

Analiza poroznosti i propusnosti procjednog betona

Cindrić, Regina

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:468463>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Regina Cindrić

**Analiza poroznosti i propusnosti procjdnog betona
(*Analysis of porosity and permeability of pervious concrete*)**

Završni rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij
Građevinski materijali**

**Regina Cindrić
JMBAG: 0114033322**

**Analiza poroznosti i propusnosti procjdnog betona
*(Analysis of porosity and permeability of pervious concrete)***

Završni rad

Rijeka, lipanj 2022.

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Regina Cindrić

U Rijeci, 04. srpnja 2022. godine

Naslov rada: Analiza poroznosti i propusnosti procjdnog betona

Student: Regina Cindrić

Mentor: izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Studij: Preddiplomski stručni studij

Kolegij: Građevinski materijali

SAŽETAK

U cilju analize poroznosti i propusnosti procjdnog betona pripremljene su 4 mješavine. Na uzorcima procjdnog betona određena je poroznost kojima se dolazi do određenih rezultata, koji se uspoređuju ovisno o različitim uzorcima te propusnost metodom stalnog stupca vode. Rad sadrži teorijsku razradu teme nakon koje slijedi opis eksperimentalnog istraživanja. Ovom deskriptivnom metodom i fotodokumentacijom (odlazak u laboratorij, pripreme uzoraka, metode ispitivanja, primjena uređaja...) analizirana su stanja područja odnosno pregled ispitivanja koja su radili drugi istraživači dok su proučavali sastav i ponašanje različitih varijanta mješavina procjdnog betona. Zaključci istraživanja odnose se na kontinuiranu potrebu korištenja procjdnog betona kao građevinskog materijala. Istraživanjem je dan doprinos u području ispitivanja svojstva materijala, ugrađivanju materijala i analizi utjecaja granulometrijskog sastava na poroznost i propusnost.

Ključne riječi: procjdni beton, poroznost, propusnost, mjerenje koeficijenta propusnosti, procjdni beton mikroarmiran polimernim vlaknima

Title of Thesis: Analysis of porosity and permeability of pervious concrete

Student: Regina Cindrić

Mentor: Silvija Mrakovčić, PhD

Study programme: Vocational Undergraduate Study Programme in Civil Engineering

Subject: Construction materials

ABSTRACT

In order to analyze the porosity and permeability of pervious concrete, 4 mixtures were prepared. The porosity of the pervious concrete leads to certain results, which are compared depending on the different samples and the permeability of the permanent water column method. Thesis contains a theoretical elaboration of the topic followed by a description of the experimental research. This descriptive method and photo documentation (going to the laboratory, sample preparation, test methods, device application...) were analyzed based on review of tests performed by other researchers while studying the composition and behavior of different variants of pervious concrete. The conclusions of the research refer to the continuous need to use pervious concrete as a building material. The research contributed to the field of material properties testing, material incorporation and analysis of the influence of granulometric composition on porosity and permeability.

Key words: pervious concrete, porous concrete, porosity, permeability, constant head permeability test, polymer fiber reinforced concrete

Zahvala mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić, na vremenu i trudu uloženom u poboljšanje kvalitete mogega završnog rada.

Zahvala tehničkom suradniku Dini Juriševiću na pomoći tijekom izvođenja eksperimentalnog dijela rada u laboratoriju u sklopu Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Posebne zahvale mojoj obitelji na maksimalnoj potpori i razumjevanju tijekom studija.

SADRŽAJ:

Popis tablica:.....	2
Popis slika:.....	3
1.UVOD.....	4
2.SASTAV PROCJEDNOG BETONA.....	7
2.1.AGREGAT.....	7
2.1.1. UTJECAJ GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA NA POROZNOST I PROPUSNOST.....	8
2.2 VODA.....	9
2.3 VEZIVA.....	10
2.4.VLAKNA.....	11
2.5 ADITIVI.....	14
3. STANJE PODRUČJA ISPITIVANJA POROZNOSTI I PROPUSNOSTI ZA PROCJEDNE BETONE I PROCJEDNE BETONE MIKROARMIRANE POLIMERNIM VLAKNIMA.....	15
3.1. ISTRAŽIVANJE „LABORATORY EVALUATION OF PERMEABILITY AND STRENGTH OF POLYMER-MODIFIED PERVIOUS CONCRETE“ (HUANG, B., WU, H., SHU, X., BURDETTE, E.G.).....	16
3.2. ISTRAŽIVANJE „PERVIOUS PAVEMENT SYSTEMS“ U SKLOPU ČLANKA PRACTICAL REVIEW OF PERVIOUS PAVEMENT DESIGNS (MULLANEY, J., LUCKE, T.).....	19
4.EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	21
4.1. PROJEKT SASTAVA BETONA.....	22
4.2. ISPITIVANJE GUSTOĆE SVJEŽEG BETONA.....	22
4.3. ISPITIVANJE POROZNOSTI SVJEŽEG BETONA.....	24
4.4. ISPITIVANJE KONZISTENCIJA SVJEŽEG BETONA METODOM KUGLICE I SLIJEGANJEM.....	28
4.5. ISPITIVANJE GUSTOĆE OČVRSNULOG BETONA.....	32
4.6. ISPITIVANJE POROZNOSTI OČVRSNULOG BETONA.....	35
4.7. ISPITIVANJE PROPUSNOSTI OČVRSNULOG BETONA METODOM STALNOG STUPCA VODE.....	37
5.ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	43
6.ZAKLJUČAK.....	47
POPIS LITERATURE:.....	48

Popis tablica:

Tablica 1: Sastav krupnog agregata korištenog u istraživanju (izvor: Huang, B., Wu, H., Shu, X., Burdette, E.G., Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, članak, Construction and Building Materials 24, str. 818-823, 2009., pristup 13.05.2022.)	17
Tablica 2: Udio materijala u mješavini procjdnog betona mikroarmiranog polimernim vlaknima (izvor: Huang, B., Wu, H., Shu, X., Burdette, E.G., Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, članak, Construction and Building Materials 24, str. 818-823, 2009., pristup 13.05.2022.)	18
Tablica 3: Prikaz sastava mješavina	21
Tablica 4: Prikaz rezultata ispitivanja gustoće svježeg betona	23
Tablica 5: Prikaz rezultata ispitivanja sadržaja šupljina u svježem betonu	27
Tablica 6: Prikaz rezultata ispitivanja gustoće očvrstulog procjdnog betona (izvor: vlastiti prikaz)	33
Tablica 7: Prikaz rezultata ispitivanja sadržaja šupljina u očvrstulom betonu	35
Tablica 8: Prikaz rezultata ispitivanja koeficijenata propusnosti za mješavinu 1	40
Tablica 9: Prikaz rezultata ispitivanja koeficijenata propusnosti za mješavinu 2	40
Tablica 10: Rezultati ispitivanja koeficijenata propusnosti za mješavinu 3	41
Tablica 11: Rezultati ispitivanja koeficijenata propusnosti za mješavinu 4	41
Tablica 12: Prikaz srednje vrijednosti koeficijenta propusnosti	42

Popis slika:

Slika 1 : Prikaz procjednog betona u odnosu na tradicionalni beton (izvor: https://www.pinterest.com/pin/411516484683015795/ , pristup 04.05.2022.)	6
Slika 2 : Prikaz agregata (izvor: vlastita fotografija)	8
Slika 7 : Granulometrijske krivulje u ovisnosti protoka o udjelu pijeska u procjednom betonu (lijevo) i krivulje ovisnosti tlačne čvrstoće o udjelu pijeska u procjednom betonu (desno).....	9
(izvor: [5]).....	9
Slika 3 : Prikaz adekvatnog doziranja vode (izvor: vlastita fotografija)	10
Slika 4 : Prikaz polimernih vlakna (polipropilen) (izvor: vlastita fotografija)	12
Slika 5 : Prikaz staklenih vlakna (izvor: https://www.bitpromet.hr/staklena-vlakna-za-glazuru-sjeckana-12-mm/prid/735 , pristup 20.04.2022.)	13
Slika 6 : Prikaz doziranja superplastifikatora (izvor: vlastita fotografija)	14
Slika 8 : Prikaz postupka punjenja posude u svrhu ispitivanja gustoće svježeg betona	22
(izvor: vlastita fotografija)	22
Slika 9: Prikaz rezultata gustoće svježeg betona	24
Slika 10 : Prikaz postupka zbijanja svježeg betona pomoću Proctorova čekića (izvor: vlastita fotografija).....	25
Slika 11 : Prikaz dobivenih rezultata sadržaja šupljina u svježem betonu	27
Slika 12 : Prikaz punjenja kalupa i zbijanje slojeva mješavine metalnom šipkom (izvor: vlastiti prikaz)	29
Slika 13 : Prikaz poravnavanja površine betona šikom i mjerenje slijeganja h (izvor: vlastiti prikaz)	30
Slika 14 : Prikaz dlanovima formirane kuglice procjednog betona (izvor: vlastita fotografija)	31
Slika 15 : Prikaz usporedbe rezultata srednje vrijednosti gustoće očvrstnalog procjednog betona.....	34
Slika 16 : Prikaz usporedbe rezultata srednje vrijednosti sadržaja šupljina u očvrstnulom procjednom betonu.....	36
Slika 17 : Prikaz uređaja za ispitivanje koeficijenta propusnosti (izvor: vlastita fotografija)	38
Slika 18 : Prikaz uzoraka betona u plastičnim cijevima (izvor: vlastita fotografija).....	39
Slika 19 : Prikaz usporedbe rezultata srednje vrijednosti koeficijenta propusnosti.....	43
Slika 20 : Prikaz odnosa koeficijenta propusnosti i sadržaja šupljina	44
Slika 21 : Prikaz odnosa gustoće i sadržaja šupljina.....	45
Slika 22 : Prikaz odnosa koeficijenta propusnosti i udjela vlakana (izvor: vlastiti prikaz) ..	46

1.UVOD

Procjedni beton je posebna vrsta betona koja sadrži visok udio međusobno povezanih pora što omogućuje veću propusnost takve vrste betona. Sastav procjednog betona čini mješavina krupnozrnatog agregata (jedne frakcije ili dvije nesusjedne frakcije), sitnozrnatog agregata (do 15%), cementa, vode i aditiva ukoliko je to potrebno. Zbog specifičnog granulometrijskog sastava nastaje veliki broj (oko 20%) kontinuiranih šupljina koje pogoduje pronosu većih količina vode kroz pore betona do podzemnih slojeva tla. Procjedni beton naziva se i betonom bez sitnih frakcija, propusnim betonom ili poroznim betonom. Usporedi li se ovaj beton s ostalim uobičajenim vrstama betona, njegova svojstva neosporno opisuju i dokazuju njegovu održivost. Važnije značajke su otpornost na skupljanje pri sušenju, niža volumenska masa, bolja termoizolacijska svojstva, izraženija propusnost, niža tlačna i vlačna čvrstoća, manji pritisak na oplatu tijekom ugradnje betona, duži period njege prije skidanja oplata, ekonomičnost materijala. Visok stupanj poroznosti omogućava veću vodopropusnost toga betona, ali i smanjuje tlačnu čvrstoću. Izuzetan značaj poprima postupak određivanja optimalne razine poroznosti kako bi se postigla tražena svojstva čvrstoće i propusnosti. [3]

Ova se vrsta betona koristi u niskogradnji za izgradnju kolnika u svrhu regulacije oborinskih voda, pri izgradnji parkirališnih prostora, u zonama niskog prometnog opterećenja (nerazvrstane prometnice), pri izgradnji pločnika i drugih površina slične namjene. Procjedni se beton u visokogradnji može koristiti pri izvedbi zidnih konstrukcija radi olakšanja konstrukcije ili postizanja bolje toplinske izolacije, kao pregrada u određenim objektima (zoološkim vrtovima, konjušnicama,...), kao podna obloga u staklenicima radi izbjegavanja nakupljanja vode i u druge slične svrhe.. Upotreba procjednog betona učestalija je zbog svojstava ovog materijala koja su u skladu s načelima održivosti.

