

# Utjecaj vrste agregata na toplinske karakteristike betonskih i asfaltnih podloga

---

**Arlović, Ana Marija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:157:065648>

*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**

**Ana Marija Arlović**

**Utjecaj vrste agregata na toplinske karakteristike betonskih i asfaltnih  
podloga**

**Završni rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Stručni prijediplomski studij  
Građevinarstvo  
Građevinski materijali**

**Ana Marija Arlović  
JMBAG: 0114037802**

**Utjecaj vrste agregata na toplinske karakteristike betonskih i  
asfaltnih podloga**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2024.**

## **IZJAVA**

Završni rad izradila 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.

---

Ana Marija Arlović

U Rijeci, 12.9.2024.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić i komentorici dr. sc. Ivani Ban na neumornoj pomoći, strpljenju i razumijevanju tijekom izrade ovog završnog rada.

## **SAŽETAK**

**Naslov rada:** Utjecaj vrste agregata na toplinske karakteristike betonskih i asfaltnih podloga

**Student:** Ana Marija Arlović

**Mentorica:** izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

**Komentorica:** dr. sc. Ivana Ban

**Studij:** Stručni prijediplomski studij

**Kolegij:** Građevinski materijali

Tema završnog rada je usporedba svojstava asfaltnih i betonskih uzoraka, s naglaskom na njihove toplinske karakteristike, posebno na toplinsku provodljivost i poroznost uzoraka te agregata korištenih u njihovoj izradi. Tijekom izrade rada provedena su mjerenja temperature uzoraka na ispitnom polju, pri čemu su korištene sonde Kimo Kistock KTT 310 postavljene na površine uzoraka i u njihove šupljine. U radu se također istražuje utjecaj poroznosti agregata na uzorke i njihovu toplinsku provodljivost.

### **Ključne riječi:**

asfalt, beton, toplinska provodljivost, poroznost, agregat, toplinske karakteristike

## **ABSTRACT**

**Title of the Thesis:** The Influence of Aggregate Type on the Thermal Characteristics of Concrete and Asphalt Pavements

**Student:** Ana Marija Arlović

**Supervisor:** Associate Professor Dr. Silvija Mrakovčić

**Co-Supervisor:** Ivana Ban, PhD

**Study Program:** Vocational Undergraduate Study Programme in Civil Engineering

**Course:** Construction Materials

The topic of this thesis is the comparison of the properties of asphalt and concrete samples, with a focus on their thermal characteristics, particularly thermal conductivity and the porosity of the samples and aggregates used in their preparation. During the research, temperature measurements were conducted on the test field samples using Kimo Kistock KTT 310 probes, which were placed on the surface and inside the cavities of the samples. The thesis also examines the impact of aggregate porosity on the samples and their thermal conductivity.

**Keywords:**

asphalt, concrete, thermal conductivity, porosity, aggregate, thermal characteristics

## Sadržaj

<i>POPIS TABLICA</i> .....	8
<i>POPIS SLIKA</i> .....	8
<i>1. UVOD</i> .....	10
1.1. Beton s vapnenačkim i eruptivnim agregatom.....	10
1.2. Asfalt s vapnenačkim i eruptivnim agregatom .....	11
<i>2. TOPLINSKE KARAKTERISTIKE BETONSKIH I ASFALJNIH POVRŠINA</i> .....	12
2.1. Toplinska provodljivost.....	12
2.2. Specifični toplinski kapacitet.....	13
2.3. Toplinska difuznost.....	13
<i>3. EKSPERIMENTALNI DIO RADA</i> .....	15
3.1. Sijanje agregata .....	16
3.2. Određivanje fizikalnih parametara agregata.....	19
3.3. Izrada betonskih uzoraka .....	27
3.4. Izrada asfaltnih uzoraka .....	29
3.5. Ispitivanje poroznosti na uzorcima.....	31
3.6. Ispitivanje toplinskih karakteristika uzoraka .....	34
<i>4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA</i> .....	38
4.1. Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti asfaltnih I betonskih uzoraka .....	38
4.2. Usporedba rezultata ispitivanja .....	45
<i>5. ZAKLJUČAK</i> .....	46
<i>LITERATURA</i> .....	47



## POPIS TABLICA:

<i>Tablica 1: Projekt sastava za 1 m<sup>3</sup> betona (izvor: vlastiti prikaz) .....</i>	<i>15</i>
<i>Tablica 2: Projekt sastava asfalta za ukupnu masu uzoraka (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>16</i>
<i>Tablica 3: Izmjereni podaci vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz) .....</i>	<i>24</i>
<i>Tablica 4: Gustoće i volumenske mase vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>24</i>
<i>Tablica 5: Apsorbirana voda (upijanje), površinska vlažnost, vlažnost vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 6: Poroznost vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz) .....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 7: Izmjereni podaci eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz) .....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 8: Gustoće i volumenske mase eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz) .....</i>	<i>26</i>
<i>Tablica 9: Apsorbirana voda (upijanje), površinska vlažnost, vlažnost eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>26</i>
<i>Tablica 10: Poroznost eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>26</i>
<i>Tablica 11: Usvojene vrijednosti dimenzija asfaltnih uzoraka (izvor:vlastiti prikaz).....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 12: Ispitivanje poroznosti na betonskom uzorku s vapnenačkim agregatom (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>33</i>
<i>Tablica 13: Ispitivanje poroznosti na betonskom uzorku s eruptivnim agregatom (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 14: Prosječna dnevna temperatura zraka i relativna vlažnost (izvor: vlastiti prikaz)..</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 15: Najviše i najniže izmjerene temperature uzoraka (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>44</i>

## POPIS SLIKA:

<i>Slika 1: Dio deponija agregata na Građevinskom fakultetu u Rijeci (izvor: vlastita fotografija).....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2: Sušenje eruptivnog agregata frakcije 0-4 mm (izvor: vlastita fotografija) .....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 3: Laboratorijska sijačica (izvor: vlastita fotografija).....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 4: Posuda za odlaganje prosijanog agregata veličine zrna 4-8 mm (izvor: vlastita fotografija).....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 5: Vaganje prosijanog agregata na laboratorijskoj vagi (izvor: vlastita fotografija).....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 6: Piknometar ispunjen vodom do označenog nivoa (izvor: vlastita fotografija) .....</i>	<i>20</i>

Slika 7: Piknometar ispunjen materijalom i vodom (izvor: vlastita fotografija) .....	20
Slika 8: Zasićen površinski suh pijesak (izvor: vlastita fotografija).....	21
Slika 9: Vaganje potpuno suhog pijeska (izvor: vlastita fotografija) .....	22
Slika 10: Vaganje agregata na zraku (izvor: vlastita fotografija) .....	22
Slika 11: Vaganje zasićenog površinski suhog agregata (izvor: vlastita fotografija) .....	23
Slika 12: Spravljanje betonske mješavine ručnom miješalicom (izvor: vlastita fotografija) .	27
Slika 13: Ispitivanje konzistencije svježeg betona slijeganjem (izvor: vlastita fotografija) ...	28
Slika 14: Uzorci betonskih mješavina (izvor: vlastita fotografija) .....	29
Slika 15: Izvagani materijali za svaku mješavinu (izvor: vlastita fotografija) .....	30
Slika 16: Betonski uzorci zasićeni vodom (izvor: vlastita fotografija) .....	31
Slika 17: Vaganje površinski suhog betonskog uzorka (izvor: vlastita fotografija) .....	32
Slika 18: Kalupi za ispitivanje toplinskih karakteristika (izvor: vlastita fotografija).....	35
Slika 19: Uređaj za mjerenje temperature uzoraka (izvor: vlastita fotografija).....	35
Slika 20: Postavljene sonde u šupljine uzoraka (izvor: vlastita fotografija) .....	36
Slika 21: Graf promjene temperature na prvom uređaju u razdoblju najveće izmjerene (izvor: vlastiti prikaz) .....	38
Slika 22: Graf promjene temperature na prvom uređaju u razdoblju najniže izmjerene (izvor: vlastiti prikaz) .....	39
Slika 23: Graf promjene temperature na drugom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz) .....	40
Slika 24: Graf promjene temperature na trećem uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz) .....	41
Slika 25: Graf promjene temperature na četvrtom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (iz-vor: vlastiti prikaz).....	42
Slika 26: Graf promjene temperature na petom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz) .....	43
Slika 27: Graf promjene temperature na šestom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz) .....	44

# 1. UVOD

## 1.1. Beton s vapnenačkim i eruptivnim agregatom

Beton je kompozitni materijal sastavljen od veziva, vode, agregata i eventualnih dodataka. Svojstva betona ovise o svojstvima sastojaka koje koristimo za njegovo spravljanje. U kombinaciji s vodom, cement djeluje kao vezivo koje se povezuje s agregatom kroz kemijski proces hidratacije. Agregat je troma ispuna u betonskim mješavinama te zauzima 80 % njegovog volumena zbog čega je značajna vrsta agregata i njegova svojstva za spravljeni beton. Agregate za beton dijelimo na prirodne, umjetne i reciklirane, a pri ispitivanju su korišteni prirodni. [1]

Beton s vapnenačkim agregatom ima prednosti kao što su velika čvrstoća, smanjeno skupljanje betona prilikom sušenja i manju mogućnost pojave bubrenja betona. Povećavanjem udjela sitnog vapnenačkog agregata u betonskoj mješavini povećavaju se i modul elastičnosti, tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje. [2]

Eruptivni agregati povećavaju tlačnu čvrstoću betona zbog svoje velike čvrstoće, gustoće i otpornost na habanje što je idealno za prometne površine. Imaju veću toplinsku provodljivost i toplinsku stabilnost od vapnenačkih agregata. Beton s eruptivnim agregatom ima veliku otpornost na visoke temperature i mogućnost bržeg prenošenja topline. [3]

