

Ispitivanje toplinskih karakteristika betonskih i asfaltnih podloga

Buršić, Mario

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:157:583366>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-21**



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**

Mario Buršić

**Ispitivanje toplinskih karakteristika betonskih i asfaltnih podloga
(Thermal properties examination of concrete and asphalt surfaces)**

Završni rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij
Građevinski materijali**

**Mario Buršić
JMBAG: 0114033018**

Ispitivanje toplinskih karakteristika betonskih i asfaltnih podloga

Završni rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom i komentoricom 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.

Mario Buršić

U Rijeci, 16.09.2022.

SAŽETAK

Naslov rada: Ispitivanje karakteristika betonskih i asfaltnih podloga

Student: Mario Buršić

Mentorica: doc. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Komentorica: dr. sc. Marijana Cuculić

Studij: Preddiplomski stručni studij građevinarstva

Kolegij: Građevinski materijali

Tema završnog rada su procjedni beton i porozni asfalt i usporedba njihovih svojstava sa običnim betonom i asfaltom. Naglasak rada biti će na razlici samog sastava procjednog betona i poroznog asfalta, te na njihovim toplinskim svojstvima, to jest na osjetljivosti betonskih i asfaltnih uzoraka na visoke ili niske temperature. Za mjerenje temperature testnih uzoraka koristiti će se sonde marke Kimo Kistock, koje će biti postavljene na dnu i na površini uzoraka te će se mjerenje odvijati pri vanjskim uvjetima. U radu će se još spomenuti i pojavu efekta urbanih otoka, gdje su temperature površina asfalta i betona znatno veće od okoline te zbog svoje boje, poroznosti, gustine i ostalih svojstava zagrijavaju okolinu i zrak oko sebe te ćemo navesti neka moguća rješenja za tu pojavu.

Ključne riječi:

Procjedni beton, porozni asfalt, toplinske karakteristike, sastav, efekt urbanih otoka, poroznost i efekt hlađenja

ABSTRACT

Title thesis: Thermal properties examination of concrete and asphalt surfaces

Student: Mario Buršić

Supervisor: Silvija Mrakovčić, PhD

Co-supervisor: Marijana Cuculić, PhD

Study: Vocational Undergraduate Study Programme in Civil Engineering

Subject: Construction materials

Theme of this final paper is porous concrete and porous asphalt and a comparison of their properties with conventional concrete and asphalt. The emphasis of final paper will be on differences of the composition of porous concrete and porous asphalt, and on their thermal properties, that is on sensitivity of concrete and asphalt to high and low temperatures. For the measurements of test samples we will use probes Kimo Kistock which will be placed one on the bottom and one on the surface of sample and the measurements will take place under external conditions. We will also mention term urban island effect, where the temperature of concrete and asphalt surfaces are significantly higher from the environment because of their color, permeability, density and other properties and it comes to excessive heating of environment, so we will mention few possible solutions.

Keywords:

Porous concrete, porous asphalt, thermal properties, composition, urban island effect, permeability and cooling effect

ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić na pomoći, prenesenom znaju i vodstvu tijekom izrade završnog rada. Također zahvaljujem laborantu Dinu Juriševiću na pomoći tijekom eksperimentalnog dijela rada i profesorici dr. sc. Marijani Cuculić na pomoći kod dijela rada koji se tiče poroznog asfalta.

Sadržaj:

POPIS TABLICA

POPIS SLIKA

1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o betonu.....	1
1.2. Općenito o procjednom betonu.....	1
1.3. Prednosti i nedostaci procjednog betona.....	3
1.4. Tehnologija procjednog betona.....	5
2. SASTAV PROCJEDNOG BETONA.....	7
2.1. Voda.....	8
2.2. Agregat.....	9
2.3. Cement i cementni materijali.....	9
2.4. Dodaci.....	10
2.5. Efekt urbanih toplinskih otoka.....	10
3. TOPLINSKA SVOJSTVA PROCJEDNOG BETONA.....	11
3.1. Toplinska provodljivost i porozitet procjednog betona.....	11
3.2. Reciklirano agregat i indeks refleksije sunčeve svjetlosti procjednog betona.....	14
4. POROZNI ASFALT U ASFALTNIM KONSTRUKCIJAMA.....	17
4.1. Prednosti i mane konstrukcija od poroznog asfalta.....	18
5. POROZITET I TOPLINSKA SVOJSTVA ASFALTNIH MJEŠAVINA.....	19
5.1. Simulacija efekta hlađenja asfaltnih površina.....	20
6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	25
6.1. Ispitivanje gustoće svježeg procjednog betona.....	30
6.2. Ispitivanje konzistencije svježeg procjednog betona.....	31
6.3. Određivanje sadržaja šupljina svježeg procjednog betona.....	34
6.4. Mjerenje toplinskih karakterisitika procjednog betona i poroznog asfalta.....	37
6.5. Rezultati mjerenja.....	38
7. ZAKLJUČAK.....	44

8. LITERATURA.....	45
--------------------	----

POPIS TABLICA:

<i>Tablica 1: Tipični rasponi količine materijala u procjednom betonu [3].....</i>	<i>8</i>
<i>Tablica 2: Sastojci i udio pojedinih u smjesi procjednog betona [10].....</i>	<i>11</i>
<i>Tablica 3: Svojstva materijala [12].....</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 4: Rezultati gradacije agregata [16].....</i>	<i>20</i>
<i>Tablica 5: Temperature uzoraka na različitim dubinama [16].....</i>	<i>23</i>
<i>Tablica 6: Potreban materijal za izradu mješavina [1].....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 7: Rezultati ispitivanja gustoće svježeg betona (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 8: Rezultati slijeganja procjednog betona Abramsovim konusom (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>33</i>
<i>Tablica 9: Rezultati ispitivanja sadržaja šupljina svježeg procjednog betona (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>36</i>
<i>Tablica 10: Prosječna dnevna temperatura i relativna vlažnost zraka tijekom 23 dana ispitivanja (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 11: Osnovne temperature uzoraka na površini i dnu (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>43</i>

Popis slika

Slika 1: Procjedni beton [17].....	2
Slika 2: Parkiralište od procjednog betona [6].....	2
Slika 3: Pješačka staza od procjednog betona [18].....	3
Slika 4: Poprečni presjek procjednog betona [3].....	4
Slika 5: Čišćenje procjednog betona [19].....	5
Slika 6: Rasprostiranje procjednog betona [20].....	6
Slika 7: Njegovanje poroznog betona folijom [6].....	7
Slika 8: Ispitivanje konzistencije metodom kuglice (izvor: vlastita fotografija).....	8

Slika 9: Mjerenje toplinske provodljivosti ploče od suhog procjdnog betona [10].....	12
Slika 10: a) Mjerenje toplinske provodljivosti mokre betonske ploče termalnom igličastom sondom, b) Plan bušenja betonske ploče igličastom sondom [10].....	13
Slika 11: Testni uzorci za određivanje indeksa refleksije sunčeve svjetlosti [12].....	15
Slika 12: Reflektometar solarnog spektra [12].....	16
Slika 13: Dijagram ovisnosti vrste agregata i indeksa refleksije sunčeve svjetlosti [12].....	17
Slika 14: UV lampa osvjetljava i grije asfaltni uzorak [16].....	21
Slika 15: Model konačnog elementa [16].....	22
Slika 16: Površinske temperature asfaltnih uzoraka [16].....	24
Slika 17: Suhi sastojci u rotirajućem bubnju spremni za suho miješanje (izvor: vlastita fotografija).....	26
Slika 18: Dodavanje superplastifikatora u vodu (izvor: vlastita fotografija).....	27
Slika 19: Ugradnja procjdnog betona u kalup (izvor: vlastita fotografija).....	28
Slika 20: Izgled vibriranog uzorka procjdnog betona (izvor: vlastita fotografija).....	29
Slika 21: Ugradnja običnog betona u kalup oblika valjka dimenzija $\varnothing 100 \times 200$ mm (izvor: vlastita fotografija).....	30
Slika 22: Priprema uzorka za ispitivanje konzistencije slijeganjem (izvor: vlastita fotografija).....	33
Slika 23: Mjerenje konzistencije slijeganjem (izvor: vlastita fotografija).....	34
Slika 24: Priprema uzorka za ispitivanje sadržaja šupljina (izvor: vlastita fotografija).....	35
Slika 25: Graf promjene temperature za uzorak od poroznog asfalta (izvor: vlastita fotografija).....	39
Slika 26: Graf promjene temperature za uzorak od običnog asfalta (izvor: vlastita fotografija).....	40
Slika 27: Graf promjene temperature za uzorak od običnog betona (izvor: vlastita fotografija).....	41
Slika 28: Graf promjene temperature za uzorak od procjdnog betona (izvor: vlastita fotografija).....	42

1. UVOD

1.1. Općenito o betonu

Beton je višekomponentni, najkorišteniji građevinski materijal, sastavljen od agregata, pijeska, cementa i vode. Razlog njegove široke upotrebe su njegova široka dostupnost, cijena u usporedbi sa drugim materijalima, visoka tlačna čvrstoća, velika otpornost na različite vremenske uvjete i drugi [1]. Od 6. stoljeća prije Krista Rimljani već koriste beton za izradu skoro svih svojih građevinskih objekata. Za izradu betona koristili su vulkanski pepeo, vapno i morsku vodu. Veliki procvat u tehnologiji izrade betona nastaje 1793. godine kada John Smeaton otkriva modernu metodu izrade hidrauličkog vapna tako što je vapnenac sa udjelom gline pekao dok se nije pretvorio u klinker, pa ga je zatim mrvio u prah [2].

1.2. Općenito o procjednom betonu

Glavna namjena procjednog (porozni ili propusni beton) betona (Slika 1) je, kao što mu i samo ime govori, da vodu s betoniranih površina propušta kroz svoj presjek u donje slojeve te se ona dalje odvodi ili pohranjuje. Takvo svojstvo dovodi do toga da se djelomično ili čak u potpunosti eliminira sustav odvodnje oborinske vode s betoniranih površina. Procjedni beton pruža vrlo kvalitetno rješenje za arhitekte i različite projektantske izazove, zbog mogućnosti kombiniranja različitih vrsta agregata i boja u samom betonu [3].



Slika 1: Procjedni beton [17]

Njegova uporaba je u današnje vrijeme vrlo raširena, a najčešće se upotrebljava za izradu: pločnika, parkirališta (Slika 2), trgova, staza (Slika 3), područja uz bazene i plaže, pješačkih staza i drugih. Procjedni beton je zbog svoje strukture vrlo učinkovit način osiguravanja zaštite okoliša i u konačnici samih ljudi koji ga koriste [3].



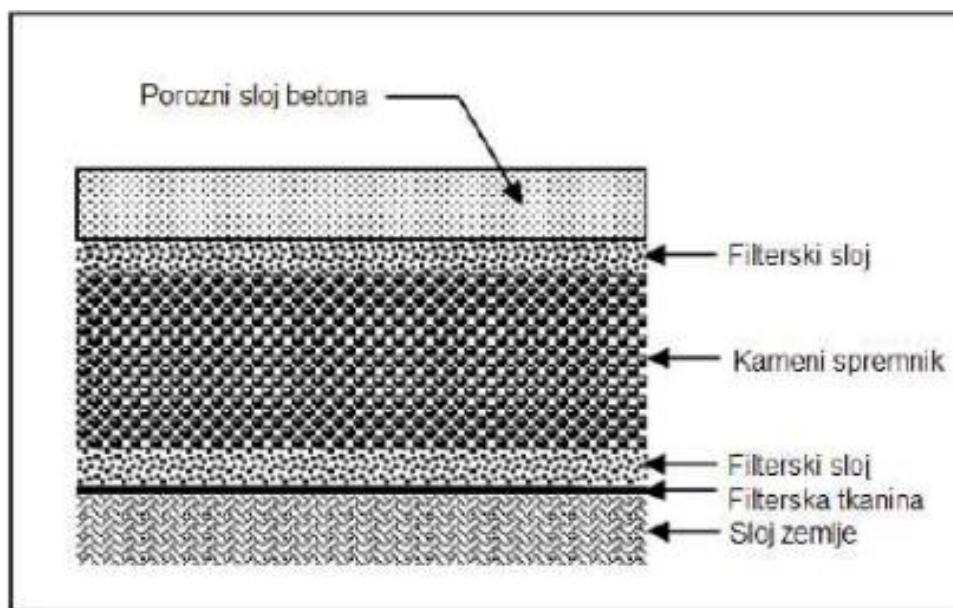
Slika 2: Parkiralište od procjednog betona [6]



Slika 3: Pješačka staza od procjdnog betona [18]

1.3. Prednosti i nedostaci procjdnog betona

Zbog protjecanja vode kroz ovakvu vrstu betona smanjuje se mogućnost pojave leda na betoniranim površinama, te se samim time višestruko smanjuje mogućnost oštećenja betona uslijed smrzavanja i odmrzavanja. Masa procjdnog betona služi kao spremište vode dok se ona ne apsorbira u zemlju (Slika 4). Kapacitet skladištenja vode ovisi o postotku pora procjdnog betona, to jest veća poroznost znači i veći kapacitet vode koja može biti pohranjena u kamenom spremniku prije otjecanja viška vode po površini. Važno je napomenuti kako veliku ulogu u skladištenju vode u procjdnom betonu ima nagib konstrukcije. Ukoliko konstrukcija nije horizontalna lako se može premašiti brzina upijanja procjdnog betona, te će viši dijelovi konstrukcije ostati nezasićeni i neiskorišteni. Filterski slojevi i zemlja zaslužni su za filtriranje zagađivača tla [1].



