koriste UHPC uključuju Njemačku, Francusku, Australiju, Austriju, Hrvatsku, Italiju, Japan, Maleziju, Nizozemsku, Kanadu, Novi Zeland, Sloveniju, Južnu Koreju i Švicarsku, itd. Očito je, da UHPC privlači pozornost u cijelom svijetu. Evolucija UHPC-a u njegovu sadašnju formulaciju bila je postupan proces koji se odvijao mnogo godina.

Pješački most The Peace Bridge u Južnoj Koreji lučni je most s glavnim rasponom od 120 m što ga čini UHPC mostom s najvećim rasponom na svijetu (Slika 3). Izgrađen je od šest predgotovljenih, naknadno zategnutih dijelova tetivama koje se nalaze u gornjem i donjem dijelu. [5]



Slika 3. The Peace Bridge in Seoul, South Korea [6]

Tehnički izazov koji predstavlja nasumična geometrija fasade od 9.000 m² Fondacije Louis Vuitton ispunjen je proizvodnjom 19.000 ploča dobivenih lijevanjem bijelog betona ultra visokih performansi od kojih je 16.000 s različitim zakrivljenostima (Slika 4). UHPC beton brzo se pokazao jedinim materijalom koji je sposoban ispuniti očekivanja ovog projekta zbog svojih ultra-visokih performansi u smislu izdržljivosti, kvalitete površine, tanke debljine panela, proizvodnje temeljene na lijevanju i duktilnosti.



Slika 4. The Fondation Louis Vuitton [8]

Iako je u Hrvatskoj još uvijek primjena UHPC betona u samim začecima, na dijelove AB zidova Vodotoranja u Vukovaru (Slika 5), pričvršćena je metalna podkonstrukcija na kojoj su od betona ultravisokih performansi ovješene betonske obloge.



Slika 5. Vodotoranj Vukovar [7]

3. PRINCIPI BETONA VISOKIH PERFORMANSI

Napredak na području betona visokih svojstava do danas bio je plod empirijskog pristupa, a ne temeljnog i znanstvenog, štoviše napredak u praksi doveo je do temeljitih znanstvenih istraživanja. Iako još nije moguće objasniti svaki aspekt betona visokih svojstava do najsitnijih detalja, trenutno je moguće objasniti bolju izvedbu betona visokih svojstava na temelju načela koja mogu biti znanstveno potkrijepljena. Odnosno, kako bi se izbjeglo kretanje iz početka, moguće je slijediti praktične smjernice za omjere mješavina. Međutim, sve dok je beton visokih performansi napravljen od približno istih materijala koji se koriste za izradu uobičajenog betona, njihov stvarni sastav neće nužno biti najbolji za izradu betona visokih performansi. Nažalost, proizvođači cementa nisu zainteresirani za prevelika ulaganja u modificiranje svojih proizvodnih procesa jer beton visokih svojstava još uvijek predstavlja mali dio tržišta betona. Kako bi ostao tehnički konkurentan uobičajenom betonu, trošak proizvodnje betona visokih svojstava morat će biti što je moguće niži.

Izazov je postizanje najnižeg mogućeg vodocementnog faktora iz betonske mješavine s obradivošću koja se može kontrolirati dovoljno dugo kako bi postavljanje, konsolidacija i završna obrada betona visokih performansi bila laka kao i uobičajeni beton. Izrada betona visokih performansi kompliciranija je od proizvodnje uobičajenog betona. Kako se tlačna čvrstoća povećava, svojstva betona više nisu povezana samo s vodocementnim faktorom, temeljnim parametrom koji upravlja svojstvima uobičajenog betona. U smjesu uobičajenog betona stavlja se toliko vode da i hidratizirana cementna pasta i prijelazna zona predstavljaju najslabije karike u mikrostrukturi betona, u kojima se počinje razvijati mehanički kolaps kada je beton izložen tlačnom opterećenju. Tlačna čvrstoća nije jedino svojstvo betona koje daje prednost upotrebi betona visokih svojstava, ali je važno jer je povezano s istim mikrostrukturnim značajkama betona koje također određuju druga svojstva, kao što su modul elastičnosti i trajnost. [2]

Tijekom posljednjih godina napretka, mnogi su istraživači razvili UHPC do razine na kojoj su spremni za primjenu. Tlačna čvrstoća za projektirani UHPC doseže do 200 MPa. Međutim, značajni napredak je došao nakon razvoja superplastifikatora koji su omogućili proizvodnju lako tekućeg betona s visokim udjelom optimalno pakiranih ultrafinih čestica kako bi se smanjila poroznost kompozita korištenjem ekstremno niskog vodocementnog faktora.

Osnovni principi dizajniranja UHPC-a su:

- minimiziranje poroznosti kompozita optimiziranjem zrnate smjese kroz široku distribuciju klasa veličine praha i smanjenje vodocementnog faktora,
- poboljšanje mikrostrukture naknadnom toplinskom obradom kako bi se ubrzala pucolanska reakcija superplastifikatora i povećala mehanička svojstva,
- poboljšanje homogenosti eliminacijom grubog agregata što rezultira smanjenjem mehaničkih učinaka heterogenosti,
- povećanje duktilnog ponašanja dodavanjem odgovarajućeg volumenskog udjela malih čeličnih vlakana.

Primjena ovih principa dovodi do betona s vrlo visokom tlačnom čvrstoćom, a dodatak čeličnih vlakana pomaže u poboljšanju i vlačne čvrstoće i duktilnosti betona. [9]

3.1.SASTAVI UHPC SMJESA

Proteklih godina, rezultati u tehnologiji betona omogućili su proizvodnju UHPC-a s izvrsnim reološkim ponašanjem, uključujući obradivost, svojstva samo-ugradnje i samo-zbijanja, poboljšane mehaničke i trajnosne performanse s vrlo visokom tlačnom čvrstoćom. Razvoj UHPC uglavnom počinje projektiranjem granularne strukture agregata, od kojih su od izuzetne važnosti odabir i karakterizacija prikladnih sitnih čestica za optimalnu gustoću pakiranja. Ključni čimbenik u proizvodnji UHPC je poboljšanje mikro i makro svojstava sastojaka njegove smjese kako bi se osigurala mehanička homogenost, maksimalna gustoća pakiranja čestica i minimalna veličina nedostataka. Osim na relativne udjele različitih veličina zrna, odabir sastava UHPC treba se fokusirati i na odgovarajući odabir materijala s odgovarajućim fizikalnim i kemijskim svojstvima.

Cilj UHPC-a je postizanje gusto zbijene cementne matrice dobre obradivosti i čvrstoće, a da bi se postigla željena svojstva UHPC-a, obično su potrebne dobro odabrane sirovine i sofisticirani tehnički postupci. [9]



UHPC mješavine vrlo često se sastoje od kombinacije portland cementa, finog pijeska, silicij dioksida, vode, dodatka za smanjenje vode visokog raspona i vlakana (najčešće čeličnih). Ponekad se koriste sitni agregati i razni kemijski dodaci. Ovisno o primjeni i dobavljaču, mogu se koristiti različite kombinacije ovih materijala.

Za upotrebu komercijalno dostupnih sastavnih materijala, razvijene su sljedeće preporuke za omjere mješavina:

- cement umjerene finoće i udjela C3A znatno nižeg od 8 posto,
- omjer pijeska i cementa od 1,4 za maksimalnu veličinu zrna od 0,8 mm,
- silicij dioksid s vrlo niskim sadržajem ugljika na 25 posto težine cementa,
- stakleni prah s srednjom veličinom čestica od 1,7 μm na 25 posto težine cementa,
- dodatak visokog stupnja redukcije vode,
- vodocementni omjer oko 0,22,
- čelična vlakna s 2,5 posto volumena. [5]

Neke UHPC mješavine komercijalno dostupne prikazane su u Tablici 1. Može se uočiti da UHPC obično koristi visok volumen cementa, superplastifikatora i pijeska.

Tabela 1. Kompozicije komercijalnih UHPC [9]

Materials (kg/m ³)	BCV [®]	BSI [®]	Cemtec [®]		
Portland cement	2115	1114	1050	712	911
Fine sand	(Premix)	1072	514	1020	911
SF		169	268	231	225
Ground quartz		-	-	211	-
Accelerator	-	-	-	30	-
Steel fibers	156	234	858	156	173
SP	21.5	40	44	30.7	38
Water	159	211	180	109	200

Dizajn mješavine je izbor sirovina u optimalnim omjerima kako bi se betonu pružila potrebna svojstva u svježem i očvrslom stanju za određene primjene. Dizajn UHPC-a ima za cilj postizanje gusto zbijene cementne matrice dobre obradivosti i čvrstoće. Međutim, očekuje se složeni materijal u očvrslom stanju UHPC-a zbog većeg broja mogućih kombinacija sastojaka.

U usporedbi s običnim betonom, u proizvodnji UHPC-a obično se koristi velika količina veziva i doza superplastifikatora. S odgovarajućom kombinacijom cementnih materijala,

odgovarajućom gradacijom pijeska i ugradnjom vlaknastog ojačanja i superplastifikatora, UHPC se može proizvesti za postizanje visoke sposobnosti tečenja s poboljšanim mehaničkim svojstvima i izdržljivošću. Međutim, ova izvanredna mehanička svojstva dolaze sa skupom i sofisticiranom tehnološkom pripremom. Visoki troškovi materijala, složena tehnika izrade zajedno s ograničenim raspoloživim resursima ozbiljno ograničavaju njegov komercijalni razvoj i primjenu u modernoj građevinskoj industriji. Ova ograničenja dodatno motiviraju razvoj ekonomičnog UHPC-a korištenjem alternativnih materijala sa sličnim funkcijama za zamjenu skupih kompozita UHPC-a kako bi se povećala njegova razina prihvatljivosti. [9]

3.2. Proizvodnja UHPC betona

UHPC betoni proizvode se na isti način kao i uobičajeni betoni, koristeći istu proizvodnu opremu. Sva oprema koja se koristi za vaganje i doziranje, mora se redovito kalibrirati jer je bitno da se pažljivo odabrani i kontrolirani materijali precizno doziraju kako bi se postigla ciljana čvrstoća i obradivost. UHPC mješavine vrlo su osjetljive na bilo kakve promjene u svojim omjerima, naročito u sadržaju vode. Povećanje od 3 do 5 l vode za miješanje po kubnom metru betona može rezultirati smanjenjem tlačne čvrstoće od 10 do 20 MPa. [2]

Gotovo svaka konvencionalna miješalica za beton će miješati UHPC, međutim UHPC zahtijeva veći unos energije u usporedbi s konvencionalnim betonom, tako da će se vrijeme miješanja produljiti. Povećan unos energije, u kombinaciji sa smanjenjem grubog agregata i niskim sadržajem vode, zahtijeva korištenje modificiranih postupaka kako bi se osiguralo da se UHPC ne pregrije tijekom miješanja. Upotreba visokoenergetskog miksera ili snižavanje temperatura sastojaka te djelomična ili potpuna zamjena vode u mješavini ledom, može ovaj problem riješiti.

Vrijeme miješanja UHPC-a kreće se od 7 do 18 minuta, što je znatno dulje nego kod konvencionalnih betona te otežava kontinuirane proizvodne procese i smanjuje kapacitet betonara. Vrijeme miješanja može se smanjiti optimiziranjem raspodjele veličine čestica, zamjenom cementa i kvarcnog pijeska parom silicijevog dioksida te povećanjem brzine miješalice. Također se može smanjiti dijeljenjem procesa miješanja u dvije faze. [5]

Vrijeme miješanja je obično dulje za betone visokih performansi nego za uobičajene betone te se mora prilagoditi od slučaja do slučaja. Miješanje je optimizirano tako da svako daljnje

povećanje vremena miješanja ne povećava homogenost ili obradivost betona. Još uvijek se istražuje kada i kako se superplastifikator mora unijeti u smjesu tijekom miješanja. Trenutno postoje tri pristupa:

- 1. pristup: sav superplastifikator u isto vrijeme se dodaje smjesi. Pobornici ovog pristupa smatraju da je to najlakši način da se postigne jednostavna i potpuna kontrola doziranja superplastifikatora. Iako je najjednostavniji, smanjuje vrijeme miješanja te povećava učinak betona visokih performansi, može koštati više jer je doza superplastifikatora potrebna za postizanje željenog slijeganja na terenu nešto veća.
- 2. pristup: na početku miješanja smjesi se dodaje otprilike dvije trećine superplastifikatora, a na samom kraju miješanja zadnja trećina. Pobornici ovog načina tvrde da se postižu određene uštede u ukupnoj količini superplastifikatora potrebnoj za postizanje određene obradivosti. Smatraju da je bolje pustiti da se vrlo rani etringit formira iz sulfata cementa, umjesto da se neke molekule superplastifikatora potroše tijekom ranog doziranja na nekim reaktivnim mjestima čestica cementa. Još uvijek se ne zna je li istinit ovaj pristup kada u industriji vrijeme miješanja traje manje od 2 do 3 minute.
- 3. pristup: dio superplastifikatora dodaje se tijekom miješanja tako da beton visokih performansi napušta tvornicu sa slijeganjem od oko 100 mm i kada stigne na gradilište još uvijek ima slijeganje od najmanje 50 mm. Zatim se dodaje ostatak superplastifikatora kako bi se postiglo ciljano spuštanje. Pobornici ovog pristupa smatraju da je problematičan transport tekućeg betona kao što je beton visokih performansi proizveden s prva dva pristupa jer postoji opasnost od izlivanja pri kočenju miješalice za beton, te je opasan kada miješalice na gradilištu stane na neravan teren. Međutim, pobornici prva dva pristupa smatraju da, kako bi se postiglo ispravno miješanje na gradilištu, tranzitna miješalice ne može primiti puno opterećenje kada napušta pogon. Kod ovog pristupa, prikladno je razrijediti odloženi dio superplastifikatora s visokim sadržajem krutine u jednakoj količini vode za miješanje, koju treba oduzeti od početne količine vode za miješanje.

Neovisno o korištenom pristupu treba napomenuti da pad betona visokih svojstava ne smije biti veći od 230 mm. Betoni visokih performansi s višim vrijednostima slijeganja skloni su segregaciji, osim ako njihov sastav nije prilagođen na odgovarajući način.[2]

4. UTJECAJ MINERALNIH DODATAKA

Kada je vrlo jednostavan, ali vrlo važan koncept vodocementnog omjera inicijalno razvijen, beton je bio izrađen isključivo od portland cementa. S godinama, iako u različitoj mjeri u različitim dijelovima svijeta, uporaba takozvanih „dopunskih cementnih materijala“ postala je uobičajena praksa tako da mnogi moderni betoni sada uključuju leteći pepeo, metakaolin, silikatnu prašinu, kameno brašno, itd. Trošak konvencionalnog betona ovisi o cijeni cementa, što objašnjava zamjenu industrijskih nusproizvoda (šljaka, letećeg pepela), inertnih materijala (vapnenačka punila) i prirodnih proizvoda u prahu (prirodni pucolani i kalcinirana glina) za dio cementa.