## 1.2. Asfalt s vapnenačkim i eruptivnim agregatom

Asfalt je smjesa bitumena i mineralnih tvari koji postupnim zagrijavanjem postane ljepljiv i mekan. Asfaltnu mješavinu izrađujemo u asfaltnoj bazi tako da odabrani agregat sušimo, prosijavamo, te ga zagrijavamo zajedno sa bitumenom i nakon toga miješamo. [4] Molekule asfalta se sastoje od slabih kemijskih veza na čiju promjenu utječe i temperatura mješavina i agregata. [5] Također su i mehanička svojstva kao što su modul elastičnosti, modul krutosti i viskoznost ovisni o temperaturi, a to dokazuju i brojna ispitivanja koja pokazuju da prilikom nižih temperatura asfaltu se smanjuje modul elastičnosti što ima tendenciju ranijeg pucanja. [6] Toplinska svojstva asfalta imaju značajan učinak na distribuciju temperature u kolniku. [5]

Pri izgradnji prometnih površina u asfaltnoj mješavini vapnenac se rijetko koristi zbog slabije mehaničke otpornosti i gustoće. [6] No, vapnenački agregat je dobro povezan s asfaltnom mješavinom zbog svojih velikih pora, dok se agregati s manjim porama teže povezuju s bitumenom. Toplinska provodljivost asfaltne mješavine s eruptivnim agregatima je veća u odnosu na toplinsku provodljivost asfaltne mješavine s vapnenačkim agregatom, što dokazuju brojna ispitivanja. [7]

Asfalt s eruptivnim agregatom ima veću trajnost i otpornost na habanje u odnosu na onaj sa vapnenačkim agregatom. Eruptivni agregati imaju visoku toplinsku provodljivost i u kombinaciji s asfaltom je ona dobra. Također, imaju veći toplinski kapacitet što asfaltu omogućava apsorbiranje veće količine topline. [8]

## 2. TOPLINSKE KARAKTERISTIKE BETONSKIH I ASFALTNIH POVRŠINA

Toplinske karakteristike materijala, poput toplinske provodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske difuzivnosti materijala, ključni su za funkcioniranje betonskih i asfaltnih površina bez oštećenja u kritičnim uvjetima.

Toplinska provodljivost je sposobnost materijala da provodi toplinu, a specifični toplinski kapacitet određuje kolika je količina topline potrebna za povećanje temperature materijala. Toplinska difuzivnost karakterizira koliko brzo toplina prolazi kroz materijal, a ova tri parametra ključna su za donošenje zaključaka o ponašanju betona i asfalta pod termičkim opterećenjem. [9]

### 2.1. Toplinska provodljivost

Toplinska provodljivost je najbitnija veličina za određivanje prijenosa topline, a definira se kao količina topline koja u jedinici vremena prođe kroz materijal. [10]

Toplinsku provodljivost materijala možemo odrediti preko brzine protoka topline  $Q$ . Njega izražavamo formulom [9]:

$$Q = \lambda \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (J) \quad (1)$$

Gdje je:

$Q$  – brzina protoka topline (J)

$\lambda$  – toplinska provodljivost (W/mK)

$A$  – područje kojim prolazi toplina (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  – temperaturna razlika (K)

$\Delta x$  – debljina materijala (m)

Toplinsku provodljivost izražavamo kao:

$$\lambda = \frac{Q \times \Delta x}{\Delta T \times A} \quad (\text{W/mK}) \quad (2)$$

Gdje je:

$\lambda$  – toplinska provodljivost (W/mK)

A – područje kojim prolazi toplina (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  – temperaturna razlika (K)

$\Delta x$  – debljina materijala (m)

Q – brzina protoka topline (J)

## 2.2. Specifični toplinski kapacitet

Toplinski kapacitet je definiran kao količina topline Q koju neko tijelo može primiti da bi mu se temperatura povećala za jedan stupanj. Da bi dobili karakterističnu vrijednost za određeni materijal, definiramo specifični toplinski kapacitet c. Takav kapacitet je količina topline Q koja je potrebna da se jediničnoj masi materijala povisi temperatura za jedan stupanj. Njega izražavamo formulom [10]:

$$c = \frac{1}{m} \times \frac{Q}{\Delta T} \quad (\text{J/K kg}) \quad (3)$$

Gdje je:

Q – količina topline (J)

m – masa materijala (kg)

c – specifični toplinski kapacitet (J/Kkg)

$\Delta T$  – temperaturna razlika (K)

## 2.3. Toplinska difuznost

Toplinska difuznost se definira kao brzina promjene temperature u nekom materijalu. Ovisi o gustoći materijala  $\rho$ , specifičnom toplinskom kapacitetu c i o koeficijentu toplinske

provodljivosti  $\lambda$ . Što je toplinska difuznost materijala veća, veća je i toplinska provodljivost materijala. Toplinsku difuznost  $a$  izražavamo formulom [9]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times c} \quad (\text{m}^2\text{s}^{-1}) \quad (4)$$

Gdje je:

$a$  – toplinska difuznost materijala ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )

$\lambda$  – toplinska provodljivost materijala ( $\text{W/mK}$ )

$\rho$  – gustoća materijala ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$  – Specifični toplinski kapacitet materijala ( $\text{J/kgK}$ )

Asfaltne mješavine s visokom poroznosti imaju nisku toplinsku provodljivost i manji specifični toplinski kapacitet od asfaltnih mješavina čija je poroznost manja. Mješavine s manjom poroznosti, ne samo što imaju visoku toplinsku provodljivost i specifični kapacitet, također se sporije zagrijavaju i hlade zbog svoje gustoće usporedno s asfaltnih mješavinama visoke poroznosti [11].

Betonskim mješavinama, jednako kao i asfaltnim, povećanjem poroznosti uzorci imaju manju toplinsku provodljivost [12].

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Eksperimentalnim dijelom rada ispitana je poroznost i toplinska provodljivost na četiri različite mješavine:

- asfaltna mješavina s eruptivnim agregatom
- asfaltna mješavina s vapnenačkim agregatom
- betonska mješavina s eruptivnim agregatom
- betonska mješavina s vapnenačkim agregatom

Za potrebe ispitivanja željenih parametara izrađene su betonske mješavine u Laboratoriju za materijale, te asfaltna mješavine u Laboratoriju za prometnice na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Za izradu betonskih mješavina koristio se cement CEM 42,5 N, voda, pijesak 0/4 mm, te krupni agregat 4/11 mm. Asfaltna mješavine su izrađivane od bitumena, punila, te sitnog i krupnog agregata istih frakcija kao i kod betonskih mješavina.

U Tablici 1. su prikazan je potreban materijal za 1 m<sup>3</sup> betonske mješavine, dok je u Tablici 2. prikazan projektni sastav asfaltnih mješavina.

*Tablica 1: Projekt sastava za 1 m<sup>3</sup> betona (izvor: vlastiti prikaz)*

<i>Uzorci</i>	<i>cement (kg)</i>	<i>voda (kg)</i>	<i>0-2 mm (kg)</i>	<i>2-4 mm (kg)</i>	<i>4-8 mm (kg)</i>	<i>8-11mm (kg)</i>
<i>Betonska mješavina s vapnenačkim agregatom</i>	<i>372,73</i>	<i>205</i>	<i>171,23</i>	<i>171,23</i>	<i>256,84</i>	<i>1112,98</i>
<i>Betonska mješavina s eruptivnim agregatom</i>	<i>372,73</i>	<i>205</i>	<i>177,07</i>	<i>177,07</i>	<i>265,60</i>	<i>1150,92</i>



Tablica 2: Projekt sastava asfalta za ukupnu masu uzoraka (izvor: vlastiti prikaz)

<i>Uzorci</i>	<i>Bitumen (g)</i>	<i>punilo (g)</i>	<i>0-2 mm (g)</i>	<i>2-4 mm (g)</i>	<i>4-8 mm (g)</i>	<i>8-11mm (g)</i>
<i>Asfaltna mješavina s vapnenačkim agregatom</i>	<i>40,70</i>	<i>10,60</i>	<i>89,90</i>	<i>106,10</i>	<i>145,90</i>	<i>706,90</i>
<i>Asfaltna mješavina s eruptivnim agregatom</i>	<i>40,7</i>	<i>10,60</i>	<i>89,90</i>	<i>106,10</i>	<i>145,90</i>	<i>706,90</i>

### 3.1. Sijanje agregata

Za izradu betonskih i asfaltnih mješavina korišteni su vapnenac i andezit. Kako bi se dobile potrebne frakcije za izradu uzoraka, agregati su prethodno morali biti potpuno suhi kako bi se omogućilo njihovo prosijavanje do željenih frakcija (Slika 1).



Slika 1: Dio deponija agregata na Građevinskom fakultetu u Rijeci (izvor: vlastita fotografija)

Agregati finijih frakcija, zbog tada promjenjivih vremenskih uvjeta, bili su zasićeni vodom, te ih je, prije postupka sisanja, bilo potrebno osušiti. Dio agregata namijenjenog za sisanje sušen je u laboratorijskoj sušionici, dok je preostali dio sušen na zraku (Slika 2).



Slika 2: Sušenje eruptivnog agregata frakcije 0-4 mm (izvor: vlastita fotografija)

Sisanje je provedeno s pomoću laboratorijske sijačice (Slika 3). Za sisanje agregata do željenih frakcija, korištena su sita otvora 2 mm, 4 mm, 8 mm i 11,20 mm. Ostatak na sitima otvora 2 mm, 4 mm i 8 mm korišten je kao frakcija 2/4 mm, 4/8 mm i 8/11,20 mm.



Slika 3: Laboratorijska sijačica (izvor: vlastita fotografija)

Sijanje agregata trajalo je osam minuta, a nakon svakog sijanja, ostaci na situ su odvojeni u različite posude namijenjene za svaku potrebnu frakciju (Slika 4).