Slika 4: Poprečni presjek procjedbog betona [3]

Također, uporabom procjedbog betona štitimo eko sustav jer je njegova boja svjetlija od boje klasičnog betona te on manje privlači sunčevu svjetlost i na taj način se mogu značajno smanjiti temperature zraka u svim područjima njegove uporabe. Procjedni beton je u usporedbi sa običnim betonom skuplji kao početna investicija za otprilike 25%, ali se na kraju može isplatiti zbog svoje sposobnosti upijanja i odvodnje vode, te samim time smanjenjem potrebe za izgradnjom ostalih sustava odvodnje vode kao što su: retencije, drenaže, rigoli i drugi. Procjedni beton omogućuje filtraciju vode od zagađivača do zemlje, to jest zagađivači se zadržavaju na površini procjedbog betona ili se njihov prodor ograničava. Ukoliko se primijeti smanjenje infiltracije od 25 % potrebno je odraditi dubinsko čišćenje koje se sastoji od istovremenog pranja pod tlakom i vakumiranja [3, 4].

Uz mnoštvo prednosti procjedni beton ima i svoje nedostatke koji predstavljaju ograničenja prilikom projektiranja, proizvodnje i same ugradnje procjedbog betona. Mana ove vrste betona je ta što se zbog velike količine šupljina i velike poroznosti, smanjuje njegova čvrstoća u usporedbi sa običnim betonom. Manja tlačna čvrstoća u usporedbi s običnim betonom ograničavajuća je u područjima kretanja vozila velikih težina. Prilikom neodržavanja postoji mogućnost začepjenja lišćem ili drugim nečistoćama, međutim taj problem se može vrlo lako otkloniti povremenim čišćenjem vodom i uređajima za otpuhivanje lišća (Slika 5) [3, 5].



Slika 5: Čišćenje procjdnog betona [19]

1.4. Tehnologija procjdnog betona

Zbog svojih specifičnih svojstava procjdnog betona zahtjeva malo strožu kontrolu sastojaka od običnog betona. Sama smjesa procjdnog betona je vrlo osjetljiva na sadržaj vode te taj dio proizvodnje mora biti strogo kontroliran. Pravilnim doziranjem vode osigurava se potrebna čvrstoća i propusnost, a u isto vrijeme se sprječava otjecanje paste s agregata i zatvaranje njegove otvorene strukture [1].

Proces miješanja procjdnog betona vrlo je sličan procesu miješanja običnog betona. Postupanje s procjdnim betonom je malo zahtjevnije zato što mu je obradljivost znatno manja nego što je to kod običnog betona te se mješavina mora ugraditi u roku od jednog sata nakon prvog miješanja. Posebni kemijski dodaci nam mogu pomoći da to vrijeme produžimo na sat i pol ili više. Transport i ugradnja procjdnog betona moraju biti strogo kontrolirani zbog malog sadržaja vode. Time je zbog malog slijeganja procjdnog betona i samo pražnjenje iz automiješalice nešto sporije u odnosu na obični beton. U nekim slučajevima može doći do određene korekcije sadržaja vode na gradilištu kako bi se postigla odgovarajuća konzistencija, ali prilikom te radnje treba biti oprezan jer je dodavanje vode na gradilištu teško kontrolirati. Kod ugradnje procjdnog betona mogu se koristiti različite tehnike, no procjodne betonske mješavine nisu pogodne za pumpanje. Ugradnja treba teći kontinuirano te se smjesa mora brzo rasprostirati i ravnati. Ravnanje se uglavnom radi vibrirajućim i ručnim ravnalicama (Slika 6) te se mora paziti na frekvenciju vibrirajućih ravnalica da se izbjegne pretjerano zbijanje i zatvaranje površinskog sloja [1, 3].



Slika 6: Rasprostiranje procjednog betona [20]

Zbijanje se radi čeličnim valjcima te zbog brzog stvrdnjavanja mora biti gotovo nakon 15 minuta od trenutka postavljanja. Kao kad se betoniraju prometne površine običnim betonom treba napraviti dilatacijske reške kako bi se spriječilo pucanje materijala, s time da razmak između reški može biti veći nego kod standardnih betona zato što procjedni beton ima manje skupljanje. Razmak reški iznosi 6 m iako se u nekim sustavima gdje je razmak 13,5 m nisu uočile pukotine. Njega poroznog betona važnija je od njege običnih betona zbog njegove otvorene strukture i krupnih pora. Njega počinje i prije ugradnje, to jest posteljicu treba navlažiti kako bi se spriječilo da kamen upije vlagu iz betona. Nakon ugradnje procjedni beton se pokriva plastičnom folijom najmanje 7 dana (Slika 7) [6].



Slika 7: Njegovanje procjdnog betona folijom [6]

2. SASTAV PROCJEDNOG BETONA

Posebnu pažnju treba obratiti na udio sitnog agregata i količinu vode u samoj mješavini. Sitni agregat ili pijesak se koristi do 15 % ukupne mase agregata ili se uopće ne koristi baš zato da bi se osigurala znatna količina pora u očvrslom betonu. Sadržaj šupljina u očvrslom betonu kreće se od 15 do 25%. Prosječna gustoća procjdnog betona kreće se od 1600 do 2000 kg/m³. Tablica 1 prikazuje tipične količine materijala u mješavini procjdnog betona te se one mogu razlikovati ovisno o vrsti materijala, količini aditiva i zahtjevima na gradilištu [3].

Tablica 1: Tipični rasponi količine materijala u procjednom betonu

Sastojci	Količina materijala u m ³ procjednog betona (kg)
Cement	260 do 400
Agregat	1420 do 1600
Voda	v/c= 0,28 do 0,40
Sitni agregat	0 do 240

2.1. Voda

Udio vode u procjednom betonu mora biti strogo kontroliran. Vodocementni omjer smjese kreće se od 0,28 do 0,40, Općenito vrijedi pravilo da je svaka voda koja je pitka, pogodna i za korištenje u smjesi betona. Vodocementni omjer utječe na konzistenciju betona. Mješavina procjednog betona je u odnosu na obične vrste betona kruta što ga čini neadekvatnim na ispitivanje na slijeganje svježeg betona. Dobro određena količina vode u procjednom betonu osigurava da voda ne otječe s agregata. Konzistencija procjednog betona provjerava se oblikovanjem kuglice od betona, koja se ne smije raspasti niti izgubiti svoju poroznu strukturu (Slika 8) [6].



Slika 8: Ispitivanje konzistencije metodom kuglice (izvor: vlastita fotografija)

Ukoliko je pogodnost vode upitna i sumnja se na moguće nečistoće, soli ili štetne tvari u vodi, preporučuje se probno doziranje s materijalom potrebnim za rad.

2.2. Agregat

Preporučene veličine zrna agregata za ovu vrstu betona kreću se od 8 do 19 mm s minimalnim udjelom ili bez udjela sitnijih frakcija. Često se koristi drobljeni agregat, a kada situacija zahtjeva veće čvrstoće koristi se i riječni šljunak. Obzirom na granulometrijski sastav i njegovu diskontinuiranost, teško se postižu velike tlačne čvrstoće te se one kreću od 2,8 do 28 MPa [3].

Obično udio sitnog agregata ne prelazi 15% ukupne mase agregata zbog smanjenja vodopropusnosti i zatvaranja šupljina. U praksi se primjetilo da se veće čvrstoće dobivaju uporabom agregata zaobljenog zrna s time da su uglata zrna agregata generalno pogodnija za uporabu zbog prionljivosti cementne paste. Omjer agregata i cementa najčešće se kreće u rasponu od 4 do 4,5. Tipična smjesa procjeddnog betona sadrži 1420 - 1600 kg/m³ agregata. Treba paziti na suhoću agregata koji može upiti vodu te napraviti mješavinu presuhom te će takvu mješavinu biti teško ugraditi i zbijati. Isto treba paziti i na previše vlažan agregat, jer će dodatna voda iz takvog agregata povećati vodocementni faktor te smjesa neće biti dobre konzistencije [6, 7, 8].

2.3. Cement i cementni materijali

Kao i kod običnih betona, koriste se portland i miješani cementi, te se mogu koristiti i dodatni materijali kao što su leteći pepeo, silicijska prašina ili zgura. Ispitivanje interakcije cementnih materijala s ostalim sastojcima betona je poželjno prije izrade mješavine zbog određivanja svojstava mješavine kao što su: vrijeme stvrdnjavanja, poroznost, propusnost vode, brzina razvoja čvrstoće i drugih. Leteći pepeo, silicijska prašina i zgura utječu na vrijeme stvrdnjavanja, čvrstoće, propusnost i druge. Silicijska prašina se inače koristi za izradu betona visokih čvrstoća jer, uz ostale posebnosti sastava, može povećati tlačnu čvrstoću betona i preko 135 MPa. Silicijska prašina može zamijeniti dio cementa u rasponu od 5 do 12% [6].

2.4. Dodaci

Za dobivanje posebnih svojstava čvrste ili svježe smjese kao i kod običnih betona koriste se posebni kemijski dodaci. Zbog brzog vremena sušenja procjedenog betona uglavnom se koriste usporivači vezanja ili stabilizatori hidratacije. Za povećanje tlačne čvrstoće koriste se. Prilikom korištenja svih vrsta aditiva preporuča se praćenje preporuke proizvođača i izrada probnih mješavina [1].

2.5. Efekt urbanih toplinskih otoka

Efekt urbanih toplinskih otoka javlja se na dijelu površine ili volumena nekog tijela u kojem je temperatura veća od okoline. Ova pojava može se dogoditi na površini od nekoliko kvadratnih milimetara pa sve do nekoliko tisuća kvadratnih kilometara.

Betonske i asfaltne površine apsorbiraju i pohranjuju više topline od prirodnih površina, te ispuštaju tu istu toplinu u atmosferu a time pridonose efektu urbanih toplinskih otoka. Američka agencija za zaštitu okoliša (EPA-Environmental Protection Agency) primjetila je godišnji porast temperature od 1°C do 3°C u gradovima s milijun ili više stanovnika. Asfaltne i betonske podloge dostižu čak 25°C do 50°C veću temperaturu od okoline zbog svoje boje i guste strukture. Osim odabira vrste i boje materijala, poroznost i debljina slojeva utječu na toplinska svojstva asfaltnih i betonskih površina. Poroznost utječe na efekt hlađenja isparavanjem vode iz kolnika. Svrha efekta hlađenja isparavanjem je održavanje vlažnih uvjeta u kolniku. Porozne površine dozvoljavaju vodi da prolazi kroz slojeve do korijena te pogoduje ozelenjivanju u urbanim područjima i isparava kada temperatura naraste, a stupanj isparavanja ovisi o temperaturi materijala, temperaturi atmosfere i o sadržaju vlage. Povećanjem sadržaja vlage smanjuje se temperatura podloge. Čak i s ovim značajkama primjećuje se da su tijekom sušnog razdoblja porozni asfalt i procjedni beton hladniji nego konvencionalne betonske i asfaltne podloge [9].

3. TOPLINSKA SVOJSTVA PROCJEDNOG BETONA

Toplinska svojstva kod višekomponentnih i poroznih materijala kao što je procjedni beton ovise o strukturi agregata i kontinuitetu čvrste mase (agregata i paste). Kod procjednog betona uz krupni agregat, šupljine igraju veliku ulogu u količini topline koja će proći kroz konstrukciju obzirom da zrak ima vrlo nisku toplinsku provodljivost u usporedbi sa drugim materijalima.

3.1. Toplinska provodljivost i porozitet procjednog betona

U radu [10] autori su ispitivali toplinsku provodljivost procjernih betonskih uzoraka različitih poroziteta. Toplinska provodljivost mjerena je pomoću dvije metode: mjeračem toplinskog protoka i metodom termičke sonde u obliku igle. Metode su odrađene na dvije vrste uzoraka: kvadratne ploče dimenzija 287,75 x 287,75 mm debljine 82,55 mm i na valjcima promjera 100 mm visine 200 mm. Krupni agregat u smjesi bio je drobljeni bazalt maksimalne veličine zrna 9,5 mm. Gustoća mješavine procjednog betona bila je 2143,3 kg/m³ ciljane srednje poroznosti 27% (Tablica 2).

