

Utjecaj dodatka na svojstva betona izloženog habanju

Milišić, Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:982113>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-22**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Krešimir Milišić

Split, 2022.

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

Krešimir Milišić

**Utjecaj dodataka na svojstva betona izloženog
habanju**

Diplomski rad

Split, 2022.

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

STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA

KANDIDAT: Krešimir Milišić

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083215266

KATEDRA: Katedra za građevinske materijale

PREDMET: Građevinski materijali 2

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Utjecaj dodataka na svojstva betona izloženog habanju

Opis zadatka: Zadatak diplomskog rada je istražiti utjecaj dodataka (silikatne prašine, vlakana i kvarcnog pijeska) na fizikalno-mehanička i trajnosna svojstva betona izloženog abraziji i kloridima. Potrebno je prikazati mehanizam trošenja betona usred abrazije, principe projektiranja sastava betona uključivanjem trajnosti elemenata, te relevantne metode ispitivanja.

Projektirati sastav betona prema razredu izloženosti XM i XD – beton izložen habanju i korozija betona uzrokovana kloridima koji nisu iz morske vode. Provesti relevantna laboratorijska ispitivanja betona u svježem i čvrstom stanju. Sve dobivene rezultate potrebno je analizirati i dati najvažnije zaključke rada.

U Splitu, 07. ožujka 2022.

Voditelj Diplomskog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Komentor:

dr.sc. Ante Buzov

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

Zahvala

Zahvaljujem se mojim roditeljima, bratu, sestri i svom malom nećaku koji su tijekom mog školovanja bili moralna i emocionalna podrška. Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Goranu Baloeviću na uzajamnom trudu i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Utjecaj dodataka na svojstva betona izloženog habanju

Sažetak:

Habanje je pojava trošenja materijala. Razlog tome je kretanje različitih promjena opterećenja kod industrijskih podova i kolnika prometnica. Kloridi koji nastaju, a da nisu od utjecaja morske vode su kemijski produkti kao što su zaštita ceste od mraza, kemijski premazi i kloridi koje izlaze iz pokretnih strojeva. Kloridi imaju negativan utjecaj na njihov prodor u cementi kamen koji kao rezultat daje brže trošenje površinske podloge. Cilj je proučiti kako dodatkom kemijskih i mineralnih dodataka se pospješuje otpor na habanje. U ovom će radu biti navedeni faktori koji utječu na otpornost na habanje. Kao rezultat ispitivanja koristit će se šest različitih mješavina koji će nam predočiti pozitivna i negativna svojstva betona na otpornost na habanje.

Ključne riječi:

kloridi, beton, mineralni dodaci, habanje, kavitacija, trajnost, metakaolin, silicijska prašina, polipropilenska vlakna, staklena vlakna

Abstract:

Fraying is the phenomenon of the wear material. The reason is moving of the different changes of load at the industrial floors and pavements. Chlorides, which appear and that are not caused by sea water are chemical products, just as the road frost protection, chemical coatings and chlorides which come out from moving vehicles. Chlorides have negative influence on their penetration into the cement stone, which gives faster wearing of surface, as the result. The goal is to study how, water chemical additions and mineral additions to speed up fraying resistance. In this paper, listed factors which influence fraying resistance are going to be mentioned. As a testing result, it is going to be used six different mixtures which are going to show positive and negative concrete properties to the fraying resistance.

Key words:

chlorides, concrete, mineral additions, fraying, cavitation, durability, metakaolin, silica fume, polypropylene fibers, glass fibers

Sadržaj

1. UVOD	1
2. PROJEKTIRANJE SASTAVA BETONA	3
2.1. Obradivost svježeg betona	6
2.2. Svojstva svježeg betona	7
2.3. Svojstva u čvrstom stanju	8
2.3. Dodaci betonu	9
2.3.1. Mineralni dodaci	10
2.3.2. Kemijski dodaci	14
2.4. Trajnost betona	15
3. METODE ISPITIVANJA SVJEŽEG BETONA	22
3.1. Metoda određivanja konzistencije slijeganja	22
3.2. Metoda određivanja konzistencije razastiranjem	23
4. METODE ISPITIVANJA BETONA NAKON STVRDAVANJA	24
4.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće	24
4.2. Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa	26
4.3. Ispitivanje zaprimljenosti vodljivosti klorida kroz beton	27
4.4. Ispitivanje otpornosti betona na habanje - Bohmeov test	28
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	29
5.1. Proračun etalonske mješavine.....	29
5.2. Materijali.....	31
5.3. Cement.....	32
5.4. Agregat	33
5.5. Aditiv Glenium Sky 658	37
5.6. Metakloin – Metaver	38
5.7. Silicijska prašina – Meyco	39
5.8. Polipropilenska vlakna i staklena vlakna.....	40
5.9. Sastav laboratorijskih mješavina.....	41
6. REZULTATI ISPITIVANJA SVJEŽEG BETONA	43
6.1. Rezultati ispitivanja slijeganjem.....	43
6.2. Rezultati ispitivanja razastiranjem	45
7. REZULTATI ISPITIVANJA U OČVRSLOM STANJU	47
7.1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće	47
7.2. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvuka	49

7.3. Rezultati ispitivanja ASCM 1760	51
7.4. Rezultati ispitivanja habanjem	53
8. ZAKLJUČAK	56
9. LITERATURA	57
10. PRILOZI	59

1. UVOD

Beton (franc. *béton* < starofranc. *Betun* : blato, šljunak, drobljenac < lat. *bitumen*) je kompozit koji se najviše koristi, od izgradnje mostova do izgradnje zgrada, od prometnih površina do industrijskih objekata. Osnovne komponente za izradu betona su cement, agregat i voda, a često za poboljšavanje svojstava u svježem i čvrstom stanju primjenjuje se različiti kemijski i mineralni dodaci. Zrna stijene u betonu čine približno 65 -75 % volumena, dok količine cementa na 1 m³ betona je između 200 do 400 kg ovisno o zahtjevima betona. Spoj cementa i voda tvore pastu, a kasnije cementni kamen koji sljepljuje zrna agregata, te zrak koji je zahvaćen miješanjem. Količina cementa na 1 m³ betona je između 200 do 400 kg ovisno o zahtjevima betona. Beton se proizvodi izravno na gradilištu ili u betonarama koji se putem transporta dopremaju na gradilište. Prilikom ugradnje, beton treba biti projektiran pri odabranim zahtjevima i u skladu s pravilima. Njegovanje betona nakon ugradnje je bitno zbog mogućnosti nastajanja deformacija betona. Ispravnom njegovom betona postiže se zahtijevana svojstva prema specifikaciji. Dodavanjem mineralnih i kemijski dodataka betonu se može smanjiti segregacija, usporiti vezanje, poboljšati tlačna čvrstoća, povećati otpornost na habanje i dr. Beton prema obujmom masi dijelimo na: lagane betone i teške betone. Lagani beton se primjenjuje pri sanacijskim radovima kada se ne smije povećati vlastita težina konstrukcijskog elementa (npr. pjenobeton koji ima obujamsku masu 400-600 (kg/m³). Teški betoni (preko 2000 kg/m³) se koriste pri prostorima koji zahtijevaju zaštitu od radijacije, bolnice, nuklearne elektrane. Jedno od glavnih čimbenika koji utječu na trajnost betona je otpornost na habanje.

Otpornost na habanje je najvažnija karakteristika betonski podloga. U tipične primjere habanja betona ubrajaju se industrijski podovi i cestovni kolnici s velikom gustoćom prometa. Industrijski podovi su dijelovi industrijskih postrojenja, kao što su skladišta, magazini, zračne luke, željeznički kolodvori, parkirališta itd. Najčešći uzroci pojave prekomjernog habanja industrijskih podova su: pretjerano izlaganje destruktivnom djelovanju vozila, koje se događa kod pogona gdje se za unutarnji transport koriste viličari na tvrdim kotačima te posebno na mjestima gdje viličari mijenjaju smjer ili se okreću, i/ili nedovoljna čvrstoća betona. Kod kolničkih konstrukcija cestovni gornji završni dio konstrukcije izravno preuzima opterećenje od prometa te ga prenosi na donje dijelove konstrukcije. Budući da je izravno izložen prometnom opterećenju, nakon nekog vremena dolazi do trošenja, odnosno habanja zastora. Kako bi povećali trajnost betonskih podnih površina, trebamo osigurati dobru otpornost betona na habanje.

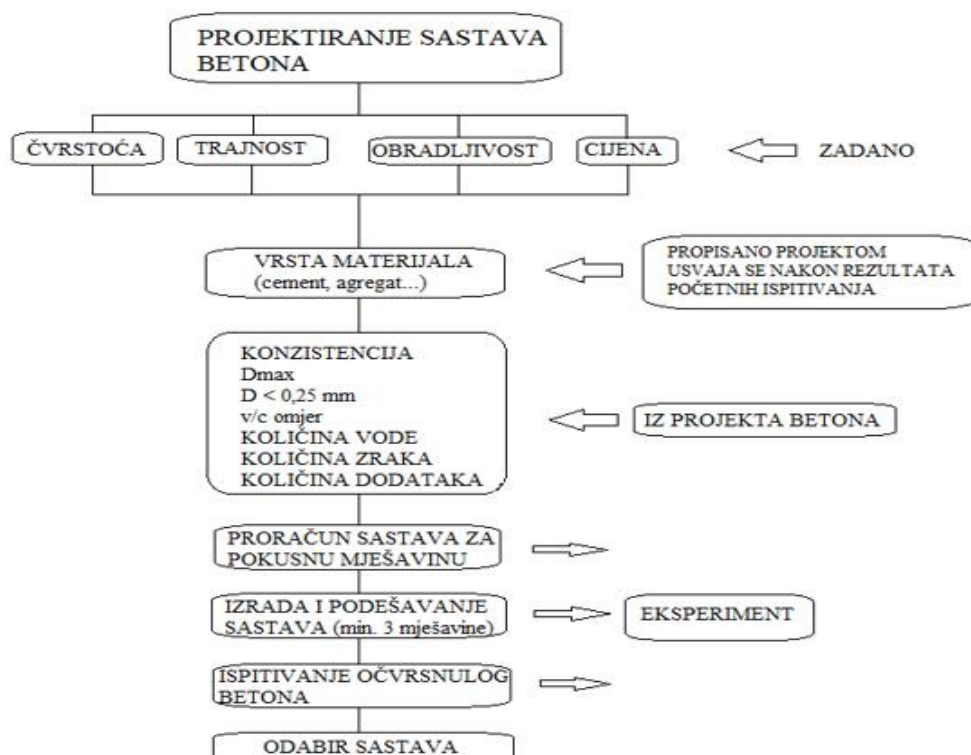
Cilj ovog rada je projektirati sastav betona izložen abraziji i kloridima na svojstva betona koji se koristi u konstrukcijama koje se ne nalaze u morskom okruženju. U laboratoriju je napravljeno šest različitih mješavina. Provedena su standardna ispitivanja betona u svježem stanju slijeganje i razastiranje. Metode koje su se koristile u očvrslom stanju su tlačna čvrstoća, brzina ultrazvuka, migracija klorida kroz beton i habanje. Sva ispitivanja provedena su sukladno propisanim normama.

2. PROJEKTIRANJE SASTAVA BETONA

Projektiranje sastava betona sastoji se od dvaju ključnih koraka :

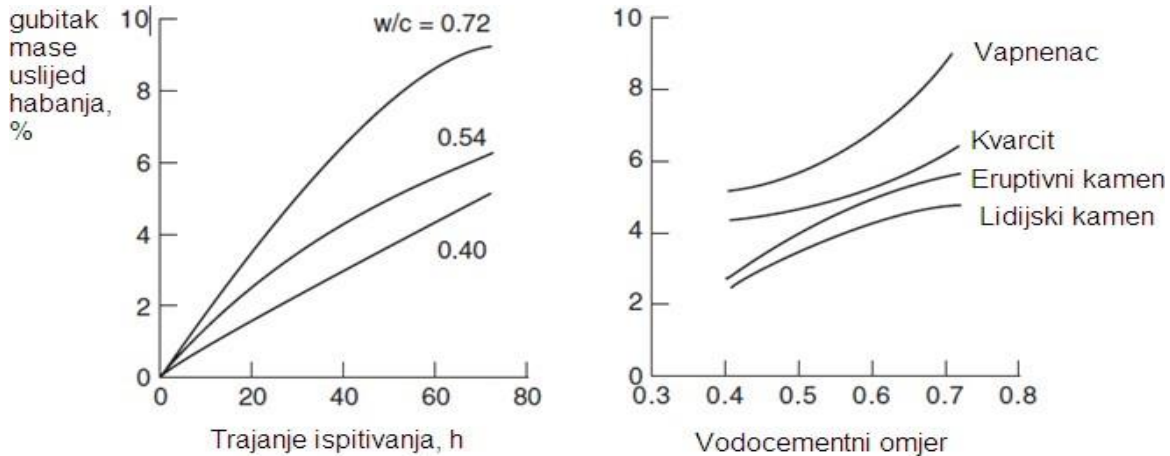
- 1) odabrati komponente sastava betona
- 2) odabir njihovog relativnog omjera da bi zadovoljio zadane zahtijevane uvjete (obradivosti , trajnost i čvrstoću).

Projektirani beton bira se tako da zadovolji zadane zahtjeve za stanje u svježem i čvrstom stanju, uključujući konzistenciju, gustoću, trajnost, čvrstoću, zaštitu ugrađenog čelika od korozije i to uzimajući u obzir proizvodni i odabrani postupak izvedbe betonskih radova. Projektirani beton se uvijek nalazi u utjecaju različitih okolina, atmosferilija koje mogu utjecati pozitivno, isto tako i negativno. Djelovanjem okoline znatno utječe na vijek trajanja konstrukcije i stabilnosti same konstrukcije, te samim time i sigurnosti za okolinu. Beton izložen kemikalijama, velikim temperatura, mrazu mijenja svoja svojstva. Postoje različita gledanja određivanja optimalnog sastava betonske mješavine. Projektiranje sastava betona još se uvijek temelji najvećim dijelom na iskustvu. Na slici 2. je prikaz izrade projektiranja pokusnih mješavina. [1]



2. Prikaz projektiranje sastava betona [1]

Prilikom projektiranja betona izložen habanju preporučuju se slijedeće mjere. Općenito pojam habanje je mjera trošenja materijala, kao u slučaju trošenja kolnika ili industrijskih podova. Čvrsta cementna pasta nema veliku otpornost na trenje. Ukoliko je beton izložen trenju do kojeg dolazi u ponavljajućim ciklusima opterećenja, životni vijek betona može se znatno skratiti.



Slika 2.1. Ovisnost gubitka mase uslijed habanja o v/c omjeru [6]

Iz prethodne slike vidljivo je da smanjenjem ili povećanjem v/c faktora u ovisnosti s otpornosti habanja. Smanjenjem v/c faktora smanjuje se trošenje materijala, dok povećanjem v/c faktora dolazi do povećanja trošenja materijala. Beton otporan na habanje mora imati čvrstoću veću od 30 MPa. Takav beton se može dobiti pravilnom granulacijom zrna do 16 mm i niskim v/c faktorom, te s najmanjim razredom konzistencije tokom ugradnje i obradivosti. Faktori koji utječu na kvalitetu otpornosti na habanje je prionjivosti veze cementa i agregata. Što je agregat tvrdi štiti mekaniju pastu, te je time i veza bolja. Pri odabiru agregata bolje je koristiti što veće zrno jer veće zrno daje veći otpor, ali je također time i krhko. Stoga pri odabiru agregata treba uzimati u obzir njegovu kvalitetu i žilavost. Agregat koji u sebi već sadrži vlagu iz okoline ima manju žilavost te je izložen krhkosti. Cement što je većeg razreda, veće je i čvrstoće te samim time i otporniji trošenju. Čimbenici koji ovise o kvaliteti veze agregata i cementa su šupljine koje se nalaze između njihove veze. Zahvaćene šupljine nastaju od zraka koji se tijekom miješanja i ugradnje betona uvlače u mješavinu. Takve šupljine negativno utječe na tlačnu čvrstoću i na trošenje materijala. Šupljine se mogu izbaci pravilnim vibriranje i pravilnom njegom betona.

