

# Utjecaj vrste agregata i metode miješanja na svojstva betona visokih performansi

---

Grbavac, Slavko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*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:123:421099>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-24**



*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Slavko Grbavac**

**Split, 2024.**

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

**Slavko Grbavac**

**Utjecaj vrste agregata i metode miješanja na svojstva  
betona visokih performansi**

**Diplomski rad**

**Split, 2024.**

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

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Slavko Grbavac

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083219608

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali 2

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Utjecaj vrste agregata i metode miješanja na svojstva betona visokih performansi

Opis zadatka: Zadatak diplomskog rada je istražiti utjecaj tipa agregata i metode proizvodnje 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 vrste agregata i načina mješanja na njihova svojstva. Projektirati sastave mješavina betona visokih performansi s varijacijom vrste agregata (kvarcni, eruptivni i vapnevac). 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

Predsjednik Povjerenstva za završne i  
diplomske ispite studija Građevinarstvo:  
izv. prof. dr. sc. Ivan Balić

Komentor:  
izv.prof.dr.sc. Nikola Grgić



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,

ARCHITECTURE AND GEODESY

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

kojom ja, Slavko Grbavac, JMBAG: 0083219608, student Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, kao autor ovog diplomskog rada izjavljujem da sam ga izradio samostalno pod mentorstvom prof.doc. dr. sc. Goran Baloević / komentorstvom prof. dr. sc. Nikola Grgić.

U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju rada. Tuđe spoznaje, zaključke, teorije, formulacije i grafičke prikaze koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u radu citirao sam i povezo s korištenim bibliografskim jedinicama.

---

(vlastoručni potpis studenta)

## **Zahvala**

*Ovom prilikom zahvaljujem prije svega svojim roditeljima na podršci, strpljenu i razumjevanju kojeg su mi pružali tokom cjelokupnog trajanja studija, bratu koji mi je svojim radom, savjetima i trudom bio veliki oslonac . Zahvaljujem svim kolegama koji su bili uz mene kad mi je bila potrebna pomoć i savjetovanje kroz naše školovanje. Posebno zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Goranu Baloeviću na pomoći kod izrade i provođenja istraživačkih ispitivanja betonskih uzoraka za potrebe izrade ovog rada.*

# **Utjecaj vrste agregata i metode mješanja na svojstva betona visokih performansi**

## ***Sažetak:***

Beton ultra visokih performansi je nova generacija betona s visokom tlačnom čvrstoćom i trajnosti. Smjesa je to cementa i mineralnih dodataka s niskim vodocementnim faktorom i kvalitetnim agregatom. Postižu se tlačne čvrstoće čak do 200 Mpa. Velike količine potrebnog cementa reduciraju se s dodacima kao što su silikatna prašina, metakaolin i leteći pepeo koji u kombinaciji s kvarcnim, eruptivnim i vapnenačkim agregatom daju najbolja svojstva. U ovom radu istražen je utjecaj tipa agregata i načina miješanja na svojstva UHPC betona u svježem i očvrslom stanju. Svi rezultati su prikazani tablično i grafički, te su dani najvažniji zaključci istraživanja.

## ***Cljučne riječi:***

Beton ultravisokih performansi, mineralni dodaci, agregat, leteći pepeo, metakaolin

## **The influence of aggregate type and mixing methods on the properties of concrete with high performance properties**

## ***Abstract:***

Ultra-high performance concrete is a new generation of concrete with high compressive strength and durability. It is a mixture of cement and mineral additives with a low water-cement factor and quality aggregate. Compressive strengths of up to 200 Mpa are achieved. The large amounts of cement required are reduced with additives such as silicate dust, metakaolin and fly ash which, in combination with quartz, eruptive and limestone aggregate provide the best properties. In this paper, the influence of aggregate type and mixing method on the properties of UHPC concrete in fresh and hardened state was investigated, and most important research conclusions are given.

## ***Keywords:***

Ultra-high performance concrete, mineral additives, aggregate, fly ash, metakaolin

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. BETON VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA (UHPC).....	3
2.1. Definicija i karakteristike UHPC-a .....	3
2.2. Povijesni razvoj i primjena UHPC-a.....	5
2.3. Prednosti i izazovi u primjeni UHPC-a.....	8
3. MINERALNI DODATCI U BETONU .....	12
3.1. Vrste mineralnih dodataka.....	12
3.1.1. Silikatna prašina .....	12
3.1.2. Leteći pepeo .....	13
3.1.3. Metakaolin.....	15
3.1.4. Granulirana zgura visokih peći .....	15
3.2. Kriteriji za odabir mineralnih dodataka .....	17
4. SVOJSTVA UHPC BETONA .....	19
4.1. Fizikalno-mehanička svojstva .....	19
4.1.1. Tlačna čvrstoća.....	19
4.1.2. Savojna čvrstoća.....	19
4.1.3. Modul elastičnosti .....	20
4.2. Reološka svojstva svježeg betona .....	20
4.2.1. Obradljivost.....	20
4.2.2. Konzistencija.....	21
4.2.3. Održavanje .....	21
4.3. Trajnost i otpornost betona.....	21
4.3.1. Otpornost na kemijske utjecaje .....	21
4.3.2. Otpornost na mraz i odmrzavanje .....	22



4.3.3.	Otpornost na abraziju .....	22
5.	VRSTE AGREGATA U BETONU .....	23
5.1.	Klasifikacija agregata .....	23
5.2.	Fizičke i kemijske karakteristike agregata .....	25
6.	UTJECAJ VRSTE AGREGATA NA SVOJSTVA UHPC-A .....	27
6.1.	Fizikalno-mehanička svojstva .....	27
6.2.	Reološka svojstva svježeg betona .....	27
6.3.	Trajnost i otpornost betona.....	28
7.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	29
7.1.	Plan i program ispitivanja .....	29
7.2.	Korišteni materijali.....	29
7.3.	Recepture i postupak miješanja.....	39
7.4.	Metode ispitivanja .....	43
7.4.1.	Ispitivanje konzistencije morta.....	43
7.4.2.	Ultrazvučno ispitivanje .....	44
7.4.3.	Savojna i tlačna čvrstoća prema EN 196-1 .....	46
8.	REZULTATI I RASPRAVA .....	48
8.1.	Analiza rezultata ispitivanja .....	48
8.1.1.	Rezultati ispitivanja obradljivosti.....	48
8.1.2.	Rezultati ultrazvučnog ispitivanja.....	49
8.1.3.	Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće .....	52
8.1.4.	Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće .....	53
9.	ZAKLJUČAK .....	56
	LITERATURA.....	58
10.	POPIS SLIKA .....	60
11.	POPIS TABLICA.....	61
12.	PRILOZI.....	62

# 1. UVOD

Beton je ključni građevinski materijal koji se široko koristi u različitim vrstama konstrukcija, od stambenih zgrada do velikih infrastrukturnih projekata poput mostova i tunela. Njegova popularnost proizlazi iz kombinacije nekoliko ključnih svojstava: visoke tlačne čvrstoće, dugovječnosti, prilagodljivosti u oblikovanju i relativno niske cijene. Međutim, s porastom zahtjeva za naprednim građevinskim materijalima, razvijen je beton visokih uporabnih svojstava (UHPC), koji nudi poboljšana svojstva u usporedbi s tradicionalnim betonima. UHPC se ističe svojom iznimnom tlačnom čvrstoćom, niskom poroznošću i visokom otpornošću na agresivne utjecaje okoliša. (Aitcin, 1998; Fehling i sur., 2014).

Cilj ovog rada je istražiti utjecaj različitih vrsta agregata na svojstva UHPC-a te opisati kako pojedine vrste agregata svojim udjelom u strukturi betonske mješavine mijenjaju karakteristike betona,

Ovaj rad organiziran je kroz šest glavnih poglavlja. Prvo poglavlje predstavlja uvod u temu rada, gdje se definiraju predmet istraživanja i ciljevi te se daje kratak pregled metodologije i strukture rada. U uvodu se također raspravlja o važnosti betona visokih uporabnih svojstava i ulozi mineralnih dodataka u poboljšanju njegovih svojstava.

Drugo poglavlje posvećeno je detaljnom opisu betona visokih uporabnih svojstava (UHPC). U ovom poglavlju bit će objašnjene definicija i karakteristike UHPC-a, njegov povijesni razvoj te prednosti i izazovi u primjeni ovog naprednog materijala. Poseban naglasak bit će stavljen na usporednu analizu UHPC-a i tradicionalnih betona.

Treće poglavlje razmatra vrste mineralnih dodataka koji se koriste u betonu. U ovom dijelu rada, detaljno će biti opisani najvažniji mineralni dodaci kao što su silikatna prašina, leteći pepeo i metakaolin. Analizirat će se njihova kemijska i fizikalna svojstva, kao i način na koji utječu na svojstva betona, s posebnim naglaskom na njihove pucolanske reakcije i doprinos smanjenju poroznosti i povećanju trajnosti betona.

Četvrto poglavlje usmjereno je na analizu svojstava UHPC-a. Ovo poglavlje uključuje detaljnu raspravu o tome kako različiti mineralni dodaci utječu na fizikalno-mehanička svojstva betona, uključujući tlačnu i savojnu čvrstoću, modul elastičnosti, te reološka svojstva svježeg betona. Također će se analizirati trajnost betona i njegova otpornost na različite agresivne utjecaje, uključujući kemijske utjecaje, zamrzavanje i odmrzavanje, te abraziju.

Peto poglavlje razmatra vrste agregata koji se koriste u betonu. U ovom poglavlju napravljena je klasifikacija agregata prema njegovim najznačajnijim karakteristikama, veličini, podrijetlu i gustoći, opisane njihove fizikalno kemijske karakteristike.

Šesto poglavlje usmjereno je na analizu utjecaja agregata na svojstva UHPC-a. Ovo poglavlje daje objašnjenje kako različite vrste agregata utječu na fizikalno-mehanička i reološka svojstva betona, te kakav je njihov utjecaj na trajnost i otpornost betona.

Sedmo poglavlje predstavlja eksperimentalni dio rada, gdje će biti opisane sve korištene metode ispitivanja, korišteni materijali i postupci miješanja. Posebna pažnja bit će posvećena pripremi uzoraka i laboratorijskim metodama ispitivanja, uključujući tlačnu čvrstoću prema normama EN 196-1, ultrazvučno ispitivanje i ispitivanje savojne čvrstoće. Ovaj dio rada ključan je za razumijevanje kako su dobiveni rezultati i kako se oni mogu interpretirati.

Osmo poglavlje donosi analizu rezultata i raspravu, gdje će se prezentirati dobiveni rezultati ispitivanja. Rezultati će biti prikazani kroz grafove, tablice i opisne analize. Na kraju rada je zaključak.

## **2. BETON VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA (UHPC)**

Beton visokih uporabnih svojstava (UHPC) označava novu generaciju betona koja kombinira izuzetno visoku tlačnu čvrstoću, duktilnost i trajnost. Ovaj materijal predstavlja značajan napredak u građevinskoj industriji, omogućujući izgradnju struktura koje su istovremeno lakše, tanje, ali i puno izdržljivije od onih izgrađenih s tradicionalnim betonima. UHPC se sve više koristi u projektima s visokim inženjerskim zahtjevima, kao što su mostovi, zgrade visoke otpornosti na seizmičke aktivnosti, te specijalizirane infrastrukture poput reaktora i skladišta opasnih tvari.

### **2.1. Definicija i karakteristike UHPC-a**

Beton visokih uporabnih svojstava (UHPC) predstavlja izuzetno napredan građevinski materijal koji kombinira visoku tlačnu čvrstoću, izuzetnu trajnost, nisku poroznost i otpornost na mnoge agresivne okolišne uvjete. Ovaj materijal nadilazi tradicionalne betone i nalazi svoju primjenu u konstrukcijama koje zahtijevaju ekstremne performanse, poput mostova, visokih zgrada, industrijskih postrojenja i specijaliziranih infrastrukture.

Definicija UHPC-a temelji se na njegovoj sposobnosti da postiže tlačnu čvrstoću veću od 150 MPa, pri čemu neke formulacije prelaze 200 MPa, čime se svrstava u najjače betone koji se koriste u građevinarstvu (Aïtcin, 1998). Tlačna čvrstoća UHPC-a značajno ovisi o nizu faktora, uključujući vodo-cementni faktor, vrstu cementa, granulometriju agregata, kao i dodatak mineralnih aditiva poput silikatne prašine i letećeg pepela. Osim toga, UHPC često sadrži vlakna koja povećavaju njegovu duktilnost, omogućujući mu da se nosi sa savojnim opterećenjima bez pojave pukotina (Richard i Cheyreyzy, 1995).

Karakteristike UHPC-a se odlikuju nizom specifičnih svojstava koja ga čine izuzetno pogodnim za primjenu u zahtjevnim uvjetima. Njegova niska poroznost osigurava visoku otpornost na penetraciju vode i kemikalija, čime se drastično smanjuje rizik od oštećenja uslijed korozije armature ili kemijskog utjecaja na beton. Ovo svojstvo omogućuje dugotrajnu izdržljivost u agresivnim okolinama, poput obalnih područja, gdje su konstrukcije često izložene visokoj koncentraciji soli (Habel i sur., 2006).

Visoka duktilnost UHPC-a rezultat je dodatka vlakana, koja djeluju kao mostovi između mikropukotina, sprječavajući njihovo širenje i time povećavajući ukupnu nosivost i otpornost na savojna opterećenja. Ova svojstva omogućuju primjenu UHPC-a u konstrukcijama koje zahtijevaju visoku otpornost na seizmičke aktivnosti, kao i u tankim, laganim elementima s velikim rasponima (Wille, Naaman i El-Tawil, 2011).

Mikrostruktura UHPC-a je izrazito gusta, zahvaljujući optimiziranom rasporedu čestica u smjesi, što dodatno smanjuje rizik od pukotina i povećava ukupnu trajnost. Ova mikrostruktura postiže se korištenjem vrlo finih materijala i visokim stupnjem zbijenosti, što rezultira homogenim i kompaktnim betonom s minimalnim brojem praznina. Korištenje superplastifikatora omogućuje smanjenje vodo-cementni faktor bez gubitka obradljivosti smjese, što je ključno za postizanje optimalne mikrostrukture (Larrard i Sedran, 1994).

Osim toga, otpornost na požar UHPC-a je poboljšana u usporedbi s tradicionalnim betonom, zahvaljujući manjoj količini slobodne vode i prisutnosti mikrovlakana koja smanjuju rizik od eksplozivnog loma pri visokim temperaturama. Ovo svojstvo čini UHPC pogodnim za upotrebu u infrastrukturnim projektima gdje postoji povećan rizik od požara (Wille i sur., 2011).