Isto vrijedi i za UHPC betone, ali uz to postoji velika reološka prednost zbog sporije reaktivnosti ovih dodatnih cementnih materijala. Takvi nusproizvodi reagiraju sporije od portland cementa, to jest oni gotovo uopće ne reagiraju tijekom prvih sati nakon miješanja pa stoga njihova uporaba općenito smanjuje količinu i cijenu superplastifikatora. Njihovo doziranje u konačnoj mješavini ovisi o željenoj ranoj čvrstoći betona visokih svojstava, uzimajući u obzir temperaturu okoline. Nusproizvodi se također mogu koristiti za daljnje smanjenje vodocementnog omjera kako bi se dobio kompaktniji i jači beton. [2]

Upotrebom velikih količina vrlo finih mineralnih dodataka, kao što su leteći pepeo, silikatna prašina, metakaolin i mljeveni kvarcni pijesak, postiže se vrlo visoka čvrstoća i trajnost u betonu visokih i ultravisokih performansi što je povezano s vrlo gustom matricom. Naime, fine čestice vapna, veličine između 0,1-10 μm , mogu popuniti praznine između zrna cementa, dok veće čestice pucolana, veličine između 10-100 μm , mogu popuniti praznine između finih zrna agregata što rezultira mnogo gušćom matricom. [1]

4.1. Vrste mineralnih dodataka

4.1.1. Silikatna prašina

Silikatna prašina glavni je sastojak nove generacije betona visokih i ultravisokih svojstava u kombinaciji sa superplastifikatorom (Slika 6). Silikatna prašina je industrijski nusproizvod iz jedinica za proizvodnju ferosilicijevih legura, stoga je njegova dostupnost ograničena. Također ponekad daje tamnu boju betonu, što je zbog neizgorenog ugljena koji se nalazi u njemu i predstavlja estetski problem. [1]

Nastaje pri temperaturi od oko 2000°C u procesu redukcije kvarca u metalni silicij. Silikatna prašina se izdvaja u procesu predsepariranja i filtriranja prašine iz proizvedenih otpadnih dimnih plinova na tehničkom sustavu za otprašivanje.

Pojedine čestice silikatne prašine manje su 50 – 100 puta nego čestice cementa i njihova prosječna veličina je 0,1 – 0,5 mikrometara. Njene fine čestice sa velikom specifičnom ploštinom i visokim sadržajem SiO₂, čine silikatnu prašinu vrlo reaktivnim pucolanom kada se upotrebljava u betonu. Silikatna prašina utječe na svojstva betona s dva mehanizma: reakcijom pucolana čime se povećava količina C – S – H gela te djelovanjem sitnih čestica koje poboljšavaju obradivost i povećavaju kohezivnost te popunjavaju unutrašnju strukturu, jer su znatno sitnije od čestica cementa.

Silikatna prašina djeluje na povećanje čvrstoće i smanjenje propusnosti betona, no zbog velike specifične ploštine, utječe na povećanje potrebe za vodom, zbog čega se preporuča rabiti ju zajedno s kemijskim dodatkom plastifikatorom ili superplastifikatorom.

Dodavanjem silikatne prašine betonu rezultira povećanom kohezijom te stoga beton nema sklonosti segregaciji i izdvajanju vode. Povećavajući čvrstoću betonu, silikatna prašina poboljšava svojstva betona u očvrslom stanju. [10]



Slika 6. Silikatna prašina [11]

Postoji mit u industriji betona da je silikatna prašina neophodna za izradu betona visokih performansi. Međutim, betoni visokih svojstava klase od 50 do 100 MPa mogu se izraditi bez silikatne prašine, a u vrlo ograničenom broju slučajeva beton visokih svojstava klase od 100 do 125 MPa izrađen je i isporučen na teren bez silikatne prašine. Međutim, kad god je ona dostupna po konkurentnoj cijeni, preporučuje se njena upotreba jer je tada lakše postići ciljane reologiju i čvrstoću.

Dodavanje silikatne prašine u betonske smjese s vrlo niskim vodocementnim faktorom, rezultira poboljšanjem obradivosti. Sićušne sferne čestice silikatne prašine su dobro raspršene u sustavu cement - voda te one mogu istisnuti molekule vode iz blizine cementnih zrnaca, tako da se zarobljene molekule vode između flokuliranih čestica cementa mogu osloboditi i tako doprinijeti fluidizaciji smjese. Silikatna prašina ispunjava praznine između zrna cementa i modificira mikrostrukturu prijelazne zone, čineći je gušćom i jačom. [2]

4.1.2. Leteći pepeo

Leteći pepeo su male čestice prikupljene sustavima za otprašivanje termoelektrana na ugljen (Slika 7). Elektrofilterski pepeo može biti različitog kemijskog i faznog sastava jer je isključivo vezan uz vrstu i količinu nečistoća sadržanih u ugljenu sagorjelom u termoelektrani. Ugljen iz istog izvora koji se koristi u istom postrojenju proizvest će gotovo isti leteći pepeo. Međutim, kao kemijski sastav letećeg pepela iz različitih biljaka može varirati. [2]

Svojstva betona poboljšavaju se pomoću letećeg pepela na 2 načina:

- fizičkim efektom povezanim s povišenjem udjela finih čestica – čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa (1- 20 μm) i
- pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama. Leteći pepeo smanjuje potrebu za vodom u betonu i izdvajanje vode, poboljšava obradljivost, smanjuje propusnost betona i usporava oslobađanje topline hidratacije pa je povoljno upotrebljavati ovaj mineralni dodatak kod masivnih betona.

On smanjuje potrebu za vodom u betonu te smanjuje propusnost, sprječava izdvajanje vode i poboljšava obradljivost, usporava oslobađanje topline hidratacije te je stoga povoljan mineralni dodatak kod masivnih betona.

Leteći pepeo ima malu cijenu i malu potrošnju energije jer nastaje kao sporedni proizvod, međutim njegova primjena može utjecati na smanjenu početnu čvrstoću te produljiti vrijeme vezivanja betona. To se može spriječiti alkalnim aktiviranjem npr. s 1% NaOH ili kombiniranjem letećeg pepela sa kemijskim dodacima, superplastifikatorima.

Smanjivanjem vodocementnog omjera upotrebom letećeg pepela kombiniranog sa kemijskim dodacima, postiže se smanjena povezanost pora u strukturi betona što utječe na propusnost, a samim time i na trajnost betona i otpornost betona konstrukcije na utjecaje iz okoliša.[10]



Slika 7. Leteći pepeo [12]

Pri izradi betona visokih svojstava klase od 50 do 100 Mpa treba ozbiljno razmotriti upotrebu letećeg pepela ili zgure. Oni su jeftiniji od cementa i uglavnom zahtijevaju manje superplastifikatora. Stoga njihova uporaba rezultira uštedama troškova materijala i lakšom kontrolom reološkog ponašanja betona. Međutim, leteći pepeo nije tako reaktivan kao cement ili silikatna prašina u smjesi visoke čvrstoće. [2]

4.1.3. Metakaolin

Metakaolin je visoko aktivna pucolanska mineralna smjesa te potiče hidrataciju cementa i skraćuje vrijeme vezivanja (Slika 8). Mljeveni metakaolin dobiva se termičkom obradom prirodne gline. Minerali kristalne gline su dehidroksilirani. Metakaolin prah ima veću pucolansku aktivnost. Temperatura kalciniranja gline utječe na pucolansku reaktivnost dobivenog proizvoda. Glina je u najreaktivnijem stanju kada temperatura kalciniranja dovodi do gubitka hidroksila i rezultira srušenom i neuređenom strukturom.

Metakaolin može imati koristan učinak u kontroli alkalne reakcije agregata, smanjenju rizika od korozije ugrađenog čelika izazvanoj kloridima, smanjenju stope upijanja. Metakaolini utječu na rano povećanje čvrstoće betona, pročišćavanje strukture pora, poboljšanje otpornosti betona na agresivne otopine, smanjenje reakcije alkalne silike. Struktura pora pasta s mješavinom metakaolina finija je od one u običnoj cementnoj tijestu. [1]

Metakaolin u betonu reagira s proizvodima kalcijevog hidroksida (vapnom) nastalim tijekom hidratacije cementa. Veličina njegovih čestica je 1 – 2 μm te ima veliku reaktivnost. Uobičajeno se koristi u količini od 5 – 15% zamjene portlandskog cementa.

Metakaolin također poboljšava svojstva betona tako što:

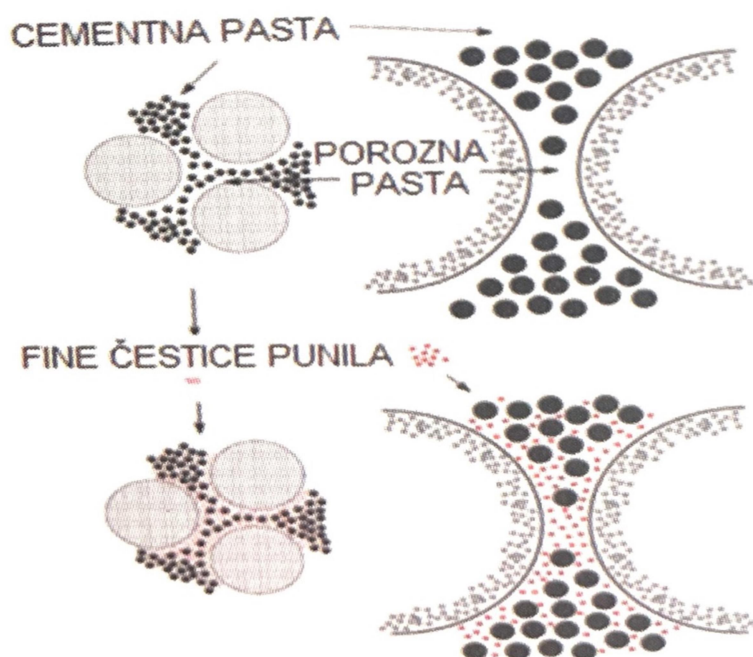
- smanjuje eflorescenciju
- olakšava završnu obradu
- smanjuje vodoupojnost
- smanjuje deformacije skupljanja
- olakšava zadržavanje boje betona. [10]



Slika 8. Metakaolin [13]

4.1.4. Kameno brašno

Kameno brašno odnosno punilo su čestice agregata koje prolaze kroz sito otvora 0,063 mm te koje dodavanjem betonu, poboljšavaju njegovu obradljivost i smanjuju segregaciju i izdvajanje vode. Punila se primjenjuju i kod betona koji sadržavaju agregate s manjim udjelom sitnih čestica.



Slika 9. Popunjavanje strukture betona česticama punila [10]

Punila svojim djelovanjem pridonose smanjenu količine cementa, a da pritom beton ne gubi čvrstoću te ubrzavaju hidrataciju cementa i poboljšavaju mikrostrukturu. Upotreba punila također povećava djelotvornost silicijske prašine.

4.1.5. Granulirana zgura visokih peći

Granulirana zgura visokih peći je otpadni proizvod iz proizvodnje sirovog željeza (Slika 10). Ukoliko se zgura polako hladi na zraku, mineralni sastojci se pojavljuju u obliku kristalnih melilita koji na običnoj temperaturi ne reagiraju s vodom. Materijal koji je fino samljeven pokazuje slabu hidrauličnu i pucolansku reakciju. Granulirana zgura dobiva se kada se tekuća zgura brzo ohladi vodom ili kombinacijom zraka i vode te se tada veći dio vapna, magnezija, silicija i aluminijskih oksida zadrži se u nekristaliziranom ili staklastom stanju. Ukoliko je hlađenje bilo sa zrakom te ograničenom količinom vode, tada se dobije peletizirana zgura. Oba proizvoda

imaju zadovoljavajuća hidraulična svojstva kada su samljeveni tako da im je finoća mliva 400 do 500 m²/ kg prema Blaineu.

Ovisno o veličini zrna zgora povećava ili smanjuje izdvajanje vode, fine čestice smanjuju izdvajanje, a veće imaju manji utjecaj. Granulirana zgora u betonu:

- poboljšava pumpabilnost
- poboljšava obradljivost betona
- smanjuje toplinu hidratacije
- povećava čvrstoću
- smanjuje propusnost
- produljuje trajnost
- povoljno utječe na čimbenike održivosti
- poboljšava izgled površine
- smanjuje troškove održavanja i popravaka
- produljuje životni vijek betonske konstrukcije
- povećava otpornost na prodiranje klorida, djelovanje sulfata, djelovanje alkalnoagregatne reakcije, iscvjetavanje. [10]



Slika 10. Granulirana zgora visoke peći [18]

4.1.6. Mljeveni kvarcni pijesak

Jedan od sastavnih materijala UHPC-a je i mljeveni kvarcni pijesak (Slika 11). Kvarcni pijesak može imati zrna promjera od 0,05 mm do 3 mm. Može biti različitih boja ovisno o nečistoćama sadržanim u njihovom sastavu, no čisti kvarcni pijesak je bezbojan ili može imati mliječnu nijansu. Kvarc ima kristalnu strukturu koja pijesku dobivenom od njega daje izuzetnu čvrstoću i otpornost na kiseline i lužine.



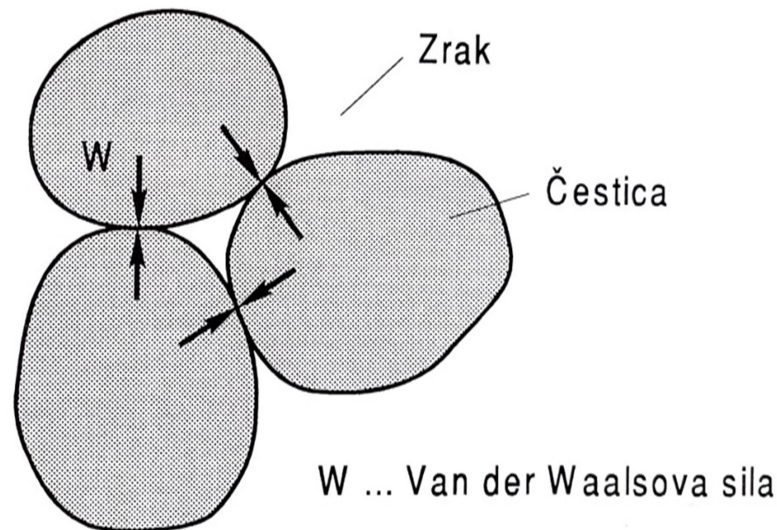
Slika 11. Mljeveni kvarcni pijesak [19]

4.2. Sile među sitnim česticama betona

Sile različite veličine i podrijetla djeluju među česticama svježeg betona. Poznavanje tih sila važno je za razumijevanje ponašanja betona u svježem i očvrslom stanju. Od zrna agregata i paste se sastoji sustav uzorka svježeg betona, a na ovu podjelu na podsustave utječe vrsta sila koje su dominantne među česticama svakog podsustava.