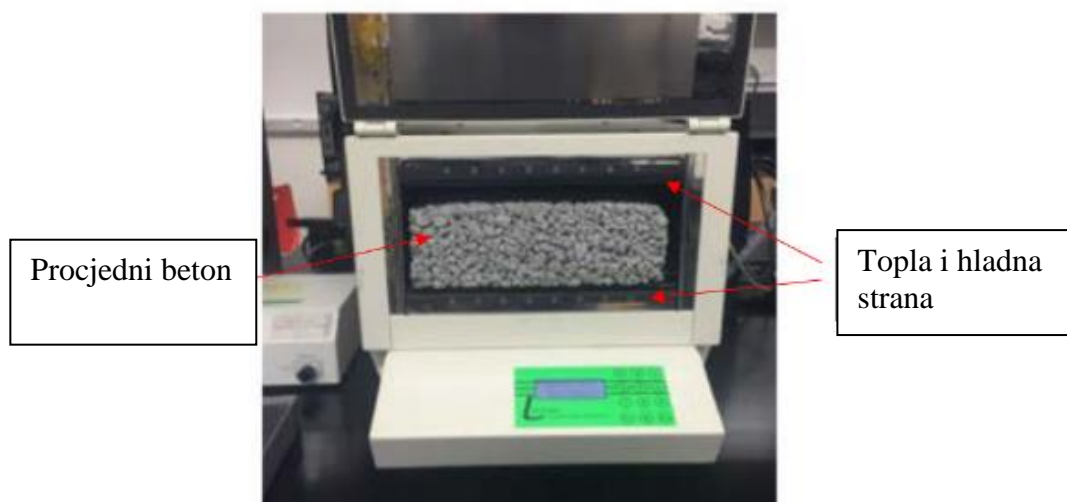
Tablica 2: Sastojci i udio pojedinih u smjesi procjednog betona

Sastojci	Količina sastojaka u m ³ betona (kg)
Površinski zasićen suhi krupni agregat	1563,3
Cement tip I/II	337
Leteći pepeo klase F	59,3
Voda	95,5

I valjci i kvadratne ploče napravljeni su tako da pokriju što veći raspon poroznosti i to zato da se toplinska vodljivost okarakterizira kao funkcija poroznosti. Napravljeno je 20 valjaka i 6 ploča te su svi uzorci njegovani u zatvorenim kalupima 7 dana u laboratorijskim uvjetima pri temperaturi od oko 22°C. 6 ploča napravljen je različitih poroziteta i to: 19 %, 21 %, 24 %, 26 %, 31 % i 36 % s minimalnim odstupanjima. Poroznost valjaka prikazana je kao raspon od 16 % do 23 %. Nakon 7 dana uzorci su izvađeni iz kalupa i izmjerena je njihova poroznost te su ostavljeni na zraku do ispitivanja toplinske provodljivosti. Poroznost

uzoraka mjerena je kao razlika ukupnog volumena i volumena istisnute vode nakon potpunog uranjanja.

Prva metoda mjerenja toplinske provodljivosti radila se FOX 304 mjerачem toplinskog protoka. Temperatura se mjerila na betonskim pločama na donjoj i gornjoj strani 4 puta za svaku ploču (Slika 9). Sva 4 testa pokazala su konstantnu vrijednost toplinske provodljivosti s minimalnim promjenjivostima s time da se zbog male toplinske provodljivosti zraka primjećuje padajući trend toplinske provodljivosti kod uzoraka s većom poroznošću. Povezanost poroznosti i toplinske vodljivosti vidi se prema podacima da je kod uzorka s 36% šupljina, srednja toplinska provodljivost iznosila $0,36 \text{ W/mK}^{-1}$, dok je kod uzorka s 19% šupljina, srednja toplinska provodljivost iznosila $0,55 \text{ W/mK}^{-1}$. Ova usporedba jasno prikazuje kako veliki postotak šupljina u procjednom betonu smanjuje prijenos topline kondukcijom.



Slika 9: Mjerenje toplinske provodljivosti ploče od suhog procjednog betona [10]

Druga metoda mjerenja izvodila se igličastom sondom RK-1. Sonda duga 60 mm promjera 4 mm služi za mjerenje toplinske provodljivosti kamena i betona tako što primjenjuje toplinske impulse na uzorak dok se mjeri temperatura uzorka. Metoda se izvodi 10 minuta i to 5 puta, a kroz sondu se pušta poznati napon i struja te se rezultati toplinske provodljivosti uzimaju tijekom perioda grijanja ili hlađenja uzorka.

Ove dvije metode pokazuju podudaranje s otprilike 20% odstupanja te se veza između toplinske provodljivosti kod ove dvije metode može prikazati izrazom (1) preuzetom iz [10]:

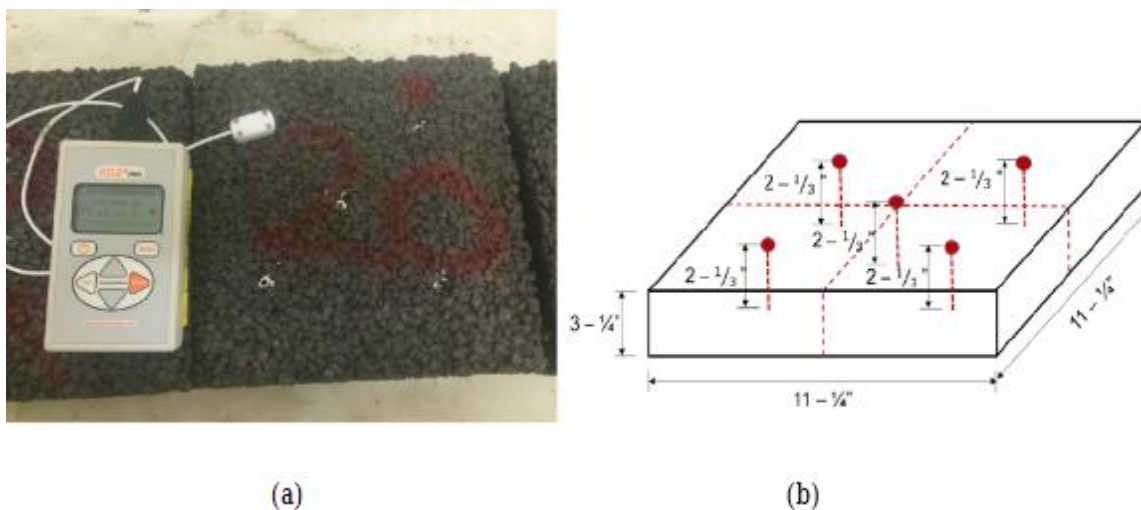
$$K_{tp} = 0,8225 \times K_s - 0,019 \quad (1)$$

gdje je:

K_{tp} - toplinska provodljivost mjerena FOX 304 mjerачem toplinskog protoka

K_s - toplinska provodljivost mjerena igličastom sondom RK-1.

Obzirom da je riječ o procjednom betonu kojem je glavna namjena procjeđivanje i odvodnja vode, napravljeni su testovi u vlažnim uvjetima. Ploče su izložene relativnoj vlažnosti od 100% pri temperaturi od 22°C dok im se masa nije stabilizirala do stalne mase (otprilike 450 g više nego kod suhe ploče). Testiranje je zatim ponovljeno metodom igličaste sonde (Slika 10 a) i b)). Kao što je i bilo očekivano, voda u uzorku je povećala toplinsku provodljivost za otprilike 20%.



Slika 10: a) Mjerenje toplinske provodljivosti mokre betonske ploče termalnom igličastom sondom, b) Plan bušenja betonske ploče igličastom sondom [10]

RK-1 sonda je uzeta i za ispitivanje valjkastih uzoraka i to zato što se zbog svog oblika ne mogu testirati mjerачem toplinskog protoka. Igličasta sonda pruža nam brzu procjenu toplinske provodljivosti valjaka. Sonda se postavlja u središte gornje i donje strane svakog valjka te je testiranje izvedeno 5 puta. Obzirom da je sonda duga samo 60 mm valjci su rezani na pola visine kako bi se dobile kvalitetnije vrijednosti ispitivanja i veza između toplinske provodljivosti i poroznosti. Kao i prije opet je primijećen pad toplinske provodljivosti s povećanjem poroznosti. U prosjeku, toplinska provodljivost donjih polovica valjaka iznosila je $0,49 \text{ W/mK}^{-1}$, a gornjih polovica $0,56 \text{ W/mK}^{-1}$. Prosječna toplinska provodljivost, posebno donjih polovica, je vrlo slična onim kvadratnih ploča, mjereno sondama.

Iz ovog istraživanja vidimo obrnuto proporcionalnu vezu između toplinske provodljivosti i poroznosti, to jest povećanjem poroznosti smanjuje se toplinska provodljivost procjednog betona. Rezultati prikazuju prihvatljivo podudaranje rezultata između kvadratnih ploča i valjaka što nam govori kako se za ove metode ispitivanja mogu koristiti i uzorci oblika valjka iako su nepogodni za testiranje metodom mjerača toplinskog protoka zbog svoga oblika [10].

3.2. Reciklirani agregat i indeks refleksije sunčeve svjetlosti procjednog betona

Indeks refleksije sunčeve svjetlosti je mjera koja označava količinu sunčevog zračenja koja je reflektirana od površine, te je ona pokazatelj koliko će topla biti ta ista površina. Toplina apsorbirana od podloge je obrnuto proporcionalna indeksu refleksije sunčeve svjetlosti što znači da nam manji indeks refleksije sunčeve svjetlosti neke površine govori da će ta površina postati toplija na suncu [11].

U radu [12] autori su ispitivali indeks refleksije sunčeve svjetlosti procjednog betona izrađenog koristeći reciklirani agregat i mljevenu šljaku. Cilj ovog rada bio je da se uporabom velikog udjela recikliranog agregata u procjednom betonu poboljšaju njegova svojstva utjecaja na okoliš, a da mu se pritom znatno ne smanje ostala svojstva.

Koristile su se 3 različite vrste krupnog agregata veličine zrna 9,5 mm a to su (Tablica 3):

- šljunak
- vapnenac
- mješavina recikliranog betonskog agregata (50% drobljeni vapnenac i 50% reciklirani agregat za beton)

Kao vezivo koristio se Portland cement tip 1, te se kao dodatni materijal za poboljšanje čvrstoće i indeksa refleksije sunčeve svjetlosti koristila mljevena šljaka iz visokih peći (nusprodukt u proizvodnji čelika).

Tablica 3. Svojstva materijala [12]

Svojstvo		Šljunak	Vapnenac	Reciklirani betonski agregat (50/50)
Masa	kg/m ³	1588	1471	1411
Apsorpcija vode	%	0,95	2,47	4,12
Specifična zapreminska težina ₁		2,61	2,57	2,42
Specifična zapreminska težina ₂		2,59	2,5	2,32
Pore	%	38,48	41,15	41,57

¹- saturirana površina, suho stanje

²- sušeno u peći

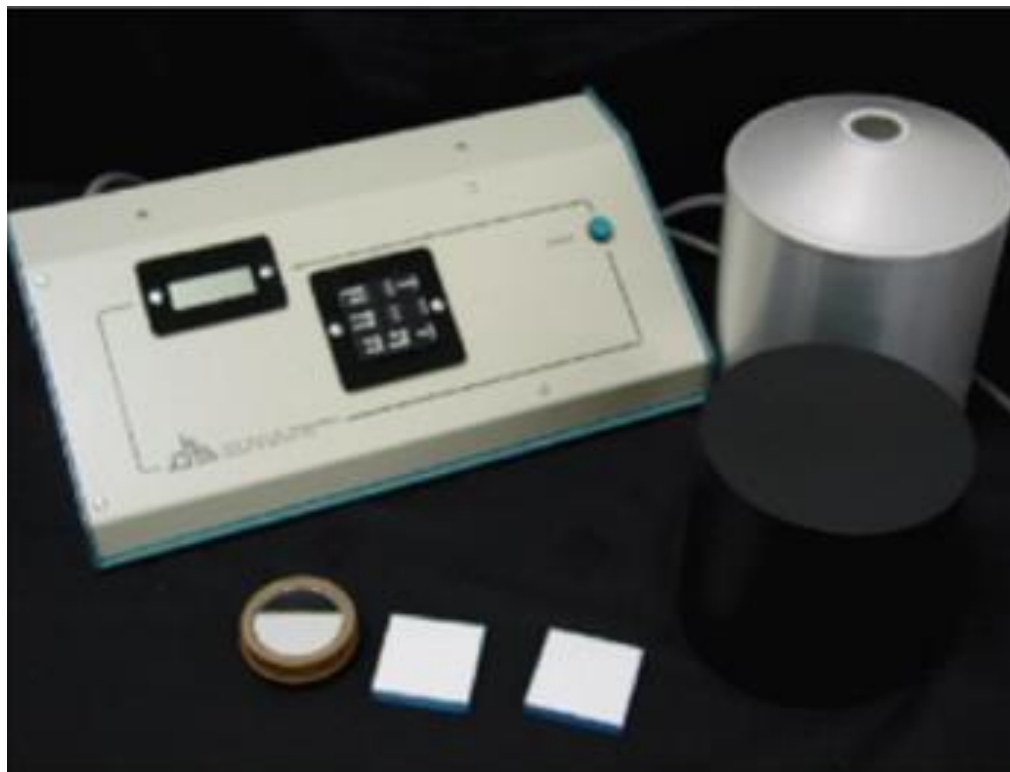
Mješavina procjednog betona pripravljena je u rotacijskom mikseru oblika bubnja zapremine 85 litara, prvo miješajući agregat, cement i šljaku jednu minutu te se zatim dodavala voda s 392 ml/100 kg cementa, dodatkom za redukciju vode STM C 494/C 494M type A i miješalo se još 3 minute. Nakon miješanja pustilo se da se mješavina odmori jednu minutu i opet se miješala 3 minute dok se u nju dodavao modulator viskoznosti ASTM C 494/C 494M tip S u dozi od 261 ml/100 kg cementa.