Poboljšanje otpornosti na habanje može se unaprijediti dodavanjem veće količine veziva, tako će se poboljšati prionjivosti paste s cementnim kamenom, te reducirati kapilarne pore i šupljine. Također povećanjem zaštitnog sloja od 5-15 mm ovisno o razredu izloženosti. Otpornost se može povećati sa slojem agregata od eruptivca ili kvarca. Upotrebom superplastifikatora može se smanjiti udio vode, gdje će konzistencija betona biti zadovoljavajuća. Potrebnom za manjom količinom vodom smanjuje se također mogućnosti pojave šupljina. Rezultat toga je čvršća cementna pasta s boljom sposobnosti povezivanja agregata. Dodatkom nekih kemijski i mineralnih dodataka povećava se otpornost na habanje. Ispravnim njegovanjem betona isto se povećava njegova otpornost na habanje. Budući da je površina betona ta na kojoj dolazi do habanja, vrlo je važno osigurati dobro njegovanje kako ne bi došlo do isušivanja površine, čime bi ona postala manje otporna na habanje. Postoje i različite obrade površine betona koje poboljšavaju otpornost na habanje, npr. tekuća sredstva za obradu površina i razni premazi, ali i posebni završni slojevi koji se nanose na betonsku podlogu u cilju povećanja otpornosti na habanje (engl. dry shakes). [6]

U nastavku rada, u eksperimentalnom dijelu je prikaz odnosa rezultata korištenjem dodatka: metakaolina, kvarcnog pijeska, staklenih vlakna, polipropilenska vlakna i silicijske prašine.

2.1. Obradivost svježeg betona

Kada se govori o svojstvima svježeg betona, primarno se misli na njegovu konzistenciju. Kada se misli o njegovoj obradivosti smatra se da će se taj beton ispravno projektirati tako da će biti lagan za ugradnju i zbijen uz korištenje raspoložive opreme. Glavna svojstva koja mora imati beton tokom ugradnje su :

- Tečnost (fluidnost) mora biti dovoljno tekuć, ne smije biti previše vodenast, također i presuh.
- Zbijenost za vrijeme ugradbe mora se vibrirati kako bi zahvaćeni zrak izašao iz pora jer u slučaju zarobljenosti zraka nastaju pukotine.
- Segregacija –beton mora ostati homogenim. [2]

U tablici 2.1. je prikaz preporuke konzistencije prema vrsti konstruktivnog elementa

VRSTE KONSTRUKCIJE	PRIJEVOZNA SREDSTVA	KONZISTENCIJA SLIJEGANJEM (mm)
Slaboarmirani ili nearmirani temelji i blokovi	trakovi, posebne posude	10-50
Armirani temelji, zidovi, ploče, stupovi	pumpa, posuda na kranu	60-120
Jako armirani presjeci stupova i greda	pumpa, posuda na kranu	80-160
Kolničke ploče, industrijski podovi	trakovi, kamioni	10-50
Betoniranje pod vodom	pumpe cijevi	120-180
Masivni hidrotehnički betoni	trakovi, kamioni, silobusi	10-50
Zalijevanje sidara, podlijevanje ploča strojeva	posude	130-200

Tablica 2.1. Preporuka za odabir konzistencije prema vrsti konstrukcijskog elementa [2]

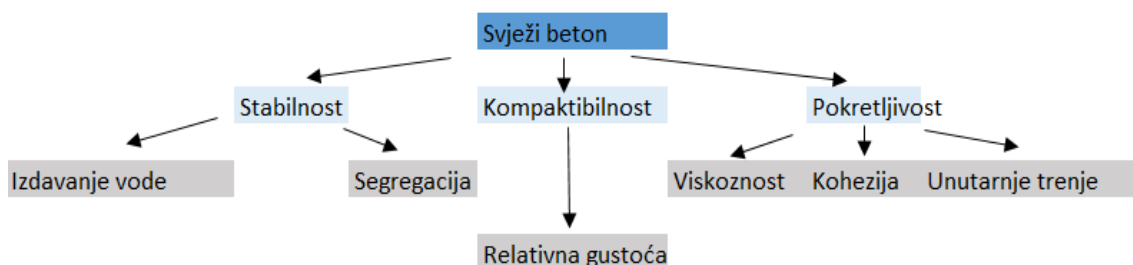
2.2. Svojstva svježeg betona

Svojstva svježeg betona utječu na odabiru potrebne mehanizacije za ugradnju te na njegova svojstva u krutom stanju. Beton u svježem stanju mora imati takva svojstva da omogućava jednostavno miješanje i transport, ugradnju, zbijanje i završnu obradu bez pojave segregacije i izdavanje vode. Također proces hidratacije mora početi u projektiranom vremensku roku kako bi se osigurala potrebna čvrstoća i ostali zahtjevi u krutom stanju.

Svježi beton treba zadovoljavati sljedeće zahtjeve:

- brza homogenizacija u miješalici
- pokretljivost pri prijevozu i ugradnji, bez unutrašnjeg razdvajanja mase, lagano zaobilaženje prepreka
- stabilnost u pogledu homogenosti pri prijevozu, ugradnji i zbijanju
- mala adhezija na kliznu otplatu odnosno cijev pumpe za prijenos betona
- dobra adhezija na podlogu
- dobra kompatibilnosti
- plastičnost za završnu obradu

Na svojstva svježeg betona utječu mnogi čimbenici kao fizička svojstva cementa i agregata, sastav betona, količina vode, miješanje betona i temperatura. [1]



Slika 2.2. Prikaz svojstva svježeg betona [1]

2.3. Svojstva u čvrstom stanju

Očvrсни beton sastoji se od morta, agregata i šupljina. Dio šupljina zahvaćen je miješanjem, a dio se može izvući upotrebom kemijskog dodatka aeranta. Početak vezivanja počinje u trenutku kontakta cementa i vode. Molekule vode obavijaju se oko čvrstih čestica cementa, te time dolazi do njihovog povezivanja u novonastale strukture gela i kristalne strukture. Hidratacija cementa se odvija u četiri faze:

- Raspršivanja čestica cementa u vodi
- Porast koncentracije iona u otopini i rast kristal
- Stvaranje produkta hidratacije
- Očvrsla hidratizirana cementna pasta [1]

Procesi kojima se odvija hidratacija cementa mogu se podijeliti u nekoliko kemijskih elemenata koji se odvijaju u različitim vremenskim intervalima u ovisnosti o prirodnim utjecajima i stanjem sustava. Ključni mehanizmi u procesu hidratacije su: otapanje, difuzija, rast, nukleracija, kompleksnost i adsorpcija. Hidratacijom cementa nastaje kompozit plosnatog oblika igličastih kristala koji se međusobno isprepliću i deformiraju, te samim time čine masu koja se naziva cementni gel. Među kristalima se nalaze male šupljine koje se nazivaju gel pore.

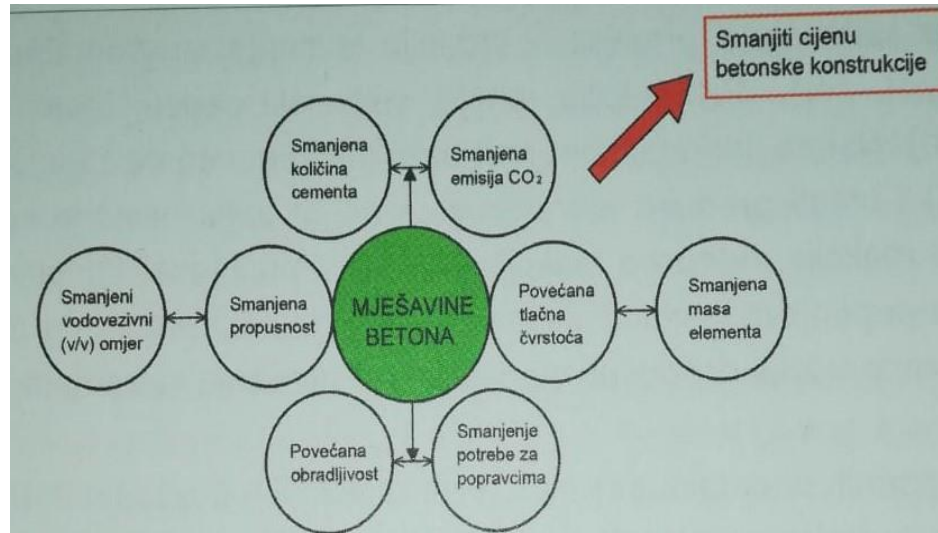
2.3. Dodaci betonu

Dodaci betonu su tvari koje se dodaju betonu radi poboljšavanja njegovih svojstava. Dodatke betona može razvrstati u dvije grupe one koje su porijeklom:

- Mineralne (silicijska prašina, zgura, leteći pepeo, metakaolin)
- Kemijske (usporivači, superplastifikatori, aeranti, inhibitor)

Proizvodnja i razvoj dodataka betonu započeli su početkom 1940 ih godina. Nakon početka proizvodnje dodatka betonu, tehnologija nije toliko napredovala, nisu se koristili dosljedni i precizni uređaji za ispitivanje i doziranje. Kao posljedica tome bilo je mnogo protivnika uporabi aditiva jer je bilo učestalih šteta na betonskim konstrukcija, koje su bile posljedica pogrešne primjene ili predoziranja dodatka koja bi u negativno smjeru djelovali na konstrukciju. Ovisno o vrsti dodatka moguće je poboljšati sljedeća svojstva:

- Povećanje obradivosti svježeg betona bez povećanja količine vode ili smanjena količina vode uz veću obradivosti
- Usporiti ili ubrzati vrijeme početka vezivanja
- Smanjiti ili spriječiti plastično skupljanje
- Smanjiti segregaciju
- Poboljšanjem pumpabilnosti
- Usporiti gubitak obradivosti
- Smanjiti smrzavanje svježeg betona
- Smanjiti razvoj topline hidratacije u mladom betonu
- Povećati čvrstoću (tlačnu, vlačnu, savojnu i prionjivosti)
- Povećati trajnost betona
- Smanjiti propusnost betona na plinove i tekućine
- Spriječiti štetno djelovanje alkalija
- Poboljšanjem veze starog i novog betona
- Povećanje otpornosti na udar i eroziju [1]

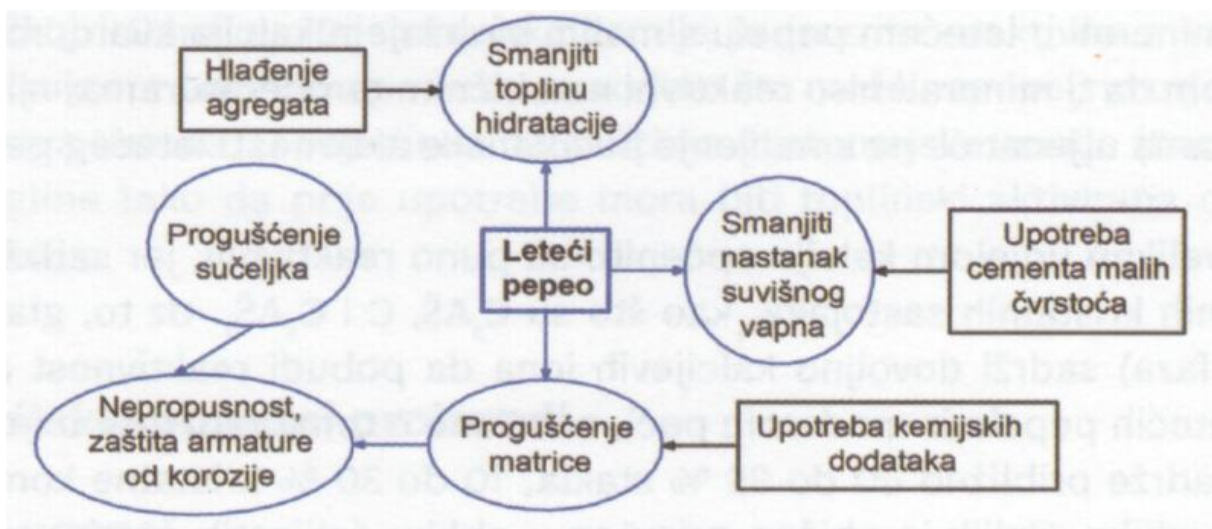


Slika 2.3 Uloga dodatka u betonu [1]

2.3.1. Mineralni dodaci

Leteći pepeo je sitni prah koji nastaje je u termoelektranama za vrijeme izgaranja ugljena u visokoj peći. Prema mineraloškom sastavu leteći pepeo može podijeliti u dvije grupe:

- Pepeo koji sadrži manje od 10% CaO koji nastaje izgaranjem antracita i bitumenskog ugljena
- Pepeo koji sadrži 15-40% CaO i uglavnom nastaje lignita i subitumenskog ugljena

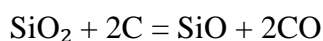


Slika 2.3.1. Djelovanje letećeg pepela na svojstva betona [1]

Zgura visoki peći je također otpadni materijal koja se dobije kao otpadni materijal iz proizvodnje sirovog željeza koji sadržava iste okside kao cement u drugačijim omjerima. Djelovanje zgure ovisi o količini s kojom je zamijenjen cement. Zgura u betonu može poboljšati sljedeće:

- Obradivost
- Pumpabilnost
- Čvrstoću
- Smanjuje propusnost
- Smanjuje toplinu hidratacije
- Povećava otpornost na: prodiranje klorida, djelovanje sulfata, alkalnoagregatne reakcije
- Produljuje trajnost
- Produljuje životni vijek [1]

Silicijska prašina je dodatak betonu koji se proizvodi od silicijskih i ferosilicijskih legura u elektrolučnim pećima. Silicijska prašina sastoji se od nekristaliziranih čestica silicijevog dioksida. Nastaje u procesu redukcije kvarca sa metalnim silicijem pri temperaturi oko 200 °C. U plinovima koji nastaju u procesu topljenja kvarcne rudače u elektroreducijskoj peći, silicij reagira s kisikom formirajući nestabilni SiO₂ koji pri temperaturi od 1100 °C s kisikom iz zraka daje vrlo fini disperzirani i amorfni SiO₂. Silikatna prašina se razdvajaju u procesu pred separiranja i filtriranja prašine iz proizvedenih otpadnim plinovima na tehničkom sustavu za oprašivanje.



Kemijski zahtjevi za silicijsku prašinu su:

- sadržaj silicijevog dioksida
- sadržaj elementarnog silicija
- sadržaj slobodnog kalcijevog dioksida, slobodni CaO
- sadržaj sulfata, izražen kao SO₃
- ukupni sadržaj alkalija

- sadržaj klorida
- gubitak žarenja

Silicijska prašina se u praksi najčešće dodaje između 7-10 % na količinu cementa, a može i više. Beton s dodatkom silicijske prašine ima bolju prionjivosti, nema sklonost segregaciji i izdavanju vode. [1]

U tablici 2.3.1. je prikaz utjecaja silicijske prašine na svojstva betona.