UHPC predstavlja vrhunski građevinski materijal sa širokom primjenom u modernim, zahtjevnim projektima. Njegove karakteristike nadilaze one tradicionalnog betona, omogućujući projektantima i inženjerima da stvaraju konstrukcije koje su istovremeno lagane, izdržljive i dugotrajne. Unatoč izazovima vezanim uz njegovu proizvodnju i obradu, prednosti koje nudi UHPC ga čine neizostavnim u gradnji u agresivnim okolišima i na mjestima gdje su potrebne visoke performanse.

## 2.2. Povijesni razvoj i primjena UHPC-a

Povijesni razvoj betona visokih uporabnih svojstava (UHPC) započeo je sredinom 20. stoljeća, kao odgovor na rastuće zahtjeve za konstrukcijama koje mogu izdržati ekstremne uvjete i dugoročno pružati visoku razinu performansi. Prvi koraci u razvoju UHPC-a bili su usmjereni na poboljšanje postojećih betona kroz smanjenje vodo-cementnog faktora, povećanje udjela cementa i uvođenje superplastifikatora kako bi se omogućila bolja obradljivost i gustoća betona (Richard i Cheyrezy, 1995).

1960-e i 1970-e godine predstavljale su prekretnicu u razvoju visoko učinkovitih betona, kada su istraživači počeli eksperimentirati s dodacima poput silikatne prašine i letećeg pepela, što je dovelo do prvih formula koje su imale značajno veće tlačne čvrstoće u usporedbi s tradicionalnim betonom. Ovi napori kulminirali su u razvoju reaktivnih praškastih betona (RPC), što je bio preteča današnjeg UHPC-a (Aïtcin, 1998).

Tijekom 1980-ih i 1990-ih godina, napredak u tehnologiji materijala i metodama obrade omogućio je daljnji razvoj UHPC-a. U to vrijeme, istraživači su se usmjerili na optimizaciju granulometrijskog sastava i povećanje gustoće betonske matrice. Richard i Cheyrezy (1995) pionirski su radili na razvoju smjese koja je kombinirala niski vodo-cementni faktor, visoko reaktivne dodatke, te mikrovlakna za povećanje duktilnosti, što je rezultiralo betonom s tlačnom čvrstoćom iznad 200 MPa.

Prva komercijalna primjena UHPC-a dogodila se krajem 1990-ih kada je francuska kompanija Bouygues izgradila most „Sherbrooke“ koristeći UHPC pod nazivom Ductal, razvijen od strane Lafarge. Ovaj projekt označio je početak široke primjene UHPC-a u građevinarstvu, postavivši standarde za buduće projekte (Blais i Couture, 1999).



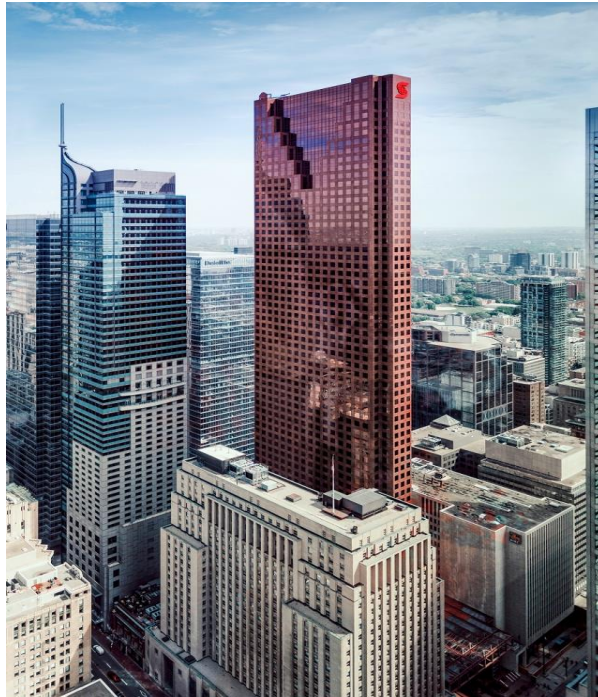
**Slika 1. Most Sherbrooka**

U novom mileniju, UHPC je našao primjenu diljem svijeta u brojnim infrastrukturnim projektima. Na primjer, u Japanu, most „Shinagawa“ izgrađen 1999. godine koristio je UHPC za postizanje tanjih i lakših konstrukcija s povećanom nosivošću (Habel, Viviani, Denarić, & Brühwiler, 2006). Slično, u Francuskoj, most "Pont du Diable" izgrađen je korištenjem UHPC-a, što je omogućilo estetski privlačne, ali i izuzetno izdržljive konstrukcije (Fehling i sur., 2014).

Primjena UHPC-a nije ograničena samo na mostove i infrastrukturu; on se koristi i u obnovi i jačanju postojećih građevina. U Švicarskoj, UHPC se koristi za sanaciju i jačanje starih betonskih mostova i zgrada, čime se produljuje njihov vijek trajanja bez potrebe za opsežnim rekonstrukcijama (Brühwiler i Denarić, 2008).

Širenje primjene UHPC-a tijekom posljednjih nekoliko desetljeća također je potaknuto razvojem novih formula koje koriste ekološki prihvatljivije materijale. Istraživači su radili na smanjenju udjela cementa, zamjenjujući ga industrijskim nusproizvodima poput letećeg pepela i silicijske prašine, čime se smanjuje ugljični otisak UHPC-a (Yu, Spiesz, i Brouwers, 2014).

Danas, UHPC se koristi u širokom spektru građevinskih projekata diljem svijeta. Njegova izuzetna tlačna i savojna čvrstoća, zajedno s otpornosti na kemijske utjecaje i abraziju, čine ga idealnim materijalom za moderne, održive građevinske projekte. Primjeri uključuju visoke zgrade u seizmički aktivnim područjima, mostove izložene morskoj vodi, te specijalizirane strukture kao što su reaktori i spremnici pod pritiskom. Primjer zgrade izgrađene od betona poboljšanih svojstava prikazan je na slici (Slika 2).



**Slika 2. Scotia Plaza, Toronto**

Osim toga, UHPC je postao standard u projektima gdje su trajnost i minimalni troškovi održavanja ključni. Njegova uporaba u konstrukcijama izloženim ekstremnim uvjetima, poput obalnih konstrukcija i infrastrukture u hladnim klimama, postavlja ga kao predvodnika u održivoj gradnji koja traži materijale dugog vijeka trajanja.

Povijesni razvoj UHPC-a pokazuje kako je ovaj materijal evoluirao od eksperimentalnih smjesa do ključnog građevinskog materijala s globalnom primjenom. Razvoj UHPC-a, potaknut potrebom za izgradnjom trajnijih i otpornijih konstrukcija, otvorio je nove mogućnosti za inženjere i arhitekte diljem svijeta. S obzirom na sve veće zahtjeve za održivom gradnjom i dugovječnim materijalima, očekuje se da će UHPC i dalje igrati ključnu ulogu u budućim građevinskim projektima.



### 2.3. Prednosti i izazovi u primjeni UHPC-a

Jedna od najznačajnijih prednosti UHPC-a je njegova iznimna tlačna čvrstoća, koja omogućuje projektantima da smanje dimenzije konstrukcijskih elemenata bez gubitka nosivosti. To rezultira lakšim i tanjim konstrukcijama, što smanjuje ukupnu težinu objekta i omogućuje korištenje manje količine materijala. Smanjenje mase konstrukcije posebno je važno kod mostova i visokih zgrada, gdje manja težina znači manje opterećenje na temelje i smanjene troškove gradnje (Fehling i sur., 2014). Nadalje, smanjena težina konstrukcije može imati pozitivan efekt na građevinu pri potresnom djelovanju zbog reduciranih inercijalnih sila.

Duktilnost i otpornost na pucanje također su ključne prednosti UHPC-a. Zahvaljujući dodatku vlakana, UHPC ima sposobnost apsorpiranja i redistribucije naprezanja, što mu omogućuje da se nosi sa savojnim i dinamičkim opterećenjima bez značajnog oštećenja. Ova karakteristika čini UHPC posebno pogodnim za primjenu u seizmički aktivnim područjima, gdje konstrukcije moraju izdržati jake potrese bez kolapsa (Wille, Naaman i El-Tawil, 2011).

Trajnost je još jedna ključna prednost UHPC-a. Njegova visoka gustoća i niska poroznost čine ga izuzetno otpornim na penetraciju vode, kloridnih iona, sulfata i drugih agresivnih kemikalija. To drastično smanjuje rizik od korozije armature i degradacije betonske matrice, što rezultira znatno duljim vijekom trajanja konstrukcija u usporedbi s tradicionalnim betonom. UHPC se stoga često koristi u obalnim i morskim konstrukcijama, gdje su izloženi visokoj koncentraciji soli i drugim agresivnim elementima (Brühwiler i Denarić, 2008).

Jedna od prednosti koja postaje sve važnija u modernom građevinarstvu je održivost. UHPC omogućuje smanjenje potrošnje materijala zbog svoje visoke tlačne čvrstoće, što rezultira manjim ekološkim otiskom. Nadalje, korištenje industrijskih nusproizvoda kao što su leteći pepeo i silikatna prašina smanjuje potrebu za primarnim sirovinama i doprinosi održivom razvoju građevinske industrije (Yu, Spiesz, i Brouwers, 2014).

Estetske mogućnosti koje pruža UHPC također su značajne. Zbog svoje visoke čvrstoće, UHPC omogućuje izgradnju tankih i elegantnih arhitektonskih elemenata, koji bi s tradicionalnim betonom bili teško izvedivi. Ovo je posebno važno u suvremenoj arhitekturi, gdje se traže inovativni i estetski privlačni dizajni koji istovremeno zadovoljavaju funkcionalne zahtjeve.

Unatoč brojnim prednostima, primjena UHPC-a nosi sa sobom i određene izazove. Jedan od glavnih izazova je visoka cijena proizvodnje. UHPC zahtijeva upotrebu visokokvalitetnih materijala, uključujući cement s niskim vodo-cementnim faktorom, superplastifikatore i vlakna, što značajno povećava troškove proizvodnje u usporedbi s tradicionalnim betonom (Fehling i sur., 2014). Ovi troškovi mogu biti prepreka za njegovu širu primjenu, osobito u zemljama s ograničenim proračunima za infrastrukturne projekte.

Obradljivost UHPC-a predstavlja još jedan značajan izazov. Niski vodo-cementni faktor, zajedno s visokim sadržajem finih materijala, rezultira smjesom koja je viskozna i teško obradiva. Ovo može zahtijevati dodatnu opremu i tehnologije za ugradnju betona, kao i visoko obučenu radnu snagu. Zbog toga se u nekim slučajevima koristi toplinsko liječenje ili autoklaviranje kako bi se poboljšala obradljivost i smanjila viskoznost smjese, što dodatno povećava troškove (Wille i sur., 2011).

Kao primjer građevine pri čijoj je gradnji posebnu ulogu imala obradivost UHPC-a i korištenje dodatne opreme pri njegovoj ugradnji imamo zgradu Sveučilišta južne Danske, Odense (Slika 3).



**Slika 3. University of Southern Denmark, Odense**

Kvalitetna kontrola je kritična za postizanje željenih svojstava UHPC-a. Svaka varijacija u kvaliteti materijala ili nepravilnost u procesu miješanja može rezultirati značajnim odstupanjima u konačnim svojstvima betona. To zahtijeva visoku razinu stručnosti i preciznosti u svim fazama proizvodnje i ugradnje, što dodatno povećava kompleksnost primjene UHPC-a u praksi (Aïtcin, 1998).

Logistički izazovi također su prisutni, posebno u projektima gdje je potrebno transportirati UHPC na velike udaljenosti ili u područja s ograničenim pristupom. Zbog specifičnih zahtjeva za miješanjem i ugradnjom, transport UHPC-a mora biti pažljivo planiran kako bi se izbjegli problemi s konzistencijom smjese i osigurala pravilna ugradnja (Fehling i sur., 2014).

Osim toga, specijalizirana oprema koja je potrebna za miješanje i ugradnju UHPC-a nije uvijek dostupna na gradilištima, što može ograničiti njegovu primjenu u nekim projektima. Ovo uključuje visoko precizne mikserice i opremu za vibriranje, koja je nužna za postizanje visoke gustoće i eliminaciju zračnih šupljina u betonu.

Nedostatak standardiziranih smjernica i normi za primjenu UHPC-a može predstavljati izazov u njegovoj široj primjeni. Iako su razvijene mnoge smjernice i preporuke za miješanje, ugradnju i testiranje UHPC-a, one se još uvijek ne koriste univerzalno. To može dovesti do različitih tumačenja i primjena, što povećava rizik od neuspjeha u izvedbi i smanjuje povjerenje u ovaj materijal (Brühwiler i Denarić, 2008).

Unatoč ovim izazovima, prednosti koje nudi UHPC čine ga izuzetno vrijednim materijalom za moderne građevinske projekte, posebno one koji zahtijevaju visoku trajnost, otpornost i estetsku vrijednost. S razvojem novih tehnologija i smanjenjem troškova, očekuje se da će UHPC postati sve češći izbor u građevinskoj industriji, kako u razvijenim zemljama, tako i u onima u razvoju.

Kao ogledni primjer uporabe UHPC u našoj zemlji imamo njegovu primjenu u rekonstrukciji dijelova u ratu teško oštećenog Vukovarskog vodotornja (Slika 4).



**Slika 4. Vukovarski vodotoranj**

### **3. MINERALNI DODATCI U BETONU**

Mineralni dodaci igraju ključnu ulogu u poboljšanju svojstava betona, osobito u kontekstu betona visokih uporabnih svojstava (UHPC). Ovi dodaci značajno utječu na fizikalna, mehanička i trajna svojstva betona, omogućujući stvaranje materijala koji može zadovoljiti najviše standarde u građevinskoj industriji. Korištenje mineralnih dodataka u betonu nije novost, ali njihov značaj posebno dolazi do izražaja u naprednim formulacijama poput UHPC-a.

#### **3.1. Vrste mineralnih dodataka**

Mineralni dodaci koji se koriste u betonu mogu se podijeliti na nekoliko ključnih vrsta, od kojih svaka ima specifične karakteristike i utjecaj na konačna svojstva betona.

##### **3.1.1. Silikatna prašina**

Silikatna prašina (silica fume) je jedan od najčešće korištenih mineralnih dodataka u betonu, osobito u visokoperformansnim smjesama poput UHPC-a. Silikatna prašina je vrlo fin prah, nusproizvod industrije silicija i silicijevog željeza, koji se sastoji od mikroskopskih sferičnih čestica silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) promjera od 0,1 do 1 mikrometra. Dodavanje silikatne prašine u beton može značajno poboljšati mehanička svojstva betona, kao i njegovu trajnost.

Silikatna prašina povećava gustoću cementne matrice smanjujući količinu slobodne vode u smjesi. Povećanje gustoće smanjuje propusnost betona, čineći ga otpornijim na penetraciju vode i kemijskih tvari, čime se povećava otpornost na koroziju armature (Hooton, 1993). Osim toga, silikatna prašina poboljšava tlačnu čvrstoću betona, što je posebno važno u smjesama visokih performansi (Wong i Razak, 2005).