Intermolekularne sile prevladavaju među česticama paste i njihovi efekti djelovanja zamjećuju se već kod količine čestica oko 0,04 mm. Efekti intermolekularnih sila izraziti su kod čestica veličine ispod 0,01 mm. No, veličina otvora standardnog sita 0,125 mm uzima se kao praktična granica veličine zrna dva podsustava. Površinske intermolekularne sile koje djeluju među sitnim česticama su: Van der Waalsove sile, sile radi adsorpcije molekula fluida, kapilarne sile te električne sile.

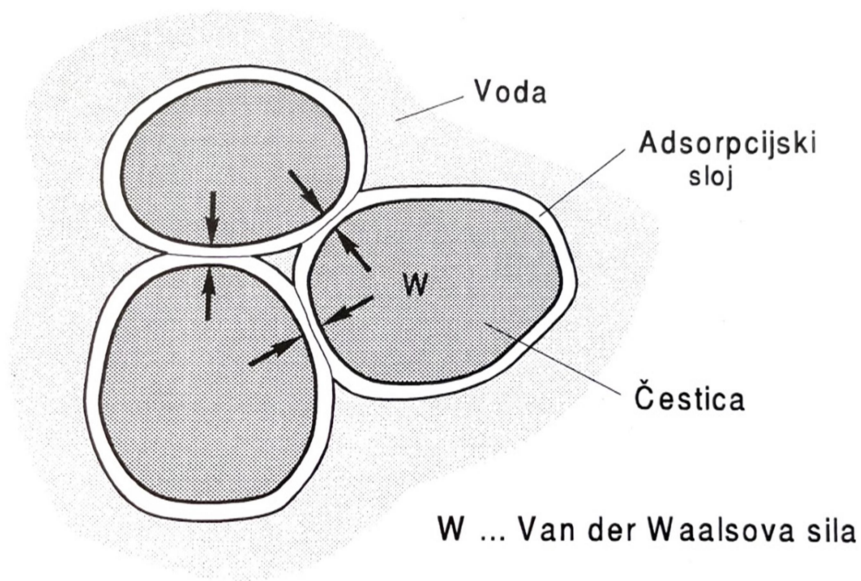
Van der Waalove sile, odnosno privlačne sile čije je porijeklo u atomskoj strukturi tvari (Slika 12). Van der Waalove sile su veće, što je manji razmak površina krute tvari među kojima djeluju. Direktni kontakt između čestica se ostvaruje ako su čestice okružene suhim zrakom. Na dodiru površina Van der Waalove sile iznose 30 Mpa. U uzorku je velik broj međusobnih dodira svih čestica te na taj način one tvore skelet koji je znatno čvršći nego kada bi samo sile od vlastite težine djelovale među česticama.



Slika 12. Shematski prikaz djelovanja Van der Waalovih sila među česticama na zraku [14]

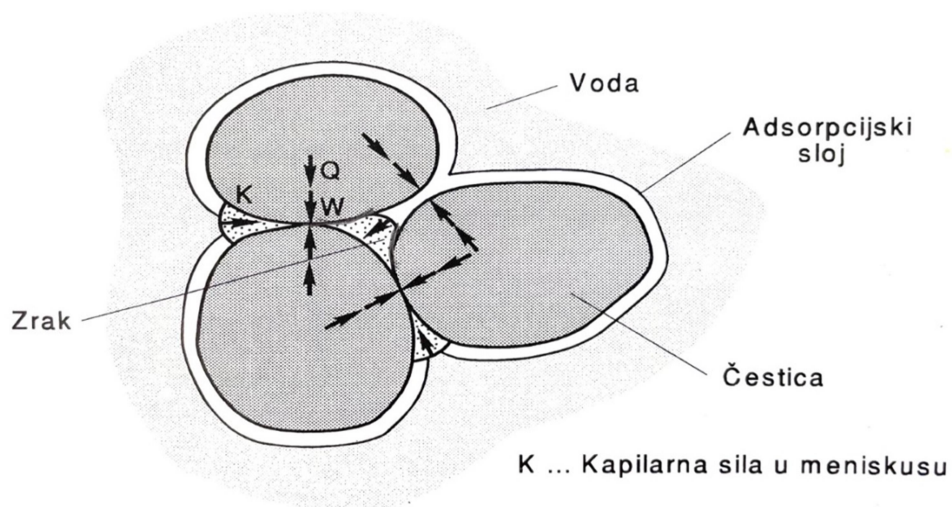
Uranjajući čestice u vodu, one se prevlače sa nekoliko slojeva skoro pravilno poredanih molekula vode koje čine adsorpcijski sloj (Slika 13). Među čestice na mjestu kontakta se uvlače molekule vode adsorpcijskog sloja te ih razmiču. No, Van der Waalove sile su svejedno dovoljno velike te mogu na mjestu nekadašnjeg kontakta dijelom zgnječiti adsorpcijski sloj, međutim više nema direktnog kontakta, samo se dodiruju adsorpcijski slojevi.

Adsorpcijski sloj utječe na lakše međusobno gibanje čestica u vodi nego na zraku. Najsitnije čestice čine beton „masnijim“ jer imaju najveću volumnu koncentraciju adsorbirane vode.



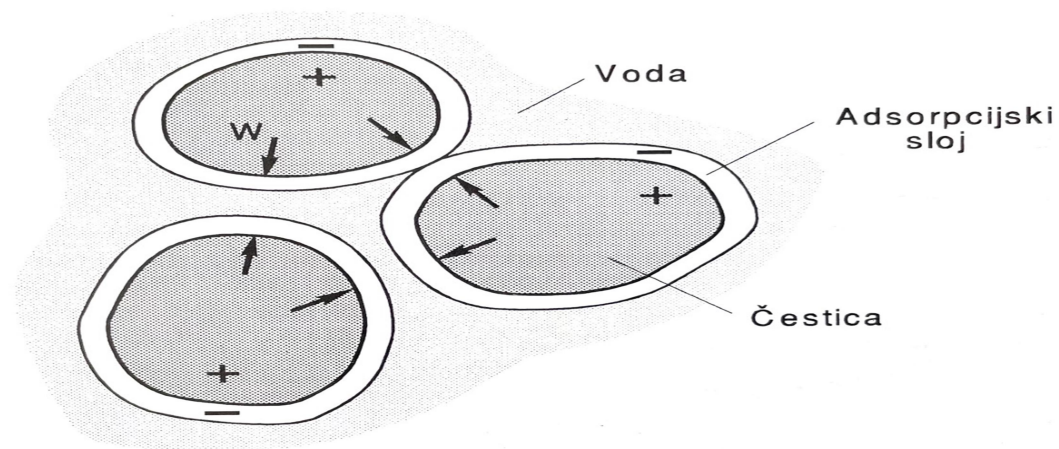
Slika 13. Shematski prikaz djelovanja adsorpcijskog sloja [14]

S obzirom da među sitnim česticama koje se ne izmiješaju s vodom zaostaje mala količina zraka, u meniskusima među česticama djeluju kapilarne sile te nastaje vlak oko zarobljenog zraka (Slika 14). Djelovanje vlaka u vodi utječe na dodatno privlačenje susjednih čestica silom Q koja čini djelovanje Van der Waalsove sile većom. Pri preoblikovanju uzorka paste, čestice se ne mogu međusobno pomaknuti zbog intermolekularne sile među njima što čini da se cijela skupina čestica ponaša kao jedna čestica neuobičajenog oblika koja se jače odupire preoblikovanju nego pojedinačne čestice.



Slika 14. Shematski prikaz djelovanja kapilarnih sila [14]

Čestice cementa imaju pozitivan električni naboj te se vodi u kojoj su uronjene kao elektrolit biraju organske molekule sa negativnim površinskim ionima koje se zbog suprotnog naboja čvrsto vežu na površinu čestica (Slika 15). Njezini negativni ioni privlače i pozitivne ione okolne vode, koji se čvrsto vežu na površinu organskih molekula. Vanjska površina adsorpcijskog sloja svake čestice ima negativan naboj zbog čega se susjedne čestice odbijaju. Odbijanje između čestica se suprotstavlja Van der Waalsovoj sili pa su adsorpcijski slojevi na kontaktu manje zgnječeni. Potpuno neutraliziranje utjecaja Van der Waalsovih sila postiže se izborom prikladnog elektrolita što utječe da se iz paste lakše izbacuje zrak zarobljen među česticama. [14]



Slika 15. Shematski prikaz rezultat djelovanja električnih sila [14]

Beton visokih performansi je beton s vrlo niskom poroznošću koja se postiže korištenjem mnogo manje vode nego kod uobičajenog betona, tako da su čestice cementa i dodatnog cementnog materijala mnogo bliže jedna drugoj nego u uobičajenim betonskim mješavinama.

Kako bi postigli sto niži vodocementni omjer, važnu ulogu u određivanju reologije svježeg betona igraju raspodjela veličine zrna i oblik čestica cementa. Među kemijskim čimbenicima koji utječu na reologiju svježeg betona su početna reaktivnost cementa i dodatnih cementnih materijala u kontaktu s vodom te trajanje takozvanog "razdoblja mirovanja".

Dodavanje finih materijala poput silikatne prašine i metakaolina u betonske smjese s vrlo niskim vodocementnim omjerom utječe na poboljšanje obradivosti i čvrstoće. Povoljan učinak dodavanja finih materijala u betonske smjese rezultat je dobro raspršenih sićušnih sfernih čestica u vodocementom sustavu koje mogu istisnuti molekule vode iz blizine

cementnih zrnaca. Tako zarobljene molekule vode između flokuliranih čestica cementa mogu se osloboditi i doprinijeti fluidizaciji smjese.

Zamjenom dijela cementa dodatnim cementnim materijalom koji ne sadrži C_3S , C_3A ili C_4AF , postaje lakše kontrolirati reologiju bilo koje betonske smjese, pod uvjetom da su raspodjela veličine zrna i oblik čestica dodatnog cementnog materijala gotovo isti kao kod zamijenjenog cementa. Takva zamjena je ekonomski povoljna budući da je cijena dodatnog cementnog materijala obično niža od cijene cementa (osim silikatne prašine, u većini slučajeva). Međutim, potrebno je pronaći optimalno doziranje cementnog materijala, uzimajući u obzir zahtjeve čvrstoće u ranoj dobi. [2]

U ovom radu je analiziran utjecaj tipa mineralnog dodatka na fizikalno-mehanička svojstva UHPC betona u svježem i očvrslom stanju. Od aktivnih dodataka korištena je silikatna prašina, metakaolin i leteći pepeo, dok je od inertnih dodataka korišteno kameno brašno. U svim recepturama korišten je dodatak veće finoće mliva (silika ili metakaolin) u kombinaciji s dodatkom manje finoće mliva (leteći pepeo ili kameno brašno). Eksperimentalni rezultati ukazuju na dobru sposobnost ovih ultrafinih materijala za proizvodnju i postizanje traženih svojstava UHPC betona. S tehničke točke gledišta, čini se da se za proizvodnju betona vrlo visoke kompaktnosti mogu koristiti drugi materijali osim silikatne prašine. Za UHPC, silikatna prašina dovodi do najviših performansi. Ipak, metakaolin, mljeveni leteći pepeo i kameno brašno mogu se koristiti za postizanje visoke tlačne čvrstoće. Potrebna su daljnja istraživanja kako bi se povećale potencijalne prednosti ultrafinih materijala u UHPC: znanje o ranoj čvrstoći na pritisak i savijanje, puzanje, skupljanje, otpornost na cikluse smrzavanja/odmrzavanja, kemijske napade, itd. Također, u praktičnom dijelu rada kombinirana su po dva navedena ultrafina materijala zajedno što je pridonijelo optimizaciji fluidnosti i tlačnoj čvrstoći.

U nastavku rada, opisat će se eksperimentalni dio te dobiveni rezultati.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1.PLAN I PROGRAM ISPITIVANJA

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj mineralnih dodataka na fizikalno – mehanička svojstva betona ultravisokih performansi. Od aktivnih dodataka korištena je silikatna prašina, metakaolin i leteći pepeo, dok je od inertnih dodataka korišteno kameno brašno. Izrađeno je ukupno 5 laboratorijskih mješavina UHPC betona. Kombinirani su mineralni dodaci veće finoće (silikatna prašina; metakaolin) s mineralnim dodacima manje finoće (leteći pepeo; kameno brašno). U svježem stanju ispitana je konzistencija UHPC betona, dok su u očvrslom stanju ispitane gustoće i savojne/tlačne čvrstoće UHPC betona. Također je ispitana brzina prolaska ultrazvučnog vala kroz UHPC beton. Dobiveni rezultati su prikazani grafički te su analitički analizirani.

U nastavku slijedi detaljan opis receptura, korištenih materijala, provedenih ispitivanja te dobivenih rezultata u svježem i očvrslom stanju.

5.2.Korišteni materijali

Prilikom izrade mješavina korišteni su:

- portland cement CEM I 42,5 R s udjelom 95% - 100% klinkera
- voda iz vodoopskrbne mreže
- aditiv MasterGlenium ACE 770
- kvarcni pijesak 0-2 mm i 0.3-1.0 mm
- metakaolin
- silikatna prašina
- leteći pepeo
- kameno brašno

5.2.1. Cement

U eksperimentalnom dijelu rada korišten je portland cement CEM I 42,5 R s udjelom 95% - 100% klinkera iz tvornice Cemex u Solinu. Cement je hidraulično vezivo, koje nastaje tako što se fino mljeveni anorganski materijal pomiješa s vodom te tvori pastu, koja se hidratacijskim reakcijama i procesima vezuje i očvršćuje te koja nakon očvrstnuća zadržava čvrstoću i stabilnost i pod vodom. Ako je usklađen s normama HRN EN 197-1 i BAS EN 197-1 te ako je pravilno pomiješan s odgovarajućim udjelima agregata i vode, cement ima sposobnost stvaranja betona ili morta, koji dovoljno dugo zadržavaju obradivost, a nakon određenih vremenskih razdoblja postižu određene razrede čvrstoća i zadržavaju dugotrajnu postojanost volumena.

Tabela 2. Tipična svojstva 42,5 N CEM I 42,5 R

TIPIČNA SVOJSTVA	ZAHTJEV NORME
Gubitak žarenjem $3,0 \pm 0,5\%$	$\leq 5,0$
Netopivi ostatak $0,2 \pm 0,1\%$	$\leq 5,0$
$\%SO_3$ $2,9 \pm 0,2\%$	$\leq 4,0$
Kloridi 0,01%	$\leq 0,1$
Postojanost volumena 1 mm	≤ 10
Vrijeme vezivanja $200 \pm 25\text{min}$	≥ 60
Rana čvrstoća 30MPa	$\geq 20,0$
Normirana čvrstoća 54 MPa	$\geq 42,5; \geq 62,5$

Tabela 3. Tipičan sastav 42,5 N CEM I 42,5 R

TIPIČAN SASTAV	ZAHTJEV NORME
Klinker 95-100%	95-100
Sporedni sastojci 0-5%	0-5

Svojstva cementa su:

- iznimno visoka rana i konačna čvrstoća,
- kratak interval početka vezivanja,
- optimalna obradivost,
- značajan razvoj topline hidratacije.