Svojstva betona	Povećanje	Smanjenje	Poboljšanje
Tlačna čvrstoća	+		
Vlačna čvrstoća	+		
Tlačni modul elastičnosti	+		
Vlačni modul elastičnosti	+		
Žilavost	+		
Sadržaj pora	+		
Otpornost na zamrzavanje			+
Otpornost na habanje			+
Prionjivost armature i betona			+
Otpornost na kemijske utjecaje			+
Otpornost armature na koroziju			+
Skupljanje od sušenja		+	
Puzanje		+	
Propusnost		+	
Toplinski koeficijent		+	
Toplinska provodljivost		+	
Izdvajanje vode		+	

Tablica 2.3.1. Utjecaj dodatka silicijske prašine na svojstva betona [1]

Metakaolin je porculanski materijal koji danas često koristi kao dodatak betonu jer mu daje bolje karakteristike i ekonomski je isplativiji. Metakaolin se dobije od kaolina, vrste gline koja se nalazi u prirodi. Kaolin je bijele boje i koristi se u proizvodnji porculana. Pečenjem kaolina na 650 °C - 850 °C dobije se metakaolin koji se mrvi da bi dobio određenu finoću koja je značajna za poboljšavanje svojstava betona. Metakaolin pridonosi :

- porast čvrstoće
- olakšava završnu obradu
- smanjuje eflorescenciju
- smanjuje vodoupojnost
- smanjuje mogućnost pojave alkanosilikatne reakcije
- smanjuje deformaciju puzanja [1]

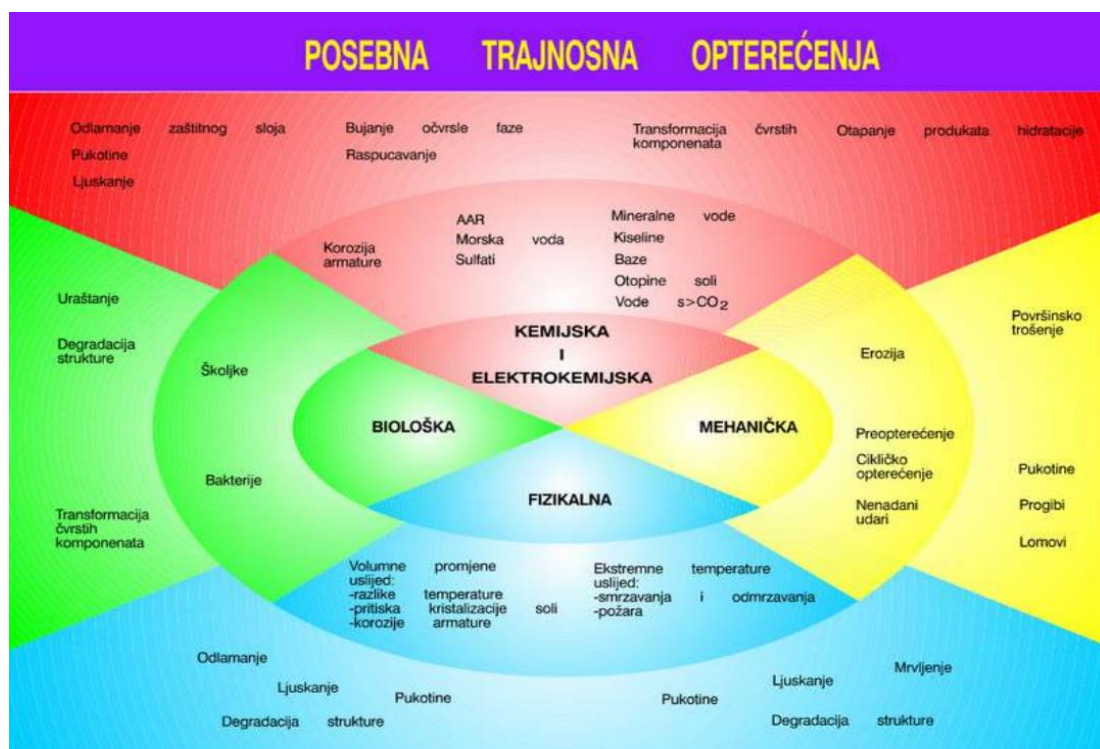
2.3.2. Kemijski dodaci

Kemijski dodaci su materijali koji reguliraju svojstva svježeg ili čvrstog betona. Koriste se u širokoj primjeni radi poboljšanja obradivosti i trajnosti betona. Dodaju se u malim količinama u odnosu na masu cementa. Djelovanje kemijskih dodataka ovisi o količini i o njihovoj usklađenosti. Treba posvetiti pažnju na starosti kemijskog dodatka, stariji dodatak slabije djelovanje. Utjecaj kemijskih dodataka na svojstva betona obično se provodi usporednim ispitivanjima s rezultatima na uzorcima betona. Vrste kemijskih dodataka prema djelovanju su :

- plastifikatori
- superplastifikatori
- aeranti
- ubrzivači i usporivači vezanja
- dodaci za zadržavanje vode
- dodaci za zadržavanja vode
- ubrzivači vezanja
- dodaci za vodonepropusnost
- usporivači vezanja (plastifikatori, superplastifikatori)
- ubrzivači vezanja (plastifikatori, superplastifikatori)
- dodaci za betoniranje pri niskim temperaturama [1]

2.4. Trajnost betona

Beton je okružen različitim klimatskim promjenama i uvijek je u kontaktu s mnogim agresivnim tvarima te je samim time izložen raznim oštećenjima. Životni vijek je u ovisnosti agresivne okoline koja djeluje na konstrukciju. Trajnost betona ovisi o intenzitetu okoline. Zahtjev konstrukcije da prema projektiranim zahtjevima zadrži svoju sigurnost i izdržljivost. Tokom projektiranja betonskih konstrukcija cilj je da zadana konstrukcija bude ekonomski prihvatljiva, ne smije se previše štedjeti, isto također ne smije biti ekonomski ne prihvatljiva. Odabirom kvalitete i ekonomičnosti određujemo vijek trajnosti građevine. Sigurnost betonske konstrukcije definira se u odnosu promjene čvrstoće i opterećenja u funkciji vremena. Najvažnije kategorije trajnosti betona su sigurnost, uporabljivost i održivost. Proces gubljenja svojstva betona ovisi o kojoj se brzini agresivne čestice prodiru unutar betonske plohe. Najvažniji elementi koji utječu na betonsku degradaciju je svojstvo propusnosti. Mjera propusnosti se određuje tako da se betonski uzorak s jedne strane izloži djelovanju tlaku te se mjeri protok. Slika 3. prikazuje trajnosna opterećenja na betonski kamen.



Slika 2.4. Trajnosna opterećenja [10]

Betonska konstrukcija je izložena određenoj grupi u ovisnosti u okolini u kojoj se nalazi. Grupe se zbog jednostavnosti mogu podijeliti u četiri čimbenika: kemijski, fizički, biološki i ostali čimbenici.

Pod kemijskim čimbenicima najčešća pojava je korozija betona koja je posljedica kemijski reakcija agresivnih tvari i neprekidnosti cementnog kamena. Djelovanje korozivne agresivnosti betonu se smanjuje tlačna čvrstoća, te samim time dolazi do promjene njegovog volumena. Prisutnost vode ili vlage je ključni čimbenik za nastanak pojave korozije, bez vode ili vlage korozija ne može stvoriti svoje produkte. Pri stupnju agresivnosti važne su sljedeće osobitosti:

- brzina toka vode koja sadrži agresivne kemijske tvari i prenosi se na beton, radi brzine kojom se agresivna čestica donosi i odnosi s površine betona radi nastajanja produkta korozije
- brzini promjena vodostaja, jer povlačenjem dolazi do izražaja agresivnih čestica
- trajanje djelovanja medija
- postojanje pritiska, jer pojavom pritiska omogućava brži ulazak agresivnih čestica
- vremenski uvjeti, povišena temperatura ubrzava kemijske produkte
- debljina betonskog sloja
- vodopropusnost tla [2]

Relativna vlažnost zraka	Proces				
	Karbonatizacija	Korozija čelika u betonu koji je :		Mraz	Kemijska agresija
		Karbonatizirao	ZasićenCL ⁻		
vrlo mala (<45%)	1	0	0	0	0
mala (45-65%)	3	1	1	0	0
srednja (65-85%)	2	3	3	0	0
velika (85-95%)	1	2	3	2	1
zasićen (95%)	0	1	1	3	3

Tablica 2.4. Utjecaj vlažnosti na rizik korozije (0-beznačajan, 1-mali, 2-srednji, 3-velik) [2]

Vegetacija, njezin rast pri otpadanju lišća, stvaranju algi, nastaju bakterije koje dovode do degradacije betona. Biološka djelovanja prvenstveno se skupljaju na mjestima vodovodnih mreža i kanalizacije. Djelovanje bakterija ovise o: temperaturi, podlozi, prisustvo kisika i pH vrijednosti. Mehanička djelovanja, abrazija trošenje materijala nastaju kad čvrste čestice nanose na podlogu i tako troše površinski sloj betona. Kada pričamo o abraziji ona se može prenositi vodom, trenjem (habanjem), vjetrom i različitim kemikalijama koje se nanese na podlogu.

Erozija ima veliki efekt na području naše obale Sjevernog primorja i Dalmacije koja je izložena jakim pritiskom vjetra, sjeverca i južnjaka. Naneseni vjetar sa sobom nosi čestice materijala koji se odbija od obalu te tako troši betonske objekte i daje rezultat oštećenja, smanjenje volumena. Na području Sjevera Hrvatske i Like koja su izložena učestalim promjenama smrzavanja i odmrzavanja je najčešći uzrok oštećenja konstrukcije. U kapilarama betonske mase u kojoj se zarobljena voda počinje se smrzavati na 0 °C te prelaskom vode iz tekućeg u kruto stanje dolazi do povećanja volumena oko 10%. Cementi kamen i agregat su do trenutka smrzavanje u kompaktnoj vezi te samim proširenjem volumena dolazi do oslabljenja kontaktne zone između njih. Otpornost betona na smrzavanje može se popraviti smanjenjem vodocemetnog faktora uz dodatak aditiva (aeranta) uz ispravnu i konstantnu njegu. Prilikom rada s betonom na niskim temperaturama potrebno je u obzir uzeti dvije različite temperature, temperaturu okolnog zraka i temperaturu samog betona. Ako se svježe ugrađeni beton ohladi na temperaturu nižu od 0°C, voda u mješavini smrznut će se i raširiti. To bi oštetilo beton do te mjere da postane neupotrebljiv i da se mora ukloniti. Međutim, ako se betonu omogući da prvo dostigne čvrstoću od 3 - 4 N/mm², vjerojatno je da će biti otporan na razorno širenje vode. Kod većine mješavina ta se čvrstoća dostiže u roku od 48 sati ako se beton održava na temperaturi od 5°C ili višoj. Ipak, čak i nakon što beton dosegne 3 - 4 N/mm², niske temperature će usporiti daljnji razvoj tlačne čvrstoće. Pri niskim temperaturama cilj stoga mora biti održavati beton toplim (iznad 5°C) tijekom prvih 48 sati i zatim omogućiti razvoj tlačne čvrstoće, iako sporiji. Ovisno o vanjskim temperaturama, treba prilagoditi mjere opreza. Beton je nezapaljiv materijal koji prilikom izloženosti velikim temperaturama ne ispušta štetne plinove. Doticajem visokim temperatura beton gubi svoja svojstva. Beton pri temperaturi oko 500 C° smanjuje se njegova čvrstoća, porastom oko 1000 C° dolazi to potpunog gubitka čvrstoće.

Eroziju betona može se dijeliti na :

- erozija kavitacijom
- erozija abrazijom

Habanje nastaje kod betonski kolnika i industrijskim halama koje su izložene većem prometnom opterećenju, opterećenja koja su veća od dopuštenih , čestice koje su nanese vjetrom, vodom ili nekim drugim silama koje usred trenja nanose lokalna opterećenja. Kod preuzimanja takvih vrsta opterećenja, bitna je količina cementnog kamena, odnosno udio agregata u betonu. Poznato je da betoni s manjim udjelom cementnog kamena, a većom količinom agregata imaju veću otpornost na habanje. Glavna tema ovoga rada i jest projektirati sastav betona koji je otporan na habanje prema normi. Pri projektiranju takvog betona treba uzimati manje razrede agregata (do zrna 16 mm) te da beton ima veću količinu agregata, a suprotnom tome cement s manjim udjelom te samim time dolazi do veće otpornosti na trošenje.



Slika 2.5. Abrazija betonske površine od djelovanja vozila [1]

Izlizanje podloge je mehaničko trošenje što ga razlikuje od kemijske agresivnosti. Kemijska agresija i mehaničko trošenje donose slične rezultate i mogu se pojaviti zajedno, ali ostaju odvojeni problemi s odvojenim rješenjima. U industriji, betonska ploča obično pruža dobar otpor trošenja površine. Građevinski element, koji bi trebao trajati desetljećima, potom je izložen teškoj upotrebi i trošenju. U industriji betona nismo se uvijek suočili s tim izazovom. Nedostatak otpornosti je uobičajen uzrok problema s podom. U slučajevima kada se cijela površina uništi do dubine od više od 0.5 milimetra, tlo ostaje neupotrebljivo. Čak i blago trošenje stvara prašinu, što je neprihvatljivo u nekim tvornicama i skladištima. S druge strane, neki podovi se dobro nose. Tradicionalni pristup je pokušati kontrolirati otpornost na nošenje kroz jedan ili više ovih faktora:

- betonska kompresijska snaga;
- odnos vode i cementa;
- liječenje betona
- metode završavanja zaštite

Ovaj indirektni pristup ponekad uspijeva, ali je riskantan. Mnogi faktori utječu na otpornost na nošenje, a ni jedna specifikacija ih ne može kontrolirati izravno. Britanski i američki standardi različito klasificiraju otpor. Nijedna metoda nije potpuno zadovoljavajuća, ali nam daje uvid u navedeno. [11]

Class	Degree of Wear Resistance	Maximum Wear Depth*	Typical Use	Traffic
Special	Extremely high	0.05 mm 0.002 in	Very heavy-duty factories	Heavily loaded steel tyres, impact, dragged loads
AR1	Very high	0.10 mm 0.004 in	Heavy-duty factories and warehouses	Steel tyres, impact
AR2	High	0.20 mm 0.008 in	Medium-duty factories and warehouses	Lightly loaded steel tyres, hard plastic tyres
AR3	Good	0.40 mm 0.016 in	Light-duty factories and warehouses	Rubber tyres
Nominal		0.80 mm 0.031 in	Construction traffic	Pneumatic tyres, feet

Tablica 2.4. Otpornosti na trošenje prema British standardu

Kavitacija je vrsta erozije koja nastaje na mjestima velikih protoka vode. Kavitacija je hidrodinamička pojava, kada radi pada piezometarskog tlaka u tekućini dolazi do formiranja sitnih mjehurića. Nastali mjehurići zatim implzijama udaraju u podlogu mlazovima tekućine i razaraju je. Odabirom pravilnog izbora materijala može se povećati otpornost na kavitaciju. Primjenom betona većih čvrstoća i smanjenjem vodocemetnog faktora kavitacija se može znatno smanjiti. Pri izradi betona visoke otpornosti od kavitacije treba koristiti beton visoke vodonepropusnosti. Oštećenja najčešće kreću od njegovog slabijeg dijela, a to je cementi kamen. Sadržaj cementa mora biti najmanje 400 kg/m³. Navedenim postupcima mogu se smanjiti oštećenja, ali se ne mogu izbjeći. [3]