**Slika 5. Silikatna prašina**

Silikatna prašina djeluje i kao pucolanski materijal, reagirajući s kalcijevim hidroksidom koji nastaje tijekom hidratacije cementa, stvarajući dodatne kalcijevo-silikatne-hidrate (CSH), što dodatno poboljšava mikrostrukturu betona. Međutim, zbog visoke reaktivnosti i finih čestica, potrebno je koristiti superplastifikatore kako bi se održala obradljivost betona (Mehta i Monteiro, 2014).

Silikatna prašina značajno smanjuje propusnost betona, čime se smanjuje rizik od oštećenja uslijed djelovanja agresivnih kemijskih tvari, kao što su sulfati i kloridi. Osim toga, povećava otpornost na zamrzavanje i odmrzavanje, što je ključno u hladnim klimama (Hooton, 1993).

### *3.1.2. Leteći pepeo*

Leteći pepeo je još jedan uobičajeni mineralni dodatak koji se koristi u betonu. Nastaje kao nusproizvod sagorijevanja ugljena u termoelektranama, a njegova uporaba u betonu ne samo da poboljšava svojstva betona, već doprinosi i smanjenju ekološkog otiska građevinske

industrije. Leteći pepeo djeluje kao pucolanski materijal, reagirajući s kalcijevim hidroksidom u betonu i stvarajući dodatne CSH faze, što povećava čvrstoću betona tijekom vremena. Betoni s dodatkom letećeg pepela često pokazuju poboljšana reološka svojstva i veću dugoročnu tlačnu čvrstoću (Malhotra i Mehta, 2002).

Zbog svoje fine prirode, leteći pepeo poboljšava obradljivost betona i smanjuje potrebu za vodom. Ovo omogućuje stvaranje gušćih betonskih smjesa s manjom propusnošću i boljom konzistencijom, što je posebno važno u betonu visokih performansi (Thomas, 2007).



**Slika 6. Leteći pepeo**

Betoni s letećim pepelom pokazuju bolju otpornost na kemijske utjecaje, uključujući sulfate i kloride, zbog smanjene propusnosti. Također, leteći pepeo smanjuje rizik od reakcije alkalija sa silikatima (alkali-silica reactivity, ASR), čime se dodatno poboljšava trajnost betona (Poon, Azhar, Anson, i Wong, 2001).

### 3.1.3. Metakaolin

Metakaolin je visoko reaktivni pucolanski dodatak koji se proizvodi termičkom obradom kaolinita, vrste gline. U posljednjih nekoliko desetljeća, metakaolin je postao popularan kao dodatak za poboljšanje svojstava betona. Dodavanje metakaolina u beton povećava tlačnu čvrstoću, otpornost na savijanje, i modul elastičnosti. Metakaolin reagira s kalcijevim hidroksidom u betonu, stvarajući dodatne CSH faze i poboljšavajući mikrostrukturu betonske matrice. Ova poboljšanja rezultiraju većom trajnošću i čvrstoćom betona (Wild, Khatib i Jones, 1996).



**Slika 7. Metakaolin**

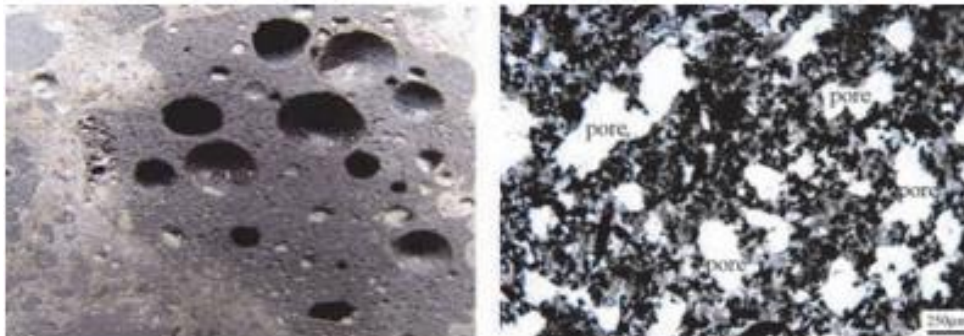
Metakaolin može povećati viskoznost svježeg betona, što može otežati obradljivost smjese. Međutim, s pravilnim doziranjem i uporabom superplastifikatora, moguće je održati željenu konzistenciju i obradljivost betona (Justice i Kurtis, 2007). Metakaolin poboljšava otpornost betona na kemijske utjecaje, smanjuje propusnost i povećava otpornost na zamrzavanje i odmrzavanje. Također, metakaolin smanjuje rizik od pucanja uslijed skupljanja i poboljšava otpornost na karbonatizaciju (Sabir, Wild i Bai, 2001).

### 3.1.4. Granulirana zgura visokih peći

Granulirana zgura je materijal dobiven kao nusproizvod nastao tijekom proizvodnje čelika u visokoj peći naglim hlađenjem postupkom potapanja u vodi. Nastala zgura se obično sastoji od vapna (CaO), magnezijeva oksida (MgO), silicijeva dioksida (SiO<sub>2</sub>), aluminijeva oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



O<sub>3</sub>), sumpora (S), željeznog oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i manganovog oksida (MnO). Sastav i struktura ohlađene zgure prikazani su na slici ispod (Slika 8).



**Slika 8. Sastav i struktura zgure iz visokih peći**

Mljevenjem ohlađene zgure dobijemo granulatu koja je zbog svojih fizikalnih i kemijskih karakteristika našao primjenu i u proizvodnji betona visokih performansi. Njegovim dodavanjem u mješavine UHPC-a dovodi do poboljšanja obradivosti pripremljene smjese naročito kod primjene pod visokim temperaturama gdje zbog niže toplinske hidratacije smanjuje rizik od toplinskog pucanja. Zbog otpornosti na visoke temperature dodaje se u kod izgradnje objekata izloženih visokim temperaturama. Isto tako zbog otpornosti na vanjske kemijske utjecaje primjenjuje se u izgradnji objekata koji su pojačano izloženi kemijskim utjecajima.



**Slika 9. Mljevena granulirana zgura**

### 3.2. Kriteriji za odabir mineralnih dodataka

Prilikom odabira mineralnih dodataka za beton, nekoliko je ključnih kriterija koje je potrebno uzeti u obzir kako bi se postigla optimalna svojstva betonske smjese. Prvi kriterij je vrsta projekta i specifični zahtjevi performansi. Na primjer, u projektima koji zahtijevaju visoku tlačnu čvrstoću i trajnost, kao što su mostovi i visoke zgrade, dodaci poput silikatne prašine i metakaolina često se preferiraju zbog njihovih svojstava koja poboljšavaju mikrostrukturu betona i smanjuju propusnost, čime se povećava trajnost betona (Wild i Bai, 2001).

Ekonomičnost i dostupnost dodataka također su važni čimbenici. Leteći pepeo, koji je često nusproizvod termoelektrana, jeftiniji je od metakaolina i silikatne prašine, a istovremeno poboljšava dugoročnu tlačnu čvrstoću i smanjuje propusnost betona (Malhotra i Mehta, 2002). Iako su silikatna prašina i metakaolin skuplji, njihova dugoročna korist u pogledu smanjene potrebe za održavanjem može opravdati početne troškove (Mehta i Monteiro, 2014).

Kompatibilnost s ostalim materijalima u smjesi također je kritična. Mineralni dodaci moraju biti kompatibilni s cementom, agregatima i kemijskim aditivima kako bi se osigurala stabilnost smjese. Na primjer, silikatna prašina može promijeniti reologiju smjese, povećavajući potrebu za superplastifikatorima (Mehta i Monteiro, 2014). Također je važno obratiti pažnju na kemijske reakcije, kao što je alkali-silika reakcija (ASR), koja može utjecati na trajnost betona (Thomas, 2007).

Ekološka održivost postaje sve važniji aspekt u izboru mineralnih dodataka. Korištenje letećeg pepela ili metakaolina može smanjiti ugljični otisak betona smanjenjem potrebne količine cementa, čime se smanjuje emisija CO<sub>2</sub> (Poon, Azhar, Anson i Wong, 2001). Nadalje, korištenje nusproizvoda poput letećeg pepela doprinosi održivosti građevinskih materijala, smanjujući potrebu za primarnim sirovinama i količinu industrijskog otpada (Malhotra i Mehta, 2002).

Specifične funkcionalne potrebe betona, kao što su otpornost na vatru ili visoke temperature, također utječu na odabir mineralnih dodataka. Metakaolin se često koristi zbog svoje sposobnosti da poveća otpornost betona na visoke temperature, što je važno za projekte poput industrijskih postrojenja (Sabir i sur., 2001). S druge strane, silikatna prašina može biti najbolji

izbor za smanjenje poroznosti betona i povećanje otpornosti na kemijske utjecaje, što je ključno za trajnost betona u agresivnim uvjetima (Justice i Kurtis, 2007).

Pravilnim odabirom mineralnih dodataka može se značajno poboljšati čvrstoća, trajnost i reološka svojstva betona, čineći ga otpornim i ekonomičnim materijalom. Uzimajući u obzir sve ove kriterije, moguće je dizajnirati betonske smjese koje optimalno odgovaraju specifičnim potrebama i izazovima svakog građevinskog projekta.

## 4. SVOJSTVA UHPC BETONA

Mineralni dodaci imaju ključan utjecaj na svojstva betona visokih uporabnih svojstava (UHPC), poboljšavajući njegovu tlačnu i savojnu čvrstoću, modul elastičnosti, te reološka svojstva i trajnost. Ovi dodaci, kao što su silikatna prašina, leteći pepeo i metakaolin, omogućuju stvaranje betona koji je izdržljiviji, gušći i otporniji na različite vanjske utjecaje, čime se značajno poboljšavaju njegove mehaničke performanse i dugovječnost.

### 4.1. Fizikalno-mehanička svojstva

Mineralni dodaci imaju značajan utjecaj na fizikalno-mehanička svojstva betona visokih uporabnih svojstava (UHPC). Povećanje tlačne čvrstoće, savojne čvrstoće i modula elastičnosti ključno je za postizanje visokih performansi betona u različitim aplikacijama.

#### 4.1.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća UHPC-a je ključno svojstvo koje se značajno poboljšava dodavanjem mineralnih dodataka kao što su silikatna prašina, leteći pepeo i metakaolin. Silikatna prašina, zahvaljujući svojim vrlo finim česticama i visokoj reaktivnosti, pomaže u smanjenju poroznosti betona, povećavajući njegovu gustoću i tlačnu čvrstoću. Studije pokazuju da dodavanje silikatne prašine može povećati tlačnu čvrstoću betona za 20% do 30% u usporedbi s betonom bez dodataka (Hooton, 1993). Leteći pepeo, kao pucolanski materijal, također doprinosi povećanju tlačne čvrstoće, osobito u kasnijim fazama očvršćavanja, dok metakaolin, zbog svoje visoke reaktivnosti, potiče brži razvoj čvrstoće u ranim fazama, što je posebno važno za projekte s kratkim vremenskim rokovima (Sabir, Wild i Bai, 2001).

#### 4.1.2. Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća UHPC-a je posebno važna za strukture koje su izložene savojnim opterećenjima, kao što su mostovi i tanji građevinski elementi. Mineralni dodaci poput silikatne prašine i metakaolina mogu značajno poboljšati savojnu čvrstoću betona. Ovi dodaci poboljšavaju vezivanje između cementne matrice i agregata, smanjujući mikropukotine i time povećavajući otpornost betona na savijanje.

Na primjer, dodavanje metakaolina u betonske smjese može povećati savojnu čvrstoću do 15%, što značajno doprinosi dugotrajnosti i stabilnosti struktura izloženih dinamičkim opterećenjima (Wild i sur, 1996).

#### *4.1.3. Modul elastičnosti*

Modul elastičnosti UHPC-a, koji odražava otpornost materijala na deformacije pod opterećenjem, također se može poboljšati dodavanjem mineralnih dodataka. Silikatna prašina, zbog svoje sposobnosti da smanji poroznost i poboljša gustoću betona, može povećati modul elastičnosti betona za 10% do 15% (Mehta i Monteiro, 2014). To čini beton otpornijim na dugotrajna opterećenja i smanjuje rizik od deformacija tijekom vremena. Metakaolin također doprinosi povećanju modula elastičnosti, čineći beton pogodnijim za primjenu u strukturama koje zahtijevaju visoku otpornost na savijanje i smicanje. Ova fizikalno-mehanička svojstva UHPC-a ključna su za osiguravanje dugotrajnosti i otpornosti građevinskih struktura, osobito u uvjetima visokih opterećenja i agresivnih okolišnih uvjeta. Dodavanje mineralnih dodataka omogućuje postizanje ovih svojstava, što UHPC čini idealnim izborom za moderne građevinske projekte.

## **4.2. Reološka svojstva svježeg betona**

Reološka svojstva svježeg betona, poput obradljivosti, konzistencije i održavanja, igraju ključnu ulogu u osiguravanju pravilnog miješanja, transporta i ugradnje betonske smjese. Mineralni dodaci značajno utječu na ova svojstva, omogućujući prilagodbu betona specifičnim zahtjevima projekta.

#### *4.2.1. Obradljivost*

Obradljivost svježeg betona odnosi se na lakoću kojom se smjesa može miješati, transportirati, ulijevati i zbijati bez segregacije. Mineralni dodaci kao što su leteći pepeo i silikatna prašina mogu poboljšati obradljivost betona smanjenjem trenja između čestica i omogućavanjem boljeg zbijanja betona (Mehta i Monteiro, 2014).

Leteći pepeo, zbog svojih finih čestica, smanjuje potrebu za vodom, poboljšavajući tako fluidnost smjese (Malhotra i Mehta, 2002). Silikatna prašina, s druge strane, može smanjiti obradljivost zbog svoje visoke reaktivnosti, pa je često potrebno koristiti superplastifikatore kako bi se održala željena konzistencija.

#### *4.2.2. Konzistencija*

Konzistencija betona odnosi se na njegovu sposobnost da zadrži oblik nakon ugradnje. Mineralni dodaci, posebno oni poput metakaolina i silikatne prašine, mogu značajno utjecati na konzistenciju svježeg betona. Silikatna prašina smanjuje vodo-cementni faktor, čime se povećava viskoznost smjese i smanjuje tendencija segregacije (Hooton, 1993). Metakaolin, zbog svojih pucolanskih svojstava, također pomaže u održavanju konzistencije betona, povećavajući stabilnost smjese tijekom ugradnje i očvršćavanja (Sabir, Wild i Bai, 2001).