Cement se primjenjuje kod:

- betona s izrazitim zahtjevima za početnom mehaničkom otpornošću,
- predgotovljenih montažnih elemenata,
- montažnih elemenata,
- prednapregnutih konstrukcija,
- mlaznog betona,
- injektiranja,
- izgradnje javnih i poslovnih objekata,
- izgradnje zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i infrastrukturnih objekata od betona visokih marki.

Cement je naročito prikladan za:

- betonske radove pri nižim temperaturama,
- izgradnju objekata koji zahtjevaju brzo skidanje oplata, ovladavanje elementima ili opterećenje konstrukcije u ranoj dobi,
- izradu vodonepropusnih betona,
- izradu betona otpornih na mraz i soli za odmrzavanje.

5.2.2. Agregat

U ovom radu korišten je standardni kvarcni pijesak prema CEN EN 196 – 1 veličine zrna 0 – 2 mm, prirodni pijesak koji je silikatan, posebno u svojim najfinijim frakcijama. Njegove čestice su uglavnom izometrične i zaobljenog oblika. Pored standardnog pijeska korišten je i kvarcni pijesak granulacije 0,3 – 1,0 mm. Uzorak je prethodno prosijan u vibracijskom uređaju za prosijavanje sa pripadajućim sitima (Slika 16).

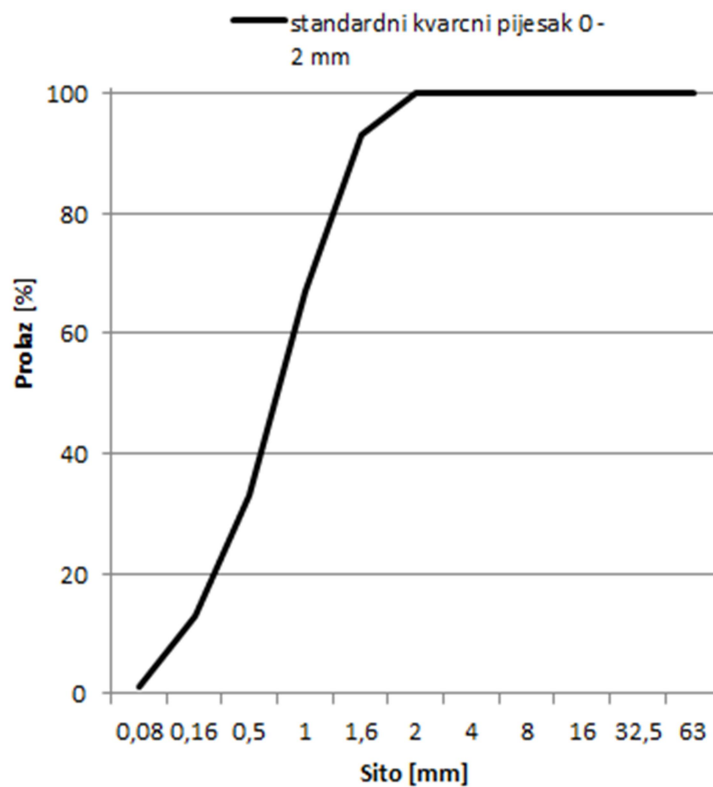
Granulometrijski sastav standardnog pijeska dan je u Tablici 4., a njegov grafički prikazan je na Slici 17.



Slika 16. Uređaj za prosijavanje agregata

Tabela 4. Gradacija mjerena prosijavanjem u skladu je sa zahtjevima EN 196-1 i ISO 679: 2009

Square mesh Size (mm)	Cumulative (%) retained
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

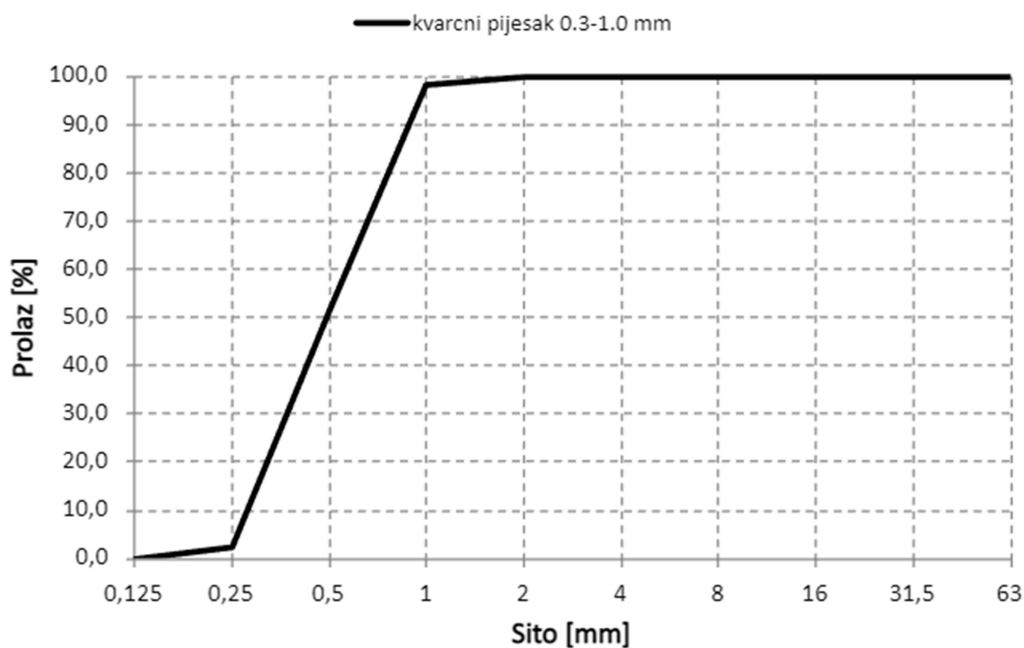


Slika 17. Grafički prikaz granulometrijskog sastava

Za mješavinu M8 korišten je Min 2C kvarcni pijesak za fuge granulacije 0,3 – 1,0 mm. Rezultati prosijavanja pijeska 0.3-1.0 mm prikazani su u Tablici 5. Grafički prikaz granulometrijskog sastava pijeska 0.3-1.0 mm prikazan je na Slici 18.

Tabela 5. Rezultati prosijavanja kvarcnog pijeska 0,3 – 1,0 mm

Sito	Ostatak	Prolaz	Ostatak	Prolaz
[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
63	0,0	810,4	0,0	100,0
31,5	0,0	810,4	0,0	100,0
16	0,0	810,4	0,0	100,0
8	0,0	810,4	0,0	100,0
4	0,0	810,4	0,0	100,0
2	0,0	810,4	0,0	100,0
1	16,0	794,4	2,0	98,0
0,5	375,8	418,6	48,3	51,7
0,25	399,9	18,7	97,7	2,3
0,125	18,4	0,3	100,0	0,0
< 0.125	0,3	-	-	-
Ukupno	810,4			
Početno	Razlika	Odstupanje	Ref.	Ocjena
[g]	[g]	%	%	-
812,9	2,5	0,0	< 1	Zadovoljava



Slika 18. Grafički prikaz granulometrijskog sastava

5.2.3. Aditiv

Korišteni aditiv je MasterGlenium ACE 770 koji je inovativni superplastifikator polikarboksilnih eter polimera. MasterGlenium ACE 440 ima posebnu molekularnu konfiguraciju koja ubrzava hidrataciju cementa. U kombinaciji s efikasnim učinkom disperzije, brza adsorpcija molekule na čestice cementa, izlaže povećanu površinu zrna cementa reakciji s vodom. Time je moguće postići raniji razvoj topline hidratacije te kao posljedicu toga, veću čvrstoću u vrlo ranoj dobi.

MasterGlenium ACE 770 ne sadrži kloride, zadovoljava zahtjeve UNI EN 934-2, UNI EN 480 (1-2), ASTM C 494-92 za tip F i također je kompatibilan sa svim cementima koji zadovoljavaju UNI EN 197-1 i ASTM standardima.

MasterGlenium ACE 770 je prikladan za izradu predgotovljenih betonskih elemenata s reoplastičnim betonom koji ima tekuću konzistenciju, bez segregacije i nizak vodocementni omjer sa visokim ranim i dugotrajnim čvrstoćama.

Prednosti uporabe MasterGlenium ACE 770 su sljedeće:

- beton s niskim vodocementnim omjerom,
- optimizirani ciklusi stvrdnjavanja smanjenjem vremena stvrdnjavanja ili temperature stvrdnjavanja,
- eliminirano stvrdnjavanje toplinom,
- eliminirana energija potrebna za postavljanje, zbijanje i stvrdnjavanje (sustav nulte energije),
- povećana produktivnost,
- poboljšan izgled površine.

Sustav nulte energije temelji se na kombinaciji avangardnog dodatka MasterGlenium ACE 770 i inovativne tehnologije reodinamičkog betona te je razvijen kako bi pomogao proizvođaču montažnog betona da racionalizira svoj proizvodni proces i uštedi na troškovima energije u kombinaciji s poboljšanom kvalitetom proizvoda i radnim uvjetima.

Uobičajena preporučena količina doziranja je 0,7 do 1,2 litre na 100 kg veziva. Druge doze mogu se koristiti u posebnim slučajevima u skladu sa specifičnim uvjetima na gradilištu.

Tabela 6. Tehničke informacije o MasterGlenium ACE 770

Oblik	Tekućina
Relativna gustoća	1,033-1,073
Sadržaj kloridnih iona	≤0,1% po masi
Sadržaj lužine	≤5,0%
Korozivsko ponašanje	Sadrži samo komponentu iz EN 934-1:2008 Dodatak A.1
Čvrstoća na pritisak	Jednaka konzistencija: 24h ≥140% 28 dana >115% Jednak v/c omjer: 28 dana >90%
Sadržaj zraka	Jednaka konzistencija: ≤2,0% Jednak v/c omjer: ≤2,0%
Smanjenje vode	≥12%
Dosljednost	Povećanje: >120 mm Zadržavanje sukladno 3.2

5.2.4. Metakaolin

U radu je korišten Metaver™ N termički obrađeni čisti metakaolin, pucolanski dodatak za stvrdnjavanje cementnih građevinskih materijala. Metaver™ N se proizvodi kalcinacijom koncentriranog kaolina i blago je crvenkast, pretežno amorfan alumosilikat koji reagira s portlanditom odnosno kalcijevim hidroksidom kako bi se izgradile cementne CSH-faze.

Tabela 7. Fizikalne karakteristike metakaolina

Specifična gustoća	2,6 g/cm ³
raspodjela veličine čestica:	d ₅₀ ~ 3,4-4,5 μm
	d ₉₅ ~ 12-18 μm
Specifična površina (Blaine)	ca. 22 000 cm ² /g
Specifična površina (BET)	ca. 18 m ² /g
Boja	bijela
Bjelina	ca. 87
Prividna slobodno istaložena gustoća	0,32 - 0,37 g/cm ³

Metaver™ N se većinom sastoji od minerala kaolinita – slojevitog silikatnog minerala. Između slojeva SiO₂ i Al₂O₃ u omjeru 1:2 nalazi se voda koja može ispariti toplinskom obradom, kalcinacijom. Tada se aktivira kaolin. Portland cement razvija ca. 25 % kalcijevog hidroksida (slobodno vapno) u svojoj hidrataciji. Ovaj alkalni nusproizvod vrlo je topiv i prvenstveno se napada i otapa u prisutnosti kiselina ili sulfata. Metaver™ N zamjenjuje 5 do 15 % cementa po težini.

Svojstvo Metaver™ N je njegova sposobnost vezanja velike količine slobodnog vapna u obliku stabilnih CSH-faza. Odgovarajućim kemijskim i građevinskim metodama mogu se kontrolirati brzina i količina ove reakcije.

Metaver™ N je pucolanski mineralni aditiv koji može poboljšati mnoga svojstva hidrauličnih cementnih mortova, betona i sličnih proizvoda te se lako umiješa i daje mekanu plastičnu konzistenciju s kojom je lako raditi. Kroz njegovu distribuciju veličine čestica ne dolazi do velikog povećanja potrebe za vodom.

Metaver™ N pokazao je svoje prednosti u primjenama gdje se zahtijeva: čvrstoća, gustoća, otpornost.

5.2.5. Silikatna prašina

Silikatna prašina koja je korištena je MEYCO® MS 610 tj. mineralni dodatak koji se koristi u normalnom i prskanom betonu.

MEYCO® MS 610 povećava inženjerska svojstva betona kao što su otpornost na pritisak, otpornost na savijanje, mehanika loma i nepropusnost poboljšavajući svojstva međupovršine betona i mikrostrukturu cementne paste.

Prednosti korištenja MEYCO® MS 610 su:

- smanjenje doze ubrzivača skrućivanja u prskanom betonu,
- mogućnost nanošenja u debljim slojevima u prskanom betonu,
- omogućuje veći pritisak i otpor povlačenja u bilo kojoj vrsti betona,
- povećava otpornost na mehanička i kemijska djelovanja,
- povećava vodonepropusnost betona,
- sprječava ispuštanje vode i segregaciju u svježem betonu,
- smanjuje propusnost klora.

Tabela 8. Tehničke specifikacije MEYCO® MS 610

Struktura materijala	Zgusnuta mikrosilika
Boja	Siva
Gustoća	0,55 - 0,70 kg/litri
Količina klora (EN 480-10)	< 0,1 %
Finoća	> 15000 m ² /kg
Omjer SiO ₂	> %85
Omjer CaO	< %1
Omjer SO ₃	< %2
0,045 < omjer čestica	< %40
Indeks aktivnosti	> %95
Zgusnuti mikrosilika	2300 kg/m ³

MEYCO® MS 610 koristi se u omjeru 5-10 kg na 100 kg cementa. Doziranje se može promijeniti ovisno o laboratorijskim ispitivanjima.

5.2.6. Leteći pepeo

U radu je korišten leteći pepeo Microsit® M10, odnosno pucolanski aditiv za građevinske materijale visoke učinkovitosti na bazi cementa. Microsit® M10 je dodatak za kontroliranu proizvodnju visokokvalitetnih mortova i betona te se većinom sastoji od SiO₂ i Al₂O₃ i klasificiran je kao aluminosilikat.

Tabela 9. Fizičke karakteristike Microsit® M10

Oblik čestice	sferni
Blaineova vrijednost	6.400 cm ² /g
Specifična gustoća	2.54 cm ² /g
Prividna gustoća labavo	0,78 cm ² /g
Boja	siva
Bjelina	26
Potreba za vodom	29%
Potreba za vodom (Kat. S)	92,5% M.-%

Raspodjela veličine čestica	$d_{10} \leq 2 \mu\text{m}$
	$d_{50} \leq 5 \mu\text{m}$
	$d_{95} \leq 10 \mu\text{m}$

Posebna raspodjela veličine čestica i sferni oblik Microsit® M10 povećavaju njegova svojstva tečenja, dok amorfne čestice povećavaju mehanička svojstva spojeva svojom pucolanskom reakcijom. Microsit® M10 karakterizira vrlo fina i definirana raspodjela veličine čestica. Raspodjela veličine čestica je ujednačena, a čestice su gotovo savršeno sferne. Zbog toga se upotrebom Microsit® M10 može optimizirati raspodjela veličine čestica mortova i betona u području finih čestica te se dobija visoka gustoća pakiranja i trajnost cementno vezane matrice.