Mehanizam razaranja kavitacijom još nije u potpunosti razriješen i postoji nekoliko teorija o djelovanjima kavitacijske erozije. Prilikom izvedbe konstrukcija izložene kavitacijom, razarajuća djelovanja mogu se smanjiti :

- preciznošću u izvođenju spojeva
- geometrijske tolerancije u izvođenju
- glatkoća površine
- dodatna obrada površine brušenjem radi smanjenja hrapavosti
- upotreba dodatne impregnacije površine

Difuzija klorida je u betonu vrlo složena pojava, jer pojava klorida je u vezi zbog kapilarnog upijanja slane otopine. Količina ulaska klorida u betonu je u ovisnosti o vrsti cementa, sastavu betona, ugradnja, njega betona , stanje vlažnosti betona, pukotino stanje betonu i dr. Sorpcija dubine prodiranja fluida provodi se na uzorcima kod kojih se prodiranje događa u jednom smjeru pri čemu su zatvoreni rubovi uzorka. Dubina prodiranja može se odrediti cijepanjem uzoraka ili mjerenjem povećanjem mase. Koeficijent difuzije klorida, može se procijeniti pomoću srednje tlačne čvrstoće betona f_{cm} prema izrazu :

$$D = D_{Cl-0} \frac{1}{f_{cm}^{1.5}}$$

D – efektivni koeficijent difuzije (m²/s)

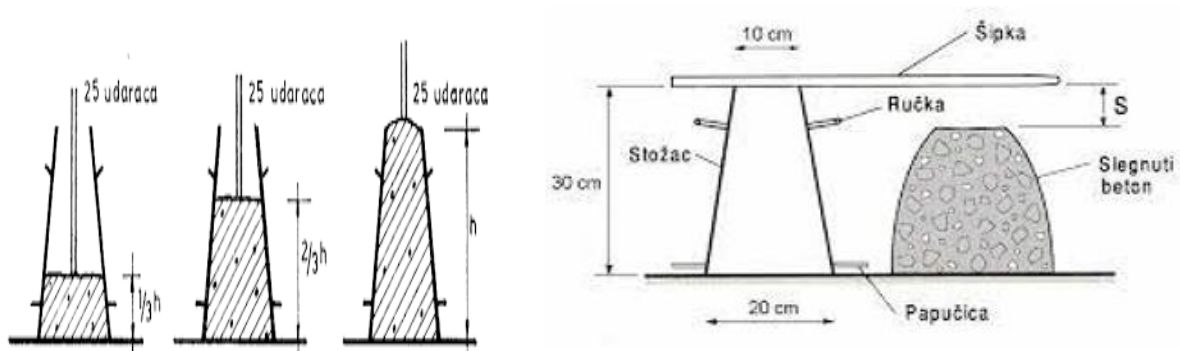
$D_{Cl-0} - 5 \times 10^{-9}$ (m²/s)

f_{cm} –srednja tlačna čvrstoća (MPa)

3. METODE ISPITIVANJA SVJEŽEG BETONA

3.1. Metoda određivanja konzistencije slijeganja

Metoda slijeganja (slump) je praktična za izvedbu na mjestu ugradnje. Metoda slijeganja provodi se prema normi HRN EN 12350-2. Potreban pribor da bi izvršili ispitivanje su Abmrasov kalup s ručkama u obliku krnjeg stošca, standardna šipka Ø16, dužine 16 cm s radijusom od 6 mm i metalno ravnalo. Ispitivanje se provodi tako da se kalup i podlogu prethodno malo navlaže, da prionjivost kroz kalup bude glatka. Beton se unosi u kalup u 3 sloja, a svaki sloj se nabija po 25 udaraca standardnom šipkom, a da pri tom šipka ne udara u dno plohe jer dolazi do nastajanja šupljina, te zadano ispitivanje neće biti približno točno. Nakon završenog punjenja, kalup se vertikalno odiže te dolazi do propadanja. Mjerilo slijeganja je razlika visine od početnog stanja u kalupu te ono nakon propadanja. Slika 3.1. prikazuje postupak nabijanja i opreme za ispitivanje. U tablici 3.1. je prikaz slijeganja prema razredu.



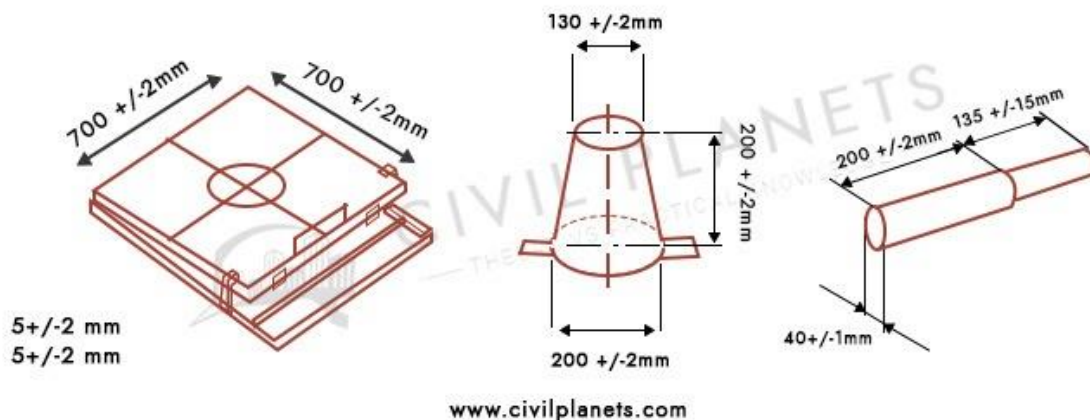
3.1. Postupak nabijanja u 3 sloja i oprema za ispitivanje [12]

Razred određen slijeganjem (mm)	
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

Tablica 3.1. Razredi slijeganja betona [1]

3.2. Metoda određivanja konzistencije razastiranjem

Metoda razastiranja je također kao i metoda slijeganja praktična za izvedbu na mjestu ugradnje. Metoda slijeganja provodi se prema normi HRN EN 12350-5. Za ispitivanje ove metode koristi se Ambrasov krnji stožac malo drugačijih dimenzija kod ispitivanja za slijeganje. Kalup se također puni u 3 sloja, svaki sloj zasebno s nabijanjem od 10 udaraca. Nakon punjena, kalup se lagano vertikalno odize. Ploha na kojoj se kalup polaže je dimenzije 90 x 90 debljine ploče oko 2 cm koja se može odizati. Ispitivanje se vrši tako da unutar 60 sekundi u razmaku svake 4 sekunde u 15 puta podigne i spusti te se izmjeri promjer u smjeru x i u smjeru y plohe što nam predstavlja rezultat mjere konzistencije betona. Na slici 3.2. prikazan je postupak i oprema za provođenje ispitivanja, a u Tablici 3.2. su prikazani razredi rasprostiranja betona .



Slika 3.2. Oprema za ispitivanje rasprostiranja betona [13]

Razred određen rasprostiranjem	
F1	≤340
F2	350-410
F3	420-480
F4	490-550
F5	560-620
F6	≥630

Slika 3.2. Razredi rasprostiranja betona [1]

4. METODE ISPITIVANJA BETONA NAKON STVRDAVANJA

4.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Metoda ispitivanja karakteristične tlačne čvrstoće je osnovno svojstvo betona. Ispitivanje karakteristične tlačne čvrstoće vršimo prema normi HRN-EN 12390-3. Ispitivanje se vrši u laboratoriju tako da se pod prešu stavljaju uzorci betona u obliku kocke dimenzija 15x15x15 cm ili na valjcima visine 30 cm i promjera 15 cm. Svaki uzorak se stavlja u kalup uz prisutnosti relativne vlage od 95% i temperature oko $20 \pm 3 \text{ C }^\circ$. Sljedeći dan uzorak se vadi iz kalupa te se stavlja u vodu u istim uvjetima 28 dana do dana ispitivanja. Na svakom gradilištu nakon ugradbe betona uzimam se uzorak koji se postavlja u propisanom kalupu, te nakon 28 dana uz prisutnosti vlage se prosljeđuje na ispitivanje je li ugrađeni beton zadovoljava propisane tlačne čvrstoće. Ispitivanje karakteristične tlačne čvrstoće je omjer maksimalne sile i površine presjeka, a formula glasi :

$$f_c = \frac{P}{A}$$

f_c - tlačna čvrstoća betona (N/mm²)

P – maksimalna sila (N)

A – površina presjeka (mm²)



Slika 4.1. Uređaj za ispitivanje karakteristične tlačne čvrstoće

Karakteristična tlačna čvrstoća betona može se podijeliti na razrede. Na primjer C 20/25 , gdje oznaka C označava beton engl. Concrete , a prvi broj u ovom slučaju predstavlja tlačnu čvrstoću na uzorku valjaka, dok drugi broj predstavlja tlačnu čvrstoću na uzorku kocke. Tablica 4.1. prikazuje razrede vrijednosnih karakterističnih i srednjih čvrstoća prema normi HRN EN 1992-1-1 (EC2) i Model Code 2010.

RAZRED TLAČNE ČVRSTOĆE BETONA	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
fck,cyl (Mpa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
fck,cube (Mpa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60
fck,cm (Mpa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58
RAZRED TLAČNE ČVRSTOĆE BETONA	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	C100/115	C110/130	C120/140	
fck,cyl (Mpa)	55	60	70	80	90	100	110	120	
fck,cube (Mpa)	67	75	85	95	105	115	130	140	
fck,cm (Mpa)	63	68	78	88	98	108	118	128	

Tablica 4.1. Vrijednosti karakterističnih i srednjih vrijednosti tlačnih čvrstoća [1]

4.2. Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Ultrazvučni impuls provodi se prema normi HRN EN 12504-4. Metoda se temelji na prolasku logitudalnih valova kroz površine uzorke betona. Ispitivanje se vrši na 3 mjesta po visini : dno uzorka, sredina i po vrhu uzorka. Vremenski interval od trenutka kada impuls napušta prvu sondu pa do trenutka prijama impulsa u drugu sondu jest vrijeme prolaska impulsa (t) kroz uzorak betona duljine (l). Prednost ove metode je njezina brza primjena i daje nam prilično točne rezultate o dimenzijama pukotina i segregaciji uzorka. Brzina ultrazvuka predstavlja omjer duljine uzorka i potrošenog vremena :

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

Iz vrijednosti brzine ultrazvuka i poznajući zadanu gustoću betona i Poissonov omjera za beton može se dobiti modul elastičnosti koji glasi :

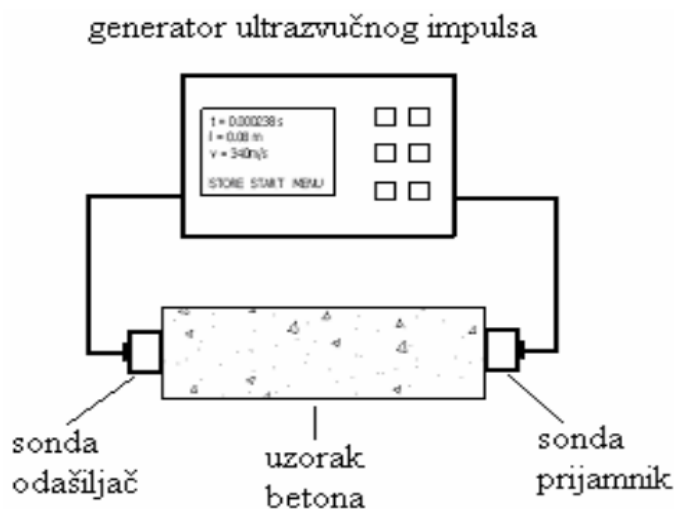
$$E_{bd} = \frac{v^3 \cdot p \cdot (1 + \mu) \cdot (1 + 2\mu)}{(1 + \mu)}$$

E_{bd} = dinamički modul elastičnosti (Gpa)

p = gustoća betona (kg/m³)

V = brzina ultrazvučnog vala

μ = Poissonov koeficijent



Slika 4.2. Uređaj za ispitivanje ultrazvučnih valova [14]

4.3. Ispitivanje zaprimljenosti vodljivosti klorida kroz beton

Metoda ispitivanje klorida vrši se prema normi ASTM C1760 kojom se određuje količina električne vodljivosti zasićenih uzoraka kroz beton. Za ispitivanje koristimo valjkasti uzorak betona promjera 100 mm i visine 200 mm. Uzorak se postavlja u ispitnu čeliju koja na svojim krajevima sadrži spremnike koje se pune sa 3% otopinom NaCl (natrijevom kloridom). Na krajevima uzorka je električni potencijal razlike 60 V. Uređaj se spaja električnim vodilicama gdje – ion se kreće prema + ionu. Ispitivanje se vrši unutar 1 minute nakon početka kretanja iona. Ukupna električna vodljivost vrši se prema izrazu :

$$\sigma = K \frac{I}{V} \frac{L}{D^2}$$

σ - električna vodljivost

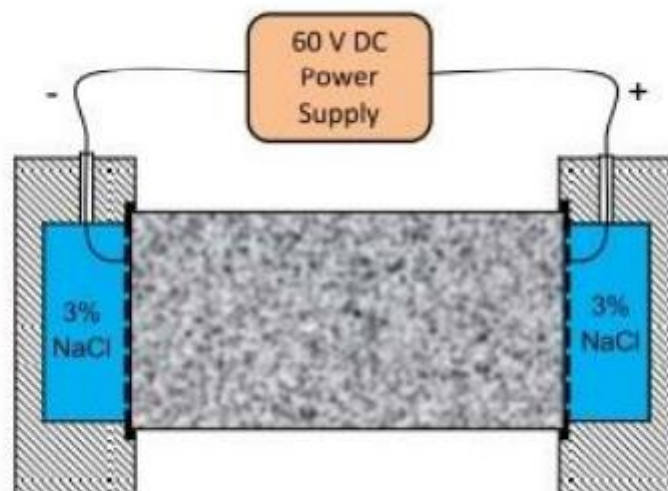
I - struja u 1 minuti (mA)

V - primijenjeni napon (V)

L - prosječna duljina uzorka (mm)

D - prosječan promjer uzorka (mm)

K - faktor konverzije =1273,2



Slika 4.3. Uređaj za ispitivanje uzorka na prolaz klorida [15]

4.4. Ispitivanje otpornosti betona na habanje - Bohmeov test

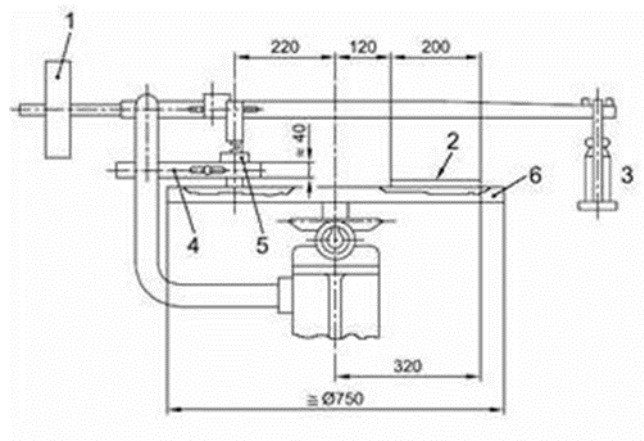
Metoda ispitivanja na habanje vrši se prema normi DIN 52108. Ispitivanje se provodi tako da uzorke koji su stajali 28 dana potopljeni u vodi izvadimo iz bazena, te se osuše do konstante temperature. Za uzorke koristimo pločaste oblike ili oblik kocke visine brida $74 \pm 1,5$ mm . Bohmeov disk je uređaj koji radi na principu 16 ciklusa. Svaki ciklus ima 22 okretaja. Prije svakog ciklusa ravnomjerno se polaže abraziv koji se ravnomjerno rasporedi po putanji kretanja diska. Prilikom svakog ciklusa abraziv se uklanja i stavlja novi. Uzorak se optereti s centralnom silom koja je približno oko 295 N. Princip rada je takav da svako 4 ciklusa ispitani uzorak izvadimo iz njegovog ležaja te mu se izmjeri masa potrošenog materijala te nakon 16 ciklusa izmjeri konačna masa i promjena dimenzije njegovih bridova. Habanje se računa kao srednja vrijednost gubitka volumena ΔV koja glasi:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho R}$$

ΔV gubitak u volumenu nakon 16 ciklusa [mm^3]

Δm gubitak u masi nakon 16 ciklusa [g]

ρR gustoća uzorka ili, za slučaj višeslojnih uzoraka, gustoća habajućeg sloja [g/mm^3]



Slika 4.4. Uređaj za ispitivanje habanja [16]

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Tema ovog rada je istražiti utjecaj dodatka silikatne prašine, vlakana i kvarnog betona na svojstva betona koji je izložen habanju i koroziji uzrokovana kloridima koji nisu iz morske vode.