Ekološka prihvatljivost temelji se na svojstvima koja utječu na umanjenje buke, ublažavanje efekta toplinskih otoka u urbanim sredinama, umanjenje proklizavanja vozila, smanjenje prskanja vode na prometnicama, ograničavanje prodora zagađenja u podzemnu vodu, smanjenje površinskog otjecanja oborinskih voda. Procjedni beton svojom strukturom apsorbira dio padalina, povećava razine podzemnih voda i štiti prirodne ekosustave.

Uz navedene pozitivne karakteristike, primjena procjednog betona ograničena je u hladnijim klimatskim uvjetima zbog niske tlačne čvrstoće, mogućnosti začepljenja, slabe otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje te izraženijeg krunjenja. [3]

Procjedni beton teško se obrađuje zbog čega se mora adekvatno zbijati kako bi se postigla zadovoljavajuća mehanička svojstva i zadržao potreban stupanj poroznosti. Brojne laboratorijske studije načina zbijanja provedene su kako bi se dobili uzorci identični onima proizvedenim "in-situ". Zaključeno je da zbijanje Proctorovim postupkom najbolje simulira metodu zbijanja na gradilištu. Uz naveden postupak procjedni se beton može zbijati u laboratoriju pomoću metalnog valjka, standardnom metodom zbijanja i vibracijskim zbijanjem. [1]

Svrha izgradnje svih vrsta procjednih kolnika je infiltracija oborinskih voda. Time se želi postići poboljšanje kvalitete oborinske vode, skladištenje vode, smanjenje otjecanja,...

Najčešća primjena procjednog betona je ona za kolnike radi otvorene strukture iz koje proizlaze tri osnovne prednosti u odnosu na tradicionalni beton (Slika 1): [7]

- 1) površina materijala osigurava smanjenje buke
- 2) površina materijala osigurava smanjenje površinskog prskanja
- 3) površina materijala osigurava otpornost na klizanje



Slika 1 : Prikaz procjednog betona u odnosu na tradicionalni beton (izvor: <https://www.pinterest.com/pin/411516484683015795/>, pristup 04.05.2022.)

Detalnija razrada teme, pregled svojstava materijala, ponašanje materijala u odnosu na druge građevinske materijale, ispitivanje i analiza materijala te dobiveni rezultati i zaključci biti će prikazani u narednim poglavljima ovog rada.

2.SASTAV PROCJEDNOG BETONA

Sastav procjednog betona bitan je zbog nastojanja da se postigne prihvatljiva protočnost tekućine kroz beton uz prihvatljivu tlačnu čvrstoću i vlačnu čvrstoću savijanjem. U sljedećim potpoglavljima ovog završnog rada detaljnije su analizirane komponente sastava betona te utjecaj granulometrije i veličine zrna agregata na propusnost i poroznost. Na temelju poznavanja osobitosti komponenata koje tvore mješavinu odnosno procjedni beton pokušava se projektirati takva mješavina čija će svojstva u svježem i očvrslulom stanju biti zadovoljavajuća. [5]

2.1.AGREGAT

Agregat zauzima najveći dio volumena betona, pa tako i procjednog betona, što ga čini njegovom glavnom komponentom. Pri izradi mješavina procjednog betona sitan agregat se izbjegava ili se koristi u malim količinama (do 15% ukupne mase agregata). Razlog izbjegavanja sitnog agregata je sprječavanje zapunjavanja šupljina te smanjenja vodopropusnosti. Upotreba krupnog agregata ograničava se na jednu frakciju ili dvije nesusedne frakcije. Za krupni agregat može se koristiti riječni šljunak, no najčešće se koristi drobljeni agregat (Slika 2) preporučene veličine zrna od 8 do 22 mm. Zbog neuobičajenog granulometrijskog sastava teško se postižu velike tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće savijanjem. Kako bi se postigle veće čvrstoće, za istu granulometriju, koristi se riječni agregat. [2]

Ovisno o vrsti agregata i načinu zbijanja poroznost procjednog betona kreće se između 15 i 30% ukupnog volumena. [4]

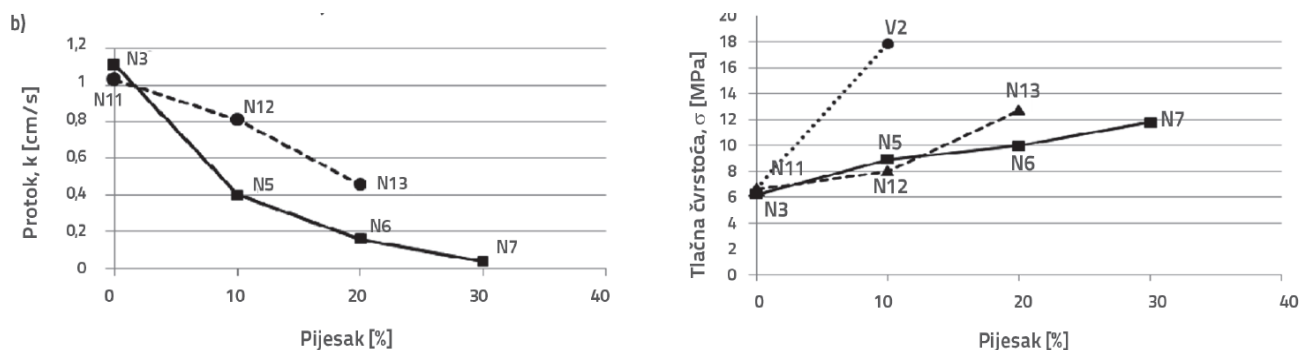


Slika 2 : Prikaz agregata (izvor: vlastita fotografija)

2.1.1. UTJECAJ GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA NA POROZNOST I PROPUSNOST

Posebnim granulometrijskim sastavom agregata za procjedni beton utječe se na vrijednosti koeficijenta protočnosti te posljedično na tlačne čvrstoće (Slika 7). Na dijagramima su prikazani rezultati ispitivanja propusnosti i tlačne čvrstoće na različitim mješavinama. Mješavine N11, N12 i N13 napravljene su s agregatom 11/16 i udjelom pijeska 0%, 10% i 20%. Mješavine N3, N5, N6 i N7 napravljene su s agregatom 8/16 te udjelima pijeska od 0%, 10% i 20% i 30%. Na dijagramima je vidljivo da je protočnost obrnuto proporcionalna udjelu sitnog agregata. Nasuprot tome, s većim udjelom pijeska tlačna se

čvrstoća povećava. Udio dodanog pijeska može biti do 15 % jer veći udio pijeska značajno smanjuje procjedna svojstva ovih betona. [5]



Slika 7 : Granulometrijske krivulje u ovisnosti protoka o udjelu pijeska u procjednog betonu (lijevo) i krivulje ovisnosti tlačne čvrstoće o udjelu pijeska u procjednog betonu (desno) (izvor: [5])

Uz agregat, na poroznost i propusnost znatno utječe i količina cementa (velika količina; više od 400 kg/m^3) čime se postiže zadovoljavajuća čvrstoća zbog male veličine zrna u odnosu na agregat. [4]

2.2 VODA

Za izradu betona, pa tako i procjednog betona najbolje je koristiti pitku vodu. Što se tiče projektiranja procjernih betonskih mješavina, iznimna važnost pridodaje se određivanju količine vode. Nedostatak vode ili prevelika količina vode u mješavini mogu rezultirati nastajanjem smjese koja nije pogodna za daljnja zbijanja i ugrađivanja. Adekvatnim doziranjem vode treba projektirati mješavinu kod koje cementna pasta ne otječe sa zrna agregata. Vodocementni faktor koji se koristi kreće se u rasponu od 0,27 do 0,30. [2] [4]



Slika 3 : Prikaz adekvatnog doziranja vode (izvor: vlastita fotografija)

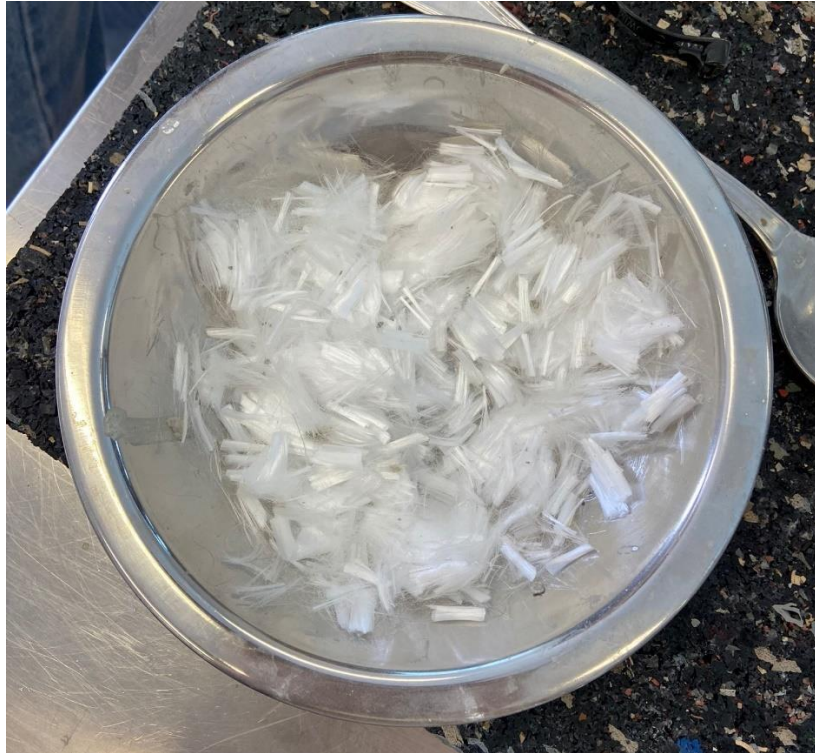
2.3 VEZIVA

Veživo u procjedom betonu najčešće je portland cement kao i kod klasičnih betona. Alternativa korištenju portland cementa su pucolani (leteći pepeo, silicijska prašina) koji se mogu dodati umjesto dijela cementa. Prije korištenja ranije navedenih mineralnih dodataka preporuča se ispitati svojstva materijala prije ugradnje betona, kako bi se utvrdio utjecaj dodanih materijala na svojstva procjednog betona. [2]

2.4.VLAKNA

Vlakna se dodaju betonu zbog poboljšanja nekih svojstva samog betona. Odabir vrste vlakana ovisi o potrebama konstrukcije i svojstvima betona na koja se želi utjecati. Procjednom betonu mogu se dodati polimerna, staklena i prirodna vlakna. Za procjedni beton se ne koriste čelična vlakna iz razloga što bi stalno u doticaju s vodom korodirala i izgubila svoja svojstva koja isključivo služe za povećanje otpornosti na habanje i povećanje duktilnosti.