#### *4.2.3. Održavanje*

Održavanje reoloških svojstava svježeg betona važno je za postizanje ravnomjernog očvršćavanja i izbjegavanje pukotina. Mineralni dodaci mogu pomoći u održavanju reoloških svojstava tijekom duljih perioda, što je ključno za projekte koji zahtijevaju dulji transport ili složenije tehnike ugradnje. Na primjer, leteći pepeo poboljšava očuvanje obradljivosti betona kroz duži vremenski period, čime se smanjuje potreba za dodatnim aditivima tijekom gradnje (Poon i sur., 2001).

### **4.3. Trajnost i otpornost betona**

Trajnost i otpornost UHPC-a na različite agresivne okolišne utjecaje ključni su za dugotrajnost konstrukcija. Mineralni dodaci značajno poboljšavaju otpornost betona na kemijske utjecaje, mraz i odmrzavanje, te abraziju.

#### *4.3.1. Otpornost na kemijske utjecaje*

Otpornost betona na kemijske utjecaje, uključujući sulfate, kloride i kiseline, može se značajno poboljšati dodavanjem silikatne prašine i metakaolina. Ovi dodaci smanjuju propusnost betona, čime se smanjuje rizik od korozije armature i kemijskog utjecaja na cementnu matricu. Studije pokazuju da dodavanje silikatne prašine može smanjiti propusnost klorida za više od 50%, čime

se povećava dugovječnost betonskih konstrukcija u agresivnim okolišima (Mehta i Monteiro, 2014).

#### *4.3.2. Otpornost na mraz i odmrzavanje*

Otpornost betona na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja također je ključna za trajnost, osobito u hladnijim klimatskim uvjetima. Mineralni dodaci kao što su silikatna prašina i leteći pepeo mogu poboljšati ovu otpornost smanjenjem propusnosti i povećanjem gustoće betona. Leteći pepeo posebno smanjuje rizik od pucanja uslijed zamrzavanja i odmrzavanja, poboljšavajući tako trajnost betona u ekstremnim vremenskim uvjetima (Malhotra i Mehta, 2002).

#### *4.3.3. Otpornost na abraziju*

Otpornost betona na abraziju važna je za površine izložene intenzivnom habanju, poput cestovnih i industrijskih podova. Mineralni dodaci poput metakaolina povećavaju otpornost betona na abraziju smanjenjem poroznosti i povećanjem čvrstoće površine. Metakaolin, zahvaljujući svojoj sposobnosti da stvori gušću cementnu matricu, značajno poboljšava otpornost betona na mehanička oštećenja i abraziju (Sabir i sur., 2001).

## 5. VRSTE AGREGATA U BETONU

Agregati čine osnovnu masu betona i njihova kvaliteta izravno utječe na konačna svojstva betona. U betonu, agregati zauzimaju između 60% i 80% ukupne zapremine, što ih čini ključnim čimbenikom u određivanju mehaničkih svojstava, trajnosti i obradljivosti betonske smjese. Postoje različite vrste agregata koje se koriste u betonu, a one se mogu klasificirati prema različitim kriterijima, kao što su veličina čestica, podrijetlo i gustoća.

### 5.1. Klasifikacija agregata

Klasifikacija agregata temelji se na nekoliko ključnih kriterija. Prvi kriterij je veličina čestica. Prema ovom kriteriju, agregati se dijele na krupne i sitne. Krupni agregati su čestice veće od 4 mm, koje uključuju materijale poput šljunka i drobljenog kamena. Ovi agregati pružaju osnovnu strukturalnu stabilnost betonu i doprinose njegovoj tlačnoj čvrstoći. Sitni agregati, s druge strane, imaju čestice manje od 4 mm, uključujući pijesak. Sitni agregati popunjavaju praznine između krupnih čestica, čime povećavaju gustoću betonske smjese i poboljšavaju njenu obradljivost. Kombinacija krupnih i sitnih agregata osigurava optimalnu raspodjelu čestica unutar betona, što je ključno za postizanje željenih mehaničkih svojstava.



Slika 10. Krupni agregat



Drugi kriterij klasifikacije je podrijetlo agregata. Agregati se dijele na prirodne i umjetne. Prirodni agregati dobivaju se iz prirodnih izvora, kao što su riječne doline, jezera i kamenolomi. Primjeri prirodnih agregata uključuju kvarcne i vapnenačke agregate.



**Slika 11. Riječni šljunak**



**Slika 12. Vapnenački agregat**

Kvarcni agregati su posebno cijenjeni zbog svoje tvrdoće i otpornosti na kemijske utjecaje, dok su vapnenački agregati poznati po svojoj sposobnosti da poboljšaju obradljivost betonske smjese. Umjetni agregati, s druge strane, dobivaju se industrijskim procesima, uključujući recikliranje građevinskog otpada i proizvodnju specijaliziranih materijala kao što su

ekspandirani škriljevac i pečena glina. Ovi agregati nude prednosti u pogledu održivosti jer omogućuju recikliranje i ponovnu upotrebu materijala, čime se smanjuje utjecaj na okoliš.



**Slika 13. Kvarcni pjesak**

Treći kriterij klasifikacije agregata je gustoća. Agregati se prema gustoći dijele na lake i teške. Lake agregati, kao što su ekspandirani škriljevac i perlit, koriste se u izradi laganih betona, koji su posebno korisni za izgradnju struktura gdje je smanjenje težine važno, primjerice kod visokih zgrada ili mostova. Teški agregati, poput barita, koriste se u specijaliziranim aplikacijama, primjerice za zaštitu od zračenja u nuklearnim postrojenjima.

## **5.2. Fizičke i kemijske karakteristike agregata**

Fizičke karakteristike agregata uključuju veličinu i oblik čestica, poroznost i apsorpciju vode. Veličina i oblik čestica izravno utječu na svojstva betonske smjese. Krupni, angularni agregati, kao što su eruptivne stijene, povećavaju tlačnu čvrstoću betona jer stvaraju čvrstu strukturu unutar smjese. S druge strane, sitni, zaobljeni agregati, poput pijeska, poboljšavaju obradljivost betona jer smanjuju trenje između čestica, omogućujući lakše miješanje i ugradnju betona. Za postizanje optimalne veličine koriste se postupci drobljenja i prosijavanja agregata. Prosijavanje se obavlja standardnim sitima sa otvorima u milimetrima 0.063, 0.125, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63 i 125 mm.

Poroznost agregata također igra važnu ulogu u određivanju kvalitete betona. Vapnenački agregati, koji su često porozniji, imaju veću sposobnost apsorpcije vode, što može zahtijevati prilagodbu vodocementnog omjera kako bi se osigurala potrebna čvrstoća i trajnost betona (Mehta i Monteiro, 2014). Kvarcni agregati, s druge strane, zbog svoje niske poroznosti i visoke tvrdoće, pružaju veću otpornost na habanje i kemijske utjecaje.

Kemijske karakteristike agregata uključuju njihov kemijski sastav i reaktivnost. Kvarcni agregati, koji sadrže visok udio silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ), poznati su po svojoj otpornosti na kemijske utjecaje i niskoj reaktivnosti s alkalijama u cementu (Mindess, Young i Darwin, 2003). Ova svojstva čine kvarcne agregate idealnim izborom za betone koji će biti izloženi agresivnim okolišnim uvjetima. Vapnenački agregati, s visokim udjelom kalcijevog karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ), podložniji su kemijskim utjecajima, posebno u kiselim uvjetima. Međutim, ovi agregati mogu poboljšati obradljivost betonske smjese i doprinijeti stvaranju stabilne cementne matrice. Eruptivni agregati, poput bazalta, zbog svoje visoke gustoće i otpornosti na mehanička opterećenja, idealni su za upotrebu u betonu namijenjenom za visoko opterećene konstrukcije.



**Slika 14. Bazaltni kamen**

## **6. UTJECAJ VRSTE AGREGATA NA SVOJSTVA UHPC-A**

Vrsta agregata u betonu visokih uporabnih svojstava (UHPC) igra ključnu ulogu u definiranju njegovih fizikalno-mehaničkih svojstava, reoloških svojstava svježeg betona te njegove trajnosti i otpornosti na agresivne okolišne utjecaje. Kvarcni, eruptivni i vapnenački agregati, o kojima smo prethodno govorili, imaju specifične karakteristike koje izravno utječu na performanse UHPC-a.

### **6.1. Fizikalno-mehanička svojstva**

Fizikalno-mehanička svojstva UHPC-a, kao što su tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća i modul elastičnosti, izravno su pod utjecajem vrste agregata. Kvarcni agregati, zbog svoje visoke tvrdoće i otpornosti na habanje, značajno doprinose povećanju tlačne i savojne čvrstoće UHPC-a. Njihova sposobnost da izdrže visoka mehanička opterećenja čini ih idealnim za primjenu u strukturama koje zahtijevaju maksimalnu čvrstoću, kao što su mostovi i visokoučinkovite zgrade. Kvarcni agregati također doprinose povećanju modula elastičnosti betona, što poboljšava njegovu otpornost na deformacije pod dugotrajnim opterećenjem (Mindess i sur., 2003).

Eruptivni agregati, poput bazalta, također imaju visok modul elastičnosti i otpornost na mehanička opterećenja, čime poboljšavaju čvrstoću i trajnost UHPC-a. Njihova angularna struktura omogućava bolje međusobno zaključavanje čestica unutar betonske smjese, što dodatno povećava tlačnu i savojnu čvrstoću (Neville, 1995). S druge strane, vapnenački agregati, iako imaju nešto nižu tlačnu i savojnu čvrstoću u usporedbi s kvarcnim i eruptivnim agregatima, doprinose boljoj obradljivosti betona, što olakšava ugradnju i smanjuje rizik od stvaranja praznina unutar betona (Mehta i Monteiro, 2014).

### **6.2. Reološka svojstva svježeg betona**

Reološka svojstva svježeg betona, koja uključuju obradljivost i konzistenciju, značajno ovise o vrsti korištenih agregata. Vapnenački agregati, zbog svoje poroznosti i zaobljenih čestica,

često poboljšavaju obradljivost i fluidnost betonske smjese, omogućujući lakše postizanje homogene smjese. To je posebno korisno u primjenama gdje je ključno osigurati ravnomjerno raspoređivanje betona, poput tankoslojnih betonskih elemenata ili složenih betonskih formi (Mehta i Monteiro, 2014).

Kvarcni agregati, iako pružaju visoku tlačnu čvrstoću, mogu smanjiti obradljivost betona zbog svoje visoke gustoće i niske poroznosti. To može rezultirati povećanim trenjem unutar smjese, što zahtijeva dodatnu upotrebu superplastifikatora kako bi se održala željena konzistencija smjese. Eruptivni agregati također mogu smanjiti obradljivost smjese zbog svoje angularnosti, što povećava trenje između čestica, no to se može kompenzirati pažljivim odabirom omjera komponenti betonske smjese (Neville, 1995).

### **6.3. Trajnost i otpornost betona**

Trajnost i otpornost UHPC-a na različite agresivne okolišne uvjete, kao što su kemijski utjecaji, ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja te abrazija, također su pod snažnim utjecajem vrste agregata. Kvarcni agregati, zahvaljujući svojoj kemijskoj inertnosti, pružaju visoku otpornost na kemijske utjecaje, smanjujući rizik od alkali-silika reakcije (ASR), koja može uzrokovati ozbiljna oštećenja betona tijekom vremena (Thomas, 2001). Ova otpornost čini kvarcne agregate idealnim izborom za betone koji su izloženi agresivnim kemijskim okruženjima, kao što su industrijski podovi ili betonske konstrukcije u kontaktu s morskom vodom.

Eruptivni agregati, poput bazalta, zbog svoje visoke gustoće i otpornosti na mehanička oštećenja, doprinose povećanju otpornosti betona na abraziju. To je posebno važno za površine izložene intenzivnom habanju, poput cestovnih površina ili industrijskih podova. Vapnenački agregati, iako manje otporni na habanje, mogu poboljšati otpornost betona na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja, ali mogu biti podložniji kemijskim utjecajima, osobito u prisutnosti kiselina (Mehta i Monteiro, 2014).

Izbor agregata za UHPC ovisi o specifičnim zahtjevima projekta, uključujući potrebnu čvrstoću, trajnost i reološka svojstva betona. Pažljivim odabirom agregata može se postići optimalna ravnoteža između svih ovih čimbenika, osiguravajući dugovječnost i pouzdanost konstrukcija izrađenih od UHPC-a.

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

### 7.1. Plan i program ispitivanja

Plan rada je izvršiti ispitivanje utjecaja agregata i vrste miješanja na svojstva betona ultravisokih performansi. Izrađeno je 7 laboratorijskih mješavina, a kao dodatci su korišteni silikatna prašina, leteći pepeo, metakaolin. Kao agregati su korišteni kvarcni, eruptivni i vapnenački pijesak. Na svježem UHPC betonu je ispitana konzistencija, dok su u očvrsnulom stanju ispitivani gustoća, savojna i tlačna čvrstoća betona, te brzina prolaska ultrazvučnih valova kroz UHPC beton. Dobiveni rezultati su grafički prikazani te su analizirani.

U sljedećem dijelu rada su opisani korišteni materijali, recepture, postupci ispitivanja koji su provedeni te dobiveni rezultati.

### 7.2. Korišteni materijali

#### 7.2.1. Cement

Za eksperimentalni dio rada korišten je portland cement CEM I 42,5 R s 95%-100% udjela klinkera iz tvornice Cemex. Cement je vezivo koje se dobiva miješanjem mljevenog anorganskog materijala s vodom. Stvara se pasta koja se vezuje hidrationskim reakcijama te nakon očvrnuća zadržava čvrstoću. Ukoliko se pravilno pomiješa s odgovarajućim omjerima vode i agregata prema normama CEM I 42,5 R stvara se beton koji tijekom vremena postiže različite razrede dugotrajne čvrstoće.

**Tablica 1. Tipični sastav 42,5 N CEM I 42,5 R**

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

**Tablica 2. Tipiska Svojstva 42,5 N CEM I 42,5 R**

TIPIČNA SVOJSTVA	ZAHITJEV 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	$\leq 10$
Vrijeme vezivanja $200 \pm 25\text{min}$	$\geq 60$
Rana čvrstoća 30MPa	$\geq 20,0$
Normirana čvrstoća 54 MPa	$\geq 42,5; \geq 62,5$

Neka svojstva cementa koja ga čine pogodnim za korištenje su kratko vrijeme vezivanja, visoka čvrstoća koja se postiže tokom očvršćivanja, te laka obradivost. Zbog svojih svojstava primjenjuje se kod izrade betona s visokim zahtjevima za početnu mehaničku otpornost, montažnih i predgotovljenih montažnih elemenata, prednapregnutih konstrukcija, injektiranja, raznih poslovnih i javnih objekata te kod izgradnje zahtjevnih inženjerskih i infrastrukturnih konstrukcija. Može koristiti za betonske radove na nižim temperaturama, za izradu betona otpornih na mraz te izradu vodonepropusnih betona.