Microsit® M10 također smanjuje potrebu za vodom i poboljšava reološka svojstva. Krajnja svojstva ovise o njegovom omjeru sa portland cementom. Tipični dodaci su 8 - 15% na težinu cementa, ovisno o potrebnim svojstvima.

5.2.7. Kameno brašno

Korišteno je kameno brašno kao punilo u eksperimentalnom dijelu rada. Korišteno kameno brašno dobiveno je mljevenjem finog vapnenca sa visokim udjelom kalcijevog karbonata, specifične gustoće 2,70 g/cm³. Finoća čestica po Blainu iznosi 5700 cm² /g.

5.3. Sastav ispitnih mješavina

Eksperimentalni dio rada proveden je u laboratoriju za materijale pri Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu.

Napravljeno je ukupno pet ispitnih mješavina UHPC betona koje se razlikuju po kombinacijama mineralnih dodataka. Pri tome se kombiniraju mineralni dodaci veće finoće (silikatna prašina, metakaolin) s mineralnim dodacima manje finoće (leteći pepeo, kameno brašno). Opis ispitnih mješavina s pripadajućim oznakama naveden je u nastavku:

- M1 – prva ispitna mješavina sa silikatnom prašinom i letećim pepelom,
- M2 – druga ispitna mješavina sa silikatnom prašinom i kamenim brašnom,
- M3 – treća ispitna mješavina s metakaolinom i letećim pepelom,
- M4 – četvrta ispitna mješavina s metakaolinom i kamenim brašnom,
- M8 – peta ispitna mješavina s metakaolinom i letećim pepelom.

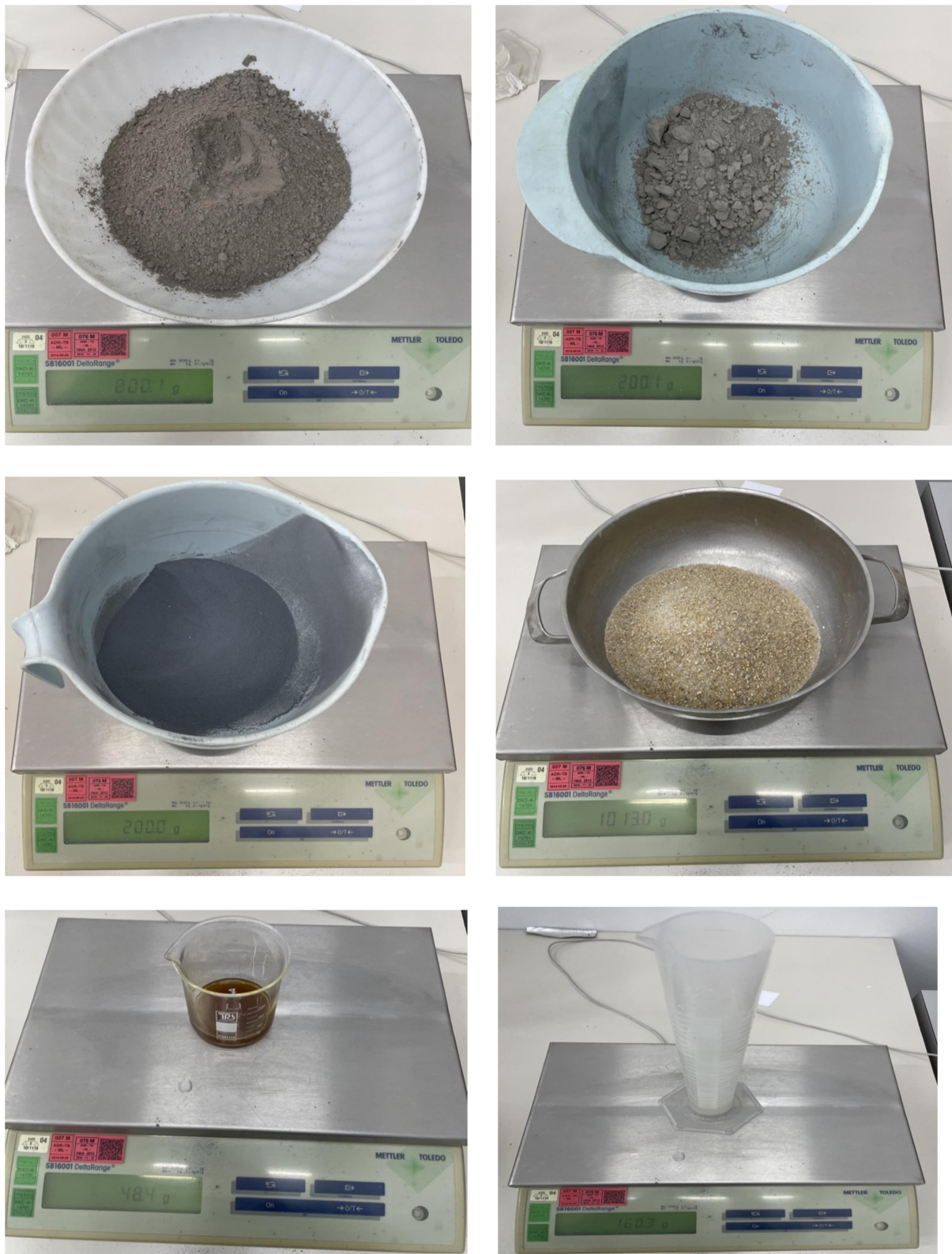
U Tablici 10 su prikazane recepture svih mješavina. U svim recepturama je za $1m^3$ mješavine korišteno 800 kg cementa. Udio pojedinog mineralnog dodatka u odnosu na cement je 0.25. Vodocementni faktor iznosi 0.2. U svim recepturama ukupni dio veziva iznosi 1200 kg. Korišten je superplastifikator u dozi od 4 % na ukupnu masu veziva.

Tabela 10. Recepture mješavina

SASTAV		M1	M2	M3	M4	M8
VEZIVO:						
Cement	CEM I 42.5 R	800	800	800	800	800
Mineralni dodaci	Silikatna prašina	200	200	-	-	-
	Metakaolin	-	-	200	200	200
	Leteći pepeo	200	-	200	-	200
	Kameno brašno	-	200	-	200	-
VODA:		160	160	160	160	160
w/c = 0.2						
ADITIV:						
Superplastifikator	ACE 70	48	48	48	48	48
AGREGAT:						
Kvarcni pijesak	0-2 mm	1000,4	1013,0	1027,5	1040,1	
Kvarcni pijesak	0.3–1.0 mm					1027,5

5.4. Postupak miješanja

Svi korišteni materijali su najprije precizno izmjereni (Slika 19).



Slika 19. Mjerenje materijala

Nakon doziranja i mjerenja sastojaka mješavina, sastojci se stavljaju u miješalicu. Miješanje UHPC betona se vršilo u laboratorijskoj miješalici za mort (Slika 20) za recepture M1-M4. Miješanje betona ultravisokih performansi traje duže nego kod običnog betona, te traje najmanje 20 minuta. Prvo miješanje se radi u suho te traje 5 minuta kako bi se komponente međusobno dobro pomiješale. Nakon toga se dodaje aditiv s pola ukupne količine vode i miješa se 2 minute. Potom se dodaje druga polovica vode te se miješa 5 minuta, a zatim se do kraja miješanja ubrza rad miješalice. Kod mješavine M8 testirana je mogućnost miješanja u laboratorijskoj miješalici za beton (Slika 21). Postupak kod spravljanja betona je identičan kao i za prethodne mješavine, osim što je brzina miješalice fiksirana.



Slika 20. Laboratorijska miješalica za mort



Slika 21. Laboratorijska miješalica za beton

Nakon završetka miješanja slijedi ispitivanje obradivosti i ugradba UHPC betona u kalupe.

U svježem stanju se ispituje obradivost UHPC betona te se nakon toga pristupa ugradbi UHPC betona u kalupe. Kalupi se prethodno premažu uljem za lakše odvajanje očvrsnulog UHPC betona od kalupa. Svi uzorci UHPC betona su ugrađeni u kalupe dimenzija 40×40×160 mm. Kalupi se pričvrste na vibro stol te se ispuni polovica kalupa i vibrira 60 sekundi, nakon čega se ispuni ostatak kalupa i vibrira sljedećih 60 sekundi (Slika 23).



Slika 22. Vibro stol



Slika 23. Svježi UHPC beton u kalupima na vibro stolu

Zatim se uzorci ostavljaju 28 dana u komori na temperaturi 20 ± 2 °C i vlažnosti 90-100% nakon čega se u očvrnulom stanju ispituje brzina ultrazvuka te savojna i tlačna čvrstoća.

5.5. KORIŠTENE METODE ISPITIVANJA

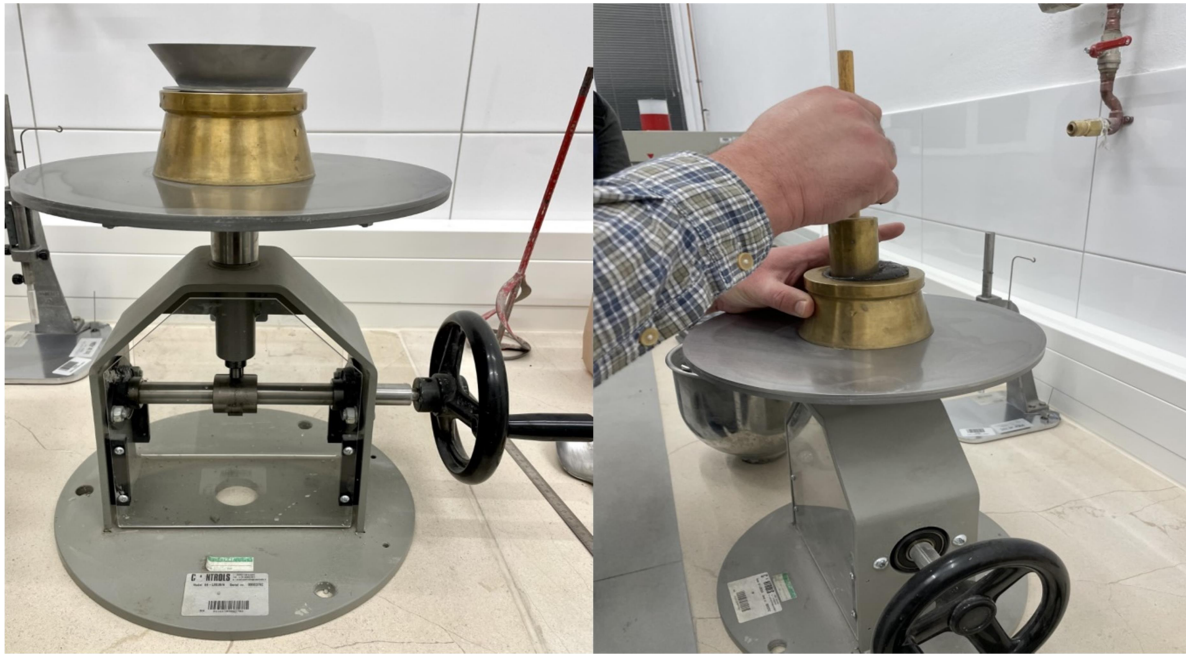
Prema određenim standardima ili normama obavlja se ispitivanje materijala koje uključuje način pripreme uzoraka za ispitivanje zatim metode ispitivanja i na koncu način obrade rezultata. Svaka metoda uvjetovana je određenim načinom izvedbe ispitivanja, korištenom opremom te drugim faktorima kojih se mora pridržavati.

Kako je beton visokih performansi uglavnom sastavljen od zrna agregata manjih od 2 mm, za ispitivanje njegovih svojstava u svježem i očvrslom stanju praktičnije je koristiti metode ispitivanja karakteristične za mort. Ukoliko se u UHPC betonu koriste zrna agregata veća od 2 mm, potrebno je usvojiti odgovarajuće metode za ispitivanje betona.

U ovom radu korišten je pijesak granulacije do 2 mm za izradu mješavina UHPC betona te su usvojene metode ispitivanja koje se standardno koriste za ispitivanje morta. Ispitana je konzistencija morta (UHPC betona) u svježem stanju, te gustoća i savojna/ tlačna čvrstoća morta (UHPC betona) u očvrslom stanju. Također je ispitana brzina prolaska ultrazvučnog vala kroz UHPC beton.

5.5.1. Ispitivanje konzistencije morta

Ispitivanje konzistencije morta (UHPC betona) obavljeno je prema standardnoj metodi razastiranja EN 1015-3, kojom se konzistencija morta definira na osnovu mjerenja njegovog promjera nakon protresanja na potresnom stolu. Za ovu metodu koristi se potresni stol, mesingani kalup oblika krnjeg stošca te drveni bat. Ispitivanje se vrši na način da se svježi UHPC beton ugrađuje u mesingani kalup koji je ranije navlažen vodom iznutra. UHPC beton se ugrađuje u dva sloja te se oba sloja navlaženim drvenim batom zbijaju 10 puta. Potom se makne mesingani kalup te se 15 puta, odnosno 1put u sekundi, okreće ručka potresnog stola. Na taj način se UHPC beton razastire te se u dva okomita smjera mjeri promjer i iz dobivenih rezultata izračunava se srednja vrijednost. Uređaj za ispitivanje konzistencije morta prikazan je na Slici 24.



Slika 24. Ispitivanje konzistencije morta

U slučaju morta za zidanje određena su tri tipa konzistencije:

- tekuća konzistencija – kod koje je $d > 200$ mm,
- plastično – elastična sa $d = 140 - 200$ mm,
- plastična konzistencija < 200 mm. [15]

5.5.2. Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Brzina ultrazvučnog impulsa mjeri se prema normi HRN EN 12504-4. Ultrazvučni impulsi se dobivaju pomoću specijalnih generatora gdje se prijenos ultrazvučnih valova vrši pomoću posebnih prijenosnika (Slika 25). Uzdužni, poprečni i površinski ultrazvučni valovi se prenose kroz element. Svaki aparat koji radi na principu rasprostiranja longitudinalnih valova sastoji se od generatora električnih impulsa, prijenosnika i prijemnika, pojačala i indikatora koji mjeri vrijeme između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka njegovog dolaska na prijemni pretvarač. Na rubove elementa i prijenosnike se stavlja gel koji omogućava bolji unos ultrazvučnih valova kroz element, a potom prijemnik pretvara mehaničke valove u električne, a indikator vremena daje vrijeme trajanja kretanja ultrazvuka.



Slika 25. Ispitivanje brzine ultrazvuka

Ova metoda omogućava prilično točne rezultate o dimenzijama pukotina i segregaciji uzorka.