Polimerna vlakna mogu biti poliesterska, polipropilenska (Slika 4), polietilenska i aramidna. Uspoređuju li se sa čeličnim vlaknima u običnom betonu, prednost im je ta što su fleksibilna, ne korodiraju i ne oštećuju strojeve. Mogu se koristiti kod izrade gotovo svih građevinskih elemenata. [2]



Slika 4 : Prikaz polimernih vlakna (polipropilen) (izvor: vlastita fotografija)

Staklena vlakna (Slika 5) dobivaju se iz rastaljenog stakla postupkom izvlačenja niti i namatanjem na brzotirajući valjak ili centrifugalnim postupkom uz puhanje s tlačnim zrakom. Staklena vlakna opisuju se kao negoriva, čvrsta, otporna na razne kemikalije i dobrih izolacijskih svojstava. Dosta su krta i kruta. Primjenjuju se kada se betonu treba povećati vlačna čvrstoća i otpornost na habanje. [2]

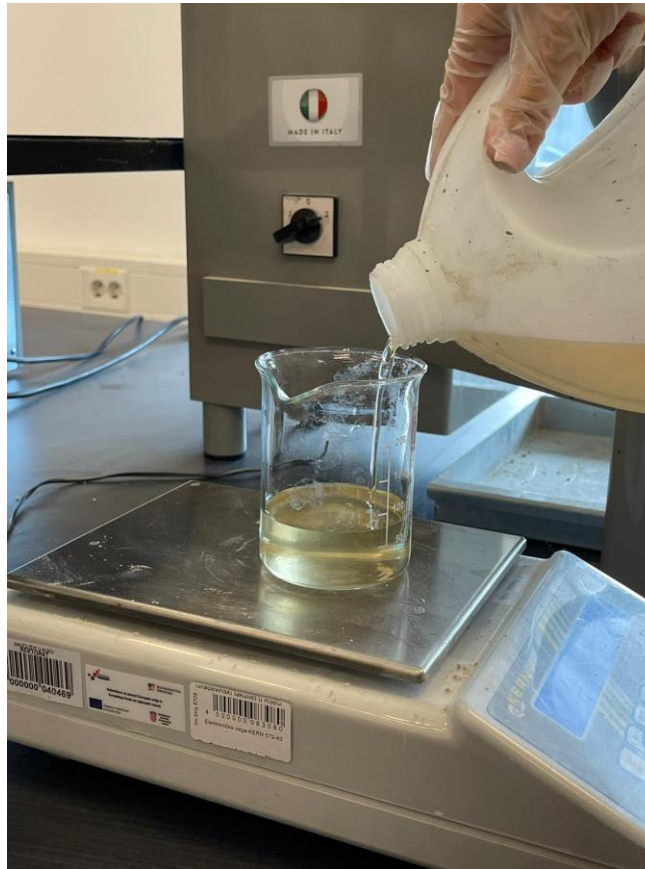


Slika 5 : Prikaz staklenih vlakna (izvor: <https://www.bitpromet.hr/staklena-vlakna-za-glazuru-sjeckana-12-mm/prid/735>, pristup 20.04.2022.)

Prirodna vlakna su vlakna koja nalazimo u prirodi. Za mikroarmiranje betona mogu se koristiti brnistra, konoplja, bambus, agava, drvo, kokosov orah, juta i slično.

2.5 ADITIVI

Svrha korištenja aditiva pri izradi procjdnog betona je djelovanje na obradljivost betona (plastifikatori i superplastifikatori (Slika 6)). [2]



Slika 6 : Prikaz doziranja superplastifikatora (izvor: vlastita fotografija)

Mješavine procjdnog betona sadrže preporučene veličine zrna agregata u rasponu od 8 do 22 mm. Sukladno tome, u potpunosti se izostavlja sitni agregat ili se dodaje u manjem postotku. Zbog takve strukture, procjdni betoni spravljeni bez aditiva imaju relativno malu tlačnu čvrstoću, od 2,8 do 28 MPa te se ovakva vrsta betona ne može ugraditi u znatno opterećene prometne ili druge površine. [5]

3. STANJE PODRUČJA ISPITIVANJA POROZNOSTI I PROPUSNOSTI ZA PROCJEDNE BETONE I PROCJEDNE BETONE MIKROARMIRANE POLIMERNIM VLAKNIMA

Pri projektiranju sastava procjednog betona bitno je pažnju usmjeriti ka činjenici da se na što ekonomičniji način postigne beton odgovarajuće čvrstoće, poroznosti i propusnosti.

Bitan je faktor odabir odgovarajućih sastojaka betona te određivanje međusobnog odnosa (udjela) sastojaka. Odabir materijala koji čine procjedni beton ovisi o svojstvima materijala, o postupku ugradnje te namjeni konstrukcije. [3]

Radi poboljšanja svojstva betona u mješavinu se mogu dodati staklena, ugljična, sintetička i celulozna vlakna. Postoje mnogi zaključci znanstvenika na temu ponašanja betona sukladno dodavanju makro/mikro vlakna u mješavinu. Neki od njih su sljedeći: [1]

- 1) Dodavanjem makrosintetičnih vlakna u procjedni beton smanjuje se njegova propusnost i koeficijent infiltracije ali ona nemaju značajan utjecaj na tlačnu i vlačnu čvrstoću. (Kevern et al.)
- 2) Dodavanjem ugljičnih vlakna za mikroarmiranje procjednog betona postiže se poboljšanje čvrstoće betona. (Rangelov et al.)
- 3) Vlačna čvrstoća na savijanje povećava se dodavanjem bazaltnih vlakna. (Liu et al.)
- 4) Celulozna vlakna učinkovito poboljšavaju vlačnu čvrstoću i otpornost betona na proces abrazije i smrzavanja-odmrzavanja. (Amde i Rogge)
- 5) Dodavanjem kevlara, polivinil alkohola i polietilenskih vlakna ultra-visoke molekularne mase otpornost na savijanje procjednih betonskih opeka za pločnike raste za 9,5%. (Oni et al.)
- 6) Dodavanjem recikliranih vlakana procjedni beton dobiva duktilne karakteristike i visoku čvrstoću nakon pucanja. (Novak et al.)

Cilj ispitivanja poroznosti i propusnosti procjdnog betona mikroarmiranog polimernim vlaknima je procijeniti učinak polimera na mehanička i fizička svojstva procjdnog betona. Poželjno je da se korištenjem polimera uravnoteži propusnost i čvrstoća betona. Tako smjesa mora biti dovoljno propusna dok u isto vrijeme podnosi tražena prometna opterećenja. [6]

U nastavku teksta dan je pregled istraživanja koja služe za usporedbu s rezultatima eksperimentalnog dijela rada (poglavlje 4.).

3.1. ISTRAŽIVANJE „LABORATORY EVALUATION OF PERMEABILITY AND STRENGTH OF POLYMER-MODIFIED PERVIOUS CONCRETE“ (HUANG, B., WU, H., SHU, X., BURDETTE, E.G.)

Huang i suradnici u radu [6] ispitivali su i analizirali udio šupljina i propusnost procjdnog betona modificiranog polimerima s dodatkom polimernih vlakana. [6]

Za ovo istraživanje, za izradu mješavina betona korišten je agregat vapnenačkog podrijetla veličine zrna od 12,5 mm, 9,5 mm i 4,75 mm (Tablica 1), te polimer (SBR lateks) kako bi se poboljšala čvrstoća procjdnog betona. SBR lateks je vrsta visokopolimerne disperzijske emulzije kojoj su glavni sastojci butadien, stiren i voda. Karakteristike ovog materijala slične su onima prirodne gume što znači da je materijal otporan na blaga otapala i kemikalije te se može uspješno vezati na mnoge materijale. Osim lateksa, u smjesu su dodana i polipropilenska vlakna kako bi se dodatno poboljšala mehanička svojstva. Polipropilenska vlakna u smjesi imaju sljedeću ulogu: inhibiraju i kontroliraju stvaranje pukotina u betonu, ojačavaju otpornost betona na utjecaj udarnih sila te produljuju trajnost konstrukcije. Kao vezivo je korišten obični portland cement tipa I.

Tablica 1: Sastav krupnog agregata korištenog u istraživanju (izvor: Huang, B., Wu, H., Shu, X., Burdette, E.G., Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, članak, Construction and Building Materials 24, str. 818-823, 2009., pristup 13.05.2022.)

Table 1
Properties of coarse aggregate.

Aggregate size (mm)	Unit weight (kg/m ³)	Bulk specific gravity	Apparent specific gravity	Absorption (%)	Void content (%)
12.5	1426	2.759	2.797	0.48	40
9.5	1393	2.758	2.801	0.56	43
4.75	1374	2.760	2.811	0.66	41

Sukladno karakteristikama navedenih materijala izrađena je mješavina masenih omjera cement : krupni agregat : voda = 1 : 4,5 : 0,35. U mješavinama u kojima su lateks i/ili fini agregat uključeni u smjesu, lateks je korišten kao zamjena za 10% mase cementa dok je prirodni pijesak korišten za zamjenu 7% mase krupnog agregata.

Uspoređene su performanse i svojstva ove mješavine u odnosu na klasični procjedni beton.

Smjesa je miješana mehaničkom miješalicom. Cilindrični uzorci promjera 152 mm i visine 305 mm zbijani su standardnom šipkom za zbijanje. Uzorci su osušeni pri standardnoj vlazi u komori za sušenje do dana testiranja. Osim za ispitivanje tlačne čvrstoće, uzorci su prije ispitivanja izrezani na manje dimenzije debljine oko 76 mm za druga ispitivanja. Izrađena su po tri uzorka od svake mješavine.