Slika 4: Posuda za odlaganje prosijanog agregata veličine zrna 4-8 mm (izvor: vlastita fotografija)

Nakon odlaganja u posude, iste te frakcije izvagane su na preciznoj laboratorijskoj vagi ORMA (Slika 5), kako bi dobili potrebne mase frakcija agregata za izradu betonskih i asfaltnih mješavina koje su prikazane u Tablici 1 i Tablici 2.



Slika 5: Vaganje prosijanog agregata na laboratorijskoj vagi (izvor: vlastita fotografija)

### **3.2. Određivanje fizikalnih parametara agregata**

Za ispitivanje različitih utjecaja vapnenačkog i eruptivnog agregata na betonske i asfaltne uzorke, potrebno je odrediti fizikalne parametre agregata kao što su gustoća, volumenska masa, vlažnost i poroznost. Prije provedbe postupka određivanja fizikalni parametara, agregati su bili potopljeni 24 sata kako bi bili zasićeni vodom.

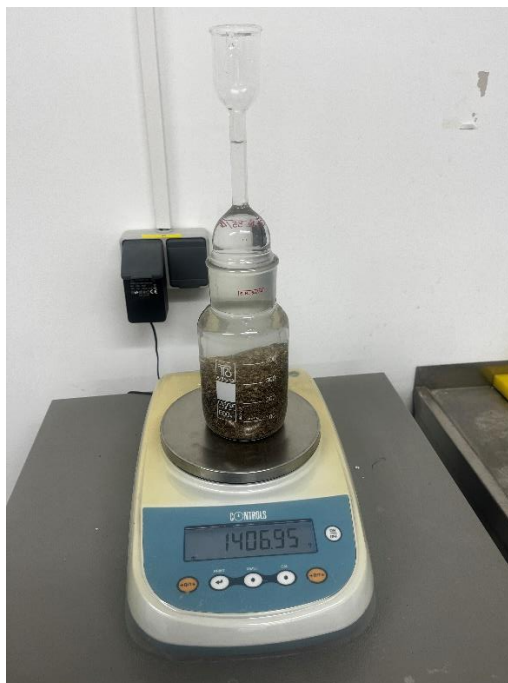
Prvo se provodilo ispitivanje vodoupojnosti na sitnom vapnenačkom agregatu veličine zrna 0/4 mm. Najprije se izvaže piknometar ispunjen vodom do označenog nivoa (Slika 6), zatim se izlije voda i pijesak se lopaticom prebaci u piknometar.





Slika 6: Piknometar ispunjen vodom do označenog nivoa (izvor: vlastita fotografija)

Nakon što se pijesak prebaci u piknometar, voda se dolije do označenog nivoa, piknometar se obriše i važe kako bi dobili masu piknometar + materijal + voda (Slika 7).



Slika 7: Píknometar ispunjen materijalom i vodom (izvor: vlastita fotografija)

Pijesak se izvadi iz piknometra, izlijemo svu vodu i važe se vlažan pijesak. Masa zasićenog površinski suhog pijeska određuje se postupkom površinskog sušenja. Kako bi se procijenilo je li pijesak površinski suh, kalup u obliku krnjeg stošca postavljen na čistu podlogu napuni se pijeskom, koji se zatim nabije s 25 udaraca pomoću šipke. Ukoliko pijesak nakon prvog sušenja zadrži oblik krnjeg stošca, to ukazuje da nije zasićen površinski suh, te je potrebno ponoviti postupak sušenja (Slika 8).



Slika 8: Zasićen površinski suh pijesak (izvor: vlastita fotografija)

Zasićen površinski suh pijesak izvagan je prije sušenja do konstante mase. Pijesak se smatra potpuno suhim kada masa u tri uzastopna vaganja ostane nepromijenjena ili s odstupanjem manjim od 0,1 % (Slika 9).



Slika 9: Vaganje potpuno suhog pijeska (izvor: vlastita fotografija)

Ispitivanje fizikalnih parametara za sitni eruptivni agregat se na isti način izvodio kao i za vapnenački. Krupni agregati veličine zrna 4/11 mm također su bili potopljani u vodi 24 sata prije ispitivanja vodoupojnosti. Za određivanje fizikalnih svojstava krupnog agregata, materijal je najprije ocijeđen kroz mrežastu košaru za vaganje pod vodom, a zatim izvagan na zraku (Slika 10).



Slika 10: Vaganje agregata na zraku (izvor: vlastita fotografija)

Površinsku vlažnost agregata bilo je potrebno odstraniti krpom, nakon čega je tako površinski suh agregat ponovno izvagan na zraku. Prije vaganja agregata pod vodom, potrebno je bilo izvršiti tarirnje mrežaste košare pod vodom (Slika 11).



Slika 11: Vaganje zasićenog površinski suhog agregata (izvor: vlastita fotografija)

Kako bi se utvrdila masa potpuno suhog agregata, isti se suši do postizanja konstantne mase. Smatra se da je agregat potpuno suh kada u dva uzastopna vaganja tijekom sušenja ima jednaku masu. Proces sušenja trajao je 45 minuta, sve dok agregat nije bio potpuno suh.

Rezultati ispitivanja fizikalnih parametara vapnenačkog agregata su prikazani u Tablici 3., Tablici 4., Tablici 5. i Tablici 6., dok su rezultati ispitivanja eruptivnog agregata prikazani u Tablici 7., Tablici 8., Tablici 9. i Tablici 10.



Tablica 3: Izmjereni podaci vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO			MATERIJAL		
			krupni agregat	pijesak	
masa vlažnog materijala	$m_{wv}$	g	1400,70	494,48	
masa materijala zasićenog površinski suhog	- vaganog na zraku	$m_z$	g	1376,48	409,25
	- vaganog pod vodom	$m_{zw}$	g	852,62	-
masa suhog materijala	$m_d$	g	1357,74	399,87	
masa piknometra ispunjenog vodom	$m_{bw}$	g	-	1149,54	
masa materijala + piknometra + vode	$m$	g	-	1406,95	

Tablica 4: Gustoće i volumenske mase vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO		FORMULA	JEDINI CA	MATERIJAL		
				krupni agregat	formule	pijesak
gustoća	$\rho_0$	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_d - m_{zw}}$	g/cm <sup>3</sup>	2,69	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_{bw} - m + m_d}$	2,81
volumenska masa	suhog materijala	$\rho_{z(d)}$	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_z - m_{zw}}$	g/cm <sup>3</sup>	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_{bw} - m + m_z}$	2,63
	zasićenog površinski suhog	$\rho_{z(ZPS)}$	$\frac{m_z \cdot \rho_w}{m_z - m_{zw}}$	g/cm <sup>3</sup>	$\frac{m_z \cdot \rho_w}{m_{bw} - m + m_z}$	2,70

Tablica 5: Apsorbirana voda, površinska vlažnost, vlažnost vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO		FORMULE	MATERIJAL	
			KRUPNI AGREGAT	PIJESAK
APSORBIRANA VODA $A_w$	(% m)	$\frac{m_z - m_d}{m_d} \cdot 100$	1,38	2,35
	(% vol.)	$\frac{(m_z - m_d) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	3,71	6,59
POVRŠINSKA VLAŽNOST $A_s$	(% m)	$\frac{m_{wv} - m_z}{m_d} \cdot 100$	1,78	21,31
	(% vol.)	$\frac{(m_{wv} - m_z) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	4,80	59,89
VLAŽNOST $W$	(% m)	$\frac{m_{wv} - m_d}{m_d} \cdot 100$	3,16	23,66
	(% vol.)	$\frac{(m_{wv} - m_d) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	8,51	66,49

Tablica 6: Poroznost vapnenačkog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO	FORMULA		MATERIJAL	
			KRUPNI AGREGAT	PIJESAK
poroznost	$\frac{\rho_0 - \rho_{z(d)}}{\rho_0} \cdot 100$	%	3,72	6,41

Tablica 7: Izmjereni podaci eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO				MATERIJAL	
				krupni agregat	pijesak
masa vlažnog materijala	$m_{wv}$	g	1023,68	467,31	
masa materijala zasićenog površinski suhog	- vaganog na zraku	$m_z$	g	989,24	404,43
	- vaganog pod vodom	$m_{zw}$	g	619,10	-
masa suhog materijala	$m_d$	g	928,95	397,28	
masa piknometra ispunjenog vodom	$m_{bw}$	g	-	1149,71	
masa materijala + piknometra + vode	$m$	g	-	1405,14	

Tablica 8: Gustoće i volumenske mase eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO	FORMULE		JEDINIC A	MATERIJAL			
				krupni agregat	formule	pijesak	
gustoća	$\rho_0$	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_d - m_{zw}}$	g/cm <sup>3</sup>	3,00	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_{bw} - m + m_d}$	2,80	
volumenska masa	suhog materijala	$\rho_{z(d)}$	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_z - m_{zw}}$	g/cm <sup>3</sup>	2,51	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_{bw} - m + m_z}$	2,67
	zasićenog površinski suhog	$\rho_{z(ZPS)}$	$\frac{m_z \cdot \rho_w}{m_z - m_{zw}}$	g/cm <sup>3</sup>	2,67	$\frac{m_z \cdot \rho_w}{m_{bw} - m + m_z}$	2,71

Tablica 9: Apsorbirana voda (upijanje), površinska vlažnost, vlažnost eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO	FORMULE	MATERIJAL		
		KRUPNI AGREGAT	PIJESAK	
APSORBIRANA VODA $A_w$	(% m)	$\frac{m_z - m_d}{m_d} \cdot 100$	6,49	1,80
	(% vol.)	$\frac{(m_z - m_d) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	19,47	5,04
POVRŠINSKA VLAŽNOST $A_s$	(% m)	$\frac{m_{wv} - m_z}{m_d} \cdot 100$	3,71	15,83
	(% vol.)	$\frac{(m_{wv} - m_z) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	11,12	44,32
VLAŽNOST $W$	(% m)	$\frac{m_{wv} - m_d}{m_d} \cdot 100$	10,20	17,63
	(% vol.)	$\frac{(m_{wv} - m_d) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	30,59	49,36

Tablica 10: Poroznost eruptivnog agregata (izvor: vlastiti prikaz)

SVOJSTVO	FORMULA		MATERIJAL	
			KRUPNI AGREGAT	PIJESAK
poroznost	$\frac{\rho_0 - \rho_{z(d)}}{\rho_0} \cdot 100$	%	16,33	4,64

Dobivene vrijednosti gustoće i poroznosti krupnog eruptivnog agregata su neobične.