Uz izmjerenu duljinu uzorka i vrijeme kretanja ultrazvuka, dolazi se do brzine ultrazvuka.

Brzina ultrazvuka predstavlja omjer duljine uzorka i vremena prolaska ultrazvučnog vala:

$$v = \frac{l}{t} \text{ (m/ s)}$$

Nakon što se uzorak izvaže dobije se masa koja podijeljena s dimenzijama uzorka ($b \times h \times L$), tvori gustoću uzorka ρ .

$$\rho = \frac{m}{b \cdot h \cdot L} \left[\frac{kg}{dm^3} \right]$$



Slika 26. Vaganje uzorka

Ultrazvučnim impulsom se može odrediti dinamički modul elastičnosti betona pomoću formule:

$$E_{bd} = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

gdje je:

E_{bd} = dinamički modul elastičnosti (GPa),

v = brzina ultrazvučnog vala izmjerena izravnim prolazom (km/s),

ρ = gustoća betona (kg/m³),

μ = Poissonov koeficijent. [16]

Tabela 11. Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala [17]

Brzina ultrazvučnog vala[km/s]	Kvaliteta betona
3,5 - 4,5	Dobar
3,0 - 3,5	Prosječan
2,0 - 3,0	Loš
<2,0	Površinske pukotine

5.5.3. Tlačna i savojna čvrstoća prema EN 196-1

Savojna čvrstoća prizmi dimenzija 40x40x60 mm ispituje se kao prosta greda raspona L na uređaju koji ima mogućnost ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće (Slika 27). Uzorak se postepeno opterećuje do loma kada se očitavaju naprezanje i sila F. Naprezanje na rubu poprečnog presjeka prizme pri lomu iznosi:

$$f_{sav} = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l}{\frac{b^3}{6}} = \frac{3 \cdot l \cdot F}{2 \cdot B^3} \text{ [MPa]}$$

gdje je F sila pri lomu u N.

Kao rezultat ispitivanja je uzeta srednja vrijednost 3 pojedinačna rezultata.

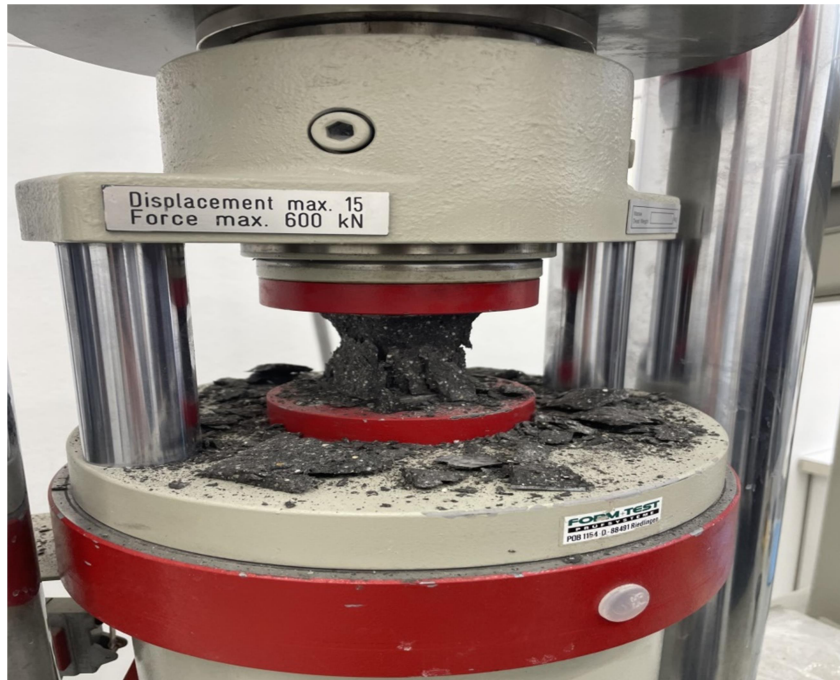


Slika 27. Ispitivanje savojne čvrstoće UHPC betona

Zatim je ispitana čvrstoća na pritisak tj. tlačna čvrstoća, f_{tlak} (Slika 28). Ispitivanje se vršilo na polovicama prizmi dobivenih nakon ispitivanja savojne čvrstoće.

Tlačna čvrstoća na svaku polovicu prizme iznosi:

$$f_{tlak} = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}$$

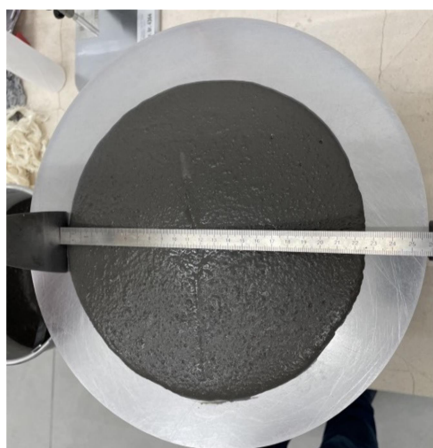


Slika 28. Ispitivanje tlačne čvrstoće UHPC betona

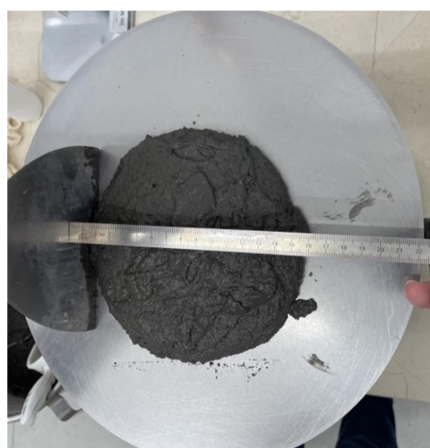
6. REZULTATI ISPITIVANJA BETONA

6.1. REZULTATI ISPITIVANJA OBRADLJIVOSTI PREMA EN 1015 – 3

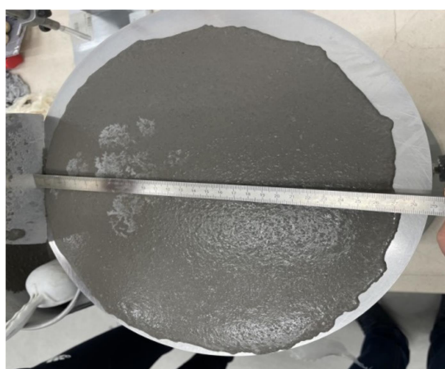
Nakon miješanja sastojaka ispitana je obradljivost uzoraka te izmjeren promjer nakon okretanja potresnog stola (Slika 29).



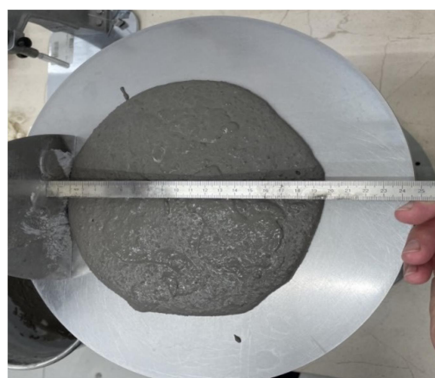
Mješavina M1



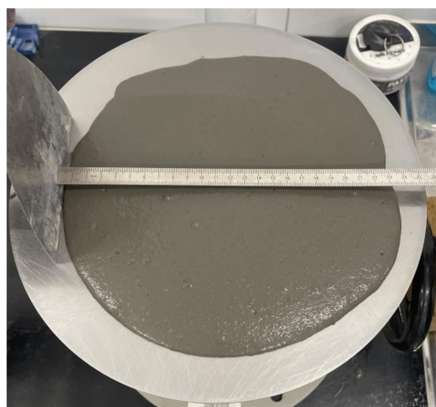
Mješavina M2



Mješavina M3



Mješavina M4



Mješavina M8

Slika 29. Ispitivanje obradljivosti uzoraka

U Tablici 12 prikazani su rezultati ispitivanja obradljivosti prema EN 1015 – 3

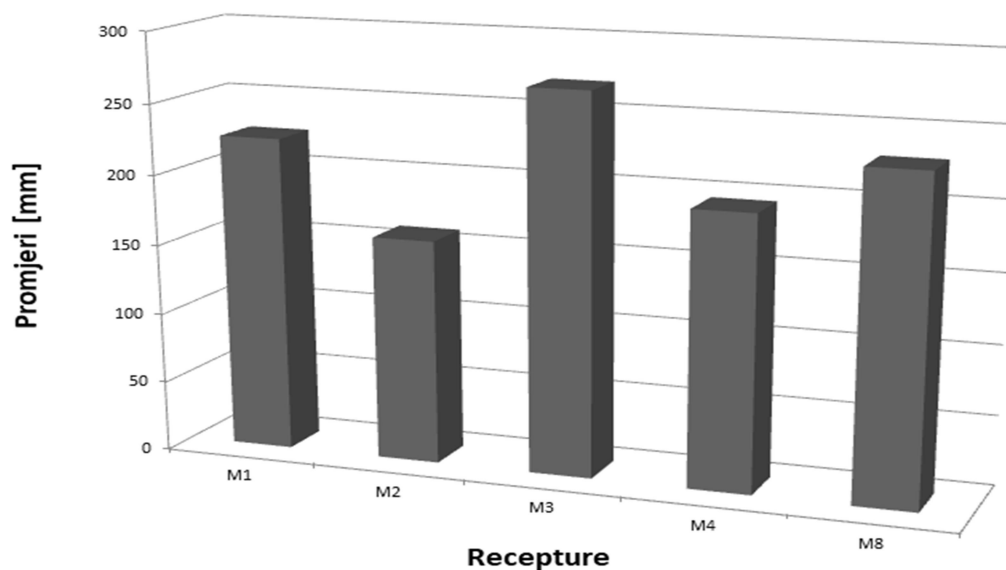
Tabela 12. Rezultati ispitivanja obradivosti

	M1	M2	M3	M4	M8
	PROMJERI [mm]				
D1	225	160	270	195	230
D2	225	160	270	195	230
DSR	225	160	270	195	230

Prema dobivenim rezultatima najveću obradljivost ima uzorak M3 s dodatkom metakaolina i letećeg pepela.

Uzorci M1 sa silikatnom prašinom i letećim pepelom, M3 i M8 s dodatkom metakaolina i letećeg pepela imaju promjer veći od 200 mm te spadaju u kategoriju tekuće konzistencije. Vidljivo je da sva tri uzorka koja spadaju u kategoriju tekuće konzistencije sadrže leteći pepeo.

Uzorci M2 sa silikatnom prašinom i kamenim brašnom te uzorak M4 sa metakaolinom i kamenim brašnom spadaju u plastično-elastičnu kategoriju sa promjerima između 140-200 mm.



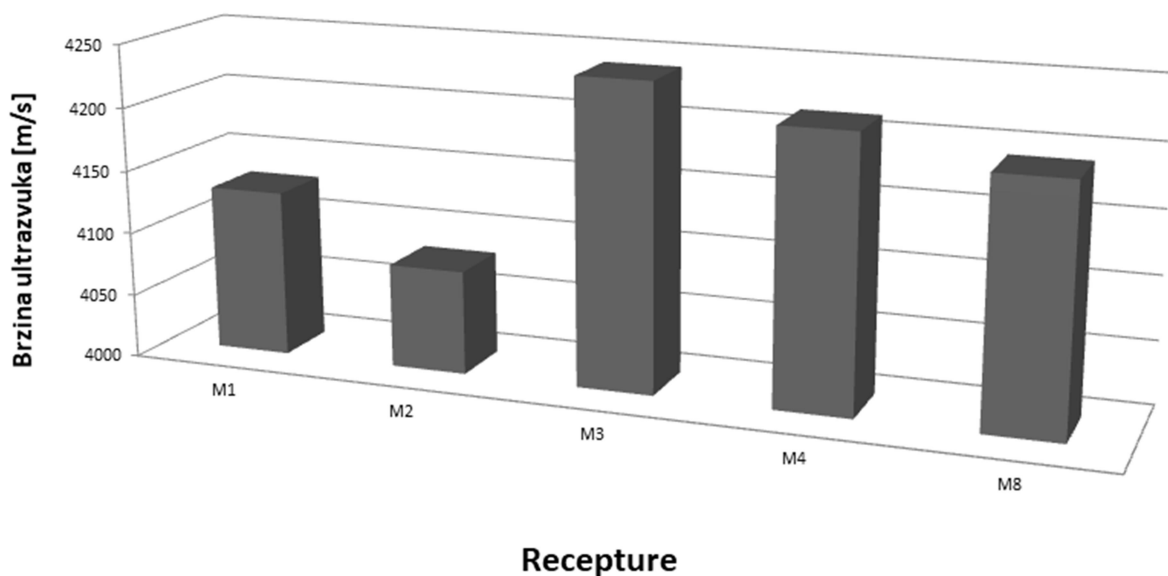
Slika 30. Rezultati ispitivanja obradivosti

6.2. Rezultati ultrazvučnog ispitivanja

Uzorci UHPC betona dimenzija 40 x 40 x 160 mm te uzorak betona u obliku kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm nakon 28 dana od izrade mješavine su ispitani te su u Tablici 13 prikazani rezultati ultrazvučnog ispitivanja. Prema prikazanim rezultatima može se zaključiti da veću brzinu ultrazvuka imaju uzorci sa dodatkom metakaolina. Najveću brzinu ultrazvuka ima uzorak M3 sa aktivnim mineralnim dodacima metakaolinom i letećim pepelom. Najmanju srednju brzinu ultrazvuka ima uzorak M2, odnosno mješavina sa silikatnom prašinom i kamenim brašnom. Leteći pepeo i metakaolin imaju izrazito sitne čestice koje su sitnije od čestica silikatne prašine te zbog smanjenog volumena zraka smanjuju potrebu za vodom te tako UHPC beton čine gušćim. Samim time bi trebali i smanjivati i brzinu ultrazvuka, no prema ovim rezultatima u uzorcima UHPC betona ultravisokih performansa čine suprotno.