Uzorci za određivanje indeksa refleksije sunčeve svjetlosti (Slika 11) izrezani su od ploče dimenzija 432 mm x 356 mm x 102 mm. Ploča je zbijena u jednom sloju s valjkom s konstantnim pritiskom od 148 kg/m.



Slika 11: Testni uzorci za određivanje indeksa refleksije sunčeve svjetlosti [12]

Indeks refleksije sunčeve svjetlosti mjeren je prijenosnim solarnim reflektometrom (Slika 12) na 3 različita mjesta na površini svakog prizmatičnog uzorka.



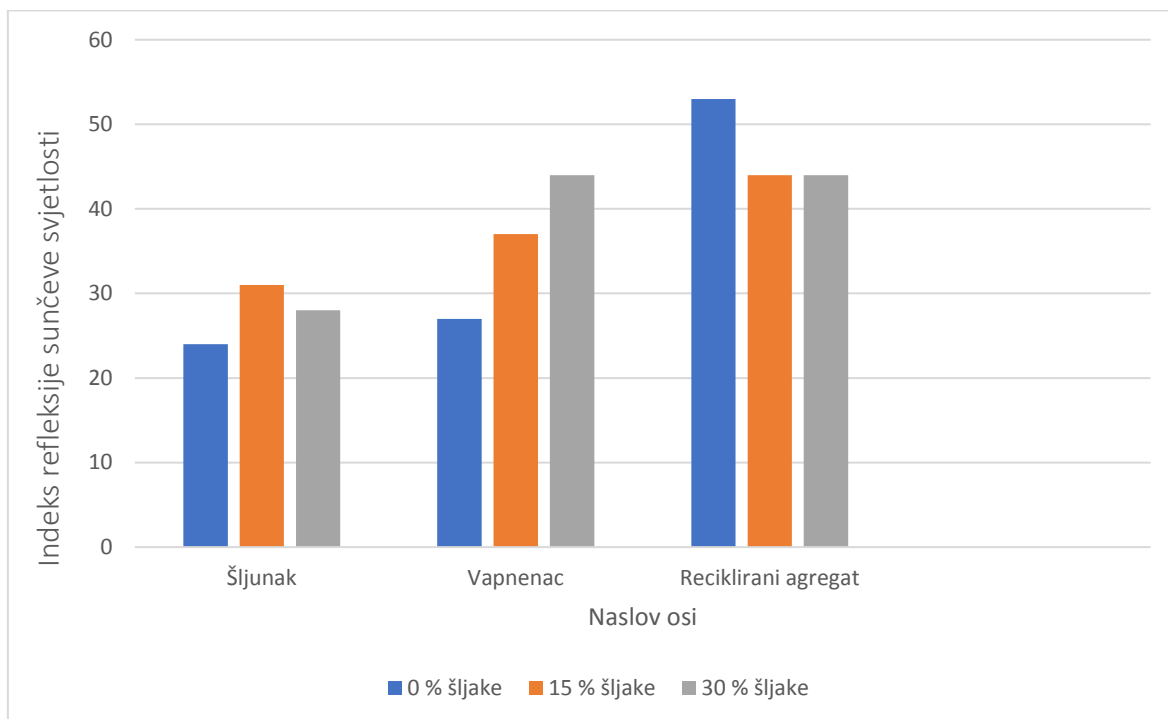
Slika 12: Reflektometar solarnog spektra [12]

Jedan set od 3 uzorka uzet je za svaku vrstu agregata (ukupno 9 uzoraka).

Uporabom 15% šljake u smjesi sa šljunkom, poboljšalo je indeks refleksije sunčeve svjetlosti, ali učinak se nije poboljšao koristeći 30% šljake u istoj smjesi. Potrebno je uzeti u obzir da je smjesa od šljunka i šljake imala manji udio paste što isto može utjecati na indeks refleksije sunčeve svjetlosti u nepovoljnom smislu. Stoga je potrebno napraviti dodatna istraživanja kako bi se utvrdilo da li korištenjem šljunka poboljšavamo indeks refleksije sunčeve svjetlosti i može li ga dodatak šljake poboljšati.

Nasuprot procjednom betonu sa šljunkom, dodavanje šljake mješavini s vapnencem povećavao se indeks refleksije sunčeve svjetlosti. Mješavina procjednog betona s vapnencem bez šljake je još uvijek bila ispod praga potrebnog indeksa refleksije sunčeve svjetlosti (minimalni prag je 30) s vrijednošću 29. Već 30% šljake u smjesi povećalo je indeks refleksije sunčeve svjetlosti za 38% u usporedbi sa smjesom bez šljake. Zamjenom 70% cementa sa šljakom uveliko je povećalo indeks refleksije sunčeve svjetlosti za 71% u usporedbi s procjednim betonom bez šljake.

Zadnja vrsta smjese procjednog betona je mješavina recikliranog betonskog agregata s 50% drobljenog vapnenca i 50% recikliranog agregata za beton. Srednje vrijednosti indeksa refleksije sunčeve svjetlosti u ovoj smjesi veće su od onih u smjesama sa šljunkom i vapnencem. Doze šljake nisu znatno utjecale na indeks refleksije u smjesama s recikliranim agregatom te se sumnja da je to zbog već prisutnog betonskog recikliranog agregata u smjesi. Promjenom vrste agregata indeks refleksije sunčeve svjetlosti mijenja se, gdje tamniji agregati poput šljunka utječu na indeks refleksije sunčeve svjetlosti u usporedbi s recikliranim agregatom i vapnencem. Zamjenom cementa s drobljenom šljakom dobivenom iz visokih peći u smjesi s vapnencem uvelike je povećalo indeks refleksije sunčeve svjetlosti u usporedbi sa smjesom bez nje [12].



Slika 13: Dijagram ovisnosti vrste agregata i indeksa refleksije sunčeve svjetlosti [12]

4. POROZNI ASFALT U ASFALTNIM KONSTRUKCIJAMA

Kolnici asfaltirani klasičnom asfaltnom mješavinom projektirani su tako da, mješavina agregata i veziva čini strukturu koja ne propušta vodu ili barem propuštanje vode kroz asfalt svedu na minimum. Takva svojstva asfalta sprječavaju otjecanje vode u donje slojeve asfaltne konstrukcije i sprječava se moguća šteta na cijeloj asfaltnoj konstrukciji. Kao

suprotnost konvencionalnim asfaltnim mješavinama osmišljen je porozni asfalt. Njegova funkcija je kao i kod procjednog betona da omogući protjecanje vode kroz asfalt te da se voda dalje odvodi u okolno tlo. Porozni asfalt se najčešće koristio na parkiralištima i drugim površinama gdje prometno opterećenje nije preveliko. Danas se obzirom na dostupnost proizvoda i mogućnost varijacija u debljini sloja poroznog asfalta od 5-10 cm, za kolničke konstrukcije većih prometnih opterećenja u asfalt dodaju polimerno modificirana veziva koja poboljšavaju osjetljivost na temperaturu, duktilnost pri izlaganju većim silama, duktilnost kod niskih temperatura i žilavost. Tipične asfaltne konstrukcije od poroznog asfalta sastoje se od poroznog asfaltnog sloja, gornjeg filtrirajućeg sloja, kamenog sloja koji služi kao rezervoar za vodu, donjeg filtrirajućeg sloja, filterske tkanine i postojećeg tla koji suži kao podloga. Životni vijek dobro izvedenog i održavanog poroznog asfalta predviđa se da je najmanje 20 godina [13].

4.1. Prednosti i mane konstrukcija od poroznog asfalta

Konstrukcije od poroznog asfalta su u početku često skuplje investicije od onih sa običnim asfaltom. Kolničke konstrukcije sa završnim slojem od poroznog asfalta nude veliku efektivnost u upravljanju oborinskih voda, smanjenju njihovog otjecanja i poboljšanju obnavljanja zaliha podzemnih voda. Ovi faktori indirektno mogu utjecati na smanjenje troškova odvodnje jer se ovisno o situaciji ne moraju ugrađivati sistemi za odvodnju vode.

Bitni faktori za osiguranje dugovječnosti asfalta i prodor zagađivača u tlo su sljedeći:

- paziti na udio organskih materijala u tlu
- vakuumski usisavati prema određenom rasporedu
- ugraditi porozni asfalt na parkirališnim mjestima male prometnosti
- ograničiti promet teških vozila preko samog asfalta
- ograničiti upotrebu dodataka za odleđivanje
- osigurati dovoljne debljine sloja asfalta koji služi kao rezervoar vode kako bi se spriječilo smrzavanje

Neke od prednosti konstrukcija od poroznog asfalta su:

- snijeg i led se brže tope s poroznog asfalta, što smanjuje potrebu za soli za odleđivanje te se životni vijek asfalta produžuje
- podzemne vode se lakše pune
- smanjena potreba za tehnologijom koja služi za odvodnju vode sa prometnica
- povećana vidljivost na mokrim cestama te smanjenje mogućnost pojave vodenog klina
- poboljšanje prijenosa vode i kisika do korijenja biljaka
- tijekom ljetnih mjeseci hladi oborinsku vodu prije otpuštanja u zemlju i ublažava efekt toplinskih otoka

Jedan od glavnih mana poroznog asfalta je, kao i kod procjednog betona, manja čvrstoća na savijanje. prometnice od poroznog asfalta predviđene su za automobile i ostala laka vozila međutim, kvalitetnim projektiranjem moguće je raditi autoceste s poroznim asfaltom. Glavni problem kod izvedbe autocesta poroznim asfaltom su velike varijabilnosti tla ispod konstrukcije, velika količina prometa, nagib ceste i komunalne usluge [14].

5. Porozitet i toplinska svojstva asfaltnih mješavina

Asfaltne mješavine s visokim porozitetom imaju manju toplinsku provodljivost i specifični toplinski kapacitet od asfaltnih mješavina manjih poroziteta. Količina topline koja se akumulira u asfaltima različitih poroziteta, ali istih materijala ovisi samo o gustoći asfaltne mješavine. Srednje temperature asfaltnih mješavina su neovisne od poroziteta tijekom procesa grijanja i hlađenja. Generalno asfaltne mješavine većih poroziteta akumuliraju manje toplinske energije od onih manjih poroziteta, te se iz tog razloga preporučuju za ublažavanje efekta urbanih otoka. Asfaltne mješavine manjih poroziteta preporučuju se kod pločnika gdje je potrebno skupljanje solarne energije te kako bi se energija od sunca koristila umjesto one iz fosilnih goriva i kako bi se zbog moguće pohrane ta energija mogla „micati“ s trenutne lokacije na kojoj uzrokuje probleme samoj asfaltnoj konstrukciji i efekt urbanih otoka [15].

5.1. Simulacija efekta hlađenja asfaltnih površina

Porozni asfaltni kolnici pokazuju manju unutarnju temperaturu od konvencionalnih asfaltnih kolnika. S obzirom na to da su asfaltni kolnici vrlo osjetljiv materijal na visoke temperature može doći do nuspojava tijekom velikih toplina. Tijekom velikih toplina otpornost asfaltnih površina na pojavu kolotruga biti će vrlo oslabljena. Kolotrazi su trajna plastična deformacija u tragovima kotača koja nastaje zbog loše podloge i kretanja vozila po kolniku. Kolotrazi predstavljaju veliku opasnost za vozače zato što je sama vožnja kroz njih neugodna te se prilikom nepažnje vrlo lako može izgubiti nadzor nad vozilom. Tijekom kiše kolotrazi su posebno opasni zbog nakupljanja vode u njima te pojave akvaplaninga [16].