### 3.3. Izrada betonskih uzoraka

Betonske mješavine pripravljene su u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Pripremljene su dvije vrste mješavina – jedna s eruptivnim, a druga s vapnenačkim agregatom. Za izradu mješavina se korišteni su ručna miješalica, posuda za miješanje, agregat, voda i cement. Projektni sastav betonskih mješavina za 1 m<sup>3</sup> prikazan je u Tablici 1.

Postupak pripreme betonske mješavine započeo je miješanjem suhih materijala, cementa i agregata, u trajanju od 1 minute. Uz kontinuirano miješanje pomoću ručne miješalice, postupno je dodavana voda (Slika 12).



Slika 12: Spravljanje betonske mješavine ručnom miješalicom (izvor: vlastita fotografija)

Nakon miješanja koje je trajalo 3 minute, provedeno je ispitivanje konzistencije svježeg betona metodom slijeganja prema normi HRN EN 12350-2. U tu svrhu korišten je Abramsov konus visine 300 mm, zajedno s metalnom šipkom i baznom pločom. Prije

početka ispitivanja, konus i bazna ploča navlaženi su vodom kako bi se osigurala izvedba ispitivanja konzistencije svježeg betona. Konus se pričvrsti na baznu ploču te se puni svježim betonom u 3 sloja, pri čemu se svaki sloj nabija s 25 udaraca metalnom šipkom. Nakon zbijanja zadnjeg sloja, višak betona se uklonio ravnjačom, a konus se podiže vertikalno, bez lateralnih pomaka, kako bi se spriječilo narušavanje strukture uzorka (Slika 13).



Slika 13: Ispitivanje konzistencije svježeg betona slijeganjem (izvor: vlastita fotografija)

Razlika u slijeganju kod betonske mješavine s vapnenačkim agregatom,  $\Delta h$ , iznosila je 35 mm, dok je kod mješavine s eruptivnim agregatom iznosila 30 mm.

Za potrebe izrađivanja betonskih uzoraka korištena su 3 cilindrična kalupa dimenzija  $\phi$  10 cm h 20 cm i 3 kalupa u obliku kocke dimenzija 10 x 10 x 10 cm za svaku mješavinu (Slika 14).



Slika 14: Uzorci betonskih mješavina (izvor: vlastita fotografija)

Uzorci ugrađeni u kalup su ostavljeni da očvrstnu 24 sata, te su sutradan raskalupljeni. Potom su uzorci oblika valjka piljeni na dva jednaka dijela, jer su za rad bili potrebni uzorci dimenzija  $\phi$  10 cm h 10 cm.

### 3.4. Izrada asfaltnih uzoraka

Asfaltne mješavine izrađene su u Laboratoriju za prometnice, a udio različitih frakcija agregata i bitumena potrebnih za izradu mješavina prikazani su Tablici 2. Za potrebe rada izradila su se tri uzorka porozne asfaltne mješavine s eruptivnim agregatom, te tri uzorka porozne asfaltne mješavine s vapnenačkim agregatom u oblik valjka.

Na laboratorijskoj vagi precizno su izvagani materijali za pojedinu mješavinu (Slika 15).



Slika 15: Izvagani materijali (lijevo: s eruptivnim agregatom; desno: s vapnenačkim agregatom)  
(izvor: vlastita fotografija)

Na prethodno izvagane materijale je dodan bitumen u očvrslom stanju. Posude s materijalom potom su stavljene u laboratorijsku pećnicu kako bi se agregat zajedno s punilom i bitumenom zagrijao i pripremio za miješanje. Za proces miješanja svake mješavine korištene su bile rukavice i špahtla. Prema normi HRN EN 12697-35, miješanje je trajalo 4 minute, kako bi se bitumen spojio sa ostalim materijalom, te su se mješavine ponovno vraćale u laboratorijsku pećnicu. Mješavine su zagrijane u laboratorijskoj pećnici 4 sata na 150 °C, te je nastala homogena smjesa kojom su izrađeni uzorci.

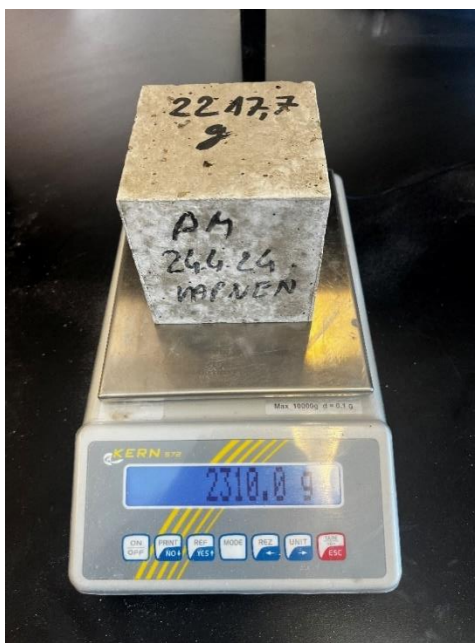
Nakon izrade uzoraka, bilo je potrebno odrediti njihove dimenzije prema normi HRN EN 12697-29. Za određivanje promjera pojedinog uzorka, na površini su iscrtana dva promjera, te su iz njihovih krajnjih točaka produžene linije do donjeg dijela uzorka. Pomoću ravnala, promjer je mjereno na površini, sredini i na dnu uzorka, u oba smjera promjera. Srednja vrijednost tih šest mjerenja korištena je kao konačna vrijednost promjera uzorka.







Ispitivanje poroznosti započelo je vaganjem uzoraka zasićenih vodom. Nakon vaganja, uzorci su obrisani krpom sve dok nisu površinski suhi, a zatim su ponovno izvagani na laboratorijskoj vagi kako bi se odredila njihova masa (Slika 17).



Slika 17: Vaganje površinski suhog betonskog uzorka (izvor: vlastita fotografija)

S obzirom da je poroznost omjer volumena pora i ukupnog volumena uzorka, volumenpora smo trebali izračunati po formuli:

$$V_P = \rho_w \times m_w \quad (\text{dm}^3) \quad (5)$$

Gdje je:

$V_P$  – volumen pora ( $\text{dm}^3$ )

$\rho_w$  – gustoća vode ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$m_w$  – masa apsorbirane vode (kg)

Masa apsorbirane vode je razlika između mase saturiranog uzorka, zasićenog površinski suhog uzorka i mase suhog uzorka, dok je gustoća vode  $1 \text{ kg}/\text{dm}^3$ .

Poroznost asfaltnih uzoraka ispitana je u Laboratoriju za prometnice gdje su dobiveni podaci da je poroznost asfaltnog uzorka s eruptivnim agregatom 21 %, dok je s vapnenačkim agregatom 19 %. Ispitivanje poroznosti na betonskim uzorcima izvodilo se u Laboratoriju za materijale gdje je ispitano da je srednja vrijednost poroznosti betonskih uzoraka s vapnenačkim agregatom 9,28 %, dok kod uzoraka s eruptivnim agregatom je 8,79 %.

Detaljniji rezultati ispitivanja poroznosti betonskih uzoraka prikazani su u Tablici 12 i Tablici 13.

Tablica 12: Ispitivanje poroznosti na betonskom uzorku s vapnenačkim agregatom (izvor: vlastiti prikaz)

BETONSKI UZORAK S VAPNENAČKIM AGREGATOM											
KOCKA 1				KOCKA 2				KOCKA 3			
suhi uzorak 1x1x1 dm				suhi uzorak 1x1x1 dm				suhi uzorak 1x1x1 dm			
duljina [dm]	1	volume n Vd [dm <sup>3</sup> ]	1	duljina [dm]	1	volume n Vd [dm <sup>3</sup> ]	1	duljina [dm]	1	volume n Vd [dm <sup>3</sup> ]	1
masa [kg]	2,16			masa [kg]	2,22			masa [kg]	2,20		
masa saturiranog uzorka [kg]				masa saturiranog uzorka [kg]				masa saturiranog uzorka [kg]			
mz		2,24		mz		2,31		mz		2,30	
masa apsorbirane vode [kg]				masa apsorbirane vode [kg]				masa apsorbirane vode [kg]			
m <sub>AW</sub>		0,08		m <sub>AW</sub>		0,09		m <sub>AW</sub>		0,10	
volumen apsorbirane vode [dm <sup>3</sup> ]				volumen apsorbirane vode [dm <sup>3</sup> ]				volumen apsorbirane vode [dm <sup>3</sup> ]			
V <sub>AW</sub>		0,08		V <sub>AW</sub>		0,09		V <sub>AW</sub>		0,10	
volumen čvrste tvari [dm <sup>3</sup> ]				volumen čvrste tvari [dm <sup>3</sup> ]				volumen čvrste tvari [dm <sup>3</sup> ]			
V <sub>čt</sub>		0,92		V <sub>čt</sub>		0,91		V <sub>čt</sub>		0,90	
volumenska masa [kg/dm <sup>3</sup> ]				volumenska masa [kg/dm <sup>3</sup> ]				volumenska masa [kg/dm <sup>3</sup> ]			
ρ'		2,16		ρ'		2,22		ρ'		2,2	
volumen pora [dm <sup>3</sup> ]				volumen pora [dm <sup>3</sup> ]				volumen pora [dm <sup>3</sup> ]			
V <sub>p</sub>		0,08		V <sub>p</sub>		0,09		V <sub>p</sub>		0,10	
gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]				gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]				gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]			
ρ		2,35		ρ		2,44		ρ		2,45	
poroznost [%]				poroznost [%]				poroznost [%]			
p		8,29		p		9,23		p		10,33	
POROZNOST (srednja vrijednost %)											
9,28											