5.1. Proračun etalonske mješavine

Razred izloženosti je XD i XM3 kada je beton koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni materijal izložen dodiru s vodom koja sadrži kloride, uključujući soli za odmrzavanje, koji nisu iz mora na ekstremno habanje.

Opis okoliša: Ekstremno habanje – elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu viličara pneumatskim gumama ili čeličnim kotačima; hidraulične konstrukcije u uzburkanim vodama (npr. bazeni za destilaciju); površine izložene prometu gusjeničara.

U Tablici 5.1 je prikaz preporučenih vrijednosti projektiranja za zadani razred izloženosti.

Razred izloženosti	Max. W/B omjer	Min. razred tlačne čvrstoće	Min. količina cementa (kg/m ³)	Min. zaštitni sloj c_{min} (mm)	Drugi zahtjevi
XM3	0.45	C 30/37	300	55	-

Tablica 5.1. Preporučene vrijednosti za razred izloženosti XM3

Uvjet čvrstoće

Zadana je klasa betona: C30/37

Uvjet: $f_{cm} > f_{ck} + (6 \text{ do } 12)$

$$f_{cm} > 37 + 8 = 45 \text{ N/mm}^2$$

Uvjet obradivosti

Za klasu izloženosti XM ne postoje preporučene vrijednosti sastava i svojstava betona za razrede izloženosti, već se uzimaju empirijski. Odabirom Fullerove granulometrijske krivulje, u ovom slučaju B16 i odabirom razreda konzistencije S2 dobijemo približne vrijednosti količine vode za 1 m³.

LITARA VODE ZA 1m ³ SVJEŽEG BETONA						
Granična linija	Drobljeni agregat			Riječni agregat		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
A 63	120	145	160	95	125	140
A 32	130	155	175	105	135	150
A 16	140	170	190	120	155	175
A 8	155	190	210	150	185	205
B 63	135	160	180	115	145	165
B 32	140	175	195	130	165	185
B 16	150	185	205	140	180	200
B 8	175	205	225	170	200	220
C 63	145	180	200	135	175	190
C 32	165	200	220	160	195	215
C 16	185	215	235	175	205	225
C 8	200	230	250	185	215	235

Tablica 5.2. Približna količina vode za 1 m³ betona u ovisnosti D_{max} i konzistencije slijeganjem

5.2. Materijali

Za izradu pokusnih mješavina koje su ispitana upotrjebljeni su sljedeći materijali:

- portland cement CEM II B-M (S-LL) 42,5 N
- voda iz vodoopskrbne mreže
- drobljeni agregat iz kamenoloma “Plano“
- aditiv Glenium Sky 658
- kvarcni pijesak
- metakaolin - Metaver
- silikatna prašina
- staklena vlakna
- polipropilenska vlakna

5.3. Cement

Za izradu pokusnih mješavina korišten je CEM I 42,5 R iz tvornice Cemex – Solin. Cement je sam po sebi hidrauličko vezivo koje očvrstne na zraku i s kontaktom s vodom. Cement se smatra materijalom koji se najviše koristi na svijetu, iznosi čak između 500-2000 kg po stanovniku. Cement koji je korišten u laboratoriju za izradu pokusnih mješavina certificiran je prema zahtjevima HRN EN 197-1, HRN EN 197-2, BAS EN 197-1 i BAS EN 197-2. Namijenjen je pripremi betona za sve građevinske radove koji se izvode u propisanim uvjetima gradnje za najzahtjevnije armirane i nearmirane betonske konstrukcije (mostovi, tuneli, vijadukti, stanogradnja, izrada gotovih betonskih elemenata), za izradu predgotovljenih betonskih elemenata i proizvoda te prenapregnuti betonskih konstrukcija za izradu visoko otpornih betona na habanje. Odlikuje se visokim početnim i završnim čvrstoćama te uz svojstvo brzog prirasta početne čvrstoće posebnu primjenu nalazi u proizvodnji betonskih elemenata, gdje omogućuje brzo oslobađanje kalupa. Također je pogodan pri gradnji zahtjevnih građevina i konstrukcija gdje tehnologija i dinamika izvođenja radova traži brzo skidanje oplata. U tablici 5.3. je prikaz fizičkih i mehaničkih svojstva portland cement CEM II B-M (S-LL) 42,5 N .

Mehanička i fizikalna svojstva:	CEM II B-M (S-LL) 42,5 N	Zahtjev norme
Početak vezivanja (min)	200 ± 30	≥ 60
Postojanost volumena po Le Chatelieru (mm)	1	≤ 10
Tlačne čvrstoće nakon 2 dana (MPa)	23	≥ 60
Tlačne čvrstoće nakon 28 dana (MPa)	48	≥42,5≤62,5
Kemijska svojstva:		
SO ₃ (%)	3,0 ± 0,2	≤ 3,5
Cl- (%)	0,04 ± 0,02	≤ 0,1

Tablica 5.3. Mehanička i fizikalna svojstva CEM II B-M (S-LL) 42,5 N

5.4. Agregat

Za pripremu uzoraka korišten je agregat iz kamenoloma Plano u rasponu frakcija 0-4mm, 4-8 mm i 8-16 mm. U ovom radu za zadanu granulometriju agregata i zadane apsorpcije i vlažnosti potrebno je odrediti maksimalno zrno i optimalnu granulometrijsku krivulju za zadani razred izloženosti.

Granulometrija agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Frak. br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5	63
1	0 - 4	5.2	24.2	33.5	48.4	72.4	98	100	100	100	100
2	4 - 8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	5.2	100	100	100	100
3	8 - 16	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	31.5	99.6	100	100

5.4. Tablica granulometrije agregata

Apsorpcija i vlažnost agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

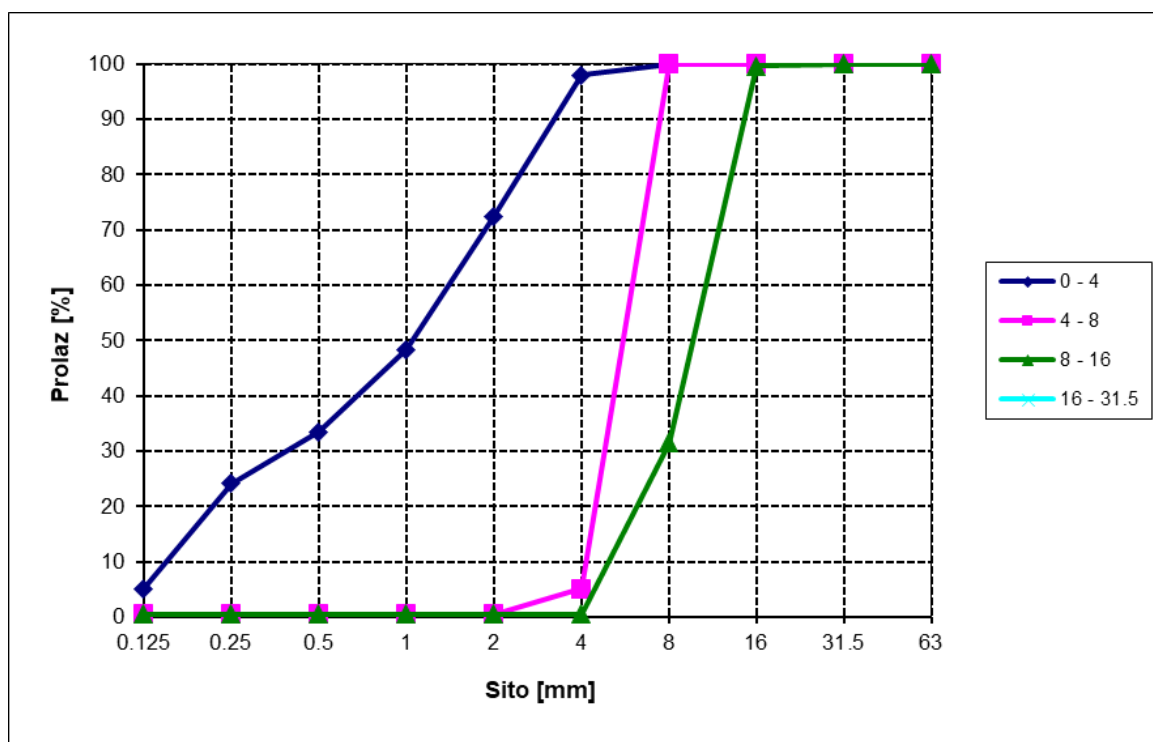
Frakcija [mm]	Apsorpcija [%]	Vlažnost [%]
0 - 4	1.20	2.40
4 - 8	0.70	1.30
8 - 16	0.50	1.10

5.5. Tablica apsorpcije i vlažnosti agregata

Za određivanje maksimalnog zrna agregata ne smije biti veći od:

- radijusa kalupa betonskog elementa R
- $1/4$ najmanje dimenzije elementa h (ili $1/3$ debljine ploče dpl)
- $0,8$ horizontalnog razmaka šipki armature a_{min}
- debljine zaštitnog sloja betona c

Na slici 5.4. je prikaz linijskog grafa zadane granulometrije agregata.



Slika 5.4. Granulometrijske krivulje pojedinih frakcija

Odabirom maksimalnog zrna agregata, a to je u našem slučaju 16 mm odabiremo Fullerovu krivulju B16. Za zadanu krivulju B16 vrijednosti su prikazane u tablici 5.4.[3].

	ZADANI SASTAV AGREGATA [%]									
Sito	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5	63
Zadano	8.8	12.5	17.7	25.0	35.4	50.0	70.7	100	100	100

Tablica 5.6. Zadani sastav agregata za krivulju B16

Sustav jednačbi:

$$98 \cdot X_1 + 5,2 \cdot X_2 + 0,5 \cdot X_3 = 50$$

$$100 \cdot X_1 + 98,2 \cdot X_2 + 31,5 \cdot X_3 = 70,7$$

$$100 \cdot X_1 + 100 \cdot X_2 + 99,6 \cdot X_3 = 100$$

Rješenja:

$$X_1 = 0,504 \approx 50\%$$

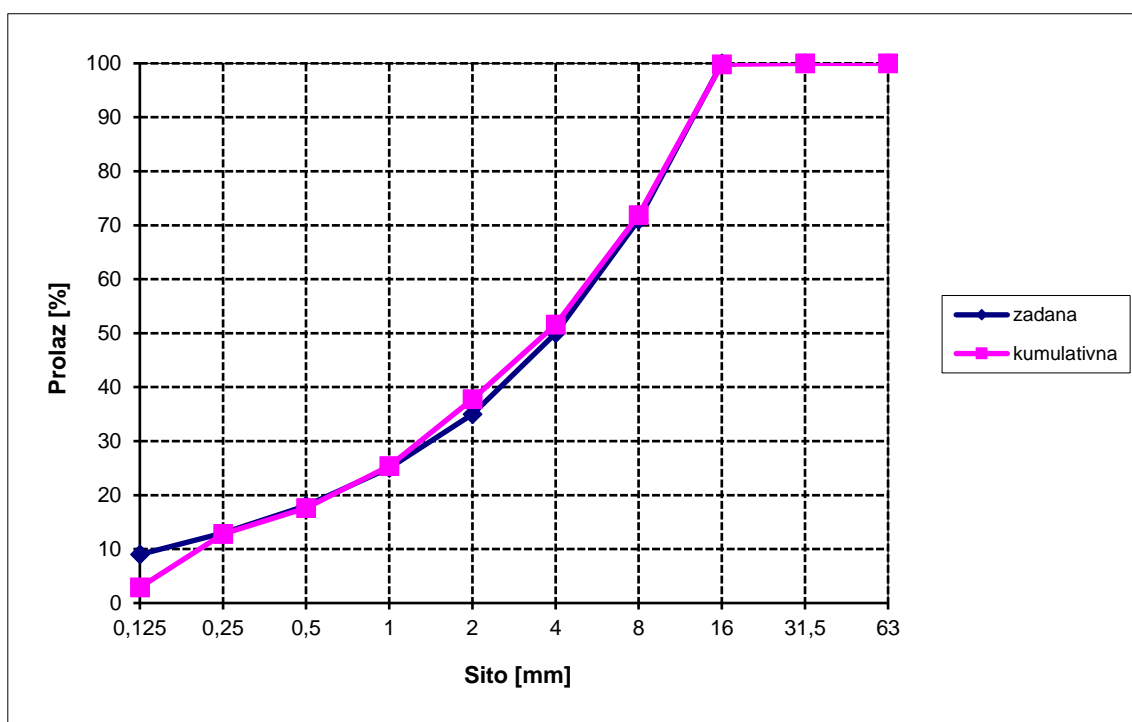
$$X_2 = 0,670 \approx 7\%$$

$$X_3 = 0,430 \approx 43\%$$

Kumulativni sastav agregata:

Frakcija	Udio [%]	KUMULATIVNI SASTAV AGREGATA [%]									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5	63
0 - 4	50	2.6	12.1	16.8	24.2	36.2	49.0	50.0	50.0	50.0	50.0
4 - 8	7	-	-	-	-	-	0.4	7.0	7.0	7.0	7.0
8 - 16	43	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	13.5	42.8	43.0	43.0
Σ	100	2.8	12.3	17.0	24.4	36.4	49.6	70.5	99.8	100.0	100.0

Tablica 5.7. Kumulativni sastav agregata



Slika 5.5. Granulometrijske krivulje agregata

5.5. Aditiv Glenium Sky 658

U ovom radu korišten je aditiv Glenium Sky 658. Prilikom gradnje cesta (vijadukti, tuneli, mostovi) koristi se beton s aditivima: aerantom i superplastifikatorom. Aerant uvlači zrak u beton koji formira zatvorene mikrosfere i na taj način prekida kapilare kojima u beton prodire voda, sulfati i ostale kemijske reakcije. Superplastifikator smanjuje potrebnu količinu vode i povećava viskoznost. Dozira se u jako malim količinama, oko 1 % u odnosu na masu cementa.