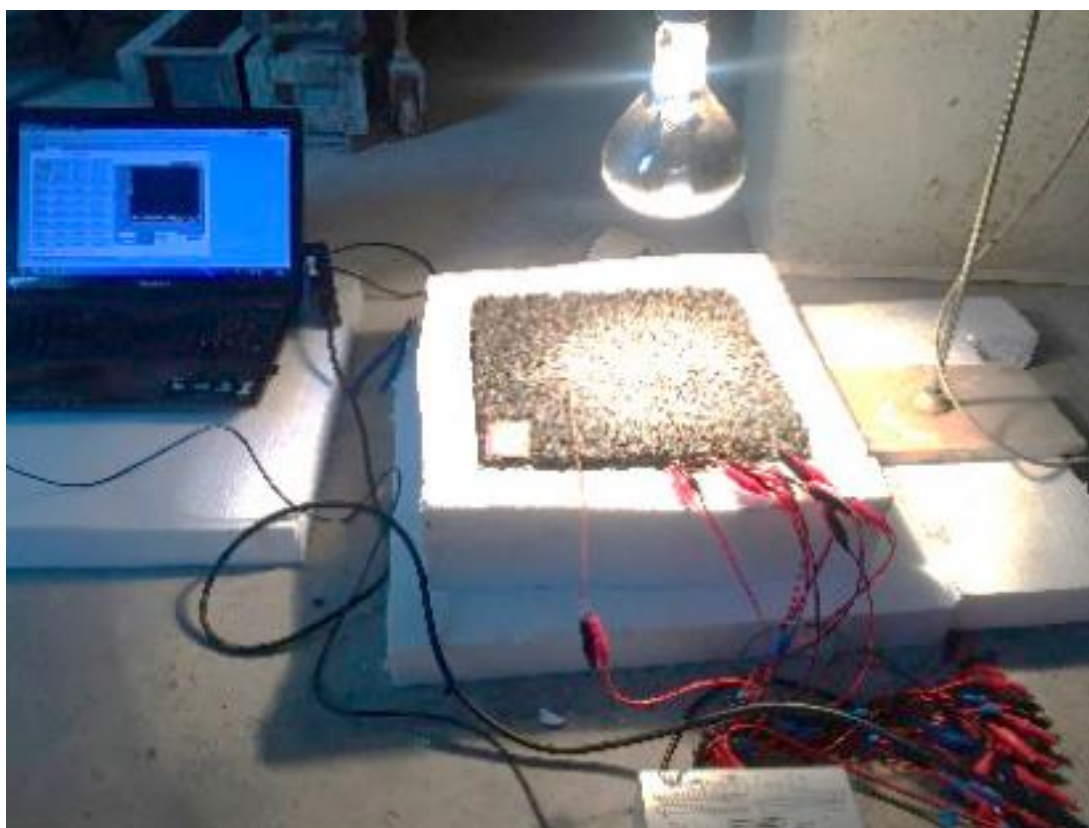
U jednom radu [16] se pokušao simulirati i ispitati efekt hlađenja asfaltnih uzoraka različitih poroziteta. Svi uzorci visine su 10 cm i baze 30 cm x 30 cm, te se sastoje od dva sloja. Gornji sloj poroznog asfalta debljine je 4 cm, a donji sloj običnog gusto nabijenog asfalta debljine je 6 cm. Izraženo je 5 takvih uzoraka te se veličina zrna agregata i njezin udio može vidjeti u sljedećoj tablici (Tablica 4):

Tablica 4: Rezultati gradacije agregata [16]

Veličina sita (mm)	Gradacija agregata (%)				
	1	2	3	4	5
16	100	100	100	100	100
13,2	95	95	95	92,7	95
9,5	55,5	67,5	65	56,8	45
4,75	20	26,5	25	16,7	10
2,36	15	18,5	16	10,4	8
1,18	12	14,3	14	7,9	7
0,6	9	10	11	6,6	6
0,3	7,5	8	9	5,2	5
0,15	6	6	6	4,5	4
0,075	5	4	4	3,8	3
Pore (%)	16,68	18,11	19,66	20,79	23,05

Prva simulacija zvala se eksperiment sa suncem. Inače je ova vrsta eksperimenta vrlo podložna vanjskim uvjetima, te nemamo kontrolu nad njima. Zato se u ovom radu radila simulacija u kontroliranim uvjetima.

Prva podvrsta simulacije zove se "simulirani eksperiment sa suncem u uvjetima bez vjetra". Uzorci su stavljeni na ploču toplinske izolacije stiropora (EPS= ekspanzirani polistiren). 4 strane uzorka su se pokrile s toplinskom izolacionom pločom debljine 10 cm te se u uzorak uperila UV lampa (jačine 220 volti i 275 vati) kao simulacija sunca da ugrije uzorke (Slika 14).



Slika 14: Simulacija grijanja asfaltnog uzorka [16]

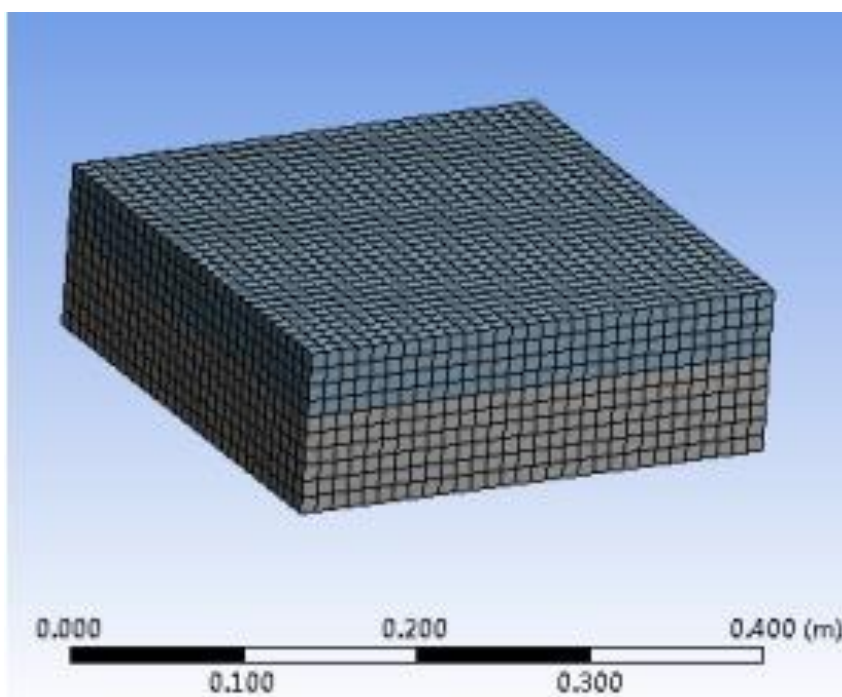
Senzori topline mjerili su toplinu uzorka na različitim dubinama.

Druga podvrsta simulacije zove se "simulirani eksperiment sa suncem u uvjetima s vjetrom". Kod pravog asfaltnog kolnika utjecaj vode i vjetra vrlo je bitan za efekt hlađenja. Nažalost, teško je kontrolirati udio vode zato što se vrlo lako može prijeći preko dopuštene granice. Zato se ova simulacija isključivo fokusirala kakav utjecaj strujanje zraka po površini uzorka ima na temperaturu uzorka. U ovoj simulaciji se za primjer uzela prosječna godišnja brzina

vjetra u Nanjingu koja je iznosila 2,61 m/s. Ponovio se postupak s UV lampom iz prvog eksperimenta, pa se odredila horizontalna udaljenost fena od uzorka dok brzina vjetra na uzorku nije iznosila 2,61 m/s.

Zadnja podvrsta simulacije bila je računalni eksperiment konačnih elemenata. Simulacija se obavljala programom ANSYS Workbench. Uzeo se element dimenzija 30 cm x 30 cm x (4 + 6) cm (Slika 15).

Toplinska svojstva koja su se mjerila za asfaltne uzorke su specifična toplina, toplinska provodljivost i toplinska difuzivnost



Slika 15: Model konačnog elementa [16]

4 bočne strane zamišljene su kao adijabatski zidovi te je samo gornja površina mogla razmjenjivati toplinsku energiju s vanjskim utjecajima.

Rezultati eksperimenta i virtualne simulacije asfaltnih i poroznih asfaltnih uzoraka pokazuju kako su temperaturne razlike na različitim dubinama slične, te je u početku temperatura rasla ubrzano. Prolaskom vremena eksperimenata, površinska temperaturna krivulja postepeno se stabilizira te krivulja postaje blaga. Čak pola temperaturnog površinskog porasta uzoraka desilo se u prvih 5 do 10 minuta eksperimenta. Nasuprot površinskoj temperaturi, temperatura na dnu uzoraka bila je nepromjenjiva prvih 25 minuta eksperimenta iz čega

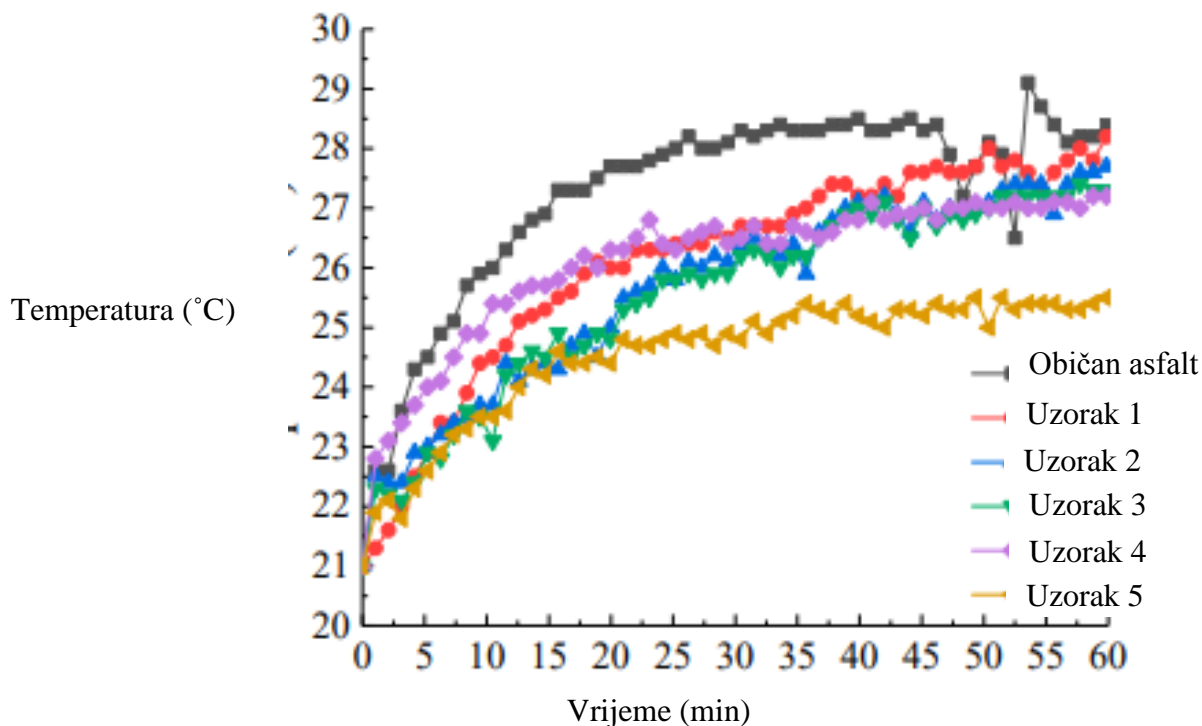
zaključujemo da povećanjem debljine kolnika, temperaturne razlike će biti manje uslijed većih promjena temperature na površini. Rezultati eksperimenta i virtualne simulacije vrlo su slični što upućuje na veliku pouzdanost virtualnih eksperimenata. Temperatura površine poroznih asfaltnih uzoraka bila je nešto veća od onih kod uzoraka od običnog asfalta, a na dubinama od 4 cm i 10 cm temperatura je bila manja kod uzoraka od poroznog asfalta, te se povećanjem poroznosti smanjuje temperatura donjih slojeva u poroznom asfaltu (Tablica 5).

Tablica 5: Temperatura uzoraka na različitim dubinama [16]

Uzorak	Poroznost (%)	Temperatura (°C)		
		Površina	4 cm	10 cm
Običan asfalt	0	65,6	41,3	30,3
1	16,68	64,8	40	29,2
2	18,11	67,4	41,3	28,9
3	19,66	66,45	39,3	28,8
4	20,79	67,2	38,8	28,6
5	23,05	67,5	37,15	27,86

Razlog ove pojave je što u uvjetima bez vjetra prilikom površinske apsorpcije topline, nema protoka zraka između pora koji će smanjiti temperaturu. S obzirom na to kako se kolotrazi asfalta pri visokim temperaturama događaju na površinskim dijelovima konstrukcije te su opasni zbog zadržavanja vode i pojave akvaplaninga, ovaj eksperiment nas upućuje kako je porozni asfalt dobar za poboljšanje svojstava i sigurnosti kolnika.

U eksperimentu gdje su bili uvjeti s vjetrom, smatralo se kako će se sve temperaturne promjene odvijati na površini uzoraka, te se zato radilo ispitivanje samo površinske temperature. U eksperimentu se vidi kako površinska temperatura u početku raste naglo te se vremenom stabilizira i krivulja postaje blaža (Slika 16).



Slika 16: Površinske temperature asfaltnih uzoraka [16]

Temperatura uzoraka od poroznog asfalta uvijek je manja od onih od običnog asfalta. Isto tako, svi uzorci, osim uzorka 4, pokazuju kako se povećanjem postotka poroznosti smanjuje površinska temperatura te je efekt hlađenja bolji kod uzoraka od poroznog asfalta. Povećanjem poroznosti dolazi do povećanja koeficijenta prijenosa topline konvekcijom, ali samo kada imamo protok zraka koji prenosi toplinu u vanjski zrak.

Poroznost ima veliki utjecaj na sva toplinska svojstva poroznog asfalta. Toplinska provodljivost, specifična toplina i toplinska difuzivnost opadale su povećanjem poroziteta uzoraka isto kao i apsorpcija toplina i prijenos topline, te su to svojstva koja znatno utječu na efekt hlađenja poroznog asfalta.