Tablica 13: Ispitivanje poroznosti na betonskom uzorku s erupivnim agregatom (izvor: vlastiti prikaz)

BETONSKI UZORAK S ERUPTIVNIM AGREGATOM											
KOCKA 1				KOCKA 2				KOCKA 3			
suhi uzorak 1x1x1 dm				suhi uzorak 1x1x1 dm				suhi uzorak 1x1x1 dm			
duljina [dm]	1	volume n Vd [dm <sup>3</sup> ]	1	duljina [dm]	1	volume n Vd [dm <sup>3</sup> ]	1	duljina [dm]	1	volume n Vd [dm <sup>3</sup> ]	1
masa [kg]	2,24			masa [kg]	2,14			masa [kg]	2,10		
masa saturiranog uzorka [kg]				masa saturiranog uzorka [kg]				masa saturiranog uzorka [kg]			
mz		2,32		mz		2,23		mz		2,19	
masa apsorbirane vode [kg]				masa apsorbirane vode [kg]				masa apsorbirane vode [kg]			
m <sub>AW</sub>		0,08		m <sub>AW</sub>		0,09		m <sub>AW</sub>		0,09	
volumen apsorbirane vode [dm <sup>3</sup> ]				volumen apsorbirane vode [dm <sup>3</sup> ]				volumen apsorbirane vode [dm <sup>3</sup> ]			
V <sub>AW</sub>		0,08		V <sub>AW</sub>		0,09		V <sub>AW</sub>		0,09	
volumen čvrste tvari [dm <sup>3</sup> ]				volumen čvrste tvari [dm <sup>3</sup> ]				volumen čvrste tvari [dm <sup>3</sup> ]			
V <sub>čt</sub>		0,92		V <sub>čt</sub>		0,91		V <sub>čt</sub>		0,91	
volumenska masa [kg/dm <sup>3</sup> ]				volumenska masa [kg/dm <sup>3</sup> ]				volumenska masa [kg/dm <sup>3</sup> ]			
ρ'		2,24		ρ'		2,14		ρ'		2,10	
volumen pora [dm <sup>3</sup> ]				volumen pora [dm <sup>3</sup> ]				volumen pora [dm <sup>3</sup> ]			
V <sub>p</sub>		0,08		V <sub>p</sub>		0,09		V <sub>p</sub>		0,09	
gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]				gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]				gustoća [kg/dm <sup>3</sup> ]			
ρ		2,43		ρ		2,36		ρ		2,31	
poroznost [%]				poroznost [%]				poroznost [%]			
p		7,88		p		9,42		p		9,08	
POROZNOST (srednja vrijednost %)											
8,79											

### 3.6. Ispitivanje toplinskih karakteristika uzoraka

Prije samog ispitivanja, u Laboratoriju za prometnice izrađena su dva kalupa za uzorke koja su služila kao imitacija slojeva kolničke konstrukcije. Kalup je izrađen od plastične posude u koju je postavljeno pet ploča stiropora debljine 2 cm koje su imale otvore za šest uzoraka. Ploče su spojene ljepljivom trakom i pričvršćene za posudu. U jednom kalupu su postavljeni asfaltni uzorci oblika valjka dimenzija prikazanih u Tablici 11., a u drugu betonski uzorci dimenzija  $\phi$  10 x 10 cm (Slika 18).



Slika 18: Kalupi za ispitivanje toplinskih karakteristika (izvor: vlastita fotografija)

Temperatura betonskih i asfaltnih uzoraka ispitivana je pomoću šest uređaja Kimo Kistock KTT 310 koji imaju po dvije sonde za mjerenje temperature (Slika 19).



Slika 19: Uređaj za mjerenje temperature uzoraka (izvor: vlastita fotografija)

Sonde su postavljene u šupljine uzoraka i pričvršćene ljepljivom trakom (Slika 20). Uzorci u kalupima postavljeni su na ispitno polje Građevinskog fakulteta u Rijeci isto kao i uređaji koji su zaštićeni plastičnim vrećicama zbog vlage ili kiše. Uređaji su prije postavljanja konfigurirani tako da svaka sonda mjeri pojedini uzorak svakih 15 minuta u periodu od ukupno 39 dana. Mjerenje se provelo u 4 ciklusa što je ukupno 1105 mjerenja po ciklusu. Jedan ciklus trajao je tjedan dana, nakon tog vremenskog razdoblja podaci su se preuzimali putem KILOG programa, te su se uređaji za mjerenje temperature ponovno konfigurirali na iste postavke. Tijekom mjerenja temperature uzoraka, meteorološka stanica fakulteta bilježila je dnevnu temperaturu zraka i relativnu vlažnost koji su bili potrebni kako bi se moglo utvrditi utječu li oni na toplinske karakteristike uzoraka. Prikazani su u Tablici 14. za svaki dan mjerenja.



Slika 20: Postavljene sonde u šupljine uzoraka (izvor: vlastita fotografija)

Tablica 14: Prosječna dnevna temperatura zraka i relativna vlažnost (izvor: vlastiti prikaz)

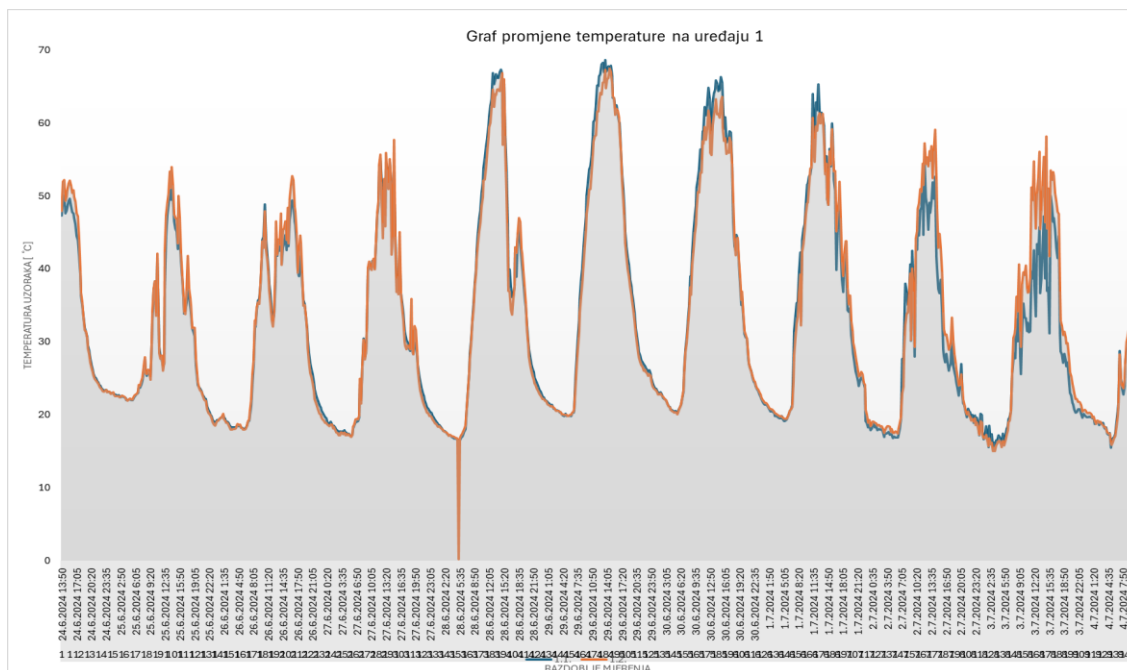
Dan	Datum	Dnevna temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
1.	27.5.2024	23	50
2.	28.5.2024	22	58
3.	29.5.2024	22	53
4.	30.5.2024	20	74
5.	31.5.2024	18	87
6.	1.6.2024	20	70
7.	2.6.2024	21	74
8.	3.6.2024	19	80
9.	4.6.2024	21	72
10.	5.6.2024	23	66
11.	6.6.2024	25	64
12.	7.6.2024	26	61
13.	8.6.2024	26	65
14.	9.6.2024	26	60
15.	10.6.2024	23	78
16.	11.6.2024	21	73
17.	12.6.2024	18	69
18.	13.6.2024	17	70
19.	14.6.2024	25	50
20.	15.6.2024	23	62
21.	16.6.2024	24	59
22.	17.6.2024	25	55
23.	18.6.2024	26	56
24.	19.6.2024	27	55
25.	20.6.2024	28	55
26.	21.6.2024	29	53
27.	22.6.2024	29	51
28.	23.6.2024	25	48
29.	24.6.2024	25	51
30.	25.6.2024	24	61
31.	26.6.2024	25	67
32.	27.6.2024	24	70
33.	28.6.2024	27	61
34.	29.6.2024	30	52
35.	30.6.2024	26	66
36.	1.7.2024	27	63
37.	2.7.2024	24	55
38.	3.7.2024	24	46
39.	4.7.2024	24	53

## 4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Ispitivanje toplinskih karakteristika se provodilo od 27.05.2024. do 04.07.2024. u vedrijim, toplijim i pomalo promjenjivim vremenskim uvjetima što je rezultiralo i oscilacijom temperature uzoraka. Srednja dnevna temperatura u razdoblju trajanja ispitivanja je iznosila 24 °C gdje je najniža 17 °C, a najviša zabilježena temperatura zraka 30 °C. Srednja dnevna relativna vlažnost iznosila je 62%, najviša je zabilježena od 87% dana 31. svibnja, te najniža 46% dana 3. srpnja. Analizom se identificiraju najviše i najniže temperature izmjerene na pojedinom uređaju te se vrši njihova korelacija s referentnim vrijednostima temperature zraka.