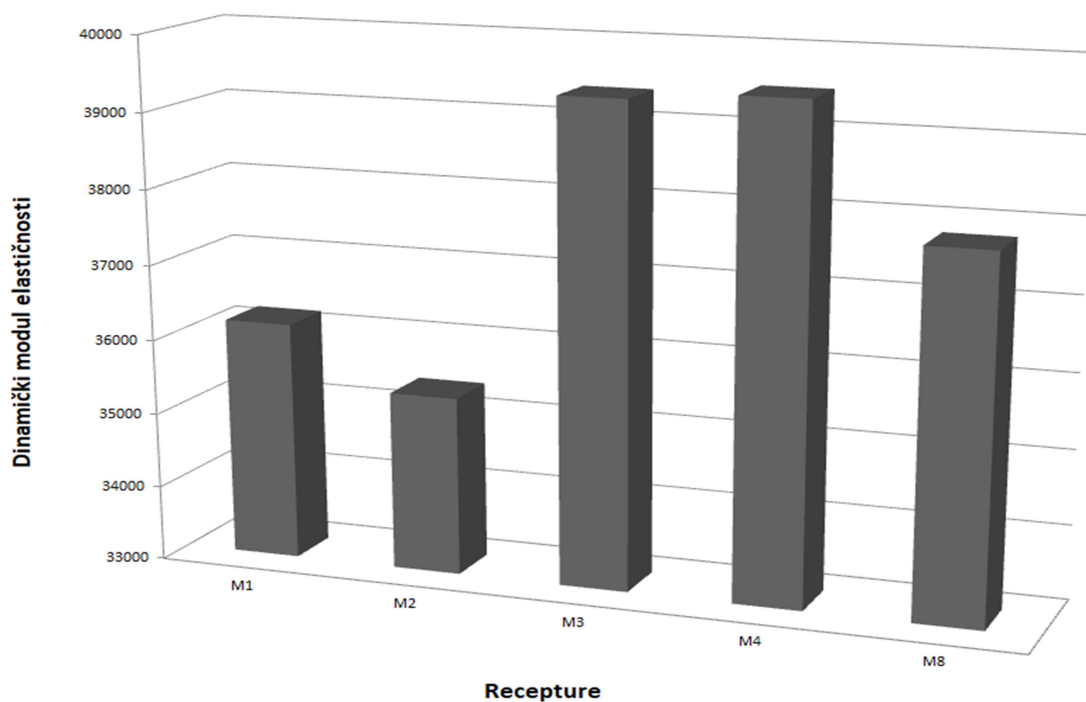
Tabela 13. Rezultati dobiveni metodom ultrazvuka

Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	Vrijeme ultrazvuka (μ s)	Brzina ultrazvuka (m/s)	Dinamički modul elastičnosti	Kvaliteta
M1	27.02.	27.03.	28	38,7	4134,37	36305,56	Vrlo kvalitetan
M1	27.02.	27.03.	28	38,8	4123,71	35965,54	
M1	27.02.	27.03.	28	38,7	4134,37	36305,56	
Srednja vrijednost				38,73	4130,82	36192,22	
M2	27.02.	27.03.	28	38,2	4081,63	35235,27	Vrlo kvalitetan
M2	27.02.	27.03.	28	38,3	4071,25	35354,64	
M2	27.02.	27.03.	28	39,1	4092,07	35566,46	
Srednja vrijednost				39,2	4081,65	35385,46	
M3	28.02.	28.03.	28	37,7	4244,03	35385,464	Vrlo kvalitetan
M3	28.02.	28.03.	28	37,8	4232,8	39553,89	
M3	28.02.	28.03.	28	37,7	4244,03	39391,78	
Srednja vrijednost				37,7	4240,29	39229,68	
M4	28.02.	28.03.	28	38,1	4199,47	39391,78	Vrlo kvalitetan
M4	28.02.	28.03.	28	38	4210,53	38410,22	
M4	28.02.	28.03.	28	37,8	4232,8	38772,37	
Srednja vrijednost				37,97	4214,27	39506,05	
M8	08.04.	08.05.	28	37,9	4221	38896,22	Vrlo kvalitetan
M8	08.04.	08.05.	28	38,6	4145	38805,08	
M8	08.04.	08.05.	28	38	4210	36337,87	
Srednja vrijednost				38,17	4192	38284,06	



Slika 31. Grafički prikaz rezultata dobiveni brzinom ultrazvuka

Iz brzine ultrazvuka dobiven je dinamički modul elastičnosti koji je najveći kod uzorka M4 sa metakaolinom i kamenim brašnom. Mješavina M2 ima najmanji dinamički modul elastičnosti.



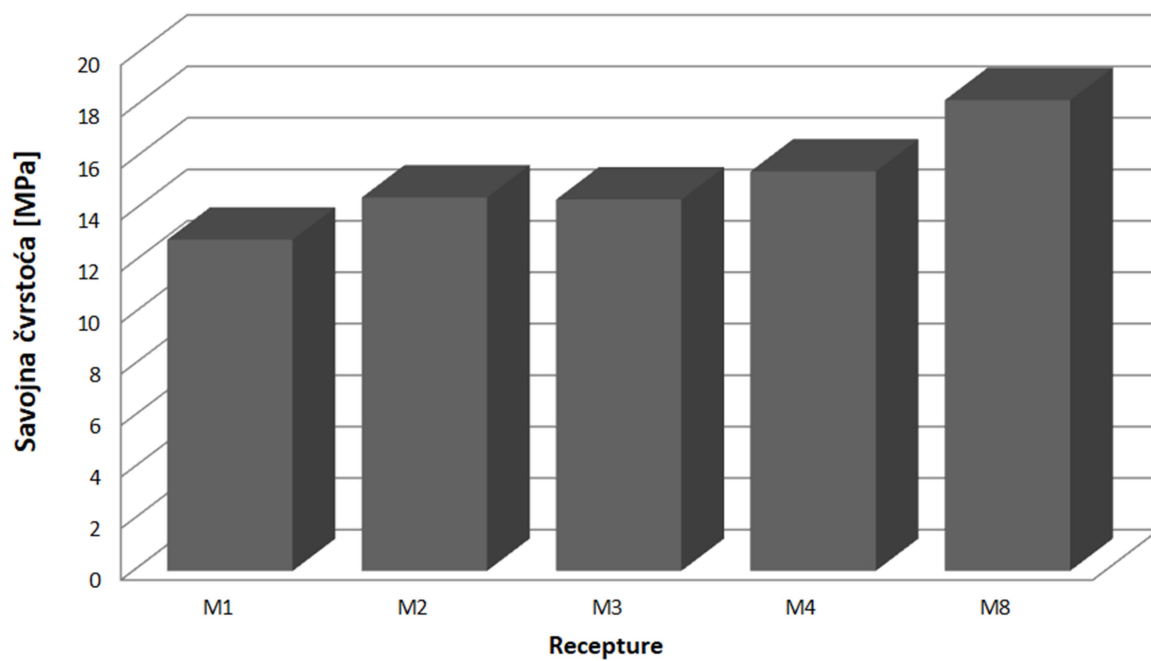
Slika 32. Grafički prikaz rezultata dinamičnog modula elastičnosti

6.3. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće

Ispitana je savojna čvrstoća prizmi UHPC betona kao prostih greda raspona L te uzorak betona u obliku kocke koji su se postepeno opterećivali do loma. Prema danim rezultatima u Tablici 14 vidljivo je da najveću savojnu čvrstoću ima uzorak M8 oblika kocke sa metakaolinom i letećim pepelom. Uzorak M4 u obliku prizme sa najvećom savojnom čvrstoćom je mješavina sa metakaolinom i kamenim brašnom.

Tabela 14. Prikaz savojnih čvrstoća ispitnih uzoraka

Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	Masa (g)	Gustoća betona (kg/m ³)	ft(MPa)
M1	27.02.	27.03.	28	604,9	2,36	12,86
M1	27.02.	27.03.	28	602,00	2,35	12,46
M1	27.02.	27.03.	28	603,4	2,36	13,3
Srednja vrijednost						12,87
M2	27.02.	27.03.	28	602,1	2,35	15,81
M2	27.02.	27.03.	28	606	2,37	15,01
M2	27.02.	27.03.	28	603,5	2,36	12,72
Srednja vrijednost						14,51
M3	28.02.	28.03.	28	624,7	2,44	13,3
M3	28.02.	28.03.	28	621,4	2,43	14,59
M3	28.02.	28.03.	28	620,3	2,42	15,41
Srednja vrijednost						14,43
M4	28.02.	28.03.	28	619,3	2,42	16,86
M4	28.02.	28.03.	28	622,8	2,43	15,41
M4	28.02.	28.03.	28	627,4	2,45	14,29
Srednja vrijednost						15,52
M8	08.04.	08.05.	28	618	2,42	18,06
M8	08.04.	08.05.	28	602,6	2,35	18,39
M8	08.04.	08.05.	28	615,3	2,4	18,41
Srednja vrijednost						18,29



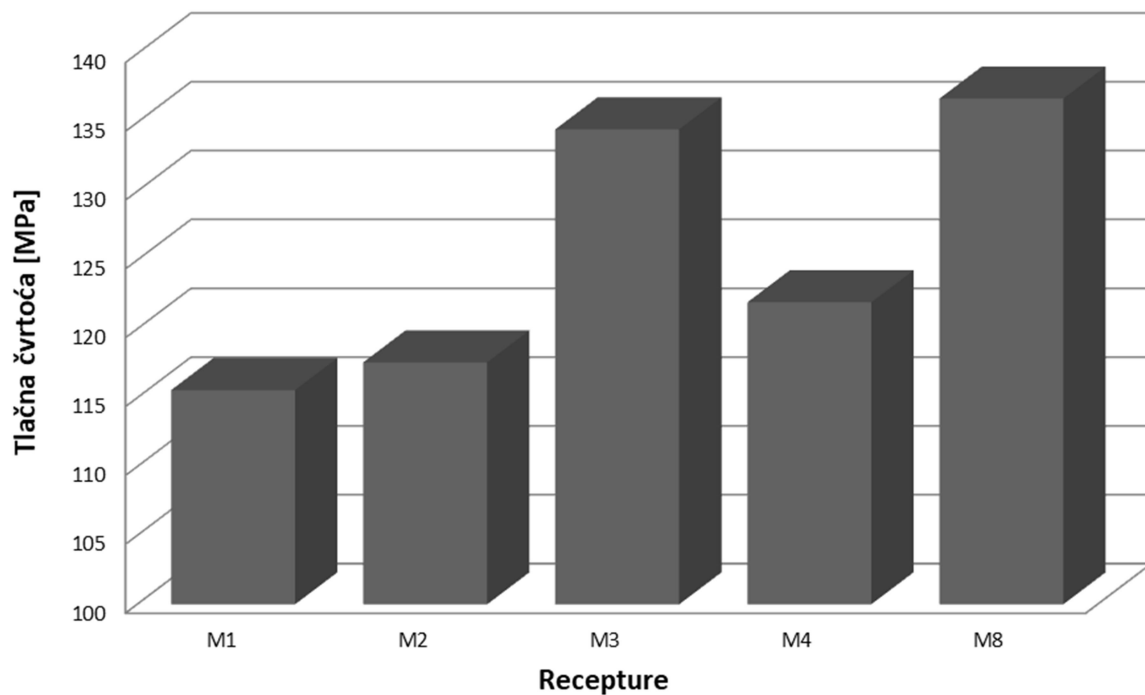
Slika 33. Grafički prikaz savojnih čvrstoća

6.4. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

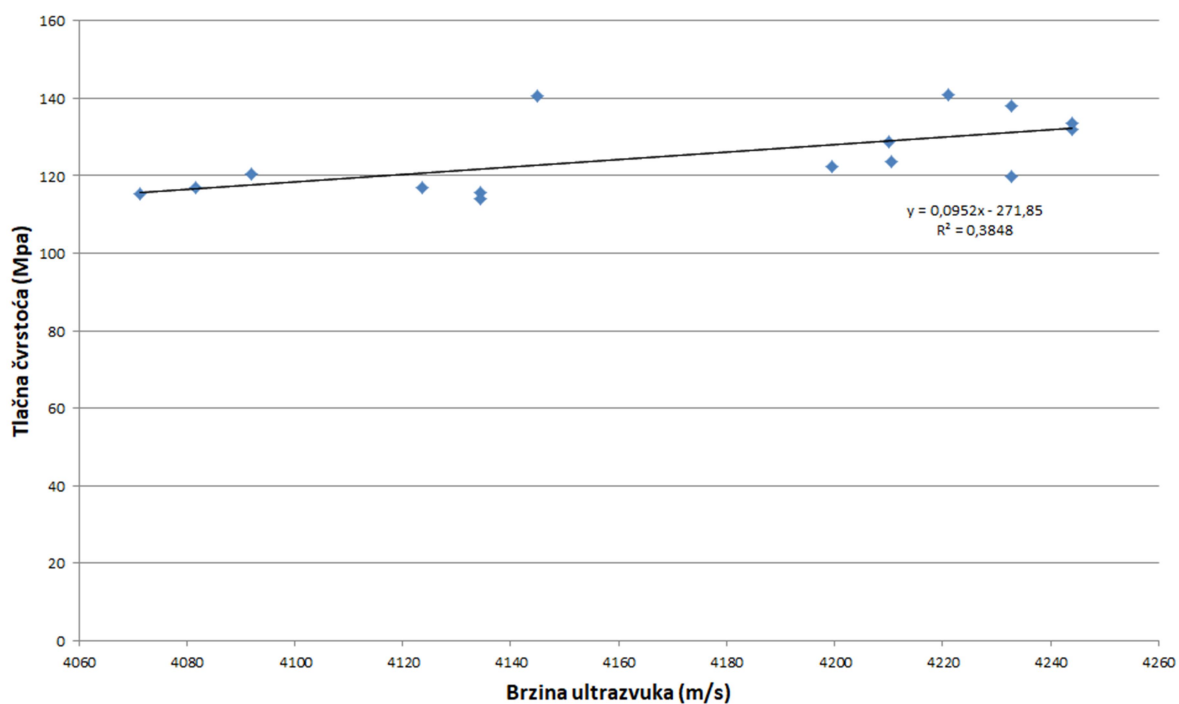
Nakon ispitivanja savojne čvrstoće, na polovicama prizmi, ispitana je čvrstoća na pritisak tj. tlačna čvrstoća. U Tablici 15 vidljivo je kako najveću tlačnu čvrstoću ima uzorak M8 u obliku kocke sa metakaolnim i letećim pepelom, isto kao i savojnu čvrstoću. Od uzorka u obliku prizmi najveću tlačnu čvrstoću ima uzorak M3 sa metakaolinom i letećim pepelom. Pokazalo se da upravo ova kombinacija mineralnih dodatka, odnosno metakaolina sa većom finoćom mliva i letećeg pepela sa manjom finoćom mliva, postiže najbolje čvrstoće uzorka. Uzorci sa silikatnom prašinom postizali su nešto lošije rezultate.

Tabela 15. Prikaz tlačnih čvrstoća ispitnih uzoraka

Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	Masa (g)	Gustoća betona (kg/m ³)	fc (MPa)	fc (MPa)	fc sr. (MPa)
M1	27.02.	27.03.	28	604,9	2,36	119,17	112,23	115,7
M1	27.02.	27.03.	28	602,00	2,35	114,76	119,00	116,88
M1	27.02.	27.03.	28	603,4	2,36	110,54	117,74	114,14
Srednja vrijednost						115,57		
M2	27.02.	27.03.	28	602,1	2,35	118,51	115,08	116,8
M2	27.02.	27.03.	28	606	2,37	113,79	117,04	115,42
M2	27.02.	27.03.	28	603,5	2,36	120,18	120,85	120,52
Srednja vrijednost						117,58		
M3	28.02.	28.03.	28	624,7	2,44	132,03	132,00	132,02
M3	28.02.	28.03.	28	621,4	2,43	137,92	138,11	138,02
M3	28.02.	28.03.	28	620,3	2,42	130,28	136,71	133,5
Srednja vrijednost						134,51		
M4	28.02.	28.03.	28	619,3	2,42	126,48	118,19	122,34
M4	28.02.	28.03.	28	622,8	2,43	127,8	119,54	123,67
M4	28.02.	28.03.	28	627,4	2,45	117,27	122,35	119,81
Srednja vrijednost						121,94		
M8	08.04.	08.05.	28	618	2,42	140,6	140,95	140,78
M8	08.04.	08.05.	28	602,6	2,35	140,21	140,99	140,6
M8	08.04.	08.05.	28	615,3	2,4	125,78	131,9	128,84
Srednja vrijednost						136,74		



Slika 34. Grafički prikaz tlačnih čvrstoća



Slika 35. Grafički prikaz ovisnosti brzine ultrazvuka o tlačnoj čvrstoći

Prikazana je ovisnost brzine ultrazvuka o tlačnoj čvrstoći uzorka te je dobiven indeks korelacije u iznosu od 0,3848.