### 7.2.2. Agregat

Za izradu mješavina u ovom radu izabrani su i korišteni agregati od kvarcnog pijeska 0-2mm i 0,3-1 mm, agregat od eruptivca (bazalt) 0-2mm, te agregat od vapnenca 0-2mm.

Kvarcni pijesak je silikatan, pogotovu u finijim frakcijama. U praksi se koristi nekoliko vrsta: jaruški, kvarcni i riječni pijesak. Svaki od njih ima svoje posebne karakteristike proizvodnje i rada. Po svojoj strukturi, ovaj materijal je drobljeni kvarc, koji nastaje u prirodnom okruženju, ili se dobiva nakon posebne obrade. Struktura pijeska je homogena i slobodno teče.

Vapnenac je sedimentna stijena sastavljena prvenstveno od kalcita, minerala kalcijevog karbonata kemijskog sastava  $CaCO_3$ . Često sadrži različite količine silicija u obliku jaspisa ili kremenca, kao i količine gline, mulja i pijeska. Glavni izvor kalcita u vapnencu su speleotemi

kao što su stalaktiti i stalagmiti. Sekundarni izvor kalcita su školjke morskih životinja i koralji. Zbog oblika svojih čestica i poroznosti poboljšavaju obradljivost te omogućuju postizanje homogene smjese betona.

Korišten je još agregat od eruptivnih stijena koje nastaju kristalizacijom ili skrućivanjem magme, odnosno lave. Sastoje se od kisika, silicija, aluminijska, željeza, magnezija, kalcija, natrija i kalija koji čine čvrste kemijske spojeve, minerale. Prema mjestu, načinu postanka i strukturi dijele se eruptivne u dubinske ili intruzivne stijene, površinske ili efuzivne stijene i žične stijene. Zbog njihove velike gustoće i otpornosti na mehaničke utjecaje uvelike pridonose otpornosti betona.

Uzorci agregata su prosijavani kroz standardizirana sita na laboratorijskom uređaju za prosijavanje.



**Slika 15. Uređaj za prosijavanje agregata**

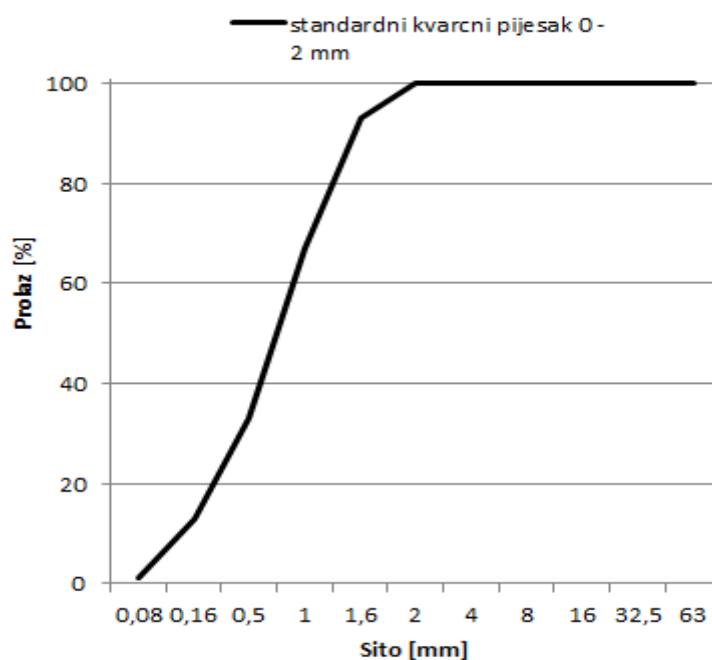
Granulometrijski sastav standardnog kvarcnog pijeska prema CEN EN 196 -1 veličine zrna 0-2mm dan je u sljedećoj tablici .



Gradacija izmjerena prosijavanjem u skladu je sa zahtjevima EN 196-1 i ISO 679: 2009

Tablica 3. Granulometrijski sastav standardnog kvarcnog pijeska

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

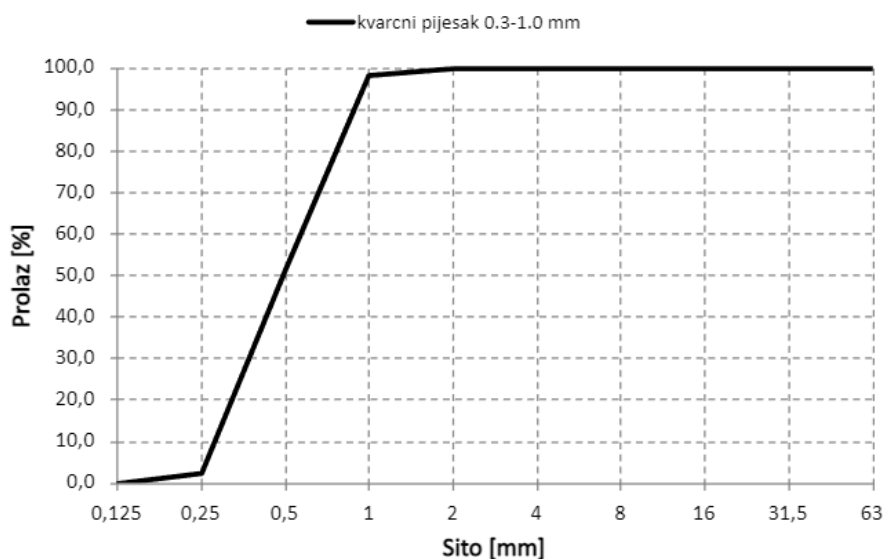


Slika 15. Grafički prikaz granulometrijskog sastava standardnog kvarcnog pijeska 0-2 mm

Granulometrijski sastav kvarcnog pijeska za fuge granulacije 0,3-1,0 mm korišten u mješavini M8 je prikazanu ljedećoj tablici uz dodatak grafičkog prikaza rezultata prosijavanja.

**Tablica 4. Granulometrijski sastav 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

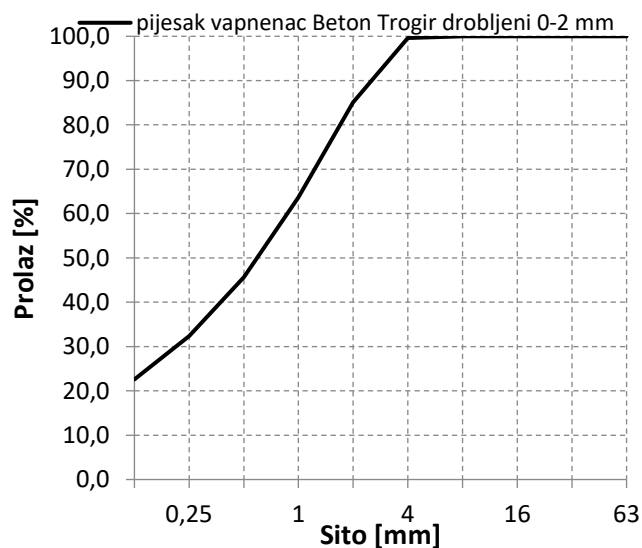


**Slika 16. Granulometrijski sastav kvarcnog pijeska za fuge granulacije 0,3-1,0 mm korišten u mješavini M8**

Granulometrijski sastav agregata od vapnenca veličine frakcije 0-2mm korištenog u mješavini M6, dan je u sljedećoj tablici i kroz grafički prikaz.

**Tablica 5. Granulometrijski sastav agregata od vapnenca veličine frakcije 0-2mm**

Sito	Ostatak	Prolaz	Ostatak	Prolaz
[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
63	0,0	815,8	0,0	100,0
31,5	0,0	815,8	0,0	100,0
16	0,0	815,8	0,0	100,0
8	0,0	815,8	0,0	100,0
4	3,2	812,6	0,4	99,6
2	118,5	694,1	14,9	85,1
1	174,7	519,4	36,3	63,7
0,5	147,1	372,3	54,4	45,6
0,25	108,1	264,2	67,6	32,4
0,125	79,9	184,3	77,4	22,6
< 0.125	184,3	-	-	-
Ukupno	815,8			
Početno	Razlika	Odstupanje	Ref.	Ocjena
[g]	[g]	%	%	-
819,1	3,3	0,0	< 1	Zadovoljava



**Slika 17. Grafički prikaz granulometrijskog sastava agregata od vapnenca veličine frakcije 0-2mm**

### 7.2.3. Aditiv

Aditiv korišten u eksperimentu je MasterGlenium ACE 770, superplastifikator polikarboksilnih eter polimera. Ima specifičnu molekularnu konfiguraciju za ubrzavanje hidratacije cementa. Brza absorpcija molekule na čestice cementa uz efikasnu disperziju izlaže veću površinu zrnaca cementa koji reagiraju s vodom. Moguće je postići veću čvrstoću u ranijoj dobi ranijim razvojem topline hidratacije. MasterGlenium ACE 770 ne sadrži kloride te je kompatibilan sa svim cementima koji zadovoljavaju UNI EN 197-1 i ASTM standardima. Pogodan je kod izrade predgotovljenih betonskih elemenata s reoplastičnim betonom tekuće konzistencije, s niskim vodocementnim faktorom i bez segregacije.

Neke od prednosti uporabe MasterGleniuma su dobivanje betona s niskim vodocementnim faktorom, optimalni ciklusi stvrdnjavanja, eliminirana energija potrebna za stvrdnjavanje (sustav nulte energije), eliminirano stvrdnjavanje toplinom, poboljšani izgled površine te povećana produktivnost. Preporučena doza aditiva je 0,7 do 1,2 litre na 100kg veziva, u drugim slučajevima dozira se s obzirom na uvjete na gradilištu.

**Tablica 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%
Korozivno 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

#### 7.2.4. Metakaolin

Za ovaj eksperiment je korišten termički obrađen čisti metakaolin Metaver™ N. Radi se o pucolanskom dodatku za stvrdnjavanje građevinskih materijala. Ovaj dodatak se proizvodi kalcinacijom koncentriranog kaolina. Amorfan alumosilkat reagira s potrlanditom i kalcijevim hidroksidom kako bi nastale CSH- faze.

Metaver™ N ima sposobnost vezanja velike količine slobodnog vapna u obliku CSH- faza, a odgovarajućim građevinskim i kemijskim metodama kontrolira se brzina i količina vezivanja. Može poboljšati razna svojstva mortova, betona i sličnih proizvoda jer miješanjem stvara mekanu plastičnu konzistenciju koja je lako obradljiva. Ne zahtjeva veliko povećanje potreb za vodom zbog njegove distribucije veličine čestica.

**Tablica 7. Karakteristike metakaolina**

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

#### 7.2.5. Leteći pepeo

Leteći pepeo korišten u eksperimentu je Microsit® M10, pucolanski dodatak za građevinske materijale na bazi cementa visoke učinkovitosti. Koristi se za kontroliranu proizvodnju visokokvalitetnih mortova i betona. Radi se o aluminosilikatu koji se većinom sastoji od SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Microsit® M10 je okarakteriziran vrlo finom i ujednačenom raspodjelom veličine čestica koje su skoro savršeno sferne. Njegovom upotrebom dobiva se optimalna raspodjela čestica kod mortova i betona te velika gustoća i trajnost cementne matrice. Poboljšava reološka svojstva betona i smanjuje potrebu za vodom. Najčešće se dodaje 8-15% na težinu cementa, a o tom omjeru i ovise njegova konačna svojstva.

**Tablica 8. Fizičke karakteristike Microsit® M10**

Oblik čestice	sferni
Blaineova vrijednost	6.400 cm <sup>2</sup> /g
Specifična gustoća	2.54 cm <sup>2</sup> /g
Prividna gustoća labavo	0,78 cm <sup>2</sup> /g
Boja	siva
Bjelina	26
Potreba za vodom	29%
Potreba za vodom (Kat. S)	92,5% M.-%
Raspodjela veličine čestica	$d_{10} \leq 2 \mu\text{m}$
	$d_{50} \leq 5 \mu\text{m}$
	$d_{95} \leq 10 \mu\text{m}$

#### 7.2.6. Silikatna prašina

Prašina koja je korištena u eksperimentu je MEYCO® MS 610. Povećava inženjerska svojstva betona kao što su otpornost na savijanje i pritisak, mehanika loma i nepropusnost. Poboljšava svojstva površine betona i mikrostrukture cementne paste. MEYCO® MS 610 mineralni je dodatak koji se koristi u normalnim i betonima za prskanje. Neke od njegovih prednosti su smanjena doza ubrzivača skrućivanja te nanošenje debljih slojeva u prskanom betonu, povećana otpornost na mehanička i kemijska djelovanja kao i povećana vodonepropusnost. Također sprječava ispuštanje vode i segregaciju u svježem betonu. Doziranje je promjenjivo s obzirom na laboratorijska ispitivanja, ali obično se koristi u omjeru 5-10kg na 100 kg cementa.

**Tablica 9. 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 <sup>2</sup> /kg
Omjer SiO <sub>2</sub>	> %85
Omjer CaO	< %1
Omjer SO <sub>3</sub>	< %2
0,045 < omjer čestica	< %40
Indeks aktivnosti	> %95
Zgusnuti mikrosilika	2300 kg/m <sup>3</sup>

### 7.3. Recepture i postupak miješanja

Eksperiment je proveden u laboratoriju na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Napravljeno je 7 mješavina UHPC betona koje se razlikuju kombinacijom mineralnih dodataka i agregata. Kombinirani su dodatci manje i veće finoće. Korišteno je 800kg cementa za 1m<sup>3</sup> mješavine. Postotak mineralnog dodatka u odnosu na cement je 0,25, a vodocementni faktor je 0,2. Ukupni dio veziva je 1200 kg, a superplastifikator se dozira kao 4 % ukupne mase veziva. Prva skupina mješavina oznake M sadrži veće količine veziva i niži vodocementni faktor dok skupina mješavina oznake R sadrži manju količinu veziva te viši vodocementni faktor.