U radu su preporučene posebne metode mikroarmiranja polimernim vlaknima kojima se vlakna adekvatno odvajaju i disperziraju u mješavinama procjedinog betona. Sugerira se i korištenje kratkih vlakana radi lakše raspodjele unutar mješavine.

Napravljene su četiri mješavine po svakoj granulaciji agregata (Tablica 2) (granulacije su 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm bez pijeska te granulacije jednakih vrijednosti sa dodanim

pijeskom). Mješavine su definirane slovima A, B, C i D. Slovo A označava uzorak koji služi za kontrolu mješavine. Slovo B služi za provjeru modifikacije mješavine dodavanjem lateksa. Slovo C služi za provjeru mješavine dodavanjem vlakna dok se u mješavinu D dodaju i lateks i vlakna. Tako su ukupno formirane dvadeset i četiri mješavine čija se razlika sastava vidi po ranije navedenom udijelu pijeska u agregatu. U istraživanju tablično su prikazane vrijednosti ne samo agregata mješavine nego i cementa, lateksa (vezivo), krupnog agregata, dodanog riječnog pijeska, vode te vlakna. Za sve navedene mješavine određen je udio zračnih šupljina, ispitana propusnost, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem.

Tablica 2: Udio materijala u mješavini procjdnog betona mikroarmiranog polimernim vlaknima (izvor: Huang, B., Wu, H., Shu, X., Burdette, E.G., Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, članak, Construction and Building Materials 24, str. 818-823, 2009., pristup 13.05.2022.)

Table 2
Mix proportions for PMPC (unit: kg/m³).

Agg.	Mix type	Cement	Latex binder	Coarse aggregate	River sand	Water	Fiber
No sand 12.5 mm	A	320.2		1440.8		112.1	
	B	314.8	31.5	1416.6		93.6	
	C	320.2		1440.8		112.1	0.9
	D	314.8	31.5	1416.6		93.6	0.9
9.5 mm	A	330.4		1486.9		115.6	
	B	324.9	32.5	1461.9		96.6	
	C	330.4		1486.9		115.6	0.9
	D	324.9	32.5	1461.9		96.6	0.9
4.75 mm	A	352.6		1586.9		123.4	
	B	346.7	34.7	1560.3		103.1	
	C	352.6		1586.9		123.4	0.9
	D	346.7	34.7	1560.3		103.1	0.9
With sand 12.5 mm	A	300.6		1352.6	94.7	105.2	
	B	295.8	29.6	1331.0	93.2	87.9	
	C	300.6		1352.6	94.7	105.2	0.9
	D	295.8	29.6	1331.0	93.2	87.9	0.9
9.5 mm	A	311.9		1403.6	98.3	109.2	
	B	306.9	30.7	1381.2	96.7	91.3	
	C	311.9		1403.6	98.3	109.2	0.9
	D	306.9	30.7	1381.2	96.7	91.3	0.9
4.75 mm	A	329.8		1483.9	103.9	115.4	
	B	324.5	32.5	1460.3	102.2	96.5	
	C	329.8		1483.9	103.9	115.4	0.9
	D	324.5	32.5	1460.3	102.2	96.5	0.9

Note: A – control; B – latex modified; C – fiber added; D – latex and fiber.

Zaključcima istraživanja se potiče korištenje polimernih vlakna, prirodnog pijeska i lateksa. Korištenjem pravilnog omjera navedenih elemenata mješavine procjednog betona postiže se smanjenje poroznosti i propusnosti betona, te se povećava tlačna čvrstoća.

Navedene pozitivne karakteristike mješavine procjednog betona obavezne su pri ugrađivanju istog u građevinske konstrukcije poput kolnika ili pješačkih površina.

3.2. ISTRAŽIVANJE „PERVIOUS PAVEMENT SYSTEMS“ U SKLOPU ČLANKA PRACTICAL REVIEW OF PERVIOUS PAVEMENT DESIGNS (MULLANEY, J., LUCKE, T.)

Mješavina procjednog betona korištena za potrebe istraživanja [7] sastoji se od portland cementnog veziva, agregata i vode. Posebnost opisane mješavine je u tome što je sitni agregat, koji je inače uključen u proizvodnju tradicionalnog betona, izostavljen. Na temelju navedenog povećava se kapacitet infiltracije odnosno propusnosti procjednog betona.

Ovo istraživanje se fokusira na kapacitet infiltracije, uklanjanje nečistih tvari i sastava betona te procese začepjenja i održavanja kolnika od procjednog betona.

Istraživanje kapaciteta infiltracije je provedeno kroz devet ključnih studija. Analiziran je hidrološki utjecaj procjednih kolničkih sustava. Rezultati devet studija tablično su prikazani u istraživanju po sljedećim kategorijama: lokacija istraživanja (UK, SAD, Australija i Belgija), navedeni rezultati istraživanja, tip procjedne konstrukcije i korištenje geotekstila.

Otjecanje padalina s krova, pločnika i pješačkih površina sadrži onečišćujuće tvari poput teških metala, fosfora, dušika, ulja i sedimenta. Navedene onečišćene oborinske vode negativno djeluju na slivove, zamućuju plovne puteve, zagađuju izvore itd. Istraživanjem je tablično prikazan niz zagađivača koji se obično nalaze na prometnicama. Vrste i koncentracija zagađivača ovise o namjeni konstrukcije, gustoći naseljenosti, geologiji, topografiji, trajanju i intenzitetu oborinskih voda unutar sliva. Zbog procesa infiltracije kolnici od procjednog betona pokazali su se učinkovitima kod uklanjanja zagađenih tvari.

Začepljenje odnosno blokiranje praznina i površine procjedinih kolničkih sustava smanjuje poroznost, propusnost te stopu infiltracije. Raspodjela veličine čestica materijala koje dovode do začepljenja i struktura pora betona utječu na učinkovitost procjedinih kolnika. Pretpostavka je da bi uz redovito pregledavanje i održavanje konici trebali trajati između dvadeset i dvadeset pet godina.

Geotekstili se često koriste pri projektiranju prethodno navedenih sustava kako bi odvojili podlogu od ostalih slojeva, djelovali kao ojačanje, pružili stabilnost te osigurali potrebnu filtraciju.

U urbanom okruženju stabla su često izložena nedostatku vode te namjernom ili nenamjernom zbijanju tla. Nedostatak vode može uzrokovati da korjenje drveća traži vodu na površini ili ispod površine kolnika što dovodi do oštećenja infrastrukture. Procjedni kolnici uz rješavanje problema probijanja korijenja pružaju poboljšane uvjete za uzgoj vegetacije. Porozna struktura omogućava prolaz vlage i kisika podzemnom tlu osiguravajući rast korijenja. U istraživanjima naveden je podatak da se ugradnjom procjedinog betona rast drveća povećao za 28 %.

Navedenim istraživanjem zaključeno je da su ključni izazovi pri ugradnji procjedinog betona osiguranje odgovarajuće čvrstoće i izdržljivosti konstrukcije te veći troškovi ugradnje.

Navodi i rasprave istraživanja fokusirani su na kapacitet infiltracije kroz procjedni beton, učinkovitost uklanjanja onečišćujućih tvari te procese začepljenja i održavanja kolnika.

4.EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Za potrebe eksperimentalnog dijela rada napravljene su 4 mješavine procjedinog betona čiji je sastav prikazan u Tablici 3. Iz svake je mješavine u svrhu ispitivanja formirano po 6 uzoraka oblika kocke koji služe za određivanje gustoće i udjela pora te 3 uzorka u plastičnim cijevima za ispitivanje propusnosti.

Na svježem betonu provedena su ispitivanja gustoće svježeg betona, poroznosti svježeg betona te konzistencije svježeg betona metodom kuglice i slijeganjem. Na očvrslom betonu provedena su ispitivanja gustoće očvrslulog betona, poroznosti očvrslulog betona te propusnosti očvrslulog betona metodom stalnog stupca vode.

Sva ispitivanja i izrada betonskih mješavina provedena su u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Laboratorij je specijaliziran za ispitivanje betona i njegovih komponenti.

Tablica 3: Prikaz sastava mješavina

SASTAV MJEŠAVINA						
OZNAKA MJEŠAVINE	VELIČINA AGREGATA [kg/m ³]	CEMENT [kg/m ³]	VODA [kg/m ³]	AGREGAT [kg/m ³]	SUPERPLASTIFIKATOR [kg/m ³]	MF VLAKNA [kg/m ³]
1	0-4 8-16	334	118	156 1356	1	-
2	0-4 8-16	334	118	156 1356	1	2 (0,2%)
3	0-4 8-16	359	122,5	148 1333	-	-
4	0-4 8-16	350	122,5	148 1333	-	2 (0,2%)

4.1. PROJEKT SASTAVA BETONA

4.2. ISPITIVANJE GUSTOĆE SVJEŽEG BETONA

Postupak

Ispitivanje gustoće svježeg procjedbog betona provedeno je sukladno normi HRN EN 12350-6. Za određivanje gustoće korištena je posuda volumena 7 litara, metalna šipka, te vaga za mjerenje mase preciznosti 0,01 kg.

Ispitivanje gustoće svježeg betona provedeno je tako da je posuda punjena u 3 sloja (Slika 8) koja su zbijana s 20 udaraca uz pomoć metalne šipke. Nakon što je posuda napunjena do vrha i provedeno zbijanje svih slojeva, površina betona je zaravnata metalnom ravnjačom. Potom je izvagana masa svježeg betona u posudi, te je zabilježena vrijednost koju je vaga pokazala.