Eksperimentom sa simulacijom sunca i virtualnom simulacijom, dokazalo se kako je efekt hlađenja bolji kod poroznog asfalta nego kod običnih asfalta te je on usko povezan s porozitetom (veći porozitet rezultira boljim efektom hlađenja).

U praksi treba paziti na porozitet jer preveliki porozitet nije pogodan zbog smanjenja čvrstoće te neće biti uporabljiv, a poroznosti u ovom radu uzimale su se kako bi čvrstoća kolnika bila osigurana.

6. Eksperimentalni dio rada

U eksperimentalnom dijelu rada bili određene su:

- gustoća svježeg betona
- poroznost svježeg betona
- konzistencija svježeg betona metodom kuglice i slijeganjem

- gustoća očvrtnulog betona
- poroznost očvrtnulog betona
- toplinske karakteristike očvrtnulog procjednog i običnog betona
- toplinske karakteristike poroznog i običnog asfalta

Za potrebe ispitivanja običnog i procjednog betona izrađene su se mješavine u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Za izradu mješavina koristio se Holcimov pijesak 0-4 mm, krupni agregat 8-16 mm od GP KRK-a, Holcimov cement CEM 42,5N, te ovisno o vrsti mješavine superplastifikator i MF vlakna.

Potreban materijal za izradu svih 5 mješavina nalazi se u tablici (Tablica 6):

Tablica 6: Potreban materijal za izradu mješavina (izvor: vlastiti prikaz)

Potreban materijal za 1 m ³	cement (kg)	0-4 mm (kg)	4-8 mm (kg)	8-16 mm (kg)	voda (kg)	superplastifikator (kg)	MF vlakna (kg)
Mješavina 1	334	156	/	1356	118	1	/
Mješavina 2	334	156	/	1356	118	1	2
Mješavina 3	350	184,15	/	1333,35	122,5	/	/
Mješavina 4	350	148,15	/	1333,35	122,5	/	2
Obični beton	350	974,67	292,67	682,67	142	3,5	/

Asfaltni uzorci nisu se dodatno izrađivali, nego su se gotovi uzorci preuzeli iz Laboratorija za prometnice na Građevinskom fakultetu u Rijeci.

Izrada mješavina i uzoraka od betona

Za izradu betonskih mješavina i potrebna ispitivanja svježeg betona bilo je potrebno pripremiti:

- vagu
- materijale
- lopatice
- posude za vaganje
- Abramsov konus, ravnjaču, metalnu šipku i metar
- Proctor čekić
- posudu od 7 l

Upute za izradu mješavina uzete su iz diplomskog rada [1]. Mješavine su izrađene u protustrujnoj miješalici (Slika 17) suhim miješanjem agregata u trajanju od 1 minute, nakon čega je dodana voda pomiješana sa superplastifikatorom (Slika 18), ukoliko je bio predviđen u mješavini te je miješanje nastavljeno još 3 minute.



Slika 17: Suhi sastojci u rotirajućem bubnju spremni za suho miješanje (izvor: vlastita fotografija)



Slika 18: Dodavanje superplastifikatora u vodu (izvor: vlastita fotografija)

U mješavine s vlaknima, vlakna su se postepeno ručno dodavala u bubanj u toku miješanja. Punjenje kalupa provedeno je metalnom lopaticom (Slika 19) u trećinama visine uz nabijanje drvenim batom 15 puta s prethodnim mazanjem unutarnjih stijenki svakog kalupa mineralnim uljem.



Slika 19: Ugradnja procjedinog betona u kalup (izvor: vlastita fotografija)

Za potrebe usporedbe rezultata s radom (Juradin et al., 2021.) probno je vibriran procjedni beton u trajanju od 5 sekundi. Nakon isteka vremena cementna pasta se slegla na dno (Slika 20). Iz tog se razloga odustalo od kratkog vibriranja mješavina kako bi se omogućila propusnost vode kroz procjedni beton. Nakon ugradnje betona u kalupe, beton je ostavljen na zraku da se suši 24 sata do raskalupljivanja.



Slika 20: Izgled vibriranog uzorka procjdnog betona (izvor: vlastita fotografija)

Smjesa običnog betona je zbog potrebe samo jednog uzorka i male količine materijala, izrađena ručnim miješanjem, zatim je ugrađena u kalup oblika valjka dimenzija $\text{Ø } 100 \times 200 \text{ mm}$ (Slika 21), vibrirana otprilike 10 s te se kao i uzorci od procjdnog betona sušila 24 sata do raskalupljivanja.



Slika 21: Ugradnja običnog betona u kalup oblika valjka dimenzija \varnothing 100 x 200 mm (izvor: vlastita fotografija)

Za potrebe ispitivanja toplinskih svojstava bilo je potrebno izraditi kalupe u toplinskoj izolaciji debljine $d=10$ cm. Sljedeći dan, nakon raskalupljivanja, uzorak procjednog betona, uzorak običnog betona te uzorci procjednog i običnog asfalta pripremljeni su za daljnje ispitivanje toplinskih svojstava.

6.1. Ispitivanje gustoće svježeg procjednog betona

Ispitivanje gustoće svježeg betona provedeno je prema normi HRN EN 12350-6

Za određivanje gustoće svježeg procjednog betona bila nam je potrebna posuda od 7 l, metalna šipka, ravnjača i vaga. Posuda od 7 l punjena je u 3 sloja koji su zbijani s 20 udaraca metalnom šipkom. Nakon što je posuda napunjena do vrha i svi slojevi zbijeni, vrh je

poravnat ravnjačom te je izvagana masa betona u posudi i izračunata njegova gustoća prema formuli (2):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

gdje je:

ρ - gustoća procjedinog betona [kg/m^3]

m - masa procjedinog betona u posudi [kg]

V - volumen posude [m^3]

Rezultati ispitivanja gustoće svježeg betona prikazani su u tablici (Tablica 7):

Tablica 7: Rezultati ispitivanja gustoće svježeg betona (izvor: vlastiti prikaz)

Ispitivanje gustoće procjedinog betona		
Broj mješavine	Masa betona u posudi volumena 7 l [kg]	Gustoća svježeg betona [kg/m^3]
M 1	13,295	1899,3
M 2	12,94	1848,6
M 3	12,77	1824,3
M 4	13,17	1881,4

6.2. Ispitivanje konzistencije svježeg procjedinog betona

Konzistencija svježeg procjedinog betona ispitana je na 2 načina:

1. Ispitivanje konzistencije betona metodom kuglice
2. Ispitivanje konzistencije betona slijeganjem

1. Ispitivanje konzistencije metodom kuglice rađeno je tako da je rukom uzet dio mješavine procjedinog betona te je formirana kuglica. Kuglica se nije smjela raspasti niti izgubiti svoju poroznu strukturu. Iz navedenog ispitivanja dobivena je kuglica dobre konzistencije koja se

ne raspada i ima dovoljno šupljina za otjecanje vode (Slika 8), što upućuje na dobar omjer materijala u mješavini.



Slika 8: Ispitivanje konzistencije procjednog betona metodom kuglice (izvor: vlastita fotografija)

2. Ispitivanje slijeganja svježeg betona rađeno je prema normi HRN EN 12350-2. Za ispitivanje konzistencije betona slijeganjem korišten je Abramsov konus promjera baze 200 ± 2 mm, promjera vrha 100 ± 2 mm, visine 300 ± 2 mm. Konus je kao i bazna ploča koja je služila kao podloga prije ispitivanja betona navlažen vodom. Tijekom punjenja betona, konus je pričvršćen za podlogu. U konus je lopaticom ubačena betonska mješavina u 3 sloja te je nabijana 25 puta metalnom šipkom (Slika 22).



Slika 22: Priprema uzorka za ispitivanje konzistencije slijeganjem (izvor: vlastita fotografija)

Donji sloj nabijen je da prodire kroz cijeli poprečni presjek sloja, ali da ne udara u baznu ploču. Drugi i gornji sloj nabijeni su da metalna šipka prodire sve do prethodnog sloja. Prije zbijanja gornjeg sloja konus je prepunjen da nakon zbijanja ostane višak viriti izvan konusa. Nakon zbijanja gornjeg sloja ravnjačom beton je poravnat s vrhom konusa i prosuti beton je uklonjen s bazne ploče.

Konus je uklonjen s uzorka vertikalno u trajanju od 5 sekundi bez bočnih pomaka kako ne bismo promijenili strukturu uzorka. Rezultati slijeganja Abramsovim konusom nalaze se u sljedećoj tablici (Tablica 8):

Tablica 8: Rezultati slijeganja procjdnog betona Abramsovim konusom (izvor: vlsatiti prikaz)

Ispitivanje slijeganja procjdnog betona Abramsovim konusom	
Broj mješavine	Razlika visine Δh [mm]
M 1	10
M 2	3
M 3	5
M 4	0

Rezultati slijeganja pokazuju nam kako je vodocementni omjer dobro određen, uzorak se vrlo malo slegao (Slika 23), te su ovakvi rezultati slijeganja uobičajeni za ovakvu vrstu betona.



Slika 23: Mjerenje konzistencije slijeganjem (izvor: vlastita fotografija)

6.3. Određivanje sadržaja šupljina svježeg procjdnog betona

Sadržaj šupljina svježeg betona inače se ispituje porometrom. Kod procjdnog betona to nije moguće zbog otjecanja vode kroz beton prije nanošenja početnog tlaka, te se dobiju rezultata koji nisu realni. Sadržaj šupljina mjeren je na način opisan u nastavku.

Ispitivanje sadržaja šupljina provedeno je prema normi ASTM C 1688-08. Za određivanje sadržaja šupljina svježeg procjdnog betona korištena je: posuda volumena 7 l, Proctor čekić, vaga, lopatica i metalna ravnjača. Navlažena posuda volumena 7 l napunjena je betonskom mješavinom. Punjenje je izvedeno u 2 sloja. Svaki sloj nabijan je Proctor čekićem 20 puta nabijanjem cijele površine poprečnog presjeka, a visina padanja čekića iznosila je

305 mm. Prije nabijanja gornjeg sloja posuda je prepunjena (Slika 24) da nakon nabijanja beton bude malo preko ruba posude.



Slika 24: Priprema uzorka za ispitivanje sadržaja šupljina (izvor: vlastita fotografija)

Beton nabijan je 10 puta sve dok nije bio višak betona iznad ruba posude. Posuda s betonom izvagana je i rezultati vaganja zaokruženi su na 50 g. Gustoća betona izračunata je prema formuli (3):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

gdje je:

ρ - gustoća procjdnog betona [kg/m^3]

m - masa procjdnog betona u posudi [kg]

V - volumen posude [m^3]

Sadržaj šupljina izračunat je prema izrazu (4) preuzetom iz [1]:

$$U = \frac{T - \rho}{T} \times 100 \% \quad (4)$$

gdje je:

U – sadržaj šupljina svježeg betona [%]

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

ρ - gustoća procjdnog betona [kg/m^3]

Teoretska gustoća svježeg procjdnog betona izračunata je prema izrazu (5) preuzetom iz [1]:

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (5)$$

gdje je:

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

M_s – ukupna masa sastojaka betona [kg]

V_s – suma apsolutnih volumena sastojaka betona [m^3]

U tablici 9 prikazani su rezultati ispitivanja sadržaja šupljina svježeg procjdnog betona

Tablica 9: Rezultati ispitivanja sadržaja šupljina svježeg procjdnog betona (izvor: vlastiti prikaz)

Sadržaj šupljina svježeg procjdnog betona				
Broj mješavine	Masa betona u posudi od 7 l	Srednja gustoća svježeg betona [kg/m^3]	Teoretska gustoća svježeg betona [kg/m^3]	Sadržaj šupljina svježeg betona [%]
M 1	13,295	1899,3	2488,5	23,68
M 2	12,94	1848,6	2496,2	25,94
M 3	12,77	1824,3	2492,1	26,80
M 4	13,17	1881,4	2488,3	24,39

6.4. Mjerenje toplinskih karakteristika procjdnog betona i poroznog asfalta

Nakon 24 sata od punjenja kalupa procjdnim betonom, procjdni beton je raskalupljen i uzorci su uzeti na ispitivanje toplinskih karakteristika sondama. Uzorci asfalta nisu se izrađivali nego su preuzeti iz Laboratorija za prometnice na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Prije postavljanja sonde izrađena su 2 kalupa u ploči toplinske izolacije $d=10$ cm u obliku valjka dimenzija $\varnothing 100 \times 200$ mm. Uzorci običnog i procjdnog asfalta dimenzija su $\varnothing 100 \times 50$ mm.