### 4.1. Rezultati ispitivanja toplinske provodljivosti asfaltnih i betonskih uzoraka

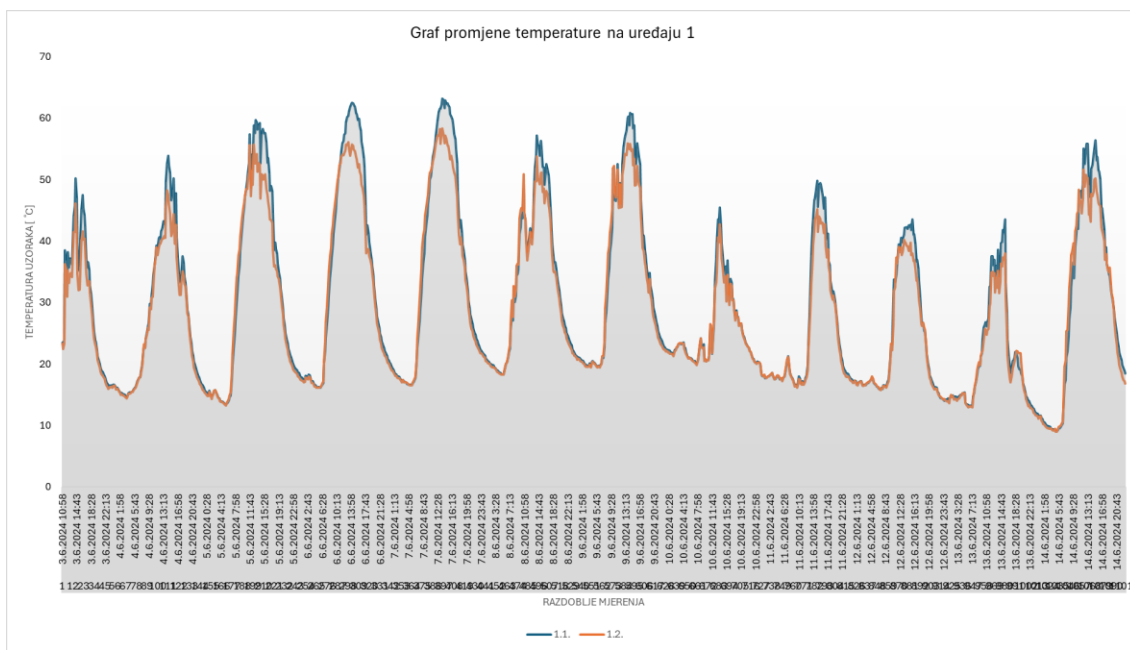
Sonde prvog uređaja koje su bile postavljene u šuplinama na površini svakog uzorka su mjerile temperaturu dva asfaltna uzorka s eruptivnim agregatom u razdoblju od 39 dana. Na prikazanom grafu se može vidjeti promjena temperature u razdoblju kada je zabilježena najviša temperatura uzorka. Oznake na horizontalnoj osi predstavljaju sonde, odnosno 1.1. je sonda koja je mjerila jedan asfaltni uzorak s eruptivnim agregatom, dok je 1.2. druga (Slika 21).





Slika 21: Graf promjene temperature na prvom uređaju u razdoblju najveće izmjerene (izvor: vlastiti prikaz)

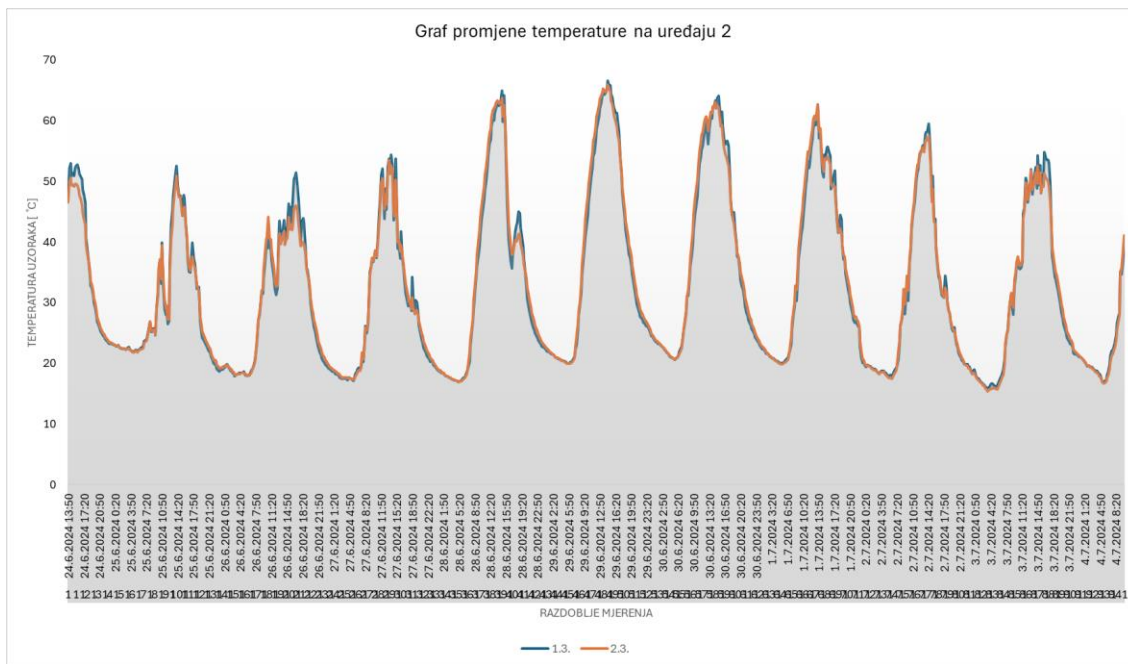
Graf prikazuje oscilacije temperature kroz razdoblje od 24.6.2024. do 4.7.2024. kada je i zabilježena najveća temperatura od 68,62 °C dana 29.6.2024. u 13:35:29 sati, a temperatura zraka 39,10 °C. Prema grafu (Slika 22) može se zaključiti da je najniža temperatura zabilježena u večernjim satima. Uređaj je izmjerio temperaturu uzorka od 9 °C u 4:58:54 sati, 14.6.2024., a tada je temperatura zraka bila ispod 13 °C.



Slika 22: Graf promjene temperature na prvom uređaju u razdoblju najniže izmjerene (izvor: vlastiti prikaz)

Sonde drugog uređaja su mjerile druga dva asfaltna uzorka, jedan s eruptivnim agregatom koji je na grafu naznačen kao 1.3., a drugi s vapnenačkim agregatom oznake 2.3. čiji je graf promjene temperature vidljiv u nastavku (Slika 23).

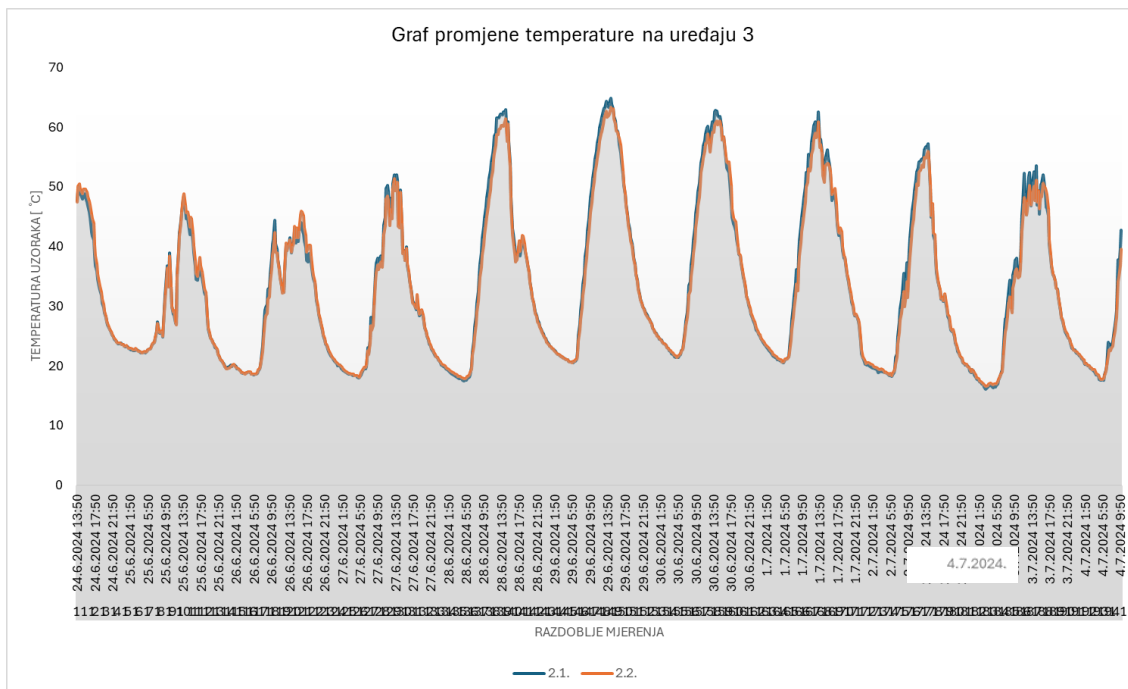




Slika 23: Graf promjene temperature na drugom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz)

Na asfaltnom uzorku s eruptivnim agregatom najveća izmjerena temperatura je bila 66,58 °C dana 29.6.2024 u 14:35:17 sati, a temperatura zraka 39,6 °C. Najniža temperatura istog uzorka od 11,26 °C zabilježena je 1.6.2024. u 4:53:41 kada je temperatura zraka bila 12,8 °C. Uzorak s vapnenačkim agregatom imao je veću zabilježenu temperaturu od uzorka s eruptivnim agregatom, 68,60 °C dana 22.6.2024. u 13:36:34 sati kada je zabilježena temperatura zraka od 34,9 °C. Dana 14.6.2024. u 3:30:49 sati zabilježena je najniža temperatura ovog uzorka od 9,11 °C kada je temperatura zraka bila 13,2 °C.