PODACI O PROIZVODU	
Oblik	tekućina
Boja	smeđa
Gustoća	1,05 g/cm ³ ± 0,02 na 20 °C
PH vrijednost	5,5 ± 1,0

Tablica 5.8. Fizikalna svojstva Glenium Sky 658

5.6. Metakloin – Metaver

Metakaolin je kaolinska glina koja se dobije zagrijavanjem na 700-900 C° pod kontroliranim uvjetima u različitim trajanjima ovisno o procesu. Djeluje kao i ostali pucolani koje dodajemo betonu tako da reagira s produktima vapna nastalim tijekom hidratacije cementa. Dodaje se kao zamjena cementu u količini od 5-15% mase cementa. Korištenjem metakaolina poboljšavaju se svojstva betona kao što su:

- porast čvrstoće
- olakšava završnu obradu
- smanjuje iscvjetavanje betona
- smanjuje vodoupojnost
- smanjuje mogućnost pojave alkalnosilikatne reakcije
- smanjuje deformaciju skupljanja

PODACI O PROIZVODU	
Veličina čestice	≈ 10 μm
Specifična ploština	12000-30000 m ² /kg
Specifična gustoća	≈ 2500 kg/m ³
Nasipna gustoća	≈ 0,5 kg/m ³
Oblik zrna	Uglast
Boja	Bijel

Tablica 5.9. Fizikalna svojstva metakaolina

5.7. Silicijska prašina – Meyco

Silicijska prašina je proizvod koji nastaje pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura u elektrolučnim pećima pri temperaturi oko 2000 C°. Silicijska prašina je fin prah koji se dodaje betonu do 15 % , no obično se dozira između 8-10%. Doziranje treba optimizirati jer SiO₂ se spaja s kalcijevim hidroksidom Ca(OH)₂ što može utjecati na smanjenje Ph vrijednosti. Dodavanjem silicijske prašine znatno se povećava tlačna i vlačna čvrstoća betona, također i modul elastičnosti. Smanjuje se puzanje, propusnost, izdavanje vode, te toplinski koeficijent i provodljivost. Zbog svih svojih pozitivnih djelovanje upotrebljavana je pri izgradnji najviše građevine na svijetu Burj Khalife u Dubaiju.

PODACI O PROIZVODU	
Veličina čestice	0,1 ≈ 0,5 μm
Specifična ploština	15000-25000 m ² /kg
Gustoća	130-430 kg/m ³
Oblik zrna	Sferičan
Boja	Tamno siva

Tablica 5.10. Fizikalna svojstva silicijske prašine



Slika 5.6. Silicijska prašina

5.8. Polipropilenska vlakna i staklena vlakna

Polipropilenska vlakna koriste se za postizanje optimalnih performansi u širokom spektru građevinske industrije. Prvenstveno sprječavaju nastanak mikropukotina u fazi stvrdnjavanja što kasnije rezultira dugotrajnošću betonske podloge. Povećavaju čvrstoću i izdržljivost. Također ublažuju tzv. efekt “znojenja betona”. Vrlo česta pojava kod koje se nakon izvođenja glazura na površini počinje pojavljivati voda koja uslijed stvrdnjavanja podloge izlazi na površinu. Voda koja izlazi na površinu istovremeno povlači i cement što kasnije rezultira slabijom betonskom podlogom.

Prednosti polipropilenskih vlakana:

- poboljšava fizičke i mehaničke osobine betona
- sprečava formiranje pukotina u toku sušenja
- smanjuje poroznost i probojnost betona
- umanjuje mogućnost pucanja
- umanjuje “ljuštenje” površine
- unapređuje otpornost na udarce
- povećavaju sposobnost zadržavanja vode svježeg betona i estriha
- jednostavno obrađivanje smjese

Staklena vlakna sjeckana su na 12 mm ugrađuju u betonske podloge komercijalnih prostora, stambenih objekata, trgovačkih centara, industrijskih hala. Sprečavaju stvaranje pukotina uslijed plastičnog skupljanja te poboljšava specifična svojstva betona, podnih površina, žbuka.

Prednosti u odnosu na polipropilenska vlakna:

- veća vlačna čvrstoća
- višestruko bolji modul elastičnosti
- bolja povezanost s betonom
- jednostavnija ugradnja
- specifična težina slična betonu- savršena disperzija [7]

5.9. Sastav laboratorijskih mješavina

U laboratoriju Građevinskog fakulteta u Splitu je napravljeno 6 različitih mješavina. Početnu mješavinu uzima se kao referentna, te je nazivamo etanolska. Kod druge mješavine umjesto agregata 0-4 mm dodan je kvarcni pijesak. Preostale četiri mješavine sadrže dodatke metakaolin, silicijsku prašinu, staklena vlakna i polipropilenska vlakna. Svaka doziranja agregata i dodataka betonu moraju biti precizno izmjerena. Nakon doziranja elemenata, sastojci se stavljaju u mješač. Prvo miješanje se radi u suho, da se frakcije međusobno dobro pomiješaju te se nakon toga dodaje voda i ostali dodaci. Za izradu uzoraka koriste se uzorci kocke dimenzije 150x150x150 mm i valjci dimenzije 100x200 mm. Kalupi uzoraka se prije ugradnje moraju premazati oplatanom, da bi se kalup nakon stvrdavanja jednostavnije i lakše može demontirati. Tokom ugradnje beton se mora vibrirati kako bi se zbio i da izbacii višak zarobljen zraka. Nakon 24 sata se uzorci pokusnih mješavina izvade iz kalupa te se stavljaju u vlažnu komoru sljedećih 28 dana.

Dodatak	Oznaka
Etalon	E
Kvarcni pijesak	KP
10 % Silicijske prašine	SP
10 % Metakaolina	MK
0.9 % Polipropilenska vlakna	VL 1
0.9 % Staklena vlakna	VL 2

Tablica 5.11. Pokusne mješavine

za 1 m ³								
Mješavine	Cement	Voda	W/B	Agregat	Aditiv	Zrak	Kvarcni pjesak	-
E	360 kg	160 kg	0.45	1877 kg	3.6 kg	2.5 %	-	-
KP	360 kg	160 kg	0.45	1877 kg	3.6 kg	2.5 %	16.7 kg	-
za 1 m ³								
Mješavine	Cement	Voda	W/B	Agregat	Aditiv	Zrak	Silicijska prašina	Metakaolin
SP	324 kg	178 kg	0.55	1818 kg	3.6 kg	2.5 %	36.0 kg	-
MK	324 kg	178 kg	0.55	1823 kg	3.6 kg	2.5 %		36.0 kg
za 1 m ³								
Mješavine	Cement	Voda	W/B	Agregat	Aditiv	Zrak	PP vlakna	Staklena vlakna
VL1	360 kg	160 kg	0.45	1877 kg	3.6 kg	2.5 %	1.0 kg	-
VL2	360 kg	160 kg	0.45	1877 kg	3.6 kg	2.5 %		1.0 kg

Tablica 5.12. Udio sastojaka u pokusnim mješavinama

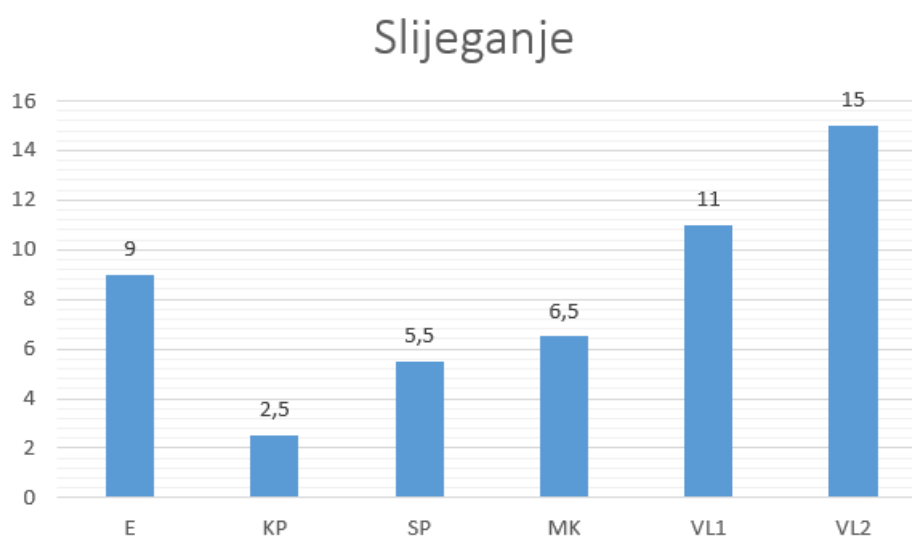
6. REZULTATI ISPITIVANJA SVJEŽEG BETONA

6.1. Rezultati ispitivanja slijeganjem

Rezultati ispitivanja metodom slijeganja (slump) prema normi HRN EN 12350-2. U navedenoj tablici 6.1. dobiveni su sljedeći rezultati.

Mješavina	Slijeganje (cm)	Razred
E	9	S2
KP	2.5	S1
SP	5.5	S2
MK	6.5	S2
VL1	11	S3
VL2	15	S3

Tablica 6.1. Rezultati ispitivanja slijeganjem



Slika 6.1. Rezultati ispitivanja slijeganjem



a) E



b) KP



c) SP



d) MK



e) VL1



f) VL2

Slika 6.2. Rezultati ispitivanja uzoraka

Najveće slijeganje imaju mješavine VL1 i VL 2 s dodatkom staklenih i polipropilenskih vlakana koje spadaju u razred S3. Dodatak metakaolina i silicijske prašine imaju sličan učinak te spadaju u razred S2, dok dodavanjem kvarcnog pijeska ima najmanje slijeganje koje spada u razred S1. Razlog tome je što dodavanjem kvarcnog pijeska pore među paste i agregata se bolje ispune te beton bude krući i otporniji.

6.2. Rezultati ispitivanja razastiranjem

Prema metodi HRN EN 12350-5 dobiveni su rezultati ispitivanja u tablici 8.2. Dobiveni rezultati spadaju svi u razred F1. Rezultati ovise o načinu nabijanja prema normi (od ruke do ruke). Najveće razastiranje imaju staklena vlakna, dok najmanje s dodatkom metakaolina. Upotrebom mineralni dodataka u ovom slučaju metakaolina smanjenje se njegova obradivost, što je dobar zahtjev za otpornost na habanje.

Mješavina	Promjer 1 (cm)	Promjer 2 (cm)	Srednja vrijednost (cm)	Razred
E	26.5	26.5	26.5	F1
KP	31	34	32.5	F1
SP	28	27	27.5	F1
MK	25	26	25.5	F1
VL1	26.5	26.5	26.5	F1
VL2	30	27	28.5	F1

Tablica 6.2. Rezultati razastiranja



Slika 6.3. Rezultati razastiranja



a) E



b) KP



c) SP



d) MK



e) VL1



f) VL2

Slika 6.4. Rezultati razastiranja uzoraka

7. REZULTATI ISPITIVANJA U OČVRSLOM STANJU

7.1. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Ispitani uzorci su oblika kocke dimenzija 150x150x150 mm. Ispitivanje se vrši nakon 28 dana od ugradbe, a pri tom su uzorci bili zasićeni vodom. Dobiveni rezultati prikazuju da najveću tlačni otpor ima uzorak sa dodatkom silicijske prašine, dok najmanju mješavina s dodatkom kvarcnog pijeska. Kod ispitivanja mješavine metakaolina i mješavine sa staklenim vlaknima na pojedinim uzorcima je došlo do ranog sloma uzorka, što znatno smanjuje srednju vrijednost. Razlog tome je lošija ugradba, veliki udio pora koji se nije posve izbacija prilikom vibriranja.

Receptura	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	Masa (g)	Gustoća betona (g/cm ³)	f _c (MPa)	F (kN)
E ₁	29.03.	27.04.	28	8200.5	2.39	62.7	1429.6
E ₂	29.03.	27.04..	28	8149.8	2.43	71.1	1589.1
E ₃	29.03..	27.04.	28	8171.8	2.38	63.7	1457.1
Srednja vrijednost						65.8	
KP ₁	29.03.	27.04.	28	7826.3	2.31	57.7	1306.9
KP ₂	29.03.	27.04..	28	7865.5	2.32	58.5	1325.0
KP ₃	29.03..	27.04.	28	7831.3	2.29	55.9	1274.5
Srednja vrijednost						57.4	
SP ₁	30.03.	28.04.	28	7988.7	2.34	69.4	1582.3
SP ₂	30.03	28.04.	28	8000.1	2.34	68.8	1568.6
SP ₃	30.03	28.04.	28	8014.4	2.34	68.1	1552.7
Srednja vrijednost						68.8	
MK ₁	30.03.	28.04.	28	8015.2	2.32	63.0	1417.5
MK ₂	30.03	28.04.	28	8095.1	2.34	43.9	987.8
MK ₃	30.03	28.04.	28	8007.1	2.35	65.7	1478.3
Srednja vrijednost						57.5	
VL1 ₁	31.03.	29.04.	28	8149.2	2.37	64.1	1442.3
VL1 ₂	31.03.	29.04.	28	8144.5	2.36	66.6	1498.5
VL1 ₃	31.03.	29.04.	28	8133.4	2.38	67.3	1514.3
Srednja vrijednost						66.0	
VL2 ₁	31.03.	29.04.	28	8179.9	2.38	64.7	1484.9
VL2 ₂	31.03.	29.04.	28	8171.5	2.37	65.9	1512.4
VL2 ₃	31.03.	29.04.	28	8208.8	2.38	43.0	986.9
Srednja vrijednost						57.9	

Tablica 7.1. Tlačne čvrstoće ispitanih uzoraka

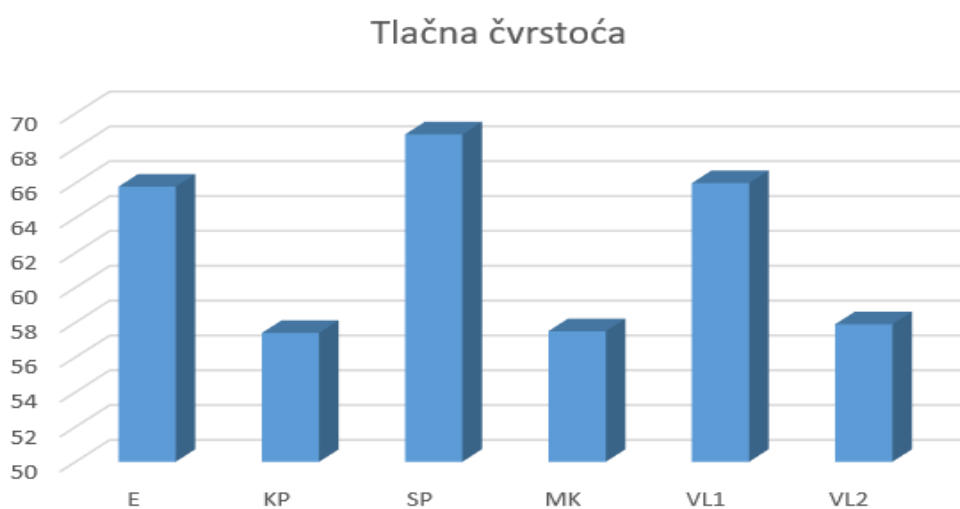


a)



b)