Opis ispitanih mješavina sa dodatcima i vrstom agregata:

M3- mješavina sa metakaolinom, letećim pepelom i standardnim kvarcnim pijeskom

M5- mješavina sa metakaolinom, letećim pepelom i eruptivnim agregatom

M6- mješavina sa metakaolinom, letećim pepelom i vapnenačkim agregatom

M8- mješavina sa metakaolinom, letećim pepelom i kvarcnim agregatom 0,3-1 mm

R1- mješavina sa metakaolinom, silikatnom prašinom i standardnim kvarcnim pijeskom

R2- mješavina sa metakaolinom, silikatnom prašinom i eruptivnim agregatom

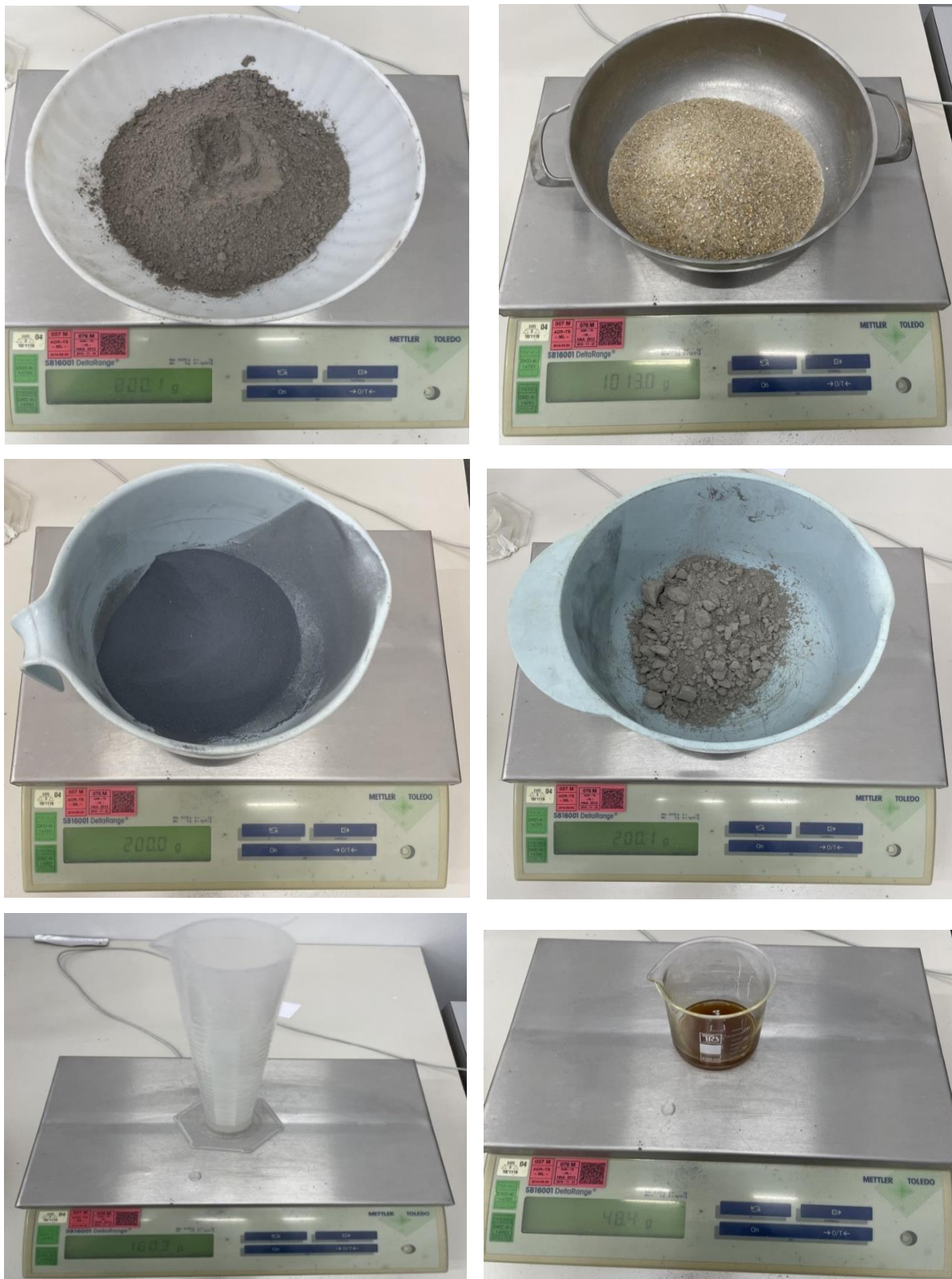
R3- mješavina sa metakaolinom, silikatnom prašinom i standardnim kvarcnim pijeskom



**Tablica 10. Recepture istraživanih mješavina**

Receptura	Mješavine (g)						
	M3	M5	M6	M8	R1	R2	R3
Cement	800	800	800	9600	550	550	650
Leteći pepeo	200	200	200	2400			
Silikatna prašina					180	180	230
Metakaolin	200	200	200	2400	180	180	230
Superplastifikator	48	48	48	576	13,7	13,7	16,7
Kvarcni agregat (0-2mm)	1027,5				747,6		517,1
Eruptivni agregat (0-2mm)		1027,5				747,6	
Vapnenački agregat (0-2mm)			1027,5				
Kvarcni agregat (0,3-1mm)				12330,1			
Voda	160	160	160	1920	345,8	345,8	355
W/C	0,2	0,2	0,2	0,2	0,63	0,63	0,55

Materijali korišteni u eksperimentu su precizno izvagani.



Slika 18. Materijali korišteni u eksperimentu

Nakon što su dozirani sastojci za mješavine, stavljaju se u laboratorijsku miješalicu. Za sve mješavine osim za M8 korištena je laboratorijska mješalica za mort, dok je za M8 korištena laboratorijska mješalica za beton. Postupak mješanja UHPC betona se razlikuje od procesa mješanja običnih betona. Duži je to proces koji počinje miješanjem suhih sastojaka oko 5 minuta kako bi se promiješale sve komponente. Sljedeći korak je dodavanje aditiva s polovinom ukupne količine vode te nastavak miješanja još 2 minute. Nakon toga dodaje se drugi dio vode te se rad miješalice ubrzava. Ukupno vrijeme mješanja UHPC betona je najmanje 20 minuta. Mješavine oznake R mješane su 90 sekundi u prvoj i 90 sekundi u drugoj brzini. Dosta kraće vrijeme mješanja utječe na svojstva betona. Što se tiče mješanja na laboratorijskoj mješalici za beton, postupak i priprema mješavine su jednaki, ali razlika je u tome što je brzina miješalice fiksirana.



**Slika 19. Mješalica za mort**



**Slika 20. Laboratorijska miješalica za beton**

Nakon mješanja ispituva se obradivost te se UHPC betoni ugrađuju u kalupe. Obradljivost betona se ispituje u svježem stanju. Uzorci UHPC betona se ugrađuju u kalupe dimenzija

40x40x160 mm na način da se kalupi postave i učvrste na vibrostol, ispuni se kalup do pola visine te se vibrira 60 sekundi. Nakon vibriranja puni se i druga polovica kalupa te se vibrira dodatnih 60 sekundi.



**Slika 21. Vibrostol**



**Slika 22. Uzorci UHPC na vibrostolu**

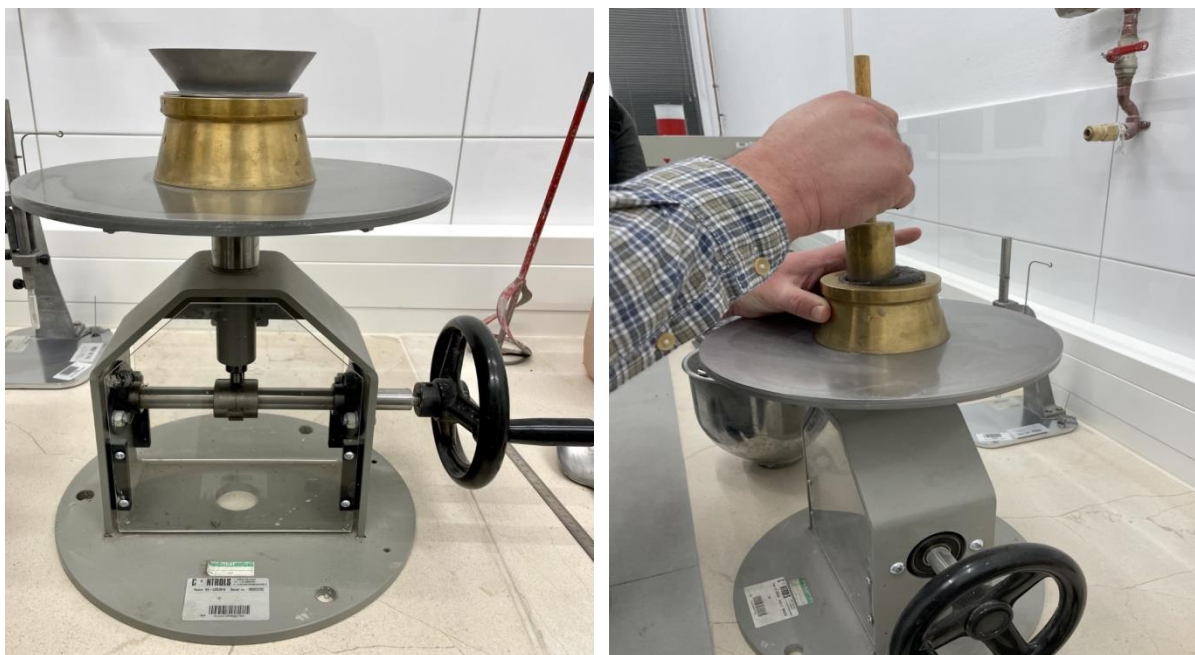
Izvibrirani uzorci ostavljaju se 28 dana u komori na temperaturi  $20 \pm 2$  °C i vlažnosti 90-100% potom se u očvrslom stanju ispitivaju. Ispitiva se brzina ultrazvuka, savojna i tlačna čvrstoća.

## **7.4. Metode ispitivanja**

### *7.4.1. Ispitivanje konzistencije morta*

Konzistencija morta se obavlja po standardnoj metodi razastiranja EN 1015-3. Konzistencija morta se definira s obzirom na promjer rasutog morta nakon potresanja na potresnom stolu. Na potresni stol se postavlja mesingani kalup u obliku krnjeg stožca u koji se nabija mort uz pomoć drvenog bata. Eksperiment se vrši tako što se UHPC beton puni u kalup koji se najprije navlaži vodom. Beton se ugrađuje u dva dijela te se svaki sloj nabije navlaženim drvenim batom po 10

puta. Kalup se skida, a ručka potresnog stola se okreće 15 puta tj 1 put u sekundi. Beton se razastire u dva smjera, a promjer se mjeri te se vadi srednja vrijednost dobivenih rezultata.



**Slika 23. Ispitivanje obradljivosti na potresnom stolu**

#### *7.4.2. Ultrazvučno ispitivanje*

Prema normi HRN EN 12504-4 mjere se brzine ultrazvučnih impulsa koji se dobivaju pomoću generatora u kojima se prijenos ultrazvučnih valova vrši posebnim prienosnicima. Valovi koji se prenose kroz element mogu biti uzdužni, poprečni i površinski. Aparat se zasniva na principu širenja longitudinalnih valova, a sastoji se od generatora električnih impulsa, pojačala, prijenosnika i prijemnika te mjerača koji mjeri vrijeme između početka impulsa generiranog prednjim pretvaračem i njegovog dolaska na prijemni pretvarač. Krajevi elementa i prijenosnici se premazuju gelom zbog boljeg prijenosa valova kroz uzorak. Prijemnik pretvara mehaničke valove u električne i nakon toga indikator daje vrijeme kretanja ultrazvuka kroz element.

Pomoću ove metode možemo dobiti poprilično točne informacije o segregaciji i dimenziji pukotina. Iz izmjerene duljine uzorka i vremena prolaska valova odnosno kretanja ultrazvuka dobijamo brzinu ultrazvuka. Brzina je omjer duljine uzorka i vremena prolaza ultrazvučnog vala:

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

Nakon vaganja uzorka dobija se masa koja podijeljena s dimenzijama uzorka (b x h x L), daje gustoću uzorka  $\rho$ .

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



**Slika- 25. Mjerenje brzine ultrazvuka**



**Slika 26. Vaganje uzorka beton**

Dinamički modul elastičnosti betona preko ultrazvučnog impulsa se dobiva iz 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),

$\rho$  = gustoća betona (kg/m<sup>3</sup>),

$\mu$  = Poissonov koeficijent. [16]

**Tablica 11. Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala**

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

#### 7.4.3. Savojna i tlačna čvrstoća prema EN 196-1

Tlačna i savojna čvrstoća se mjeri na laboratorijskoj preši koja ima mogućnost ispitivanja vlačnih i tlačnih čvrstoća. Savojna čvrstoća se ispituje na prizmi koja se ispituje kao prosta greda dimenzija 40x40x60 mm. Uzorak se postepeno opterećuje do loma te se onda očitaju naprezanja i sila F. Naprezanje na rubu 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 uzima se srednja vrijednost od 3 uzorka. Ispitivanje tlačne odnosno čvrstoće na pritisak vrši se na slomljenim polovinama uzoraka na kojima je ispitana savojna čvrstoća.

Tlačna čvrstoća polovine uzorka iznosi:

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



Slika 24. Ispitivanje savojne čvrstoće



Slika 25. Ispitivanje tlačne čvrstoće



## 8. REZULTATI I RASPRAVA

### 8.1. Analiza rezultata ispitivanja

#### 8.1.1. Rezultati ispitivanja obradljivosti

Nakon što su zamješani uzorci ispitivana je obradljivost svježeg betona tako što se mjerio promjer razasrtog betona nakon okretanja potresnog stola.

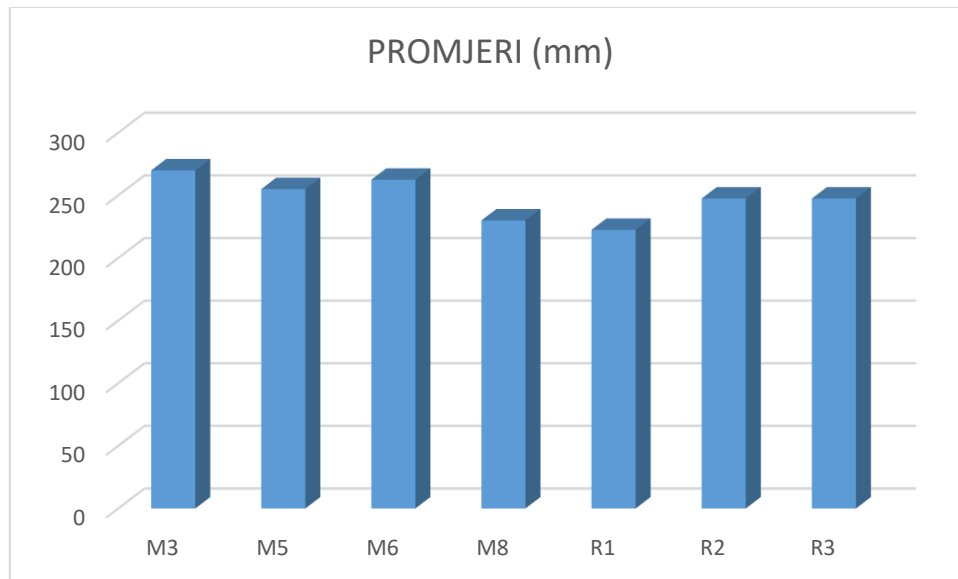


Slika 26. Ispitivanje obradljivosti

Tablica 12. Rezultati ispitivanja obradljivosti

	M3	M5	M6	M8	R1	R2	R3
	<b>PROMJERI (mm)</b>						
<b>D1</b>	270	260	265	230	220	255	220
<b>D2</b>	270	250	260	230	225	240	225
<b>DSR</b>	270	255	262,5	230	222,5	247,5	247,5

Iz dobivenih rezultata vidimo da najveću obradljivost ima uzorak M3 koji ima dodatak metakaolina i letećeg pepela. Svi uzorci s dodatkom metakaolina u kombinaciji s letećim pepelom i silikatnom prašinom imaju promjer veći od 200 mm i time spadaju u kategoriju tekuće konzistencije. Uzorci sa sitnijom frakcijom imaju manju obradivost uslijed veće površine zrnaca agregata koji stvaraju trenje. Usporedbom uzoraka M3 i M8 koje imaju istu recepturu, ali različite veličine zrna agregata pokazuju nam razliku u obradivosti. Pošto se radi o sitnijim frakcijama agregata vrsta agregata nema prevelik utjecaj na obradivost svježeg betona.