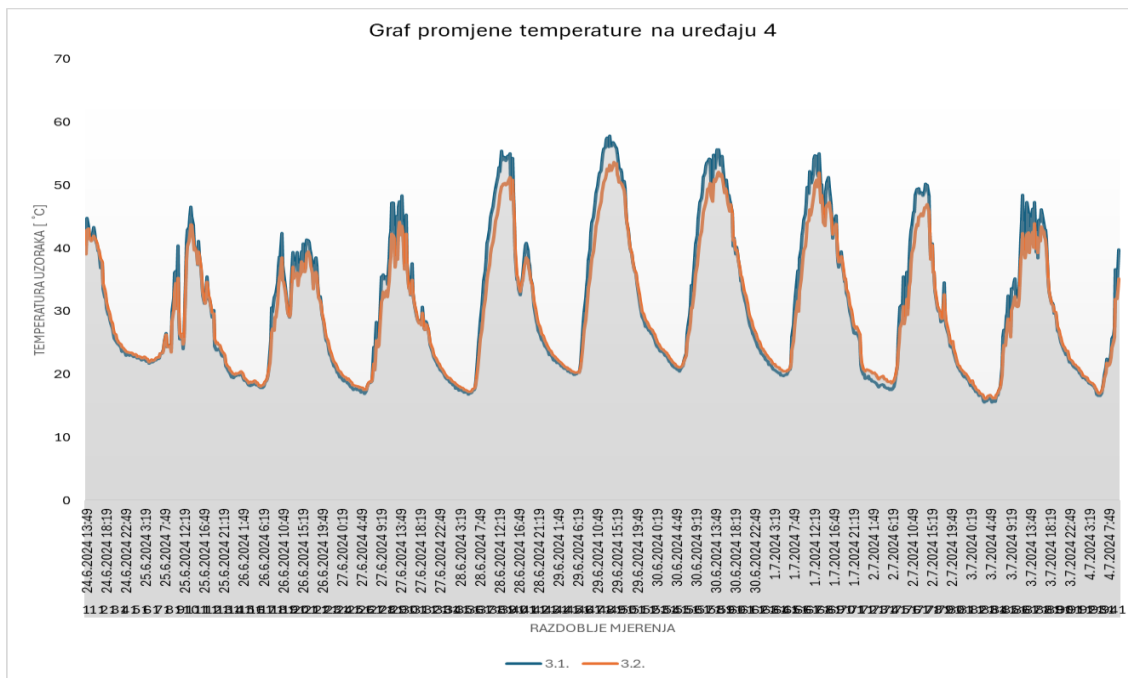
Sonde trećeg uređaja bile su priključene na dva asfaltna uzorka s vapnenačkim agregatom od kojih je jedan prikazan na grafu kao 2.1., te ga mjeri jedna sonda uređaja, dok drugi uzorak 2.2. mjeri druga sonda. U grafu (Slika 24) možemo vidjeti da su krivulje temperature približno jednake.



Slika 24: Graf promjene temperature na trećem uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz)

Najveća zabilježena temperatura na asfaltnom uzorku s vapnenačkim agregatom je 64,80 °C 29.6.2024. u 14:35:17 sati, u isto vrijeme kada je zabilježena najviša temperatura asfaltnog uzorka s eruptivnim agregatom s razlikom od 1,78 °C. Najniža izmjerena temperatura na ovom uređaju je 9,50 °C, 14.6.2024. u 4:47:17 sati kada je temperatura zraka bila 13 °C.

Četvrti uređaj je mjerio temperaturu dva betonska uzorka s eruptivnim agregatom. Prva sonda uređaja mjerila je uzorak čije su oscilacije temperature prikazane plavom krivuljom 3.1., dok je druga mjerila uzorak 3.2., prikazano narančastom krivuljom. Na prikazanom grafu se može vidjeti promjena temperature uzoraka (Slika 25).

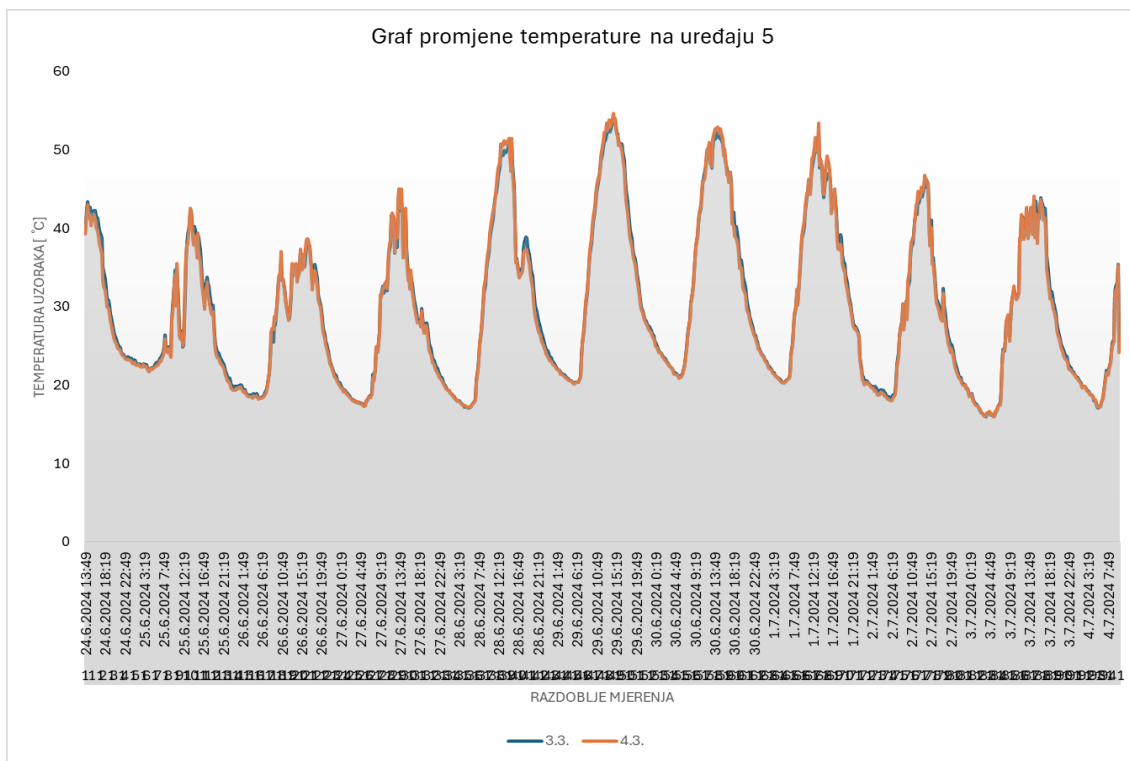


Slika 25: Graf promjene temperature na četvrtom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz)

Najveća temperatura na ovom uređaju je 57,86 °C zabilježena je 29.6.2024. u 13:34:02 sati kada je temperatura zraka, u tom trenutku, bila 39,10 °C. Uređaj je izmjerio i najnižu temperaturu uzorka od 9,27 °C u 4:51:10 sati, 14.6.2024., a tada je temperatura zraka bila ispod 13 °C. Isti dan i u približno isto vrijeme kada je zabilježena najniža temperatura betonskog uzorka s eruptivnim agregatom, zabilježena je i najniža temperatura asfaltnog uzorka s eruptivnim agregatom koja je 0,27 °C niža.

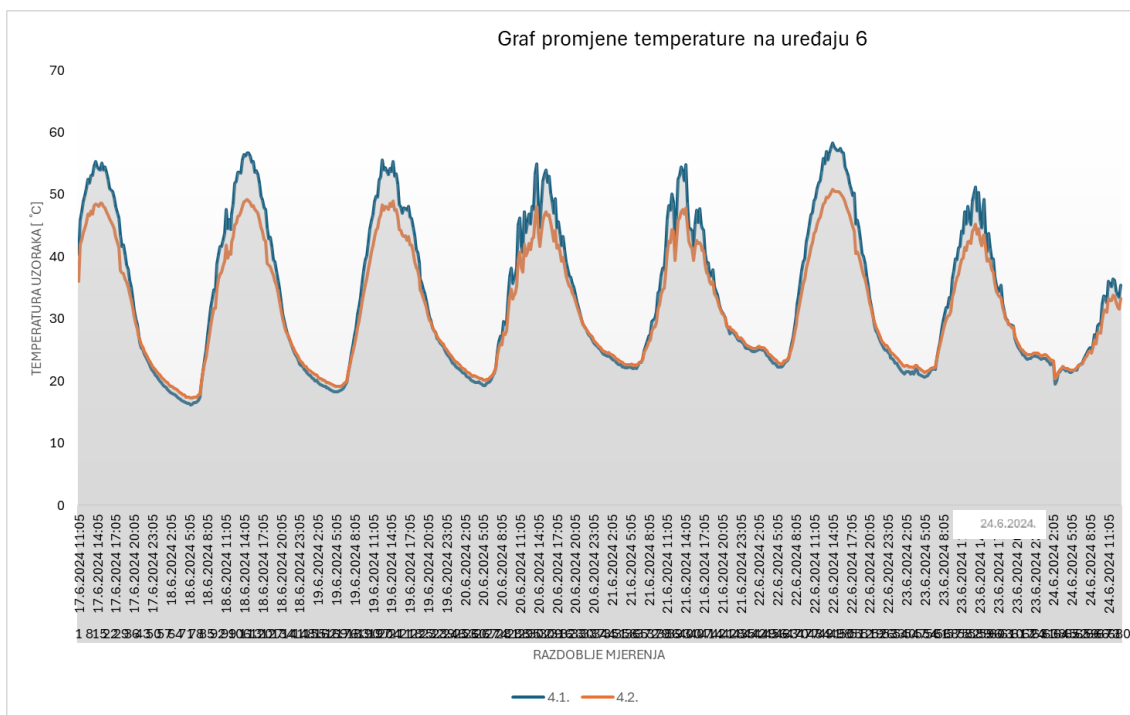
Peti uređaj je mjerio druga dva betonska uzorka, gdje je jedna sonda mjerila temperaturu betonskog uzorka s eruptivnim agregatom koji je na grafu naznačen kao 3.3., a druga uzorak s vapnenačkim agregatom naznačenim 4.3. oznakom. Na betonskom uzorku s eruptivnim agregatom najveća izmjerena temperatura je bila 53,83 °C dana 29.6.2024 u 13:34:19 sati, a temperatura zraka 39,10 °C. Najniža temperatura istog uzorka od 9,27 °C zabilježena je 14.6.2024. u 5:08:00 kada je temperatura zraka bila 13 °C. Temperatura betonskog uzorka s vapnenačkim agregatom zabilježena je isti dan kada i betonski uzorak s eruptivnim agregatom s temperaturom većom za 0,85 °C , 54,68 °C dana 29.6.2024. u