Slika 7.1. a) ispitani uzorak E b) preša s uzorkom E



Slika 7.2. Grafički prikaz tlačnih čvrstoća

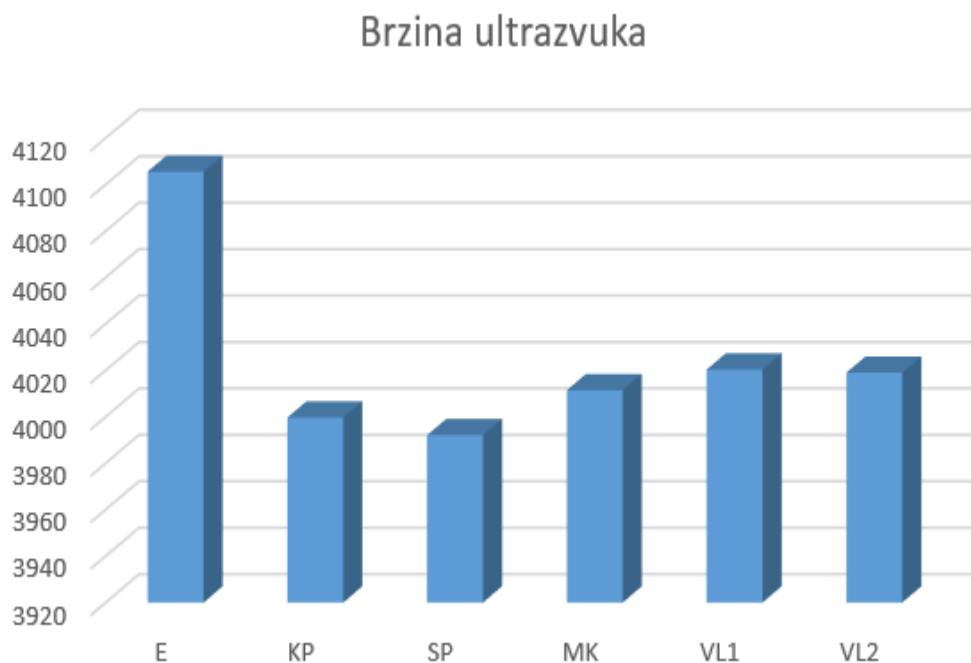
Iz dobivenih rezultat dobiveno je da u odnosu na etanolsku mješavinu dodatkom kvarcnog pijeska, metakaolina i staklenih vlakna smanjenja čvrstoća betona za 9 %, dok dodatkom polipropilenskih vlakna čvrstoća betona je prilično jednaka etanolskoj. Najveću tlačnu čvrstoću postignuta je kod mješavine kojoj je dodana silicijska prašina gdje je povećanje tlačne čvrstoće 5% u odnosu na etanolsku.

7.2. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvuka

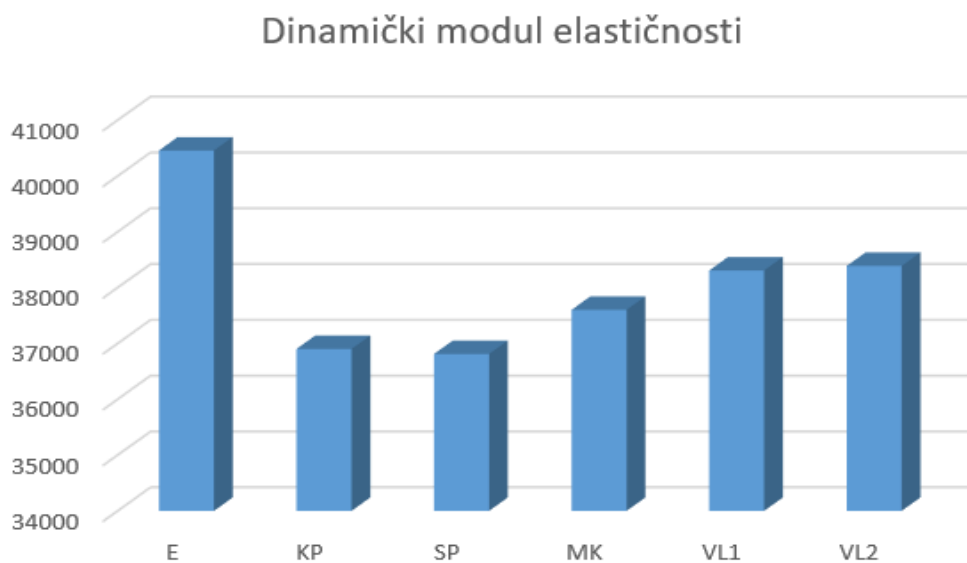
Ispitivanje se vrši na uzorcima kocke dimenzija 150x150x150mm nakon 28 dana koji su bili izloženi vlažnoj okolini (bazenskoj komori). Dobiveni rezultati pokazuju da dodatkom mineralnih dodataka se povećava brzina ultrazvuka. Najmanju srednju brzinu ima etanolska mješavina, dok najveću srednju imaju uzorci s dodatkom vlakana. Također iz brzine ultrazvuka može se izvući i dinamički modul elastičnosti koji je u korelaciji s brzinom. Najmanji dinamički modul elastičnosti imaju mješavine s dodatkom vlakana, dok najveću etanolska. U tablici 6.2. je prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem.

Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	Vrijeme ultrazvuka (μs)	Brzina ultrazvuka (m/s)	Dinamički modul elastičnosti (MPa)	Kvaliteta betona
E ₁	29.03.	28.04.	28	36.54	4105.10	40275.91	Vrlo kvalitetan
E ₂	29.03.	28.04.	28	36.37	4124.30	41333.94	
E ₃	29.03.	28.04.	28	36.70	4087.20	39758.39	
Srednja vrijednost				36.54	4105.54	40456.08	
KP ₁	29.03.	28.04.	28	37.54	3995.73	36881.13	Vrlo kvalitetan
KP ₂	29.03.	28.04.	28	37.50	4000.00	37120	
KP ₃	29.03..	28.04.	28	37.47	4003.20	36698.64	
Srednja vrijednost				37.50	3999.64	36899.92	
SP ₁	30.03	28.04.	28	38.27	3919.52	35948.57	Vrlo kvalitetan
SP ₂	30.03.	28.04.	28	37.63	3986.18	37181.74	
SP ₃	30.03.	28.04.	28	37.57	3992.55	37300.66	
Srednja vrijednost				37.82	3966.08	36810.32	
MK ₁	30.03	28.04.	28	37.47	4003.20	37179.41	Vrlo kvalitetan
MK ₂	30.03	28.04.	28	37.27	4024.68	37903.43	
MK ₃	30.03	28.04.	28	37.44	4006.41	37720.60	
Srednja vrijednost				37.39	4011.43	37601.15	
VL1 ₁	31.03.	28.04.	28	37.20	4032.25	38533.92	Vrlo kvalitetan
VL1 ₂	31.03.	28.04.	28	37.40	4010.70	37962.28	
VL1 ₃	31.03.	28.04.	28	37.33	4018.21	38427.50	
Srednja vrijednost				37.31	4020.38	38307.90	
VL2 ₁	31.03.	28.04.	28	37.13	4039.85	38842.52	Vrlo kvalitetan
VL2 ₂	31.03.	28.04.	28	37.27	4024.68	38389.40	
VL2 ₃	31.03.	28.04.	28	37.57	3992.54	37938.10	
Srednja vrijednost				37.32	4019.02	38390	

Tablica 7.2. Rezultati dobiveni metodom ultrazvuka



Slika 7.3. Grafički prikaz rezultata dobiveni brzinom ultrazvuka



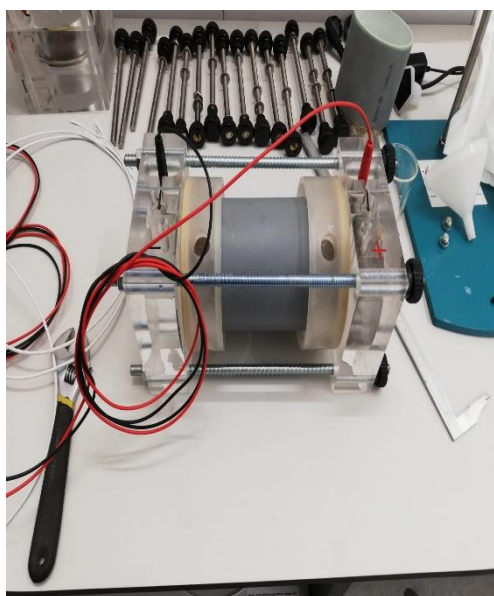
Slika 7.2.[4] Grafički prikaz rezultata dinamičnog modula elastičnosti

7.3. Rezultati ispitivanja ASCM 1760

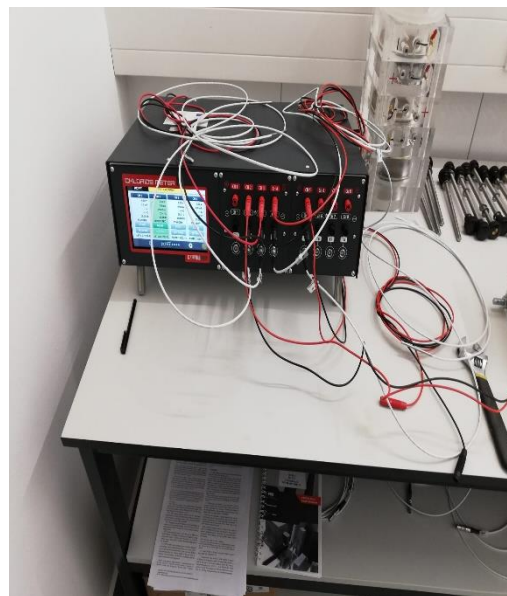
Ispitivanjem propusnosti na kloride metodom ASCM 1760 dobiveni su rezultati u Tablici 7.3. Iz tablice je vidljivo da dodatkom mineralnih dodataka se smanjuje propusnost na kloride. Najmanju vrijednost ima silicijska prašina, dok najveću etanolska.

Redni broj	Oznaka	Datum ispitivanja	D	L	I_1	σ
-	-	-	(mm)	(mm)	(mA)	(ms/m)
1	E	27.05	100	198	43.0	18.3
2	KP	27.05.	100	194	37.4	15.4
3	SP	27.05	100	196	6.5	2.7
4	MK	27.05.	100	196	11.9	4.9
5	VL1	27.05.	100	197	32.4	13.6
6	VL2	27.05.	100	197	66.7	27.9

Tablica 7.3. Rezultati ispitivanja propusnosti na kloride

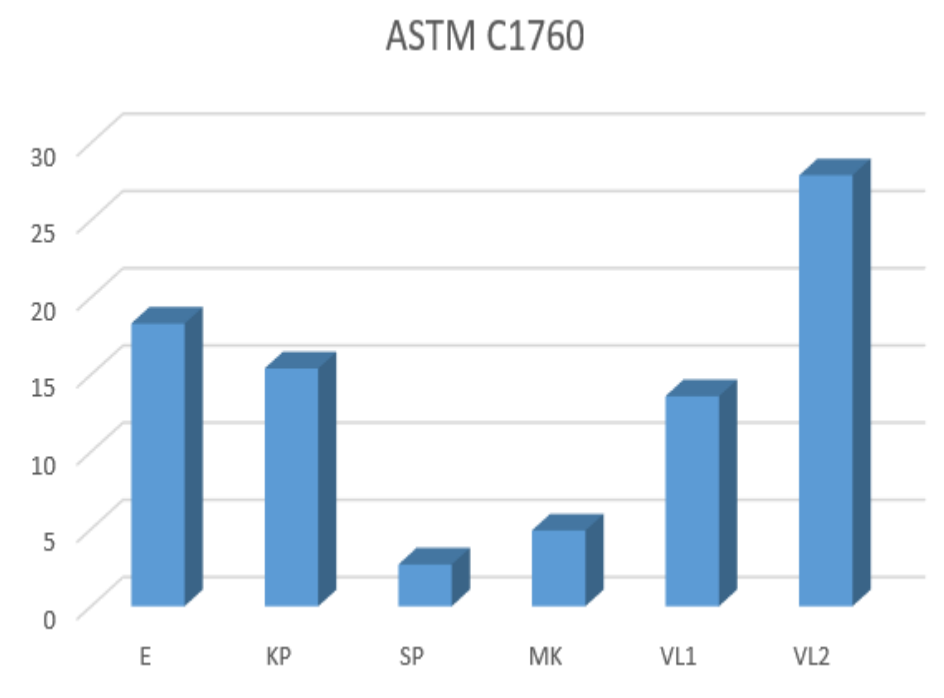


a)



b)

Slika 7.5. Uređaj i oprema za ispitivanje prema ASCM 1760



Slika 7.6. Grafički prikaz rezultata dobiveni metodom ASTM C1760

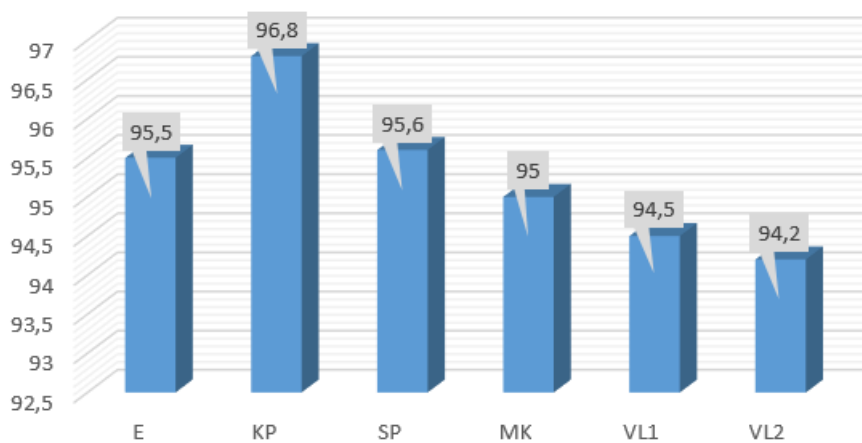
7.4. Rezultati ispitivanja habanjem

Rezultati ispitivanja na habanje prema normi DIN-52108 dobiveni su sljedeći rezultati u Tablici 7.4. Iz dobivenih rezultata se može vidjeti da uzorci betona s dodatkom, silicijske prašine i kvarcnog pijeska su izgubili manji udio mase pri habanju od uzorak etanolske mješavine betona. Etanolska mješavina je imala gubitak mase 4,5 % , dok je kvarcni pijesak 3,2 % i silicijska prašina 4,3%. Također, vidi se da otpornost na habanje raste kako rastu tlačna čvrstoća i modul elastičnosti pojedinog uzorka. Porastom dodatka silicijske prašine i kvarcnog pijeska u mješavini smanjuje se volumen potrošenog betona što jasno ukazuje na to da je beton otporniji na habanje što veći. U odnosu na etanolski uzorak, mješavina s dodatkom metakaolina nije poboljšala svojstva materijala pri habanju. Gubitak mase metakolina tokom ciklusa habanja je 5 %. Dodatkom staklenih i polipropilenskih vlakana pokazuje najlošija svojstva betona prilikom habanja u odnosu na ostale mješavine, gubitak mase oko 6 % . Čelična vlakna bi vjerojatno pokazala bolju otpornost na habanje zbog jače otpornosti samog porijekla materijala.