Slika 8 : Prikaz postupka punjenja posude u svrhu ispitivanja gustoće svježeg betona
(izvor: vlastita fotografija)

Gustoća svježeg procjdnog betona računata je prema izrazu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

gdje je:

ρ – gustoća svježeg procjdnog betona [kg/m^3]

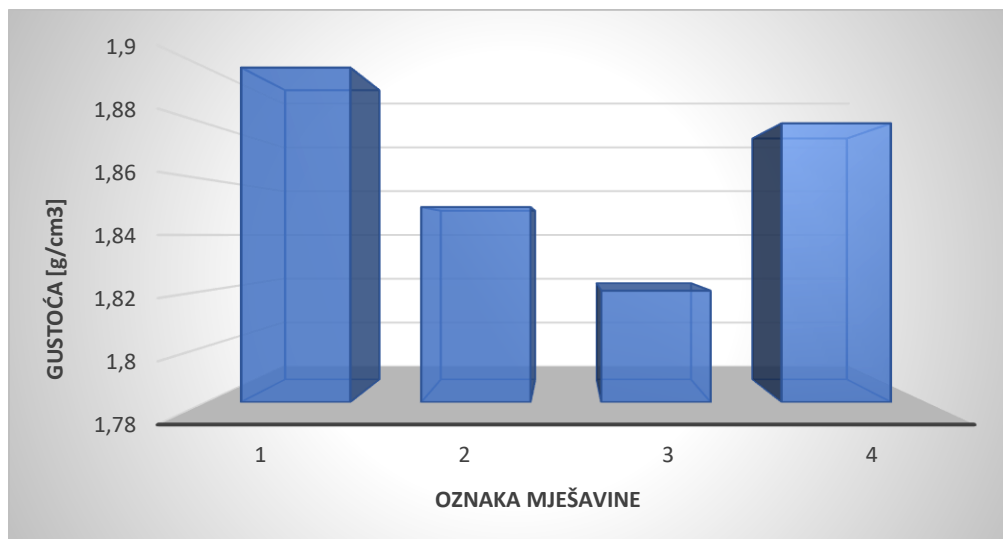
m – masa svježeg procjdnog betona u posudi [kg]

V – volumen posude [m^3]

U Tablici 3 prikazani su rezultati ispitivanja gustoće svježeg procjdnog betona. Ispitivanje je provedeno na ukupno 4 mješavine. Usporedba dobivenih rezultata gustoće svježeg betona po mješavinama prikazana je na Slici 9.

Tablica 4: Prikaz rezultata ispitivanja gustoće svježeg betona

GUSTOĆA SVJEŽEG BETONA		
OZNAKA MJEŠAVINE	MASA BETONA U POSUDI VOLUMENA 7 [kg]	GUSTOĆA SVJEŽEG BETONA [kg/m^3]
1	13,30	1899,29
2	12,94	1848,57
3	12,77	1824,29
4	13,17	1881,43
VRIJEDNOST SREDNJE GUSTOĆE		1863,40



Slika 9: Prikaz rezultata gustoće svježeg betona

4.3. ISPITIVANJE POROZNOSTI SVJEŽEG BETONA

Ispitivanje sadržaja šupljina najčešće se ispituje porometrom. Kod procjednog betona navedena metoda nije moguća zbog toga što voda koja se ulije u beton prije samog nanošenja početnog tlaka, odmah prolazi kroz šupljine. Opisani postupak daje neadekvatne rezultate.

Zbog toga se poroznost ispituje sukladno normi ASTM C 1688-08 (Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete).

Postupak

Navlažena je posuda ukupnog volumena od 7 litara. Beton je stavljen u posudu u dva sloja, svaki je sloj nabijan s dvadeset udaraca pomoću Proctorovog čekića kojem je visina padanja iznosila 305 mm (Slika 10). Posuda je prepunjena prije samog nabijanja gornjeg sloja te je stoga beton izlazio 3 mm preko ruba posude nakon što je zbijen gornji sloj. Zatim je beton opet zbijan 10 puta te je zbijanje trajalo dok nije bilo viška betona iznad ruba posude. Višak materijala je odstranjen i površina je zaglađena pomoću ravnjače. Nakon toga je izvagana posuda s betonom i zabilježena vrijednost koju pokazuje vaga.



Slika 10 : Prikaz postupka zbijanja svježeg betona pomoću Proctorova čekića (izvor: vlastita fotografija)

Gustoća svježeg procjdnog betona računata je prema izrazu (4.1)

Izračun šupljina betona je računat prema izrazu:

$$U = \frac{T - \rho}{T} \times 100 \% \quad (4.2)$$

gdje je:

U – sadržaj šupljina u svježem procjdnom betonu [%]

T – teoretska gustoća svježeg procjdnog betona [kg/m^3]

ρ – gustoća svježeg procjdnog betona [kg/m^3]

Teoretska gustoća svježeg procjedinog betona računata je prema izrazu:

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (4.3)$$

gdje je:

T – teoretska gustoća svježeg procjedinog betona [kg/m³]

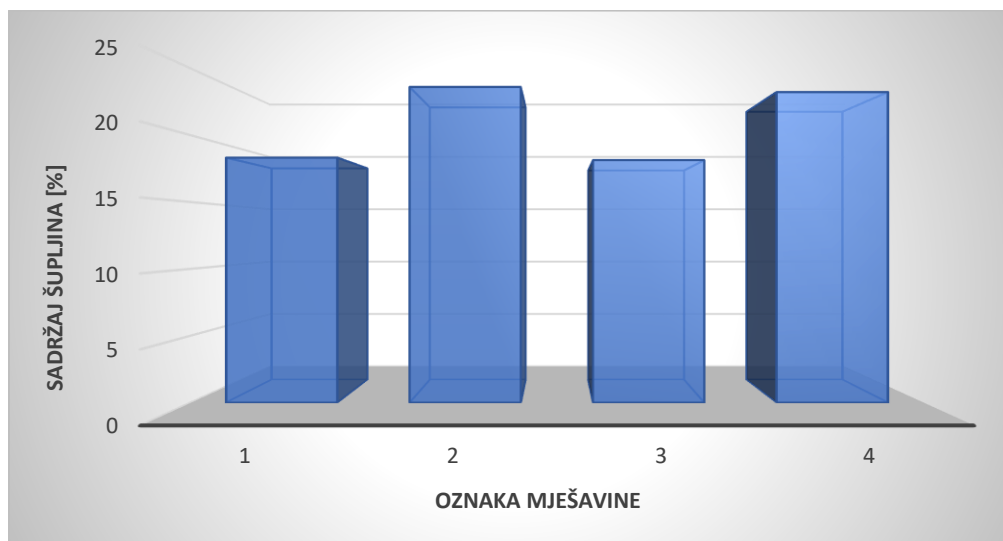
M_s – ukupna masa sastojaka procjedinog betona [kg]

V_s – suma apsolutnih volumena sastojaka procjedinog betona [m³]

Dobiveni rezultati ispitivanja sadržaja šupljina u svježem betonu su prikazani u Tablici 4. Ispitivanje je provedeno na ukupno 4 uzorka, dakle jednom uzorku po mješavini (ukupno 4 mješavine). Rezultati dobivenih sadržaja šupljina u svježem betonu po mješavinama te njihova usporedba prikazani su na Slici 11.

Tablica 5: Prikaz rezultata ispitivanja sadržaja šupljina u svježem betonu

SADRŽAJ ŠUPLJINA U SVJEŽEM BETONU				
OZNAKA MJEŠAVINE	SREDNJA MASA BETONA U POSUDI VOLUMENA 7 LITARA [kg]	SREDNJA GUSTOĆA SVJEŽEG BETONA [kg/m ³]	TEORETSKA GUSTOĆA SVJEŽEG BETONA [kg/m ³]	SADRŽAJ ŠUPLJINA U SVJEŽEM BETONU [%]
1	14,28	2040,00	2497,14	18,31
2	13,35	1907,14	2495,88	23,59
3	14,29	2041,43	2493,62	18,13
4	13,38	1911,43	2489,18	23,21



Slika 11 : Prikaz dobivenih rezultata sadržaja šupljina u svježem betonu

4.4. ISPITIVANJE KONZISTENCIJA SVJEŽEG BETONA METODOM KUGLICE I SLIJEGANJEM

Ispitivanjem konzistencije svježeg procjednog betona slijeganjem moguće je postići slijeganje materijala od 10 mm do 20mm. Izvan navedenih granica ispitivanje slijeganja nije primjenjivo, u tom se slučaju primjenjuju druge metode. Metoda nije primjenjiva ako se slijeganje nastavi i nakon perioda od 1 minute nakon podizanja kalupa. U slučaju kada je najveće zrno agregata veće od 40 mm, metoda također nije pogodna. [8]

Postupak ispitivanja konzistencije metodom slijeganja

Navlažen kalup postavljen je na baznu ploču, a sve skupa navodoravnu površinu. Tijekom punjenja kalup je trebalo čvrsto držati pritisnut na baznu ploču uz pomoć kvačica ili stojeći na istakama za stopala.

Kalup je zatim ispunjen u tri sloja (Slika12). Svaki od slojeva približno je zauzima trećinu kalupa kad je zbijen. Svaki sloj je zbijan s 25 udaraca šipkom za zbijanje (Slika12). Bilo je nužno ravnomjerno rasporediti udarce svakog sloja pazeći da se ne udara u bazu (prvi sloj), odnosno da udarci samo prodru u donji sloj (drugi i gornji sloj). Tijekom punjenja i zbijanja gornjeg sloja beton je usut iznad gornjeg ruba kalupa prije početka zbijanja.



Slika 12 : Prikaz punjenja kalupa i zbijanje slojeva mješavine metalnom šipkom (izvor: vlastiti prikaz)

Nakon zbijanja zadnjeg sloja poravnana je površina betona valjajući je šipkom za zbijanje (Slika13). Postupak podizanja kalupa proveden je u periodu od dvije do pet sekundi ravnomjernim podizanjem prema gore, bez bočnih ili torzijskih pokreta koji bi se prenijeli na beton. Postupak je proveden bez prekida i unutar 150 s od početka punjenja do uklanjanja kalupa. Neposredno nakon uklanjanja kalupa izmjereno je i zapisano slijeganje (h), određivanjem razlike između visine kalupa i najviše točke slegnutog ispitnog uzorka (Slika13).



Slika 13 : Prikaz poravnavanja površine betona šikom i mjerenje slijeganja h (izvor: vlastiti prikaz)

Rezultat ispitivanja

Ispitivanje je regularno samo onda kada je postignuto pravo slijeganje, odnosno slijeganje pri kojemu beton ostaje stvarno netaknut i simetričan. Ako se uzorak smakne, mora se uzeti drugi uzorak i ponoviti postupak. Ukoliko dva uzastopna ispitivanja pokažu takve rezultate, dio se betona smakne od mase ispitnog uzorka te takvom betonu nedostaje kohezivnost i potrebna plastičnost za koju se primjenjuje ispitivanje slijeganjem. [9]

Rezultat ispitivanja je da nije došlo do slijeganja zato jer je korišten veliki udio krupnog agregata. Beton je ostao potrebno kohezivan i plastičan, uzorak se nije smaknuo.

Postupak ispitivanja konzistencije metodom kuglice

Provjerena je konzistencija procjdnog betona metodom izrade kuglice. Uspješna provedba ovog postupka rezultira formiranjem pravilnog oblika kuglice do kojeg ne može doći ukoliko u smjesi ima viška ili manjka vode. Formiranje kuglice dlanovima se provodi s ciljem dobivanja strukture koja se neće raspasti ili izgubiti svojstvo poroznosti tijekom procesa ulijevanja paste u šupljine između agregata. Dlanovima formirana kuglica (Slika 14) zadržala je svoj oblik, iz čega je zaključeno da beton ima zadovoljavajuću obradljivost.