7. ZAKLJUČAK

Najveća prednost betona ultravisokih performansa je visoka čvrstoća koja u kombinaciji s visokom žilavošću nudi mogućnost projektiranja lakih konstrukcija s odgovarajućom krutošću što može dovesti do tanjih poprečnih presjeka ili do većih raspona. Također, u budućnosti će biti neophodan popravak i nadogradnja te povećanje kapaciteta postojećih konstrukcija, gdje će se kao ojačanje, beton ultravisokih performansi pokazati kao logičan materijal.

Ovim radom razmatran je utjecaj mineralnih dodataka na fizikalno - mehanička svojstva betona visokih uporabnih svojstava. Na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu u laboratoriju su projektirani sastavi mješavina betona visokih performansi s varijacijom količine i tipa mineralnih dodataka sa većom finoćom mliva, odnosno metakaolina i silikatne prašine sa dodatcima manje finoće mliva, odnosno kamenim brašnom i letećim pepelom. Provedena su ispitivanja u svježem i očvrslom stanju, gdje je u svježem stanju ispitana konzistencija UHPC betona, a u očvrslom je određena brzina ultrazvuka te ispitana tlačna i savojna čvrstoća.

Rezultati pokazuju da mineralni dodaci unaprjeđuju svojstva betona visokih uporabnih svojstava u svježem i očvrslom stanju. Prema dobivenim rezultatima u svježem stanju uzoraka, najveću obradljivost ima uzorak s dodatkom metakaolina i letećeg pepela. Svi uzorci koji sadržavaju leteći pepeo spadaju u kategoriju tekuće konzistencije, dok uzorci sa kamenim brašnom spadaju u plastično-elastičnu kategoriju.

Ispitivanjem brzine ultrazvuka utvrđeno je da uzorci sa dodatkom metakaolina imaju veću brzinu ultrazvuka. Najveću brzinu ultrazvuka ima uzorak sa mineralnim dodatcima metakaolinom i letećim pepelom. Najmanju srednju brzinu ultrazvuka ima mješavina sa silikatnom prašinom i kamenim brašnom. Rezultati su iznenađujući s obzirom da leteći pepeo i metakaolin imaju izrazito sitne čestice koje UHPC beton čine gušćim te obično smanjuju brzinu ultrazvuka.

Ispitivanja tlačne i savojne čvrstoće uzoraka pokazalo je da kombinacija metakaolina i letećeg pepela najviše doprinose čvrstoći uzoraka. Prema svim rezultatima, kombinacija metakaolina i letećeg pepela je postigla najbolji efekt. Projektiranje te izrada mješavina rezultirala je pozitivnim ishodom te je postignut beton visokih performansi sa srednjom vrijednosti tlačne čvrstoće od 136,74 MPa.

Gusta matrica betona koja se postiže upotrebom velikih količina vrlo finih mineralnih dodataka, kao što su silikatna prašina i metakaolin rezultira vrlo visokim čvrstoćama i trajnosti u betonu visokih i ultravisokih performansi.

S obzirom da proizvodnja betona ultravisokih performansi zahtjeva veliku količinu cementa, upotrebom mineralnih dodataka smanjuje se njegova potrebna količina, a samim time i upotreba štetnog klinkera koji se upotrebljava za distribuciju cementa.

8. LITERATURA

- [1] Schmidt M., Fehling E., Geisenhanslüke C.: Ultra High Performance Concrete (UHPC), Die Detusche Bibliothek, Kassel, Germany, (2004)
- [2] Aïtcin P.C.: High-Performance Concrete, E & FN Spon, Québec, Canada, (1998)
- [3] <https://www.costar.com/article/587412639/chicagos-water-tower-place-often-called-the-worlds-original-vertical-mall-could-slash-retail-space-in-major-redevelopment> (pristupljeno 17.travnja 2023.)
- [4] <https://largeprojects.schindler.com/en/reference-projects/vertical-inspiration/scotia-plaza.html> (pristupljeno 17.travnja 2023.)
- [5] Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, Publication No. FHWA-HRT-13-060, Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center, Georgetown, (2013)
- [6] <https://tempodacqua.com/il-ponte-di-seonyudo-the-footbrigde-of-peace/> (pristupljeno 18.travnja 2023.)
- [7] <https://hrvatski-vojniki.hr/vukovarski-vodotoranj-simbol-obrane-hrabrosti-i-zajednistva/617-vodotoranj-1/> (pristupljeno 18.travnja 2023.)
- [8] <https://www.ductal.com/en/fondation-louis-vuitton> (pristupljeno 18.travnja 2023.)
- [9] Azmee N. M., Shafiq N.: Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications, , Universiti Teknologi PETRONAS, Perak, Malaysia, (2018)
- [10] Bjegović D., Štirmer N.: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, (2015)
- [11] <https://microsilica-fume.com/wp-content/uploads/2017/12/94-silica-fume-01.jpg> (pristupljeno 24.travnja 2023.)
- [12] <https://hr.delachieve.com/leteci-pepeo-opis-sastav-gost-ocjene-i-posebnu-primjenu/> (pristupljeno 24.travnja 2023.)
- [13] <https://www.australianmining.com.au/curtin-cements-research-into-high-reactivity-metakaolin/> (pristupljeno 24.travnja 2023.)

- [14] Krstulović, P, Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu: Institut građevinarstva Hrvatske, (2000)
- [15] Muravljov M.: Građevinski materijali, Građevinski fakultet, Beograd (1995)
- [16] Ukrainczyk V.: Beton, Struktura, Svojstva, Tehnologija, ALCOR, Zagreb, (1994)
- [17] Bjegović, D.; Serdar, M.; Stipanović Oslaković, I.: Assessment of concrete properties in structures, Handbook of concrete durability, Middleton Publishing Inc., Korea, (2010)
- [18]https://hr.swewe.net/word_show.htm/?79164_1&Zgura_visoke_pe%C4%87i
(pristupljeno 28. lipnja 2023.)
- [19] <https://astrachemicals.com/product/silica-sand-brown/> (pristupljeno 28. lipnja 2023.)

9. POPIS SLIKA

Slika 1. Water Tower Place, Chicago.....	4
Slika 2. Scotia Plaza, Toronto.....	4
Slika 3. The Peace Bridge in Seoul, South Korea.....	5
Slika 4. The Fondation Louis Vuitton.....	6
Slika 5. Vodotoranj Vukovar	6
Slika 6. Silikatna prašina.....	13
Slika 7. Leteći pepeo.....	15
Slika 8. Metakaolin	16
Slika 9. Popunjavanje strukture betona česticama punila.....	17
Slika 10. Granulirana zgura visoke peći	18
Slika 11. Mljeveni kvarcni pijesak.....	19
Slika 12. Shematski prikaz djelovanja Van der Waalsovih sila među česticama na zraku	20
Slika 13. Shematski prikaz djelovanja adsorpcijskog sloja	21
Slika 14. Shematski prikaz djelovanja kapilarnih sila	21
Slika 15. Shematski prikaz rezultat djelovanja električnih sila	22
Slika 16. Uređaj za prosijavanje agregata.....	27
Slika 17. Grafički prikaz granulometrijskog sastava	28
Slika 18. Grafički prikaz granulometrijskog sastava	29
Slika 19. Mjerenje materijala.....	36

Slika 20. Laboratorijska miješalica za mort.....	37
Slika 21. Laboratorijska miješalica za beton.....	37
Slika 22. Vibro stol	38
Slika 23. Svježi UHPC beton u kalupima na vibro stolu.....	38
Slika 24. Ispitivanje konzistencije morta	40
Slika 25. Ispitivanje brzine ultrazvuka.....	41
Slika 26. Vaganje uzorka	42
Slika 27. Ispitivanje savojne čvrstoće UHPC betona.....	43
Slika 28. Ispitivanje tlačne čvrstoće UHPC betona	44
Slika 29. Ispitivanje obradljivosti uzoraka.....	45
Slika 30. Rezultati ispitivanja obradivosti	46
Slika 31. Grafički prikaz rezultata dobiveni brzinom ultrazvuka.....	48
Slika 32. Grafički prikaz rezultata dinamičnog modula elastičnosti	48
Slika 33. Grafički prikaz savojnih čvrstoća	50
Slika 34. Grafički prikaz tlačnih čvrstoća.....	52
Slika 35. Grafički prikaz ovisnosti brzine ultrazvuka o tlačnoj čvrstoći	52

10. POPIS TABLICA

Tabela 1. Kompozicije komercijalnih UHPC	9
Tabela 2. Tipična svojstva 42,5 N CEM I 42,5 R.....	25
Tabela 3. Tipičan sastav 42,5 N CEM I 42,5 R	25
Tabela 4. Gradacija mjerena prosijavanjem u skladu je sa zahtjevima EN 196-1 i ISO 679: 2009.....	28
Tabela 5. Rezultati prosijavanja kvarcnog pijeska 0,3 – 1,0 mm	29
Tabela 6. Tehničke informacije o MasterGlenium ACE 770	31
Tabela 7. Fizikalne karakteristike metakaolina	31
Tabela 8. Tehničke specifikacije MEYCO® MS 610	33
Tabela 9. Fizičke karakteristike Microsit® M10.....	33
Tabela 10. Recepture mješavina	35
Tabela 11. Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala [17].....	43
Tabela 12. Rezultati ispitivanja obradivosti.....	46
Tabela 13. Rezultati dobiveni metodom ultrazvuka	47

Tabela 14. Prikaz savojnih čvrstoća ispitnih uzoraka.....49

Tabela 15. Prikaz tlačnih čvrstoća ispitnih uzoraka.....51

11. PRILOZI

Naziv:	M1	Datum:	27.2.2023
Projekt:	diplomski rad		

Proračun sastava za 1m³

Sastav	Opis	faktor	Masa	Gustoća	Volumen
VEZIVO					
Cement	CEM I 42.5 R		800	3,10	258,1
Mineralni dodatak	Silikatna prašina	0,25	200	2,30	87,0
Inertni dodatak	Leteći pepeo M10	0,25	200	2,54	78,7
VODA					
w/c		0,2	160	1,00	160,0
ADITIV					
Superplastifikator	ACE 770	4	48	1,05	45,7
AGREGAT					
Pijesak	kvarcni 0-2mm		1000,4	2,70	370,5
UKUPNO			2408,416		1000

Laboratorijska mješavina		Vol =	1	litara
Sastav	Masa (g)			
Cement	800			
Mineralni dodatak	200			
Inertni dodatak	200			
Voda	160			
Superplastifikator	48			
Pijesak	1000,4			

Naziv:	M2	Datum:	27.2.2023
Projekt:	diplomski rad		

Proračun sastava za 1m³

Sastav	Opis	faktor	Masa	Gustoća	Volumen
VEZIVO					
Cement	CEM I 42.5 R		800	3,10	258,1
Mineralni dodatak	Silikatna prašina	0,25	200	2,30	87,0
Inertni dodatak	Kameno brašno	0,25	200	2,70	74,1
VODA					
w/c		0,2	160	1,00	160,0
ADITIV					
Superplastifikator	ACE 770	4	48	1,05	45,7
AGREGAT					
Pijesak	kvarcni 0-2mm		1013,0	2,70	375,2
UKUPNO			2421,015		1000

Laboratorijska mješavina Vol = 1 litara

Sastav	Masa (g)
Cement	800
Mineralni dodatak	200
Inertni dodatak	200
Voda	160
Superplastifikator	48
Pijesak	1013,0

Naziv:	M3	Datum:	28.2.2023
Projekt:	diplomski rad		

Proračun sastava za 1m³

Sastav	Opis	faktor	Masa	Gustoća	Volumen
VEZIVO					
Cement	CEM I 42.5 R		800	3,10	258,1
Mineralni dodatak	Metakaolin N	0,25	200	2,60	76,9
Inertni dodatak	Leteći pepeo M10	0,25	200	2,54	78,7
VODA					
w/c		0,2	160	1,00	160,0
ADITIV					
Superplastifikator	ACE 770	4	48	1,05	45,7
AGREGAT					
Pijesak	kvarcni 0-2mm		1027,5	2,70	380,6
UKUPNO			2435,507		1000

Laboratorijska mješavina		Vol =	1	litara
Sastav	Masa (g)			
Cement	800			
Mineralni dodatak	200			
Inertni dodatak	200			
Voda	160			
Superplastifikator	48			
Pijesak	1027,5			

Naziv:	M4			Datum:	28.2.2023
Projekt:	diplomski rad				

Proračun sastava za 1m³

Sastav	Opis	faktor	Masa	Gustoća	Volumen
VEZIVO					
Cement	CEM I 42.5 R		800	3,10	258,1
Mineralni dodatak	Metakaolin N	0,25	200	2,60	76,9
Inertni dodatak	Kameno brašno	0,25	200	2,70	74,1
VODA					
w/c		0,2	160	1,00	160,0
ADITIV					
Superplastifikator	ACE 770	4	48	1,05	45,7
AGREGAT					
Pijesak	kvarcni 0-2mm		1040,1	2,70	385,2
UKUPNO			2448,105		1000

Laboratorijska mješavina

Vol = 1 litara

Sastav	Masa (g)
Cement	800
Mineralni dodatak	200
Inertni dodatak	200
Voda	160
Superplastifikator	48
Pijesak	1040,1

Naziv:	M8		Datum:	8.5.2023
Projekt:	diplomski rad			

Proračun sastava za 1m³

Sastav	Opis	faktor	Masa	Gustoća	Volumen
VEZIVO					
Cement	CEM I 42.5 R		800	3,10	258,1
Mineralni dodatak	Metakaolin N	0,25	200	2,60	76,9
Inertni dodatak	Leteći pepeo M10	0,25	200	2,54	78,7
VODA					
w/c		0,2	160	1,00	160,0
ADITIV					
Superplastifikator	ACE 770	4	48	1,05	45,7
AGREGAT					
Pijesak	kvarcni 0.3-1 mm		1027,5	2,70	380,6
UKUPNO			2435,507		1000

Laboratorijska mješavina Vol = 12 litara

Sastav	Masa (g)
Cement	9600
Mineralni dodatak	2400
Inertni dodatak	2400
Voda	1920
Superplastifikator	576
Pijesak	12330,1