Uzorak	Datum	Početna masa (g)	Dimenzije A-B-C	Masa nakon 4 ciklusa	Masa nakon 8 ciklusa	Masa nakon 12 ciklusa	Masa nakon 16 ciklusa	Dimenzije nakon 16 ciklusa
E	28.04	933.3	73.68	921.5	912.7	902.1	891.0	72.35
			75.66					74.77
			74.42					72.33
KP	28.04	903.8	74.02	894.9	888.9	881.3	874.8	73.32
			74.56					73.9
			74.99					74.48
MK	28.04	920.1	74.50	906.1	894.9	883.8	874.2	72.39
			74.24					74.17
			74.98					73.3
SP	29.04	940.5	73.08	929.7	919.5	910.4	899.8	72.60
			73.70					72.48
			74.13					73.52
VL1	29.04.	927.3	73.72	916.1	904.0	889.5	876.6	71.97
			74.90					72.78
			74.54					72.40
VL2	29.04.	948.6	75.13	933.8	920.4	907.1	894.3	72.81
			74.35					72.44
			75.32					73.42

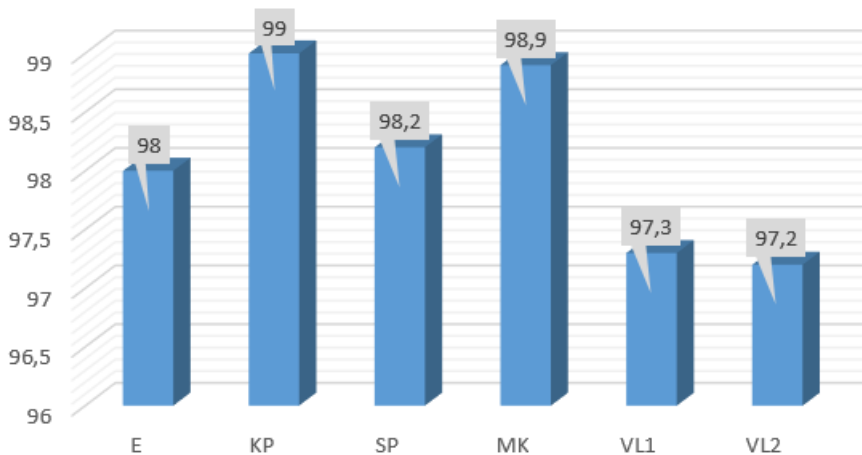
Tablica 7.4. Rezultati trošenjem materijala habanjem

Gubitak mase tijekom habanja



Slika 7.7. Rezultati gubitka mase materijala habanjem

Gubitak dimenzija tijekom habanja



Slika 7.8. Rezultati gubitka dimenzija bridova habanjem

Rezultati dobiveni mjerenjem promjene mase i gubitka dimenzija bridova nisu u potpunosti povezani. Metodom mjerenja mase je točnija jer se koriste jako precizne vage, dok ručno mjerenje dimenzija promjene bridova je poprilično neprecizno. Kao rezultat mjerenje najpreciznije je uzeti omjer promjene mase .



Slika 7.9. Uređaj za ispitivanje habanja-Bohmeov disk

8. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme betonu koji je izložen pokretnu opterećenju u industrijskim hala i kolnicima posvećuje se velika pažnja. Osnovna karakteristika takvog betona je njegova tlačna čvrstoća. U laboratoriju Građevinskog fakulteta u Splitu napravljene su šest različitih mješavina. Kao recipročnu mješavinu uzimala se etanolska kojoj se u narednim mješavinama dodavaju kvarcni pijesak, silicijska prašina, metakaolin, staklena vlakna i polipropilenska vlakna. Najprije su napravljena ispitivanja u svježem stanju: slijeganje i razastiranje. Etanolska mješavina ima slijeganje od 9 cm koje pripada razredu S2, najmanje slijeganje ima uzorak s dodatkom kvarcnog pijeska od 2.5 cm koje pripada razredu S1, dok najveće slijeganje ima uzorak s dodatkom staklenih vlakana od 15 cm. Kvarcni pijesak je prirodnog porijekla te ima bolju povezanost sa zrnima agregata i manje je izložen krhkosti. Frakcija agregata 0-4 mm dobiva se drobljenjem materijala te ima veću krhkost kao materijal. Metodom ispitivanja na razastiranje svi uzorci pripadaju razredu F1, nisu prevelike oscilacije među uzorcima. Mješavina s dodatkom kvarcnog pijeska ima najveće razastiranje, dok dodatkom metakaolina najmanje. U očvrlomlom stanju napravljene su četiri metode ispitivanja : tlačna čvrstoća, brzina ultrazvuka, difuzija klorida i otpornost na habanje. Sve mješavine pokazale su dobru tlačnu čvrstoću koja se kreće od 57 do 69 MPa. Očekivano najveću čvrstoću ima uzorak s dodatkom silicijske prašine. Prilikom ispitivanja brzine ultrazvuka i difuzije klorida ustanovljeno je da dodatkom kemijskih i mineralnih dodataka se poboljšavaju svojstva svi mješavina u odnosu na etanolsku. Kod ispitivanja otpornosti betona na habanje u ovom radu pokazano je da se betonu može poboljšati otpornost na habanje na više različitih načina. Ukoliko se sastavu betona dodaju sadržaj silicijske prašine poveća se tlačna čvrstoća, te će takav beton imati bolju otpornost na habanje. Treba paziti da količina bilo kakvih dodataka kemijskih i mineralni bude optimalna. Suprotno tome učinak može biti negativan, tj. smanjenje otpornosti na habanje. Dodatkom mineralnih i kemijskog u odnosu na etanolsku mješavinu smanjuje se modul elastičnosti, brzina ultrazvuka te prodor klorida. Prilikom projektiranja ovakvog tipa betona treba uzet u obzir njegovu čvrstoću, obradivost i trajnost. Zadani beton, kao i svaki mora biti na granici ekonomičnosti i jednostavan za održavanje i pri tome moramo paziti na razred izložen okolišu prema kojem odabiremo idealni beton izložen takvoj okolini.

9. LITERATURA

- [1.] D. Bjegović, N. Štirmer: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.
- [2.] Velimir Ukrainczyk: Beton, Struktura, Svojstva, Tehnologija, Zagreb, 1994.
- [3.] P. Krstulović: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2000.
- [4.] Dr. Bartul Skenderović : Građevinski materijali, AGM knjiga Beograd, 2011.
- [5.] Inž. Božidar Furundžić: Osnove tehnologije betona, Izdavačko preduzeće „, Građevinska knjiga „, Beograd, 1978.
- [6.] Šišeta Lovro, Habanje kao mjera površinske kvalitete običnog, mikroarmiranog i samozbijućeg betona, Završni rad, Zagreb, 2011.
- [7.] <https://www.bitpromet.hr/polipropilenska-vlakna-za-glazuru-900-gr/prid/628>
- [8.] Properties of Concrete , A.M.Neville, Head of department of Civil Engineering, University of Leeds, England, 2011.
- [9.] <https://www.cemex.hr/documents/47380066/47381413/Tehni%C4%8Dka+uputa+CEM+I+42%2C5+R+Sv.Juraj.pdf/33161d69-3257-0162-d891-e987d42da6e8?t=1579772635945>
- [10.] Stručno usavršavanje M-12 , Važnost projektiranja trajnosti betona za osiguranje trajnosti betonskih građevina, Građevinski fakultet u Zagrebu, 18.listopada 2019.
- [11.] Design and Construction of Concrete Floors, George Garber , 2006.
- [12.] https://www.google.com/search?q=slijeganje+betona+&tbm=isch&ved=2ahUKEwi58o3ep-4AhWSs6QKHSaiAlwQ2-cCegQIABAA&oq=slijeganje+betona+&gs_lcp=CgNpbWcQAzoFCAAQgAQ6BAgAEBhQxANY6Q9gzhtoAHAAeACA AViIAeEEkgEBOZgBAKABAAoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=pUrLYvmLHZLnkgWmxIrgBQ&bih=754&biw=1536#imgrc=Gr_IgZalqYbsHM
- [13.] <https://www.google.com/search?q=slump%20flow%20test&tbm=isch&hl=hr&tbs=ri mg:CXvAxVn80CwRYZwtmTdo53gd8AEAsgIMCgIABAAOgQIABAA&sa=X&ved=0CBsQuIIBahcKEwjomM3-qu4AhUAAAAAHQAAAAAQcw&biw=1519&bih=754#imgrc=bpCvDjBORie29M>
- [14.] https://www.google.com/search?q=brzina+ultrazvuka+beton&tbm=isch&ved=2ahUK Ewi1lvSkrO4AhUMC-wKHdteCqAQ2-cCegQIABAA&oq=brzina+ultrazvuka+beton&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECAAQGFDFWE FjBFmD_GmgAcAB4AIABTogBmgOSAQE2mAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=a0_LYvW0KoyWsAfbvamACg&bih=754&biw=1536#imgrc=iy7V ds9nrRQ9KM

- [15.] <https://germann.org/products-by-application/electrical-conductivity-electrical-resistivity-and-chloride-penetrability/prooveit>
- [16.] HRN 1128:2007 Dodatak M.
- [17.] Concrete industrial ground floors, A guide to design and construction, Report of a concrete Society Working Party, Third Edition, TrownBridge UK, 2007.

10. PRILOZI

Oznaka:	E	Date:	28.03.2022
Projekt:	diplomski rad K.Milišić		

Tabela broj 1.

Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	18 lit	Laboratorijska mješavina [kg]
CEMENT		360	3,10	116		6,48
VODA		160	1,00	160		2,88
V/C	0,45					
DODACI BETONU						
Glenium 658	1,00	3,60	1,07	3,364		0,0648
-	0,00	0,00	2,60	0,000		0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000		0,0000
ZRAK [%]	2,5	0,00	0,00	25		0
AGREGAT		1877	2,70	695		33,79
UKUPNO		2401		1000		43,22

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	18 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	50	938,66	1,40	13,14	0,20	1,88	927,40	16,69
4 - 8	7	131,41	0,95	1,25	0,20	0,26	130,43	2,35
8 - 16	43	807,25	0,39	3,15	0,20	1,61	805,72	14,50
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium 658		3,60					3,60	0,0648
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		360					360	6,48
VODA		160		17,54		3,8	174	3,13

Oznaka: **KP** Date: **28.03.2022**
 Projekt: **diplomski rad K.Milišić**

Tabela broj 1.
 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	18 lit	Laboratorijska mješavina [kg]
CEMENT		360	3,10	116		6,48
VODA		160	1,00	160		2,88
V/C	0,45					
DODACI BETONU						
Glenium 658	1,00	3,60	1,07	3,364		0,0648
-	0,00	0,00	2,60	0,000		0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000		0,0000
ZRAK [%]	2,5	0,00	0,00	25		0
AGREGAT		1877	2,70	695		33,79
UKUPNO		2401		1000		43,22

Tabela br. 2
 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	18 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	50	938,66	1,40	13,14	0,20	1,88	927,40	16,69
4 - 8	7	131,41	0,95	1,25	0,20	0,26	130,43	2,35
8 - 16	43	807,25	0,39	3,15	0,20	1,61	805,72	14,50
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium 658		3,60					3,60	0,0648
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		360					360	6,48
VODA		160		17,54		3,8	174	3,13

→ Kvarcni pijesak

Oznaka:	MK	r.br.	4	Date:	30.3.2022
Projekt:	diplomski rad K.Milišić				

Tabela broj 1.

Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	18 lit	Laboratorijska mješavina [kg]
CEMENT		324	3,10	105		5,83
VODA		178	1,00	178		3,21
V/C	0,55					
DODACI BETONU						
Glenium 658	1,11	3,60	1,07	3,364		0,0648
Metakaolin	11,11	36,00	2,60	13,845		0,6479
-	0,00	0,00	1,00	0,000		0,0000
ZRAK [%]	2,5	0,00	0,00	25		0
AGREGAT		1823	2,70	675		32,81
UKUPNO		2364		1000		42,56

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	18 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	50	911,35	1,40	12,76	0,20	1,82	900,41	16,21
4 - 8	7	127,59	0,95	1,21	0,20	0,26	126,63	2,28
8 - 16	43	783,76	0,39	3,06	0,20	1,57	782,27	14,08
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium 658		3,60					3,60	0,0648
Metakaolin		36,00					36,00	0,6479
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		324					324	5,83
VODA		178		17,03		3,6	192	3,45

Oznaka:	SP	r.br.	3	Date:	30.3.2022
Projekt:	diplomski rad K.Milišić				

Tabela broj 1.

Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	18 lit	Laboratorijska mješavina [kg]
CEMENT		324	3,10	105		5,83
VODA		178	1,00	178		3,21
V/C	0,55					
DODACI BETONU						
Glenium 658	1,11	3,60	1,07	3,364		0,0648
Silikatna prašina	11,11	36,00	2,30	15,651		0,6479
-	0,00	0,00	1,00	0,000		0,0000
ZRAK [%]	2,5	0,00	0,00	25		0
AGREGAT		1818	2,70	673		32,72
UKUPNO		2360		1000		42,47

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	18 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	50	908,91	1,40	12,72	0,20	1,82	898,01	16,16
4 - 8	7	127,25	0,95	1,21	0,20	0,25	126,29	2,27
8 - 16	43	781,67	0,39	3,05	0,20	1,56	780,18	14,04
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium 658		3,60					3,60	0,0648
Silikatna prašina		36,00					36,00	0,6479
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		324					324	5,83
VODA		178		16,98		3,6	192	3,45

Oznaka:	VL1	r.br.	5	Date:	31.3.2022
Projekt:	diplomski rad K.Milišić				

Tabela broj 1.

Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	18 lit	Laboratorijska mješavina [kg]
CEMENT		360	3,10	116		6,48
VODA		160	1,00	160		2,88
V/C	0,45					
DODACI BETONU						
Glenium 658	1,00	3,60	1,07	3,364		0,0648
PP vlakna	0,00	1,00	0,92	1,093		0,0180
-	0,00	0,00	1,00	0,000		0,0000
ZRAK [%]	2,5	0,00	0,00	25		0
AGREGAT		1874	2,70	694		33,74
UKUPNO		2399		1000		43,19

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	18 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
kvarcni pijesak	0	0	1,40	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00
0 - 4	50	937,19	1,40	13,12	0,20	1,87	925,94	16,67
4 - 8	7	131,21	0,95	1,25	0,20	0,26	130,22	2,34
8 - 16	43	805,98	0,39	3,14	0,20	1,61	804,45	14,48
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium 658		3,60					3,60	0,0648
PP vlakna		1,00					1,00	0,0180
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		360					360	6,48
VODA		160		17,51		3,7	174	3,13

Oznaka:	VL2	r.br.	6	Date:	31.3.2022
Projekt:	diplomski rad K.Milišić				

Tabela broj 1.

Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu

SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	18 lit	Laboratorijska mješavina [kg]
CEMENT		360	3,10	116		6,48
VODA		160	1,00	160		2,88
V/C	0,45					
DODACI BETONU						
Glenium 658	1,00	3,60	1,07	3,364		0,0648
Staklena vlakna	0,00	1,00	2,65	0,377		0,0180
-	0,00	0,00	1,00	0,000		0,0000
ZRAK [%]	2,5	0,00	0,00	25		0
AGREGAT		1876	2,70	695		33,77
UKUPNO		2401		1000		43,22

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	18 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
kvarcni pijesak	0	0	1,40	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00
0 - 4	50	938,15	1,40	13,13	0,20	1,88	926,90	16,68
4 - 8	7	131,34	0,95	1,25	0,20	0,26	130,36	2,35
8 - 16	43	806,81	0,39	3,15	0,20	1,61	805,28	14,50
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium 658		3,60					3,60	0,0648
Staklena vlakna		1,00					1,00	0,0180
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		360					360	6,48
VODA		160		17,53		3,8	174	3,13