**Slika 27. Grafikon rezultata ispitivanja obradljivosti**

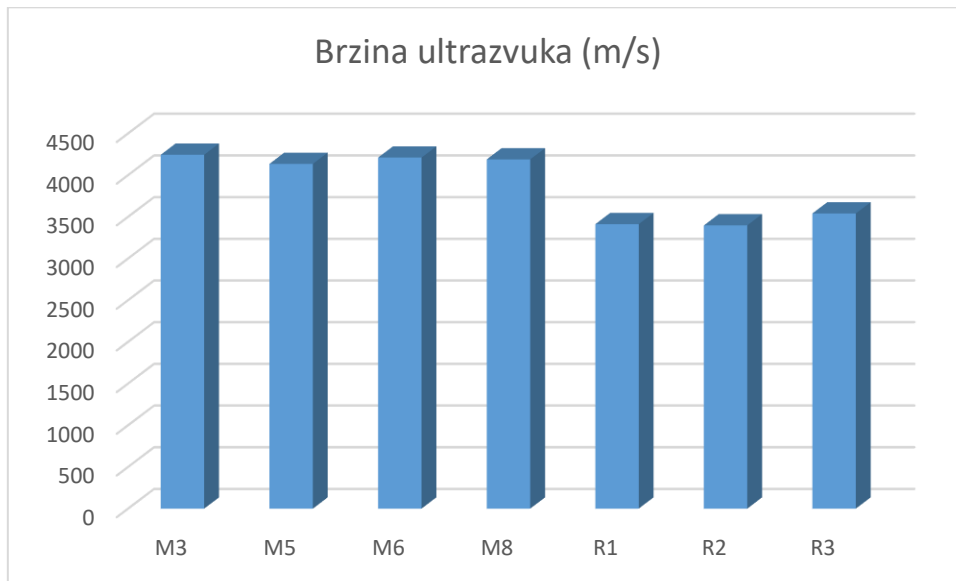
### 8.1.2. Rezultati ultrazvučnog ispitivanja

Ispitivani su uzorci UHPC betona u obliku prizmi dimenzija 40x40x160 mm i kocke dimenzija 150x150x150 mm nakon 28 dana od mješanja. U tablici su prikazani rezultati ispitivanja ultrazvukom. Najveću izmjerenu brzinu ultrazvuka daje mješavina M3 sa dodatkom metakaolina, letećeg pepela u kojoj je za agregat korištena sitnija frakcija kvarcnog pijeska. Najmanju brzinu ultrazvuka nam je pokazala mješavina R2 za koju su korišteni dodatci metakaolin, silikatna prašina te agregat od eruptivca veličine frakcije 0-2 mm. Silikatna prašina i metakaolin imaju sitnije čestice od letećeg pepela, pa zbog smanjene količine zraka između čestica smanjuju i vodocementni faktor te čine gušći UHPC beton. Iz priloženih rezultata vidimo da su mješavine s preposavljenom manjom gustoćom čestica usred svojih dodataka postigle veće brzine kod ultrazvučnog ispitivanja. Kod usporedbe utjecaja agregata i veličine njegove frakcije na brzinu ultrazvučnih valova, gledajući mješavine M3 i M8 s različitim veličinama zrna kvarcnog agregata možemo zaključiti da nema velike razlike u dobivenim iznosima brzina.

Tablica 13. Dobiveni rezultati metodom ultrazvuka

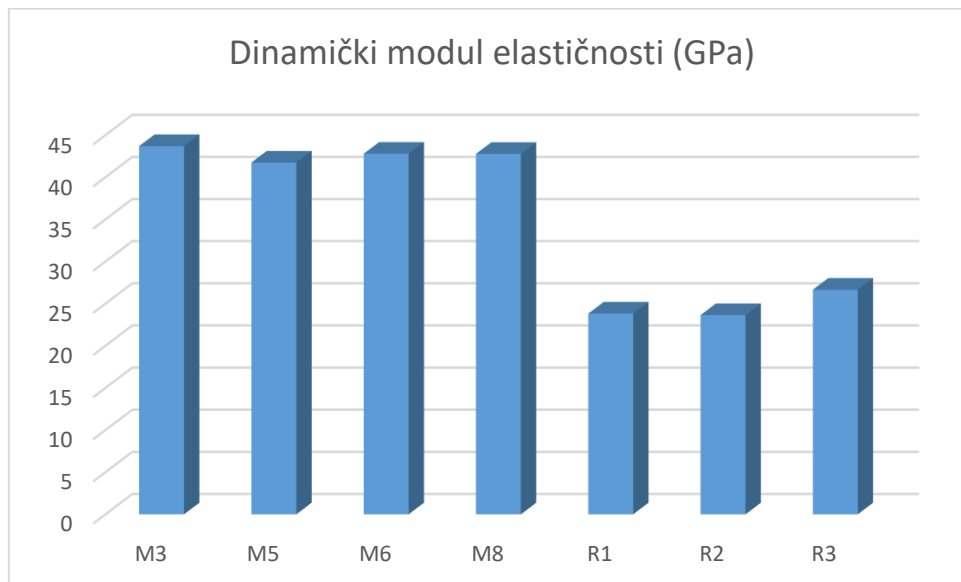
Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost	Vrijeme ultrazvuka (us)	Brzina ultrazvuka (m/s)	Dinamički modul elastičnosti	Kvaliteta
M3	28.02.	27.03.	28	37,7	4244,03	43,95	Vrlo kvalitetan
M3	28.02.	27.03.	28	37,8	4232,80	43,54	
M3	28.02.	27.03.	28	37,7	4244,03	43,59	
Srednja vrijednost				37,7	4244,03	43,69	
M5	07.03.	03.04.	28	38,8	4123,71	41,58	Vrlo kvalitetan
M5	07.03.	03.04.	28	38,8	4123,71	41,26	
M5	07.03.	03.04.	28	38,4	4166,67	42,38	
Srednja vrijednost				38,7	4134,37	41,74	
M6	07.03.	03.04.	28	37,9	4221,64	43,13	Vrlo kvalitetan
M6	07.03.	03.04.	28	38,1	4199,48	42,69	
M6	07.03.	03.04.	28	37,9	4221,64	42,55	
Srednja vrijednost				38	4210,53	42,79	
M8	11.04.	08.05.	28	37,9	4221,64	43,13	Vrlo kvalitetan
M8	11.04.	08.05.	28	38,6	4145,08	41,75	
M8	11.04.	08.05.	28	38	4210,53	43,43	
Srednja vrijednost				38,2	4188,48	42,77	
R1	16.11.	13.12.	28	46,6	3433,48	23,81	Kvalitetan
R1	16.11.	13.12.	28	46,7	3426,12	24,06	
R1	16.11.	13.12.	28	47,3	3382,66	23,57	
Srednja vrijednost				46,9	3411,51	23,82	
R2	16.11.	13.12.	28	47,3	3382,66	23,47	Kvalitetan
R2	16.11.	13.12.	28	47,2	3389,83	23,62	
R2	16.11.	13.12.	28	46,9	3411,51	23,82	
Srednja vrijednost				47,1	3397,03	23,64	
R3	16.11.	13.12.	28	45,3	3532,01	26,45	Vrlo kvalitetan
R3	16.11.	13.12.	28	45,3	3532,01	26,57	
R3	16.11.	13.12.	28	44,9	3563,47	26,92	
Srednja vrijednost				45,2	3539,82	26,65	

Grafički prikaz rezultata:



**Slika 28. Grafikon brzina ultrazvuka**

Iz brzine ultrazvuka može se izračunati dinamički modul elastičnosti betona. Najveći modul elastičnosti ima mješavina M3 dok najmanji modul elastičnosti ima mješavina R2.



**Slika 29. Grafikon dinamičkog modula elastičnosti**

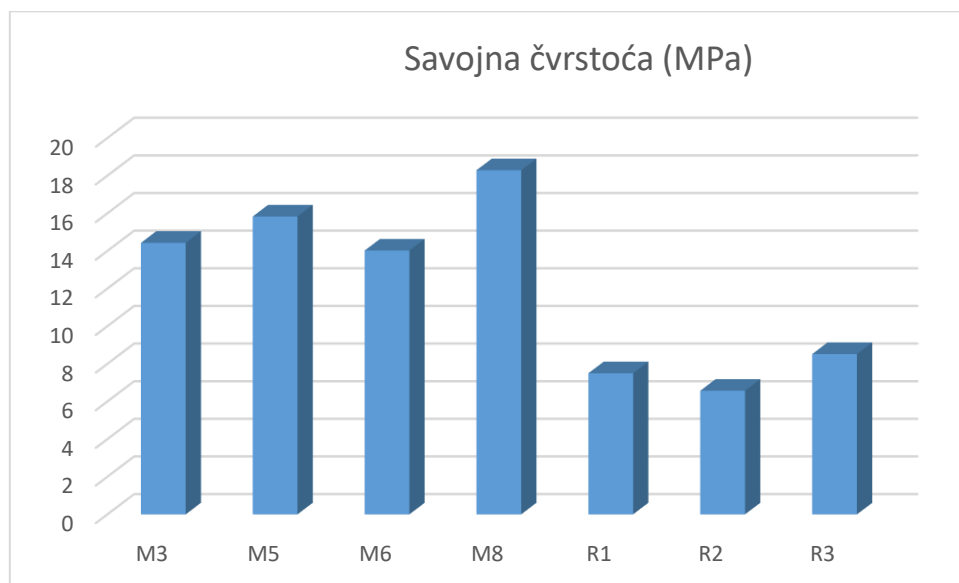
### 8.1.3. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće

Savojna čvrstoća je ispitana u preši na uzorcima UHPC betona koji se tretiraju kao proste grede raspona L i na uzorcima u obliku kocki. Uzorci se postepeno opterećuju do loma. Iz prikazanih rezultata možemo uočiti kako najveću savojnu čvrstoću daje uzorak u obliku kocke M8 koji sadrži kvarcni pijesak veće frakcije, a dodatci su mu metakaolin i leteći pepeo. Što se tiče uzoraka u obliku prizme dva uzorka s agregatom od eruptivca nam daju najnižu i najvišu čvrstoću na savijanje. Mješavina M5 koja kao dodatak sadržava metakaolin i leteći pepeo daje najvišu čvrstoću, a mješavina R2 koja umjesto letećeg pepela sadržava silikatnu prašinu daje najnižu čvrstoću stoga možemo zaključiti da savojna čvrstoća uvelike ovisi o količinama i omjerima dodataka te samom mješanju i pripremi smjese.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće

Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost	Masa (g)	Gustoća betona (kg/m <sup>3</sup> )	ft(MPa)
M3	28.02.	27.03.	28	624,7	2,44	13,3
M3	28.02.	27.03.	28	621,4	2,43	14,59
M3	28.02.	27.03.	28	620,3	2,42	15,41
Srednja vrijednost						14,43
M5	07.03.	03.04.	28	625,9	2,44	16,44
M5	07.03.	03.04.	28	621,1	2,43	14,52
M5	07.03.	03.04.	28	624,9	2,44	16,54
Srednja vrijednost						15,83
M6	07.03.	03.04.	28	619,5	2,42	14,22
M6	07.03.	03.04.	28	619,7	2,42	15,15
M6	07.03.	03.04.	28	611,22	2,39	12,69
Srednja vrijednost						14,02
M8	11.04.	08.05.	28	618	2,42	18,06
M8	11.04.	08.05.	28	602,6	2,43	18,39
M8	11.04.	08.05.	28	615,3	2,45	18,41
Srednja vrijednost						18,29
R1	16.11.	13.12.	28	518	2,02	6,25
R1	16.11.	13.12.	28	524,87	2,05	9,44
R1	16.11.	13.12.	28	526,7	2,06	6,81
Srednja vrijednost						7,50
R2	16.11.	13.12.	28	525	2,05	7,14
R2	16.11.	13.12.	28	526,2	2,06	6,3
R2	16.11.	13.12.	28	524	2,05	6,27
Srednja vrijednost						6,57
R3	16.11.	13.12.	28	543	2,12	8,85
R3	16.11.	13.12.	28	545,4	2,13	8,2
R3	16.11.	13.12.	28	542	2,12	8,5
Srednja vrijednost						8,52

Grafički prikaz rezultata ispitivanja savojne čvrstoće:



**Slika 30. Grafikon rezultata ispitivanja savojne čvrstoće**

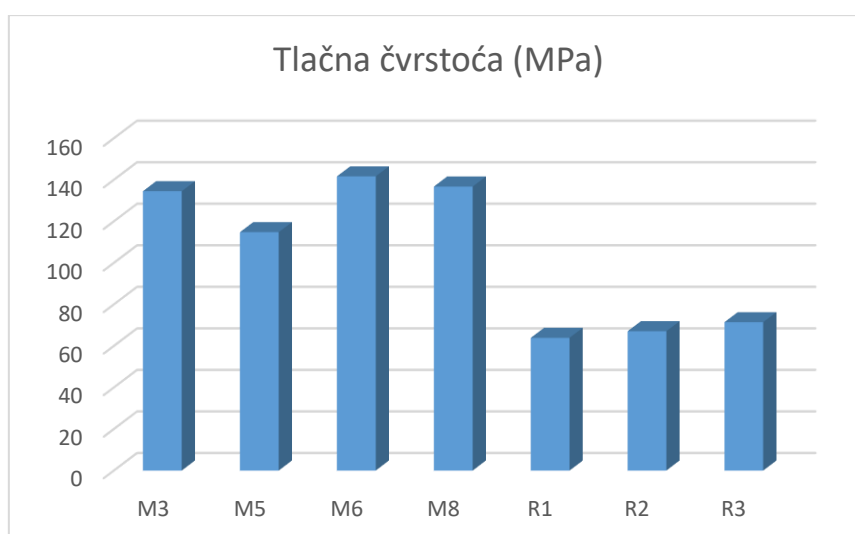
#### 8.1.4. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Poslje ispitivanja savojne čvrstoće ostale su dvije polovice uzorka na kojima je testirana tlačnu čvrstoću tj. čvrstoću na pritisak. Iz dobivenih rezultata je vidljivo da najveće čvrstoće postiže mješavina M6 sa dodatkom metakaolina, letećeg pepela s agregatom od vapnenca frakcije 0-2 mm. Radi se o kombinaciji dodataka finijeg mliva kao što je metakaolin i dodataka s manjom finoćom poput letećeg pepela. Usporedbom mješavina s istim agregatom različite frakcije možemo vidjeti kako uzorci s većom frakcijom agregata postižu nešto više tlačne čvrstoće. Mješavine R1, R2 i R3 s kraćim vremenom mješanja i manjom količinom veziva postigle su niže čvrstoće.