14:34:19 sati kada je zabilježena temperatura zraka od 39,6 °C. Dana 14.6.2024. u 5:23:00 sati zabilježena je najniža temperatura ovog uzorka od 9,34 °C, te je temperatura zraka bila 13 °C (Slika 26).



Slika 26: Graf promjene temperature na petom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz)

Šesti uređaj je mjerio temperature dva betonska uzorka s vapnenačkim agregatom. Sonde uređaja bile su priključene na površine uzoraka koji su nazvani 4.1. i 4.2., te prikazani na grafu krivuljama (Slika 27).



Slika 27: Graf promjene temperature na šestom uređaju u razdoblju izmjerene najviše temperature (izvor: vlastiti prikaz)

Najveća zabilježena temperatura na betonskom uzorku s vapnenačkim agregatom je 58,37 °C dana 22.6.2024. u 14:05:23 sati kada je temperatura zraka bila 27,60 °C. Najniža izmjerena temperatura uzoraka na ovom uređaju je 9,25 °C, 14.6.2024. u 5:10:05 sati kada je temperatura zraka bila 13 °C.

U Tablici 15. prikazane su sve najviše i najniže temperature pojedinih uzoraka.

Tablica 15: Najviše i najniže izmjerene temperature uzoraka (izvor: vlastiti prikaz)

Uzorak	Najviša temperatura [ °C]	Najniža temperatura [ °C]
Asfaltni uzorak s eruptivnim agregatom	68,62	9
Asfaltni uzorak s vapnenačkim agregatom	68,6	9,11
Betonski uzorak s eruptivnim agregatom	57,86	9,27
Betonski uzorak s vapnenačkim agregatom	58,37	9,25

## 4.2. Usporedba rezultata ispitivanja

U Tablici 14. može se primijetiti da su temperature asfaltnih uzoraka s eruptivnim i vapnenačkim agregatom gotovo jednake, što sugerira da oba materijala zadržavaju toplinu i provode ju u sličnim omjerima. Uzimajući u obzir karakteristike agregata, asfaltni uzorak s vapnenačkim agregatom ima manji porozitet, što rezultira boljom toplinskom provodljivošću.

Kod betonskih uzoraka sa eruptivnim i vapnenačkim agregatom, razlika u temperaturama nešto izraženija nego kod asfaltnih uzoraka. Na betonskom uzorku izmjerena je 0,9 % viša temperatura, nego kod asfaltnog uzorka s eruptivnim agregatom, što ukazuje na veću toplinsku provodljivost, odnosno manji kapacitet zadržavanja topline.

Analizom asfaltnih i betonski uzoraka s eruptivnim agregatom može se zaključiti da betonski uzorak, zbog nižeg poroziteta, ima bolju toplinsku provodljivost u usporedbi sa asfaltnim uzorkom koji zadržava veću količinu topline na površini.

Kao i u prethodnom slučaju, u usporedbi betonskih i asfaltnih uzoraka s vapnenačkim agregatom, asfaltni uzorak pokazuje veću sposobnost zadržavanja topline na površini zbog većeg poroziteta, što rezultira nižom toplinskom provodljivošću.

## 5. ZAKLJUČAK

Za potrebe ispitivanja utjecaja agregata na toplinske karakteristike uzoraka asfaltnih i betonskih podloga mjerene su temperature na površini uzoraka u razdoblju od 39 dana s intervalima mjerenja svakih 15 minuta. Cilj ovog ispitivanja je bio ispitati hoće li određeni agregat imati značajan utjecaj na promjenu toplinskih karakteristika asfaltnih i betonskih površina. Prijašnjim istraživanjima je već dokazano da asfalt zadržava veću količinu topline na površini od betona, te da ima nižu toplinsku provodljivost zbog svoga velikog poroziteta, stoga su rezultati ovog ispitivanja bili predvidivi.

Iz podataka koje smo dobili ispitivanjem može se zaključiti da vrsta agregata nema značajan utjecaj na karakteristike asfaltnih i betonskih površina. Udio krupnozrnastog agregata je znatno veći od sitnozrnastog, a njegov porozitet također, što ukazuje na važnost poroznosti agregata i samog uzorka u kontekstu toplinske provodljivosti. Veći porozitet eruptivnog agregata rezultira većim zadržavanjem topline na površini odnosno smanjenjem akumulacije toplinske energije što potvrđuje izmjerena temperatura od čak 68,62 °C. S druge strane, asfaltna mješavina s vapnenačkim agregatom, koji ima manji porozitet, pokazuje nižu zadržanu površinsku temperaturu što ga čini malo boljim toplinskim vodičem, no nema značajnije razlike.

S time da je zaključeno da manja poroznost čini da je materijal bolji toplinski vodič, buduća istraživanja bi trebala dati naglasak na razinu poroznosti materijala i agregata u spravljenom materijalu, te ispitivanje agregata u širem rasponu, uključujući i alternativne ideje kao reciklirani agregat.

## LITERATURA

[1] A. Augustyn, Concrete, Britannica, 2024., <https://www.britannica.com/technology/concrete-building-material> (pristup: 25.05.2024.)

[2] A. Carlos, I. Masumi, M. Hiroaki, M. Maki, O. Takahisa, The effects of limestone aggregate on concrete properties, Department of Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan University, 2010.,  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810002242?casa\\_token=gYyh7gPDIAAAAA:oV2NzvejFLptet5Fx5p3MY4tthlRsUlzBvaNGp8XwPwU\\_OfO4uTZbN3TeRao5KTuew8SIMN-5Q](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810002242?casa_token=gYyh7gPDIAAAAA:oV2NzvejFLptet5Fx5p3MY4tthlRsUlzBvaNGp8XwPwU_OfO4uTZbN3TeRao5KTuew8SIMN-5Q) (pristup: 25.05.2024.)

[3] L. Wadso, J. Karlsson, K. Tammo, Elsevier Editorial System for Cement and Concrete Research, 2012.,  
[https://www.byggnadsmaterial.lth.se/fileadmin/byggnadsmaterial/Research/CERBOF/Thermal\\_properties\\_nr\\_10\\_.pdf](https://www.byggnadsmaterial.lth.se/fileadmin/byggnadsmaterial/Research/CERBOF/Thermal_properties_nr_10_.pdf) (pristup: 28.05.2024.)

[4] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Asfalt, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/asfalt> (pristup: 28.05.2024.)

[5] P. Pan, S. Wu, X. Hu, G. Liu, Effect of Material Composition and Environmental Condition on Thermal Characteristics of Conductive Asphalt Concrete, Wuhan University of Technology, 2017.,  
[https://www.researchgate.net/publication/313949131\\_Effect\\_of\\_Material\\_Composition\\_and\\_Environmental\\_Condition\\_on\\_Thermal\\_Characteristics\\_of\\_Conductive\\_Asphalt\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/313949131_Effect_of_Material_Composition_and_Environmental_Condition_on_Thermal_Characteristics_of_Conductive_Asphalt_Concrete) (pristup: 02.06.2024.)

[6] F.L. Roberts, P.S. Kandhal, E.R. Brown, D-Y. Lee & T.W. Kennedy, Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. NAPA Research and Education Foundation, 1996.  
<https://www.scribd.com/document/672111755/Hot-Mix-Asphalt-Materials-Mixture-Design-and-Construction> (pristup: 02.06.2024.)

[7] A.R.Tarrer, V. Wagh, The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding, Auburn University, 1991., <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/shrp-91-507.pdf> (pristup: 13.06.2024.)

[8] C. Racanel, M. Dicu, S. M. Lazar, A. Burlacu, Asphalt mixtures with limestone aggregate for base layer, Technical University of Civil Engineering Bucharest, 2015.,  
<https://intapi.sciendo.com/pdf/10.1515/rjti-2015-0004> (pristup: 02.06.2024.)



[9] Zukić Š., Izrada i baždarenje aparature za određivanje toplinskih svojstava materijala, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2015., <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fkit:84/preview> (pristup: 23.07.2024.)

[10] Toplinska svojstva materijala, Građevinski fakultet u Zagrebu, <https://www.grad.unizg.hr/download/repository/3.VJEZBE.pdf> (pristup: 30.07.2024.)

[11] 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: 26.08.2024.)

[12] Buršić M., Ispitivanje toplinskih karakteristika betonskih i asfaltnih podloga, završni rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2022., <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gradri%3A1469> (pristup: 13.07.2024.)