Slika 14 : Prikaz dlanovima formirane kuglice procjdnog betona (izvor: vlastita fotografija)

4.5. ISPITIVANJE GUSTOĆE OČVRSNULOG BETONA

Gustoća očvrtnulog procjednog betona je ispitana sukladno normi HRN EN 12390- 7. Za svaku mješavinu su izrađena po 3 uzorka - kocke dimenzija $70 \times 70 \times 70$ mm. Postupak ispitivanja gustoće očvrtnulog procjednog betona započeo je potapanjem uzoraka u vodu na period koji je trajao 24 sata. Nakon što je uzorak izvađen iz vode, obrisao je krpom i izvagan na zraku. Navedenim postupkom dobivena je masa zasićenog površinski suhog uzorka (m_{zps}). Nakon toga je taj isti uzorak izvagan pod vodom, te je dobijena masa uzorka betona vaganog pod vodom (m_{zw}). Masa vode podignuta uslijed uranjanja (m) dobivena je razlikom mase uzorka vaganog na zraku i pod vodom. Uz pomoć poznate gustoće vode i mase vode koja se podigla uslijed uranjanja dobiven je volumen čvrste tvari, odnosno volumen bez pora i šupljina.

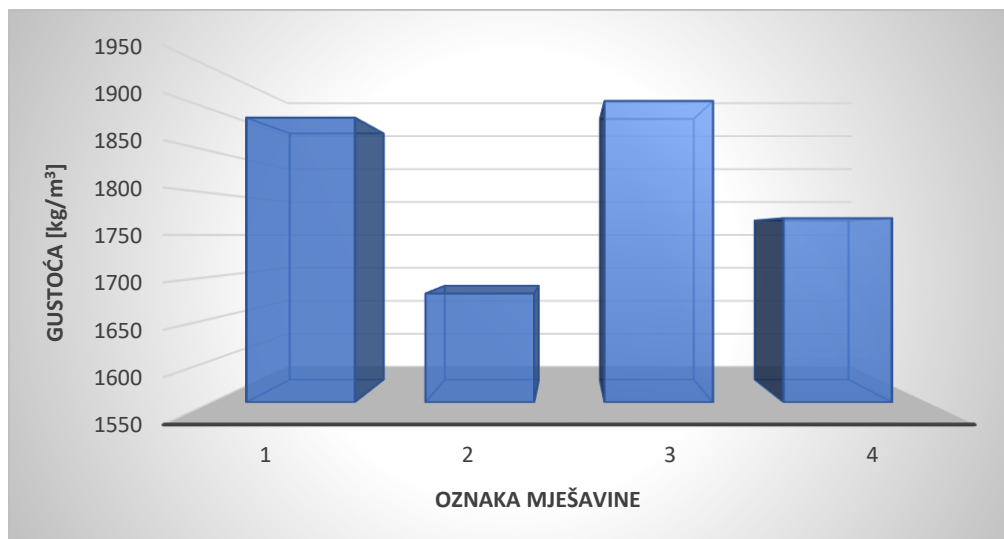
Volumen kocke je izračunan u skladu sa dimenzijama kocke. Volumen šupljina je dobiven kao razlika volumena kocke i volumena čvrste tvari. Gustoća očvrtnulog procjednog betona ekvivalentna je omjeru mase zasićenog površinski suhog uzorka vaganog na zraku i volumenu kocke.

Rezultati ispitivanja gustoće očvrtnulog procjednog betona svake od mješavina prikazani su Tablicom 6. Ispitivanje je provedeno na ukupno 4 mješavine. Pomoću dobivenih rezultata utvrđena je srednja vrijednost gustoće za pojedinu mješavinu kao aritmetička sredina 3 ispitana uzorka.

Tablica 6: Prikaz rezultata ispitivanja gustoće očvrnulog procjdnog betona (izvor: vlastiti prikaz)

GUSTOĆA OČVRSNULOG PROCJDNOG BETONA									
OZNAKA MJEŠAVINE	BROJ UZORKA	m_{zps} [kg]	m_{zw} [kg]	m [kg]	$V_{čvrste\ tvari}$ [m ³]	V_{kocke} [m ³]	$V_{šupljina}$ [m ³]	GUSTOĆA OČVRSNULOG BETONA [kg/m ³]	SREDNJA VRIJEDNOST GUSTOĆE [kg/m ³]
1	1.1	0,613		0,245	$244,6 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$98,4 \times 10^{-6}$	1790	1890
	1.2	0,652	0,369	0,283	$283,3 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$59,7 \times 10^{-6}$	1900	
	1.3	0,684		0,315	$314,9 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$28,1 \times 10^{-6}$	1990	
2	2.1	0,584		0,234	$234,3 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$108,6 \times 10^{-6}$	1700	1680
	2.2	0,537	0,035	0,187	$187,1 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$155,9 \times 10^{-6}$	1570	
	2.3	0,612		0,262	$261,7 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$81,3 \times 10^{-6}$	1780	
3	3.1	0,627		0,253	$253,0 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	90×10^{-6}	1830	1910
	3.2	0,714	0,374	0,339	$339,4 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$	2080	
	3.3	0,624		0,250	$249,7 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$93,3 \times 10^{-6}$	1820	
4	4.1	0,618		0,252	$251,8 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$91,2 \times 10^{-6}$	1800	1770
	4.2	0,592	0,366	0,226	$225,8 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$117,2 \times 10^{-6}$	1720	
	4.3	0,618		0,252	$251,9 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$91,1 \times 10^{-6}$	1800	

Na Slici 15 prikazana je usporedba rezultata srednje vrijednosti gustoće očvrnulog betona za svaku mješavinu.



Slika 15 : Prikaz usporedbe rezultata srednje vrijednosti gustoće očvrsnulog procjdnog betona

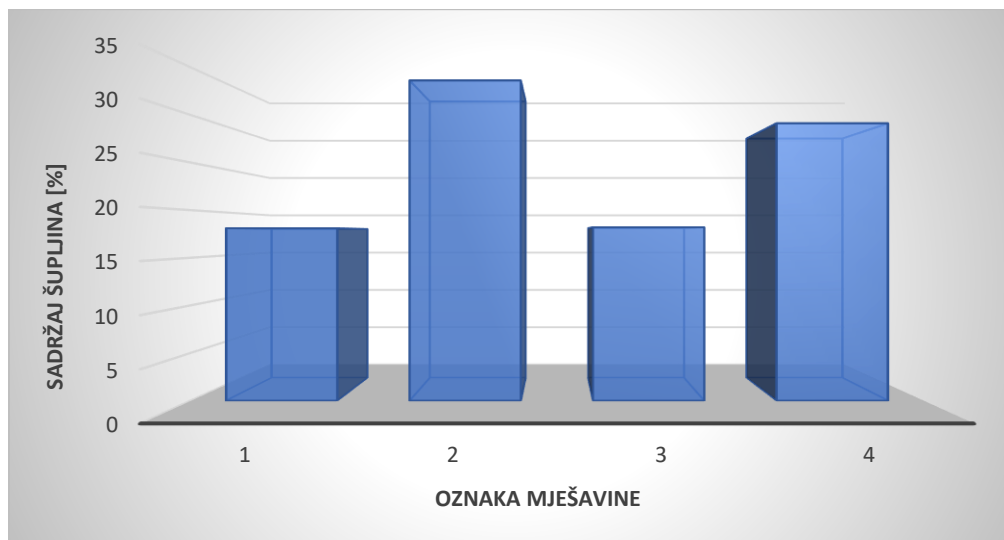
4.6. ISPITIVANJE POROZNOSTI OČVRSNULOG BETONA

Sadržaj šupljina očvrsnulog betona određen je uz pomoć jednakih uzoraka kao i gustoća očvrsnulog betona – kocki dimenzija $7,0 \times 7,0 \times 7,0$ cm. Pomoću rezultata ispitivanja koji su prikazani Tablicom 6 određen je sadržaj šupljina prikazan kao omjer volumena šupljina i volumena kocke. Dobiveni rezultati prikazani su Tablicom 7.

Tablica 7: Prikaz rezultata ispitivanja sadržaja šupljina u očvrsnulom betonu

POROZNOST OČVRSNULOG PROCJEDNOG BETONA									
OZNAKA MJEŠAVINE	BROJ UZORKA	m_{zps} [kg]	m_{zw} [kg]	m [kg]	$V_{\text{čvrste tvari}}$ [m ³]	V_{kocke} [m ³]	$V_{\text{šupljina}}$ [m ³]	SADRŽAJ ŠUPLJINA U OČVRSNULO M BETONU [%]	SREDNJA VRIJEDNOST SADRŽAJA ŠUPLJINA [%]
1	1.1	0,613		0,245	$244,6 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$98,4 \times 10^{-6}$	28,69	18,1
	1.2	0,652	0,369	0,283	$283,3 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$59,7 \times 10^{-6}$	17,41	
	1.3	0,684		0,315	$314,9 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$28,1 \times 10^{-6}$	8,19	
2	2.1	0,584		0,234	$234,3 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$108,6 \times 10^{-6}$	31,66	33,6
	2.2	0,537	0,350	0,187	$187,1 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$155,9 \times 10^{-6}$	45,45	
	2.3	0,612		0,262	$261,7 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$81,3 \times 10^{-6}$	23,70	
3	3.1	0,627		0,253	$253,0 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	90×10^{-6}	26,24	18,2
	3.2	0,714	0,374	0,339	$339,4 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$	1,05	
	3.3	0,624		0,250	$249,7 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$93,3 \times 10^{-6}$	27,20	
4	4.1	0,618		0,252	$251,8 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$91,2 \times 10^{-6}$	26,59	29,1
	4.2	0,592	0,366	0,226	$225,8 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$117,2 \times 10^{-6}$	34,17	
	4.3	0,618		0,252	$251,9 \times 10^{-6}$	$343,0 \times 10^{-6}$	$91,1 \times 10^{-6}$	26,56	

Iz rezultata prikazanih Tablicom 7 izračunata je srednja vrijednost sadržaja šupljina u očvrslom procjdnom betonu za pojedinu mješavinu kao aritmetička sredina 3 ispitana uzorka. Slikom 16 prikazane su srednje vrijednosti sadržaja šupljina očvrslolog betona za svaku mješavinu koja je ispitana.