Ispitivanje temperature betonskih i asfaltnih i betonskih uzoraka rađeno je pomoću 4 uređaja marke Kimo Kistock ktt koji na sebi imaju po dvije sonde te je jedna sonda postavljena na dno a druga sonda na vrh uzorka. Sonde su za dno i vrh zalijepljene ljepljivom trakom te je bilo bitno paziti da se postave u šupljine uzorka. Nakon postavljanja sonde uzorci i sonde postavljeni su da što veći dio dana budu na suncu, ali da uređaju budu zaštićeni od vode te su zaštićeni vrećicama.. Uređaji su prethodno kalibrirani da mjere temperaturu uzorka svakih 30 minuta i to u periodu od 23 dana što ukupno čini 1105 mjerenja. Tijekom procesa mjerenja temperature dna i površine asfaltnih i betonskih uzoraka, bilježena je i dnevna prosječna temperatura i relativna vlažnost zraka kako bismo mogli vidjeti kako ti parametri utječu na temperaturu uzorka i utječe li veći udio šupljina u uzorcima na njihovu temperaturu. Prosječne dnevne temperature i relativne vlažnosti prikazane su u tablici 10.

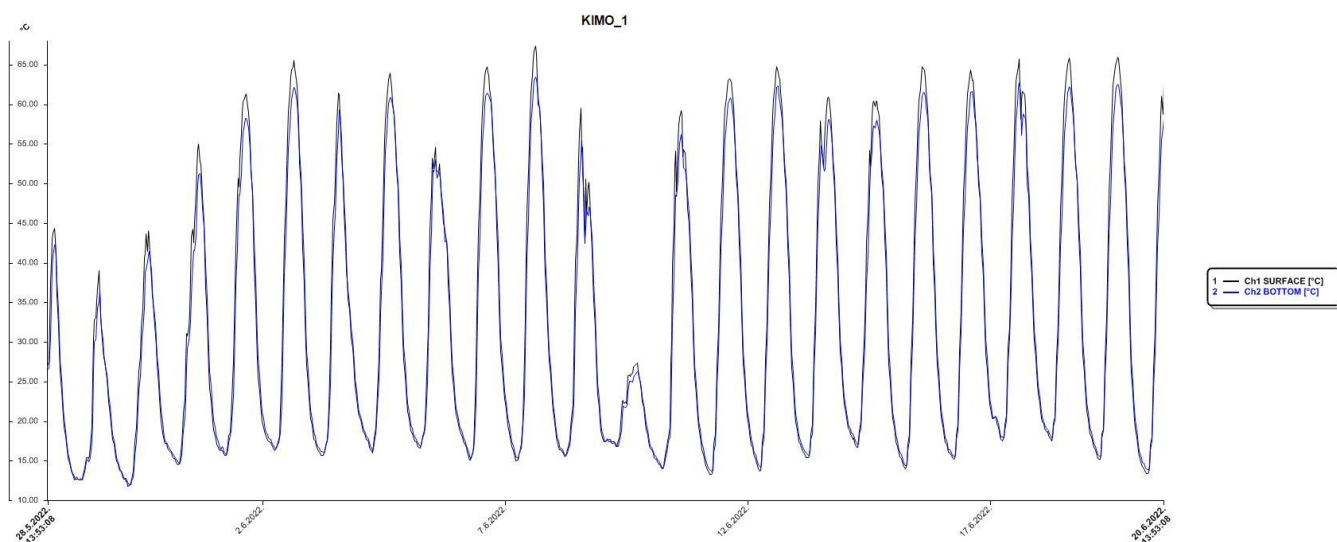
Tablica 10: Prosječna dnevna temperatura i relativna vlažnost zraka tijekom 23 dana ispitivanja (izvor: vlastiti prikaz)

Dan	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
28.5.2022	19	59
29.5.2022	16	78
30.5.2022	18	84
31.5.2022	20,5	82
1.6.2022	22	82
2.6.2022	23,5	75
3.6.2022	23	77
4.6.2022	25	72
5.6.2022	25	75
6.6.2022	26	59
7.6.2022	24	76
8.6.2022	22	67
9.6.2022	20	77
10.6.2022	24	63
11.6.2022	25	65
12.6.2022	25	70
13.6.2022	26	70
14.6.2022	25	60
15.6.2022	24	68
16.6.2022	25	71
17.6.2022	27	57
18.6.2022	25	64
19.6.2022	24	63
20.6.2022	25	79

6.5. Rezultati mjerenja

S obzirom na to da su mjerenja obavljena u relativno toplim i promjenjivim danima u godini očekivale su se velike temperature i velike promjene u temperaturama uzoraka. Srednja dnevna temperatura tijekom ovih 23 dana iznosila je $23,3^{\circ}\text{C}$ s najnižom temperaturom od 16°C te najvišom temperaturom od 27°C . Srednja relativna vlažnost zraka iznosila je $70,5\%$ gdje je najmanja iznosila 57% , a najveća 84% .

Prvi uređaj korišten je za mjerenje temperature na dnu i na površini uzorka procjeddnog asfalta. Na grafu (Slika 25) možemo vidjeti krivulju promjene temperature za uzorak od procjeddnog asfalta.



Slika 25: Graf promjene temperature za uzorak od procjeddnog asfalta (izvor: vlastita fotografija)

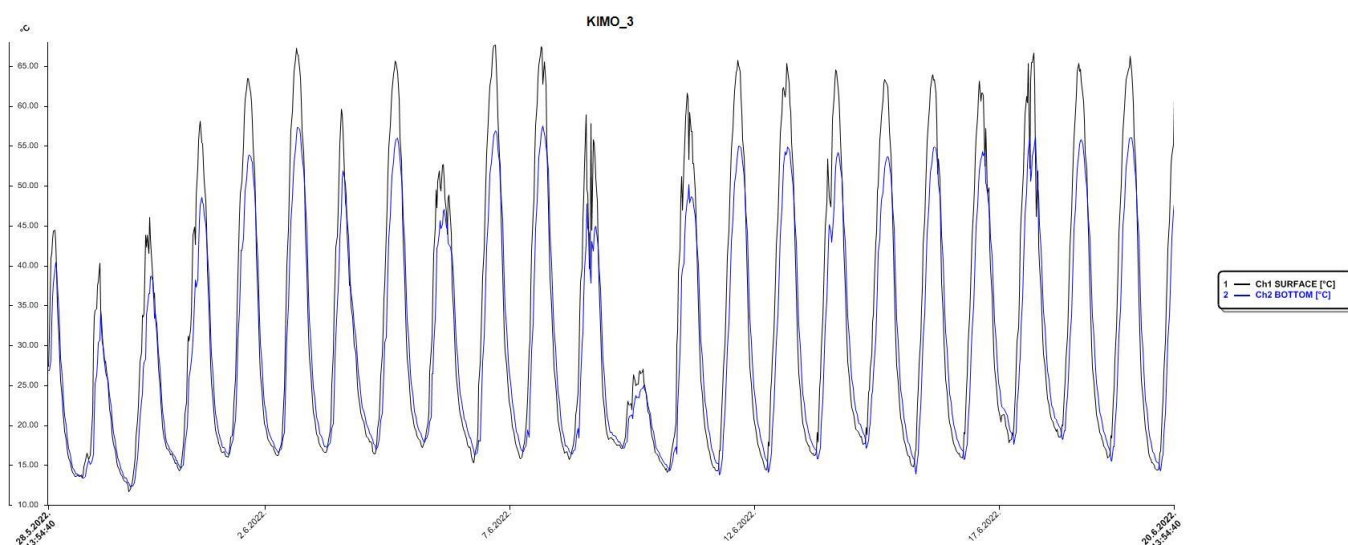
Iz grafa (Slika 25) vidi se kako su razlike u temperaturi uzorka na dnu i na površini relativno male te su se kretale od 0°C do $7,76^{\circ}\text{C}$ sa srednjom razlikom temperature od $1,7^{\circ}\text{C}$, dok su dnevne oscilacije jako velike i to čak preko 50°C u toku jednog dana. Najveća temperatura na površini uzorka procjeddnog asfalta izmjerena je 07.06.2022. u 14:53:08 sati te je ona iznosila $67,41^{\circ}\text{C}$. Najniža temperatura na površini uzorka procjeddnog asfalta iznosila je $11,83^{\circ}\text{C}$ te je izmjerena 30.05.2022. u 05:23:08 sati i taj dan je srednja vanjska temperatura bila najmanja u usporedbi s ostalim danima mjerenja. Srednja temperatura na površini

uzorka kroz cijelo ispitivanje iznosila je $32,67^{\circ}\text{C}$ te $31,96^{\circ}\text{C}$ na dnu uzorka što je razlika od $0,71^{\circ}\text{C}$ ili $2,17\%$.

Najveća temperatura na dnu uzorka izmjerena je u istom intervalu kada i najveća temperature na površini (07.06.2022. u 14:53:08 sati) te je ona iznosila $63,47^{\circ}\text{C}$.

Kao što se vidi na grafu (Slika 25), primjećujemo veliku pad temperature kroz dan 09.06.2022. Razlog ovog pada temperature je kiša koja je ujedno bila i jedina kiša tijekom ovog ispitivanja. Najviša temperature 09.06.2022. iznosila je $27,37^{\circ}\text{C}$ na površini i $26,32^{\circ}\text{C}$ na dnu uzorka dok su najniže temperature uzoraka taj dan iznosile $16,87^{\circ}\text{C}$ na površini i $16,85^{\circ}\text{C}$ na dnu uzorka.

Drugi uređaj korišten je za mjerenje temperature na površini i dnu uzorka od običnog asfalta. Na slici vidimo promjene temperature za uzorak od običnog asfalta (Slika 26)



Slika 26: Graf promjene temperature za uzorak od običnog asfalta (izvor: vlastita fotografija)

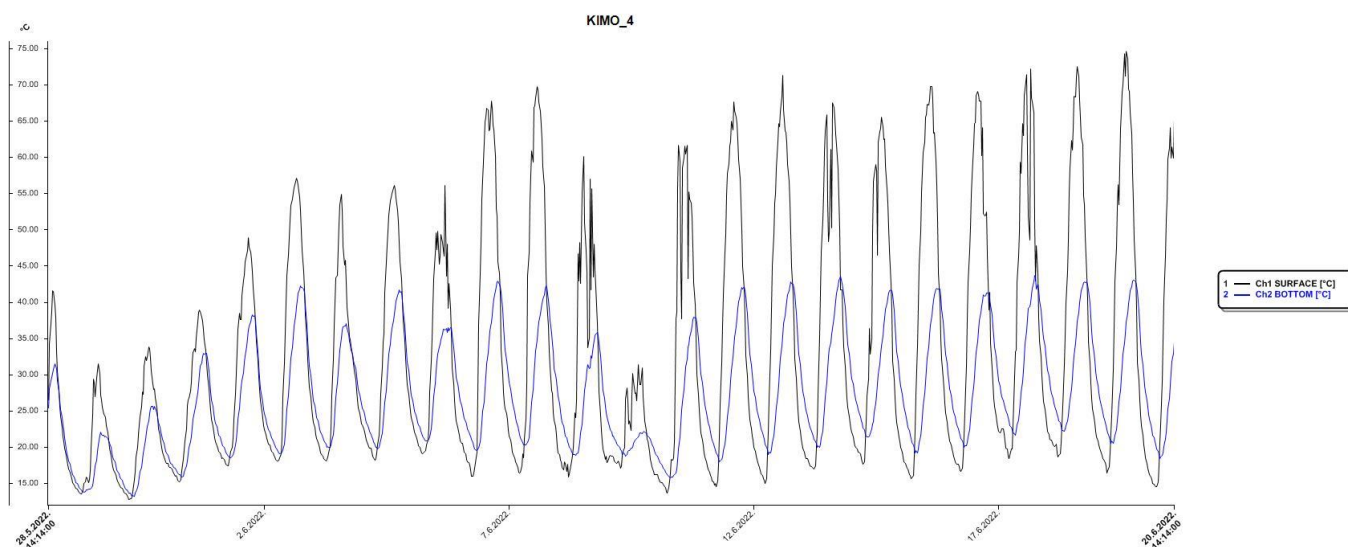
Kod uzorka od običnog asfalta najveća temperatura izmjerena je 06.06.2022. u 16:54:40 sati i to od $67,66^{\circ}\text{C}$ na površini, a na dnu je izmjerena 07.06.2022. te je iznosila $57,59^{\circ}\text{C}$. Razlike u temperature površine i dna uzorka kretale su se od 0°C do $19,96^{\circ}\text{C}$ sa srednjom razlikom od $4,9^{\circ}\text{C}$. Dnevne razlike najvećih i najmanjih temperatura na površini dosezale su čak i do 56°C , dok su na dnu uzorka bile nešto manje ali još uvijek vrlo visoke i to do 45°C . Najniža temperatura na površini uzorka izmjerena je kao i kod procjednog asfalta, 30.05.2022. u 5:24:40 sati od $11,67^{\circ}\text{C}$, a na dnu isti dan pola sata kasnije u 5:54:40 sati u iznosu od $12,29^{\circ}\text{C}$.

Srednja temperatura na površini uzorka kroz cijelo ispitivanje iznosila je $32,83^{\circ}\text{C}$ te $30,27^{\circ}\text{C}$ na dnu uzorka što je razlika od $2,56^{\circ}\text{C}$ ili $7,77\%$.

Opet se zbog kiše 09.06.2022. javio veliki pad temperature na grafu (Slika 26). Najviše temperature taj dan na površini iznosile su $26,87^{\circ}\text{C}$ i $25,06^{\circ}\text{C}$ na dnu uzorka, a najniže su iznosile $16,50^{\circ}\text{C}$ na površini i $17,10^{\circ}\text{C}$ na dnu uzorka.