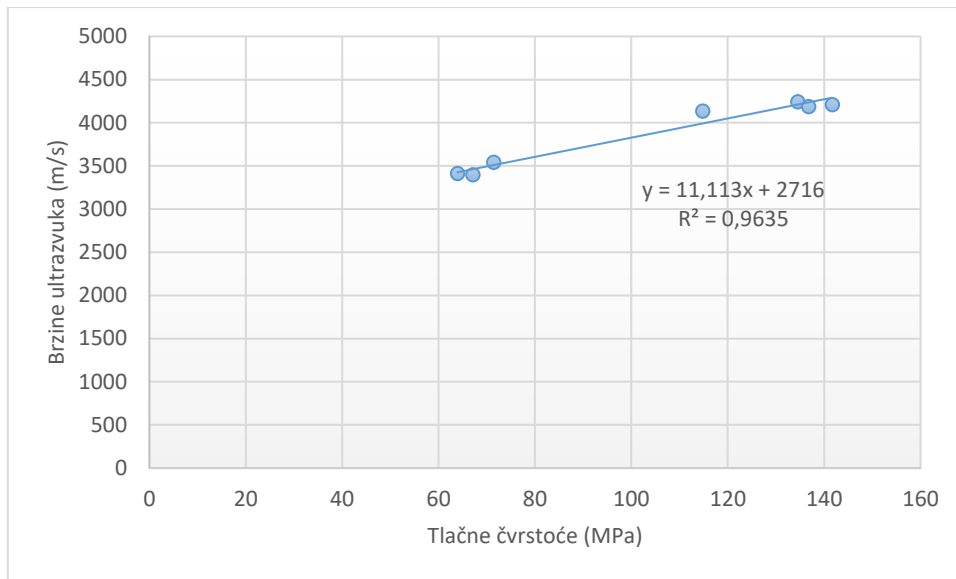
Tablica 15. Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća

Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost	Masa (g)	Gustoća betona (kg/m <sup>3</sup> )	fc(MPa)	fc(MPa)	fc sr(MPa)
M3	28.02.	27.03.	28	624,7	2,44	132,03	132	132,02
M3	28.02.	27.03.	28	621,4	2,43	137,92	138,11	138,02
M3	28.02.	27.03.	28	620,3	2,42	130,28	136,71	133,5
Srednja vrijednost						134,51		
M5	07.03.	03.04.	28	625,9	2,44	112,19	114,19	113,19
M5	07.03.	03.04.	28	621,1	2,43	113,78	113,59	113,685
M5	07.03.	03.04.	28	624,9	2,44	114,76	120,17	117,465
Srednja vrijednost						114,78		
M6	07.03.	03.04.	28	619,5	2,42	143,69	146,12	144,905
M6	07.03.	03.04.	28	619,7	2,42	135,01	148,96	141,985
M6	07.03.	03.04.	28	611,22	2,39	129,99	146,17	138,08
Srednja vrijednost						141,66		
M8	11.04.	08.05.	28	618	2,42	140,6	140,95	140,78
M8	11.04.	08.05.	28	602,6	2,43	140,21	140,99	140,6
M8	11.04.	08.05.	28	615,3	2,45	125,78	131,9	128,84
Srednja vrijednost						136,74		
R1	16.11.	13.12.	28	518	2,02	68,56	59,38	63,97
R1	16.11.	13.12.	28	524,87	2,05	59,26	66,25	62,755
R1	16.11.	13.12.	28	526,7	2,06	62,82	67,17	64,995
Srednja vrijednost						63,91		
R2	16.11.	13.12.	28	525	2,05	63,03	65,7	64,365
R2	16.11.	13.12.	28	526,2	2,06	70,06	70,69	70,375
R2	16.11.	13.12.	28	524	2,05	65,22	67,86	66,54
Srednja vrijednost						67,09		
R3	16.11.	13.12.	28	543	2,12	71,07	72,38	71,725
R3	16.11.	13.12.	28	545,4	2,13	69,77	73,03	71,4
R3	16.11.	13.12.	28	542	2,12	70,41	71,9	71,155
Srednja vrijednost						71,43		

Grafički prikaz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće:



Slika 31. Grafikon rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće



**Slika 32. Grafikon ovisnosti brzine ultrazvuka o tlačnoj čvrstoći**

Na grafikonu je prikazan utjecaj tlačne čvrstoće na brzinu ultrazvuka u UHPC uzorcima, te je dobiven koeficijent korelacije u iznosu od 0,9635.



## 9. ZAKLJUČAK

Betoni ultravisokih performansi imaju izrazito visoku čvrstoću i žilavost koje omogućuju projektiranje konstrukcija koje se odlikuju lakoćom, velikim rasponima te potrebnom krutoćom. Također još jedna od bitnijih primjena betona ultravisokih performansi se javlja u obliku ojačanja, nadogradnji postojećih građevina te raznim popravcima.

U ovom radu promatran je utjecaj agregata, mješanja i mineralnih dodataka na fizikalno-mehanička svojstva UHPC betona. Napravljene su mješavine s raznim kombinacijama agregata većih i manjih frakcija zrna uz dodatak mineralnih aditiva različitih finoća mliva. Mješavine uzoraka su izrađene i testirane u laboratoriju na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Ispitivanja su provedena na svježem betonu, te očvrsлом betonu koji je čuvan 28 dana u posebnim uvjetima temperature i vlažnosti. Na svježem betonu je testirana obradljivost, a na očvrsлом su testirane brzina ultrazvuka, savojna i tlačna čvrstoća.

Iz ispitivanja obradivosti svježih mješavina UHPC betona vidimo da sve mješavine koje sadrže metakaolin u kombinaciji sa letećim pepelom i silikatnom prašinom postižu promjer veći od 200 mm i spadaju u tekuću konzistenciju. Kvarcni agregat daje najbolji rezultat obradivosti u ovom eksperimentu. Agregat sitnije frakcije kvarcnog pijeska od 0-2mm daje bolju obradivost od krupnije frakcije 0,3-1 mm iz čega možemo zaključiti da sitnija zrna povoljnije utječu na obradivost. Također mješavina M6 sa vapnenačkim agregatom čija su zrnca takva da poboljšavaju obradivost postigla je približno iste rezultate kao mješavina s kvarcnim agregatom. Mješavine sa dužim vremenom mješanja su postigle nešto bolje rezultate.

Rezultati ispitivanja ultrazvučne brzine nam govore da su uzorci s metakaolinom i letećim pepelom kao dodatkom postizali nešto veće brzine. Mješavina M3 koja sadrži agregat od sitnije frakcije kvarcnog pijeska postigla je najveću brzinu. Mješavina R2 koja sadržava agregat od eruptivca uz dodatke metakolina i silikatne prašine postigla je najmanju brzinu. Mješavina M3 ima veću srednju gustoću od mješavine R2 stoga su ovakvi rezultati iznenađujući. Što se tiče utjecaja agregata pri usporedbi mješavina s istim agregatom različite frakcije postignute su slične brzine ultrazvuka.

Pri ispitivanju savojne i tlačne čvrstoće uzoraka vidimo da uzorci koji sadržavaju dodatak metakaolina i letećeg pepela daju najveće čvrstoće. Najveću savojnu čvrstoću postigli smo s većom frakcijom zrna kvarcnog pijeska u iznosu od 18,29 Mpa, dok smo najveću tlačnu čvrstoću postigli s vapnenačkim agregatom. Postignuta je srednja tlačna čvrstoća u iznosu od 141,66 MPa. Mješavine koje sadržavaju niži udio veziva, veći vodocementni faktor te su kraće miješane postigle su znatno niže rezultate čvrstoća na savijanje i pritisak.

Iz priloženog možemo zaključiti kako su za dobijanje najboljih rezultata korišteni dodatci metakaolina i letećeg pepela te agregati od kvarcnog pijeska i vapnenca koji su postizali najveće obradivosti i čvrstoće. Količina veziva u smjesi je imala veći utjecaj na čvrstoću nego sama vrsta agregata zbog stvaranja guste betonske matrice. Također možemo zaključiti kako je za postizanje optimalne mješavine i najpovoljnijeg razvijanja čvrstoće potrebno duže vrijeme miješanja.

## LITERATURA

1. Aïtcin, P.-C. (1998). High-performance concrete. London: E & FN Spon.
2. Blais, P. Y. i Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge—world's first reactive powder concrete structure. *PCI Journal*, 44(5), 55-71.
3. Brühwiler, E. i Denarié, E. (2008). Rehabilitation of concrete structures using ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete*, 895-902.
4. Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Fröhlich, S. (2014). Ultra-high performance concrete: Fundamentals, design, examples. Berlin: Ernst & Sohn.
5. Habel, K., Viviani, M., Denarié, E., Brühwiler, E. (2006). Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1362-1370.
6. Hooton, R. D. (1993). Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *ACI Materials Journal*, 90(2), 143-151.
7. Justice, J. M., Kurtis, K. E. (2007). Influence of metakaolin surface area on properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 292-298.
8. Larrard, F., Sedran, T. (1994). Optimization of ultra-high performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 994-1009.
9. Malhotra, V. M., Mehta, P. K. (2002). High-performance, high-volume fly ash concrete: Materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories. *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.*
10. Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
11. Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
12. Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete* (4th ed.). Longman.
13. Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y. L. (2001). Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1291-1300.
14. Richard, P., Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511.

15. Sabir, B. B., Wild, S., Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441-454.
16. Thomas, M. D. A. (2007). Optimizing the use of fly ash in concrete. Portland Cement Association.
17. Wild, S., Khatib, J. M., Jones, A. (1996). Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticized metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1537-1544.
18. Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S. (2011). Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. *Materials and Structures*, 45, 309-324.
19. Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 55, 383-394.

## 10. POPIS SLIKA

Slika 1. Most Sherbrooka.....	6
Slika 2. Scotia Plaza, Toronto.....	7
Slika 3. University of Southern Denmark, Odense .....	9
Slika 4. Vukovarski vodotoranj .....	11
Slika 5. Silikatna prašina.....	13
Slika 6. Leteći pepeo.....	14
Slika 7. Metakaolin .....	15
Slika 8. Sastav i struktura zgre iz visokih peći .....	16
Slika 9. Mljevena granulirana zgura .....	16
Slika 10. Krupni agregat .....	23
Slika 11. Riječni šljunak .....	24
Slika 12. Vapnenački agregat .....	24
Slika 13. Kvarcni pjesak .....	25
Slika 14. Bazalni kamen .....	26
Slika 15. Grafički prikaz granulometrijskog sastava standardnog kvarcnog pijeska 0-2 mm.	32
Slika 16. Granulometrijski sastav kvarcnog pijeska za fuge granulacije 0,3-1,0 mm korišten u mješavini M8 .....	33
Slika 17. Grafički prikaz granulometrijskog sastava agregata od vapnenca veličine frakcije 0-2mm .....	34
Slika 18. Materijali korišteni u eksperimentu .....	41
Slika 19. Mješalica za mort.....	42
Slika 20. Laboratorijska miješalica za beton .....	42
Slika 21. Vibrastol .....	43
Slika 22. Uzorci UHPC na vibrostolu.....	43
Slika 23. Ispitivanje obradljivosti na potresnom stolu.....	44
Slika 24. Ispitivanje savojne čvrstoće .....	47
Slika 25. Ispitivanje tlačne čvrstoće.....	47
Slika 26. Ispitivanje obradljivosti .....	48
Slika 27. Grafikon rezultata ispitivanja obradljivosti .....	49
Slika 28. Grafikon brzina ultrazvuka .....	51
Slika 29. Grafikon dinamičkog modula elastičnosti .....	51
Slika 30. Grafikon rezultata ispitivanja savojne čvrstoće .....	53

Slika 31. Grafikon rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće.....	54
Slika 32. Grafikon ovisnosti brzine ultrazvuka o tlačnoj čvrstoći .....	55

## 11. POPIS TABLICA

Tablica 1. Tipski sastav 42,5 N CEM I 42,5 R .....	29
Tablica 2. Tipška Svojstva 42,5 N CEM I 42,5 R .....	30
Tablica 3. Granulometrijski sastav standardnog kvarcnog pijeska.....	32
Tablica 4. Granulometrijski sastav kvarcnog pijeska 0,3-1,0 mm.....	33
Tablica 5. Granulometrijski sastav agregata od vapnenca veličine frakcije 0-2mm .....	34
Tablica 6. Tehničke informacije o MasterGlenium ACE 770 .....	35
Tablica 7. Karakteristike metakaolina .....	36
Tablica 8. Fizičke karakteristike Microsit® M10 .....	37
Tablica 9. Tehničke specifikacije MEYCO® MS 610 .....	38
Tablica 10. Recepture istraživanih mješavina .....	40
Tablica 11. Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala .....	46
Tablica 12. Rezultati ispitivanja obradljivosti .....	48
Tablica 13. Dobiveni rezultati metodom ultrazvuka.....	50
Tablica 14. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće .....	52
Tablica 15. Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća .....	54

## 12. PRILOZI

Naziv:	M3			Datum:	28.2.2023
Projekt:	diplomski rad				
Proračun sastava za 1m <sup>3</sup>					
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:	M5			Datum:	6.3.2023
Projekt:	diplomski rad				
Proračun sastava za 1m <sup>3</sup>					
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	eruptivac 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:	M6			Datum:	6.3.2023
Projekt:	diplomski rad				
Proračun sastava za 1m <sup>3</sup>					
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	vapnenac 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				
				dodatak vode (upijanje 2.22%)	
			22,8		

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				

SASTAV [g]	R1 (kvarcni agregat)	R2 (agregat eruptivac)
Cement	550	550
Voda	345,8	345,8
Agregat	747.6	747.6
Silikatna prašina	180	180
Metakaolin	180	180
Superplastifikator	13,7	13,7

Uzorak R3:

MIX za: (litara) 1,0 Masa (g)

Receptura		
Cement	0,650	650,0
Silika	0,230	230,0
Metakaolin	0,230	230,0
Zrak		
Superplastifikator	0,017	16,7
Voda	0,355	355,2
Pijesak	0,517	517,1
		1,999