Slika 16 : Prikaz usporedbe rezultata srednje vrijednosti sadržaja šupljina u očvrslom procjdnom betonu

4.7. ISPITIVANJE PROPUSNOSTI OČVRSNULOG BETONA METODOM STALNOG STUPCA VODE

Brzina procjeđivanja vode kod procjdnog betona izravno je povezana s veličinom šupljina u betonu i poroznosti betona. Ispitivanje koeficijenta propusnosti provedeno je metodom stalnog stupca vode pomoću posebno osmišljenog uređaja prikazanog na Slici 17. Koristeći metodu stalne razine stupca vode, voda konstantno prolazi kompletnim uzorkom procjdnog betona pod istim tlakom. pa se sukladno tome dobivaju točniji rezultati nego da se ispitivanje provodi s promijenjivim stupcom vode. Ispitivanja su provedena na betonu koji je prethodno ugrađen u plastične cijevi (Slika 18). Beton je u cijevima njegovan 28 dana, potopljen u vodi. Propusnost procjdnog očvrnulog betona računata je prema izrazu (4.4) :

$$k_s = \frac{L}{\Delta h} \frac{V}{A (t_2 - t_1)} \quad (4.4)$$

gdje je:

k_s – koeficijent propusnosti [cm/s]

L – visina uzorka procjdnog betona [cm]

Δh – hidraulička razlika razina vode [cm]

t_1 – početno vrijeme eksperimenta [s]

t_2 – završno vrijeme eksperimenta [s]

V – količina vode sakupljena u vremenu $t_2 - t_1$ [cm³]

A – procjedna površina [cm²]



Slika 17 : Prikaz uređaja za ispitivanje koeficijenta propusnosti (izvor: vlastita fotografija)



Slika 18 : Prikaz uzoraka betona u plastičnim cijevima (izvor: vlastita fotografija)

Radius i visina svakog uzorka izmjereni su prije ispitivanja propusnosti. Budući da je uzorak ugrađen u plastičnu cijev, njegova je visina dobivena oduzimanjem same duljine cijevi i srednje vrijednosti mjerenja razlike visine uzorka od ruba cijevi. Radius je usvojen kao srednja vrijednost dvaju mjerenja.

Postupak ispitivanja koeficijenta propusnosti proveden je upuštanjem vode kroz cijev u čijoj se sredini nalazio ispitni uzorak procjdnog betona. Uzorak betona je najprije doveden do stanja potpune saturacije kako bi se uklonio otpor zraka koji je bio sadržan u šupljinama. Nakon toga izmjerena je razlika vode u piježometrima. Zatim je u isto vrijeme postavljena kanta na kraj sklopa cijevi kroz koje teče voda te je započeo proces mjerenja vremena.

Nakon što je voda u kanti dosegla određenu razinu, kanta je izmaknuta i zaustavilo se mjerenje vremena. Izmjereno je vrijeme zabilježeno, dok je istovremeno količina vode u kanti izvagana i zabilježena. Na taj su način dobiveni svi potrebni ulazni podaci s pomoću kojih su izračunati koeficijenti propusnosti.

Koeficijent propusnosti određen je za sve četiri mješavine. Iz svake su se mješavine izdvajala i ispitivala po tri uzorka. Rezultati ispitivanja koeficijenta propusnosti za pojedine mješavine prikazani su redom u: Tablici 8 (mješavina 1), Tablici 9 (mješavina 2), Tablici 10 (mješavina 3) i Tablici 11 (mješavina 4).

Tablica 8: Prikaz rezultata ispitivanja koeficijenata propusnosti za mješavinu 1

KOEFIČIJENT PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 1								
Broj uzorka	L [cm]	r [cm]	Δh [cm]	t [s]	V [cm ³]	A [cm ²]	k_s [cm/s]	PROPUSNOST [l/min]
1.1	23,50	5,25	10,50	44,00	5130,00	86,59	3,02	7,00
1.2	23,00	5,25	11,00	48,00	5230,00	86,59	2,63	6,54
1.3	23,80	5,25	10,00	48,00	5060,00	86,59	2,90	6,33
SREDNJA VRIJEDNOST KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 1							2,85	

Tablica 9: Prikaz rezultata ispitivanja koeficijenata propusnosti za mješavinu 2

KOEFIČIJENT PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 2								
Broj uzorka	L [cm]	r [cm]	Δh [cm]	t [s]	V [cm ³]	A [cm ²]	k_s [cm/s]	PROPUSNOST [l/min]
2.1	23,90	5,25	11,30	60,00	5160,00	86,59	2,10	5,16
2.2	24,50	5,25	10,50	40,00	5080,00	86,59	3,42	7,62
2.3	23,40	5,25	11,00	42,00	5200,00	86,59	3,04	7,43
SREDNJA VRIJEDNOST KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 2							2,85	

Tablica 10: Rezultati ispitivanja koeficijenta propusnosti za mješavinu 3

KOEFIČIJENT PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 3								
Broj uzorka	L [cm]	r [cm]	Δh [cm]	t [s]	V [cm ³]	A [cm ²]	k_s [cm/s]	PROPUSNOST [l/min]
3.1	24,50	5,25	12,00	42,00	5280,00	86,59	2,96	7,54
3.2	22,00	5,25	9,50	44,00	5070,00	86,59	3,08	6,91
3.3	25,20	5,25	11,50	114,00	5030,00	86,59	1,12	2,65
SREDNJA VRIJEDNOST KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 3							2,39	

Tablica 11: Rezultati ispitivanja koeficijenta propusnosti za mješavinu 4

KOEFIČIJENT PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 4								
Broj uzorka	L [cm]	r [cm]	Δh [cm]	t [s]	V [cm ³]	A [cm ²]	k_s [cm/s]	PROPUSNOST [l/min]
4.1	22,50	5,25	10,00	51,00	5080,00	86,59	2,59	5,98
4.2	21,80	5,25	12,50	102,00	5140,00	86,59	1,01	3,02
4.3	21,00	5,25	11,50	64,00	5060,00	86,59	1,67	4,74
SREDNJA VRIJEDNOST KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI – MJEŠAVINA 4							1,76	

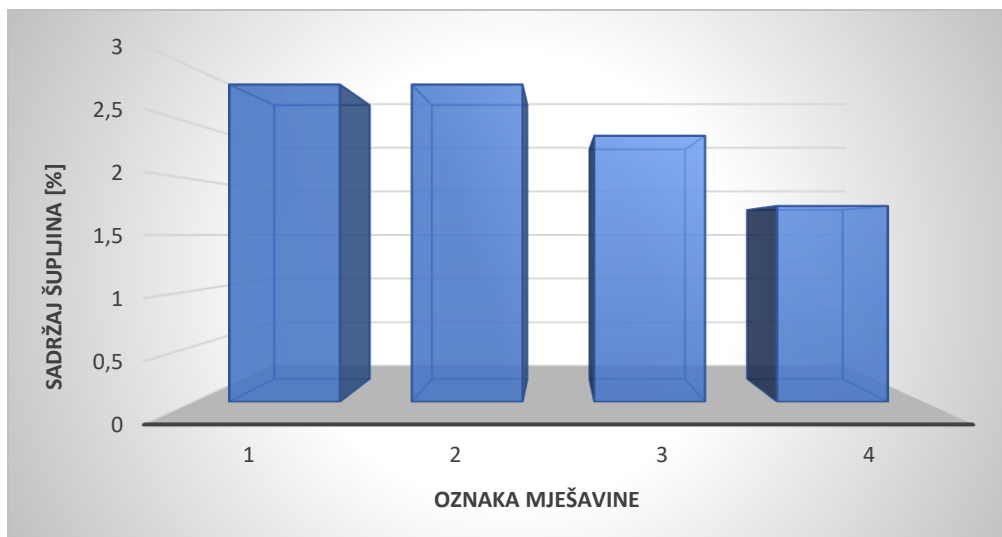
Tablicom 12 prikazana je srednja vrijednost koeficijenta propusnosti za pojedine mješavine. Iz tablice je vidljivo da minimalna propusnost procjdnog betona iznosi 1,76 cm/s, a maksimalna propusnost iznosi 2,85 cm/s. Prema istraživanjima *Schaefera i suradnika [2]* i *Leminga Akersa [2]* koeficijent propusnosti procjdnih betona kreće se od 0,2 cm/s do 1,2 cm/s.

Na temelju navedenog zaključeno je da se koeficijenti propusnosti ispitanih uzoraka procjdnog betona kreću iznad gornje granice propusnosti, odnosno da su koeficijenti propusnosti ispitanih betonskih uzoraka veći u odnosu na teorijski koeficijent propusnosti.

Tablica 12: Prikaz srednje vrijednosti koeficijenta propusnosti

KOEFICIJENT PROPUSNOSTI OČVRSNULOG PROCJEDNOG BETONA	
OZNAKA MJEŠAVINE	SREDNJA VRIJEDNOST KOEFICIJENATA PROPUSNOSTI [cm/s]
1	2,85
2	2,85
3	2,39
4	1,76

Slikom 19 je prikazana usporedba rezultata srednje vrijednosti koeficijenta propusnosti po mješavinama. Na temelju tablično prikazanih rezultata je izveden zaključak da se smanjila propusnost procjdnog betona dodavanjem vlakana, dok se propusnost nije smanjila u velikoj mjeri.



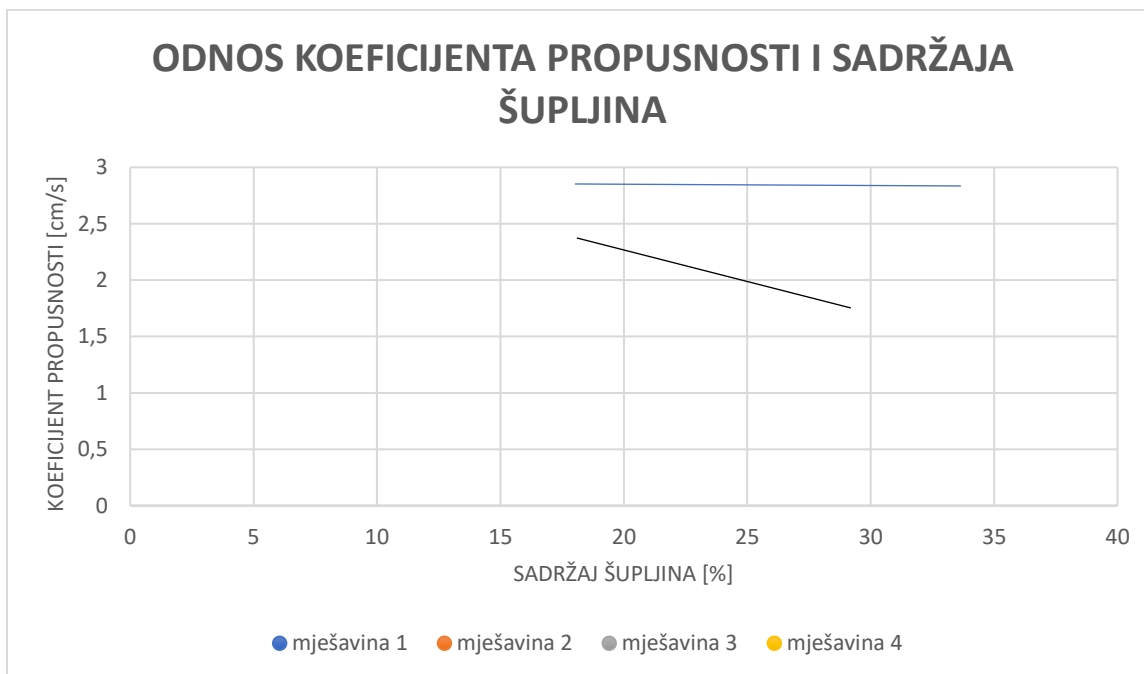
Slika 19 : Prikaz usporedbe rezultata srednje vrijednosti koeficijenta propusnosti

5.ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Nakon provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata, odrađena je analiza rezultata ispitivanja.