Razlike u najvišim temperaturama uzoraka procjednog i običnog asfalta su malene te one iznose $0,25^{\circ}\text{C}$ na površini i $5,88^{\circ}\text{C}$ na dnu. Isto vrijedi i za najniže temperature gdje su razlike $0,18^{\circ}\text{C}$ na površini i $0,3^{\circ}\text{C}$ na dnu uzoraka.

Treći uređaj korišten je za mjerenje temperature dna i površine uzorka od običnog betona te je graf prikazan na slici (Slika 27):

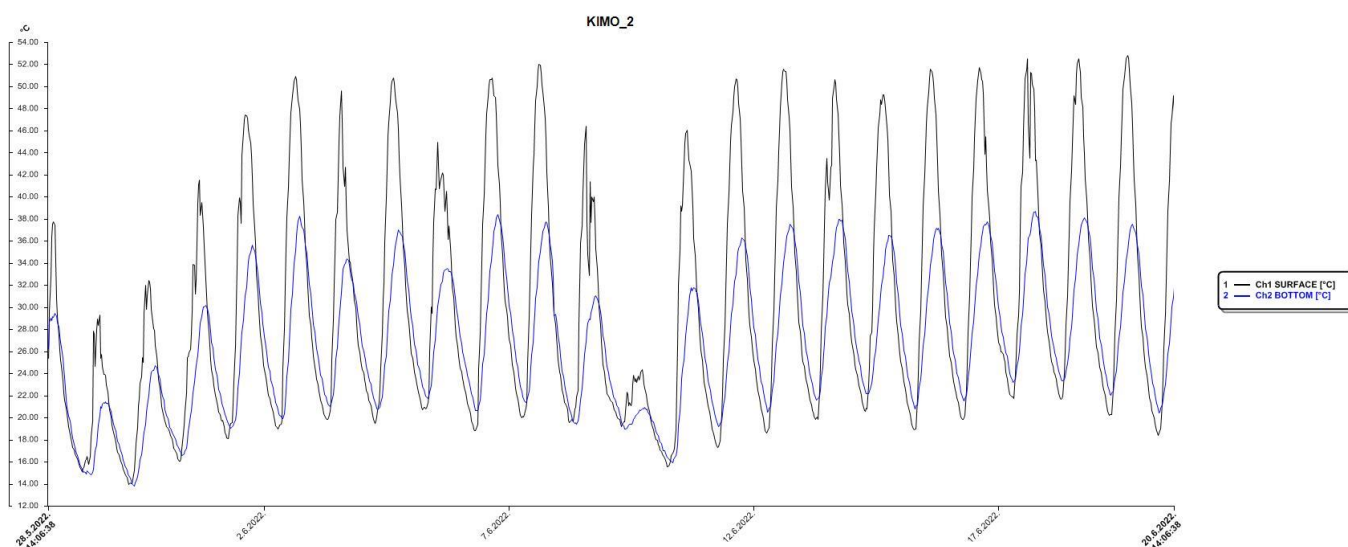


Slika 27: Graf promjene temperature za uzorak od običnog betona (izvor: vlastita fotografija)

Kod uzorka od običnog betona najveća temperatura izmjerena je 19.06.2022. u 14:44:00 sati i to od $74,66^{\circ}\text{C}$ na površini, a na dnu je izmjerena 17.06.2022. te je iznosila $43,74^{\circ}\text{C}$. Razlike u temperature površine i dna uzorka kretale su se od $0,04^{\circ}\text{C}$ pa sve do $41,89^{\circ}\text{C}$ sa srednjom razlikom od $10,30^{\circ}\text{C}$. Najniža temperatura na površini uzorka izmjerena je 30.05.2022. u 5:44:00 sati od $12,73^{\circ}\text{C}$, a na dnu isti dan sat i pol kasnije u 7:14:00 sati od $13,18^{\circ}\text{C}$. Srednja temperatura na površini uzorka kroz cijelo ispitivanje iznosila je $33,26^{\circ}\text{C}$ te $27,30^{\circ}\text{C}$ na dnu uzorka što je razlika od $5,96^{\circ}\text{C}$ ili $17,92\%$.

Opet se zbog kiše 09.06.2022. javio veliki pad temperature na grafu (Slika 27). Najviše temperature taj dan na površini iznosile su 31,45°C i 24,15°C na dnu uzorka, a najniže su iznosile 16,21°C na površini i 18,77°C na dnu uzorka.

Četvrti uređaj korišten je za mjerenje temperature dna i površine uzorka od procjdnog betona te je graf prikazan na slici (Slika 28):



Slika 28: Graf promjene temperature za uzorak od procjdnog betona (izvor: vlastita fotografija)

Kod uzorka od procjdnog betona najveća temperatura izmjerena je 19.06.2022. (isti dan kao o kod običnog betona i 32 minute kasnije) u 15:06:38 sati i to od 52,87°C na površini, a na dnu je izmjerena 14.06.2022. te je iznosila 38,73°C. Razlike u temperature površine i dna uzorka kretale su se od 0°C do 19,50°C sa srednjom razlikom od 5,50°C. Najniža temperatura na površini uzorka opet je izmjerena kao i kod običnog betona 30.05.2022. u 5:36:38 sati od 13,98°C, a na dnu isti dan dva i pol sata kasnije u 8:06:38 sati od 13,85°C. Srednja temperatura na površini uzorka kroz cijelo ispitivanje iznosila je 30,19°C te 26,71°C na dnu uzorka što je razlika od 3,48°C ili 11,53%.

Opet se zbog kiše 09.06.2022. javio veliki pad temperature na grafu (Slika 28). Najviše temperature taj dan na površini iznosile su 24,40°C i 24,63°C na dnu uzorka, a najniže su iznosile 18,27°C na površini i 19,00°C na dnu uzorka.

Razlike u najvišim temperaturama uzoraka procjednog i običnog betona velike su te one iznose 21,79°C na površini i 5,01°C na dnu, dok su najniže temperaturne razlike malene te one iznose 1,25°C na površini i 0,67°C na dnu uzoraka.

Osnovne temperature kod mjerenja uzoraka biti će prikazane u tablici (Tablica 11):

Tablica 11: Osnovne temperature uzoraka na površini i dnu (izvor: vlastiti prikaz)

Uzorak	Maksimalna temperatura na površini [°C]	Minimalna temperatura na površini [°C]	Maksimalna temperature na dnu [°C]	Minimalna temperature na dnu [°C]	Srednja temperatura na površini [°C]	Srednja temperatura na dnu [°C]
Porozni asfalt	67,41	11,83	63,47	11,99	32,67	31,96
Obični asfalt	67,66	11,67	57,59	12,29	32,83	30,27
Obični beton	74,66	12,73	43,74	13,18	33,26	27,30
Procjedni beton	52,87	13,98	38,73	13,85	30,19	26,71

7. Zaključak

Za potrebe ispitivanja toplinskih svojstava uzoraka procjedinog betona, običnog betona, poroznog asfalta i običnog asfalta mjerene su temperature na površini i na dnu svakog od 4 uzorka. mjerenje je trajalo 23 dana s intervalima mjerenja svakih 30 minuta. Glavni cilj ovog ispitivanja bilo je dokazivanje hoće li veći udio krupnozrnatog agregata, to jest manji udio pijeska u procjedinom betonu utjecati na njegovu temperaturu u toplim mjesecima.

Istraživanjima je već dokazano kako će temperatura u toplijim mjesecima biti znatno veća kod običnog betona nego kod procjedinog betona izloženog istim vremenskim uvjetima, stoga je ishod ovog ispitivanja bio relativno predvidljiv. Temperaturne razlike uzoraka od procjedinog i običnog betona dosežu čak preko 20°C u istom danu s minimalnom razlikom u vremenu (samo 32 minute). To nam govori kako manji udio sitnozrnatog materijala u procjedinom betonu utječe na efekt hlađenja te se smanjuje efekt urbanih otoka i nepotrebno dodatno zagrijavanje atmosfere i urbanih područja u kojima živimo.

Međutim, kod poroznog i običnog asfalta ne uočavamo znatnu razliku u temperaturama uzoraka. Maksimalne temperature na površini su neznatne, dok je maksimalna izmjerena temperatura na dnu čak i veća kod poroznog asfalta nego kod običnog asfalta (Tablica 11). Mogući razlog ovakvih rezultata mjerenja kod asfaltnih uzoraka u usporedbi s betonskim uzorcima može biti njegova boja (asfaltnih uzorci su crni, a betonski su puno svjetlije boje). S time kako su asfaltni uzorci samo preuzeti iz laboratorija za prometnice na Građevinskom fakultetu u Rijeci, ne znamo točne podatke količina materijala korištenih u samoj izradi uzoraka, nailazimo na jednu od više mogućih metodoloških grešaka koja nam može biti smjernica za mjerenja u budućnosti.

8. LITERATURA

- [1]. Brnas, I., Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona, diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2016., <https://repozitorij.gradst.unist.hr/islandora/object/gradst%3A377> (pristup: 21.04.2022.)
- [2]. <https://www.giatecscientific.com/> (pristup: 21.04.2022.)
- [3]. Vuljanić, D., Analiza svojstava procjednog betona s polimernim vlaknima, diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet Rijeka, 2017., <https://docs.google.com/document/d/0B3JmhfYIWO1zVkNBRXpLWmdMSk5IREZUYnNQMHZoU3NwUVU0/edit?resourcekey=0-VVd39yZXmse5vOojWtrIPA#> (pristup: 21.04.2022.)
- [4]. Katalinić, D., Stošić, M., Viduka, I., Vučinović, I., Zec, M., procjedni beton, seminarski rad, Sveučilište u Rijeci, Diplomski sveučilišni studij Građevinarstva, 2021., https://drive.google.com/file/d/1ia2updMpGsu_nsMyBYzskb3El8UwGyfQ/view (pristup: 21.04.2022.)
- [5]. Mahalingam, R., Vaithiyalingam Mahalingam, S., Analiza svojstava procjednog betona, Građevinar 68 (2016) 6, 2016., <https://hrcak.srce.hr/clanak/238523> (pristup: 21.04.2022.)
- [6]. <https://www.perviouspavement.org/materials.html> (pristup: 30.04.2022.)
- [7]. Mrakovčić, S., Čeh, N., Jugova, V., Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjednog betona, Građevinar 66 (2014) 2, 2014., <https://hrcak.srce.hr/clanak/173011> (pristup: 30.04.2022.)
- [8]. Sriravindrarah, R., Wang, N.D.H. & Ervin, L.J.W. Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete. *Int J Concr Struct Mater* **6**, 239–246 (2012), <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0024-x> (pristup: 30.04.2022.)
- [9]. S., R., O., Aletba, N., A., Hassan, R., P., Jaya, E., Aminudin, M., Z., H., Mahmud, A., Mohamed, A., A., Hussein, Thermal performance of cooling strategies for asphalt pavement, 2021., <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756421000404> (pristup: 30.04.2022.)
- [10]. Somayeh, N., Nantasai, B., Washington State University, Thermal Conductivity of Pervious Concrete for Various Porosities, 2017., https://www.researchgate.net/publication/313590420_Thermal_Conductivity_of_Pervious_Concrete_for_Various_Porosities (pristup: 30.04.2022.)

- [11]. <https://www.corrosionpedia.com/definition/5226/solar-reflective-index-sri> (30.04.2022.)
- [12]. G., Cristian, M., Armando, M., Luis, M., Farei, California State University USA, Effect of recycled materials and compaction methods on the mechanical properties and solar reflectance index of pervious concrete, 2015., https://www.researchgate.net/publication/290453321_Effect_of_recycled_materials_and_compaction_methods_on_the_mechanical_properties_and_solar_reflectance_index_of_pervious_concrete (pristup: 25.04.2022.)
- [13]. <https://vaasphalt.org/pavement-guide/porous-asphalt-pavements/> (pristup: 04.05.2022.)
- [14]. Heather, L. Dylla, Ph.D., Kent, R. Hansen, Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs, 2015., <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/pubs/hif15009.pdf> (pristup: 25.05.2022.)
- [15]. A., Hassn, M., Aboufoul, Y., Wu, A., Dawson, A., Garcia, Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures, 2016., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816304081> (pristup: 25.05.2022.)
- [16]. G., Lei, W., Zhang, X., Jianguang, Y., Liu, S., Jia, Simulation of the Cooling Effect of Porous Asphalt Pavement with Different Air Voids, 2019., <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/18/3659> (pristup: 25.05.2022.)
- [17]. Concrete Construction, <https://www.concreteconstruction.net/> (pristup: 04.04.2022.)
- [18]. Kolekcija slika Devena Bradforda, <https://www.mediastorehouse.com/europe/united-kingdom/england/devon/bradford/> (pristup: 04.04.2022.)
- [19]. Hog technologies, <https://thehog.com/> (pristup: 04.04.2022.)
- [20]. For Construction Pros, <https://www.forconstructionpros.com/> (pristup: 05.04.2022.)