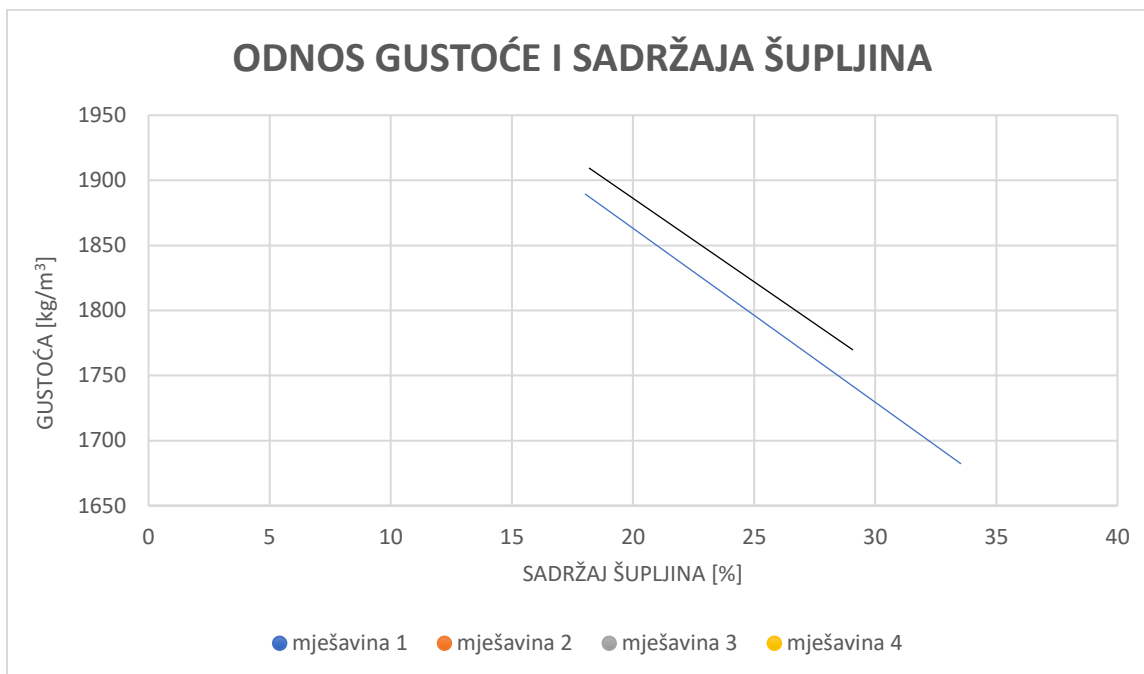
Na Slici 20 je dijagramom prikazan odnos koeficijenta propusnosti i sadržaja šupljina za referentne mješavine (1,3) i mješavine s monofilamentnim vlaknima (2,4).

Iz dobivenih rezultata je vidljivo da kod mješavina 1 i 2 povećanje sadržaja šupljina ne utječe na koeficijent propusnosti. Trebalo bi napraviti ispitivanja na više uzoraka da bi se dobilo više podataka o propusnosti i mogao donijeti točniji zaključak. Za mješavine 3 i 4, na osnovi rezultata može se zaključiti da je propusnost betona proporcionalna poroznosti. U svim mješavinama sadržaj šupljina iznosi između 18% i 34%, što je zadovoljavajuće za ovakvu vrstu betona.



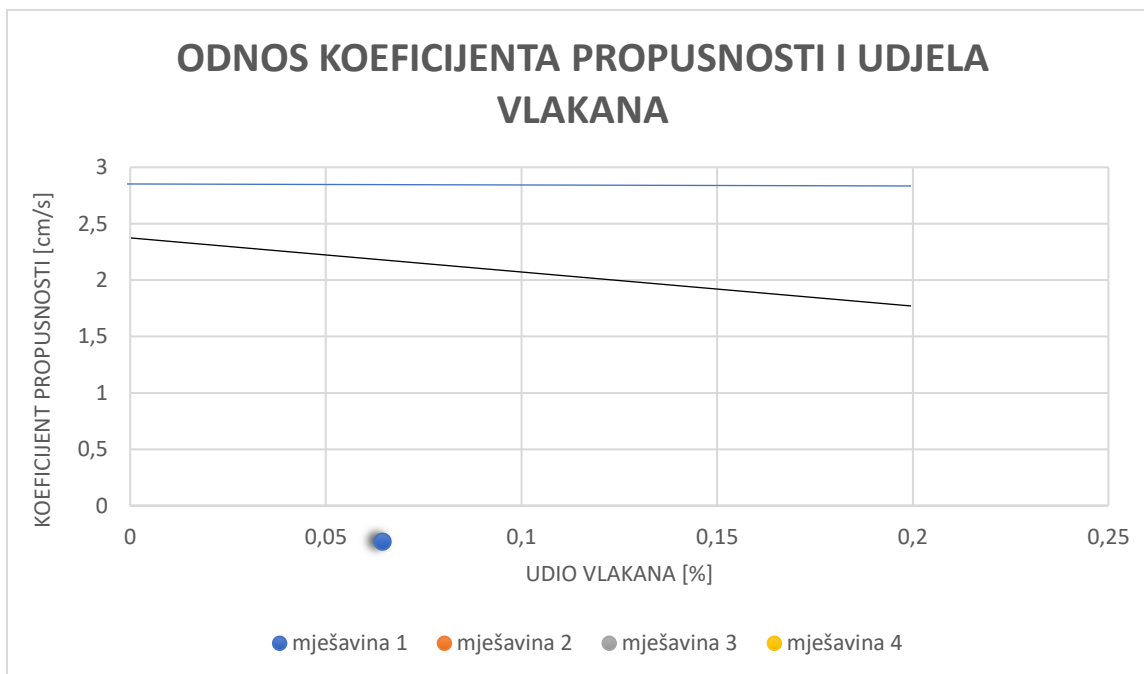
Slika 20 : Prikaz odnosa koeficijenta propusnosti i sadržaja šupljina

Dijagram na Slici 21 prikazuje odnos sadržaja šupljina i gustoće u očvrnulom betonu za referentne mješavine (1,3) i mješavine s monofilamentnim vlaknima (1,4). Može se zaključiti da se s povećanjem poroznosti procjednog betona smanjuje sama gustoća procjednog betona. S dodatkom vlakana smanjuje se gustoća i povećava poroznost betona.



Slika 21 : Prikaz odnosa gustoće i sadržaja šupljina

Slika 22 prikazuje odnos propusnosti i udjela vlakana za mješavine 1 i 2 i mješavine 3 i 4. Mješavina 1 i mješavina 2 procjdnog betona su se pokazale kao mješavine najveće propusnosti bez obzira na to što mješavina 1 ima značajno manju poroznost.



Slika 22 : Prikaz odnosa koeficijenta propusnosti i udjela vlakana (izvor: vlastiti prikaz)

6.ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada bio je napraviti pregled stanja područja te ispitati i analizirati poroznost i propusnost različitih mješavina procjedinog betona od kojih su mješavine 1 i 2 odnosno 3 i 4 bile jednake recepture s ili bez polimernih vlakana.

Na temelju pregleda recentne literature te vlastitih eksperimentalnih ispitivanja zaključeno je sljedeće:

- potiče se primjena procjedinog betona za kolnike jer, u odnosu na tradicionalni beton, njegova površina osigurava smanjenje površinskog prskanja buke i stvaranje toplinskih otoka te omogućuje lakšu odvodnju s prometnicapažljivim projektiranjem sastava betona treba dobiti mješavinu koja ima prihvatljivu protočnost tekućine kroz beton uz dostatnu tlačnu i vlačnu čvrstoću
- za povećanje duktilnosti i čvrstoće na savijanje procjedinog betona preporuča se dodati polimerna vlakna
- ispitivanje konzistencije procjedinog betona slijeganjem nije adekvatna metoda za ovu vrstu betona
- s dodatkom polimernih vlakana procjedinom betonu opada njegova gustoća i raste poroznost
- propusnost procjedinog betona u pravilu je proporcionalna poroznosti

Trend otkrivanja i patentiranja novih građevinskih materijala i tehnika ugradnje materijala potiče inženjere na sve češća ispitivanja materijala te razmišljanja o što boljoj iskoristivosti određenih materijala pazeći pritom na ekonomičnost, vremensku komponentu i mogućnosti sukladne opremljenosti laboratorija za ispitivanje.

POPIS LITERATURE:

[1] Juradin, S., Netinger-Grubeša, I., Mrakovčić, S., Jozić, D., *Impact of fibre incorporation and compaction method on properties of pervious concrete*, članak, *Materiales de construccion*, Vol. 71, Issue 342, 2020./2021.

[2] Vuljanić, D., *Analiza svojstava procjdnog betona s polimernim vlaknima*, diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2017.

[3] Mahalingam, R., Vaithiyalingam Mahalingam, S., *Analiza svojstava procjdnog betona*, članak, *Građevinar* 68, str. 495-501, 2016.

[4] Brnas, I., *Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona*, diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2016.

[5] Mrakovčić, S., Čeh, N., Jugovac, V., *Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjdnog betona*, članak, *Građevinar* 66, str. 107-113, 2014.

[6] Huang, B., Wu, H., Shu, X., Burdette, E.G., *Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete*, članak, *Construction and Building Materials* 24, str. 818-823, 2009.

[7] Mullaney, J., Lucke, T., *Practical Review of Pervious Pavement Designs*, članak, *CLEAN - Soil, Air, Water: a Journal of Sustainability and Environmental Safety* 42(2), str. 111-124, 2014.

[8] [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Primjer - uputa zs ispitivanje.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Primjer_-_uputa_zs_ispitivanje.pdf), pristup 24.05.2022.

[9] Norma HRN EN 12350-2:2009; ISITIVANJE SLIJEGANJEM – SVJEŽI BETON od mjeseca rujna 2019.