

Primljen / Received: 22.4.2024.

Ispravljen / Corrected: 16.7.2024.

Prihvaćen / Accepted: 20.7.2024.

Dostupno online / Available online: 10.10.2024.

## Istraživanje upotrebe betona i uvaljanog betona umjesto vruće bitumenske mješavine pri izgradnji kolnika autoceste u regijama s visokim temperaturama

### Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Sedat Özcanan**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Sırnak, Sırnak, Turska

Tehnički fakultet

Odjel za građevinarstvo

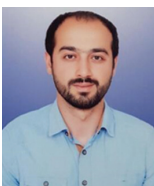
[sozcanan@sirnak.edu.tr](mailto:sozcanan@sirnak.edu.tr)

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Turan Firat**, dipl.ing.građ.

Srednja tehnička škola Mimar Sinan

Mardin, Turska

[turanfirat2001@gmail.com](mailto:turanfirat2001@gmail.com)Mr.sc. **Özgür Özcan**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Sırnak, Sırnak, Turska

Tehnički fakultet

Odjel za građevinarstvo

[ozgurozcan@sirnak.edu.tr](mailto:ozgurozcan@sirnak.edu.tr)

Prethodno priopćenje

**Sedat Özcanan, Turan Firat, Özgür Özcan**

### Istraživanje upotrebe betona i uvaljanog betona umjesto vruće bitumenske mješavine pri izgradnji kolnika autoceste u regijama s visokim temperaturama

Ovo istraživanje ispituje utjecaj temperature na kolnik autoceste Cizre – Silopi od vruće bitumenske mješavine (engl. hot mix asphalt – HMA), usredotočujući se na poteškoće s kolotrazima pogoršane visokim temperaturama koje mogu doseći i do 50 °C u regiji. Unatoč brzome propadanju, posebno pod utjecajem teškoga teretnog prometa, kolnik od vruće bitumenske mješavine pokazao je znatan gubitak stabilnosti i otpora stvaranju deformacija (približno 52 %) pri temperaturnome rasponu od 20 °C do 50 °C. Betonski kolnici (C25) i kolnici od uvaljanog betona (engl. roller-compacted concrete – RCC) pokazali su minimalno smanjenje čvrstoće pod istim temperaturnim uvjetima. Dobiveni rezultati upućuju na to da, s obzirom na prevladavajuće visoke temperature i velika osovinska opterećenja u regiji, za konstrukciju kolnika prednost treba dati betonu (C25) ili RCC-u u odnosu na HMA kako bi se povećala razina otpornosti na kolotrage i oštećenja uzrokovana temperaturom. Uočeni problemi s kolotrazima, čak i početkom ljeta nakon izgradnje, upućuju na hitno usvajanje materijala za cestovnu infrastrukturu koji su otporniji na temperaturu u navedenim klimatskim uvjetima.

#### Ključne riječi:

asfaltni kolnik, oštećenja kolnika, betonski kolnik, kolnik od valjanog betona (RCC), učinak temperature

Research Paper

**Sedat Özcanan, Turan Firat, Özgür Özcan**

### Investigating the use of concrete and RCC instead of HMA in highway pavement in hot regions

This study examines the impact of temperature on the Cizre-Silopi highway's bituminous hot mix asphalt (HMA) pavement, focusing on rutting issues exacerbated by high temperatures, which can reach up to 50 °C in the region. Despite rapid deterioration, especially under heavy truck traffic, the HMA pavement exhibited significant stability and flow resistance loss (approximately 52 %) between 20 and 50 °C. Concrete (C25) and roller-compacted concrete (RCC) pavements displayed minimal strength reductions under the same temperature conditions. These findings suggest that given the prevalent high temperatures and heavy axle loads in the region, concrete (C25) or RCC should be prioritised over HMA for pavement construction to enhance resistance against wheel rutting and temperature-induced damage. The observed rutting issues, even in the initial summer post-construction, underscore the urgency of adopting more temperature-resistant materials for road infrastructure under specified climatic conditions.

#### Key words:

asphalt pavement, pavement damages, concrete road, roller-compacted concrete (RCC), temperature effect

## 1. Uvod

Bitumenske mješavine i dalje su najčešće upotrebljavan materijal za izgradnju kolnika diljem svijeta. Međutim, s obzirom na to da se bitumen dobiva iz nafte, to on znatno doprinosi emisiji stakleničkih plinova te negativno utječe na okoliš [1-4]. U posljednjih nekoliko godina agencije za autoceste postale su sklonije ekološki prihvatljivijim alternativama radi očuvanja prirodnih resursa i promicanja održivosti. Cilj je ovog istraživanja smanjiti ugljični otisak nafte i njezinih derivata. Zato se istražuju nove tehnologije bitumenskih mješavina i reciklirani materijali kako bi se pronašla ekološki prihvatljivija rješenja [5-7]. Međutim, bitumen ostaje primarna sirovina koja se primjenjuje, a koja ima i svoje nedostatke.

Dva najutjecajnija čimbenika koja utječu na kolnike jesu prometno opterećenje i okolišni utjecaji [8-13]. Dok se utjecaji prometnog opterećenja mogu kontrolirati poduzimanjem odgovarajućih mjera, okolišni utjecaji izvan su naše kontrole. Budući da je problem oborina riješen sustavima odvodnje, dominantan okolišni čimbenik postaje temperatura. Iako je bitumen koji se primjenjuje pri izgradnji kolnika osjetljiv na promjene temperature [14-19], pri projektiranju asfaltnih kolnika temperatura se najčešće zanemaruje. Posljednjih su godina provedena istraživanja u cilju učinkovitije primjene temperature pri projektiranju asfaltnih kolnika, a razvijene su i metode koje uzimaju u obzir temperaturne čimbenike [20-22]. Iako se temperaturni čimbenik uzima u obzir pri projektiranju asfaltnoga kolnika, bitumenske mješavine pokazuju viskoelastično ponašanje pri visokim temperaturama [9, 13, 14, 18]. Temperatura je najvažniji čimbenik koji doprinosi pojavi oštećenja na asfaltnim kolnicima, uključujući kolotrage, pukotine i zamor [23-25]. Kolotrasi su oštećenja na čiju pojavu najviše utječe temperatura [26-30]. Iako postoje velika istraživanja i tehnologije vezane uz samopopravljanje pukotina (engl. *self-healing cracks*) u asfaltnome kolniku [31, 32], samopopravak kolotruga nije moguć. Dok modifikatori [33] povećavaju otpornost na pojavu kolotruga jednostavnim poboljšanjem kvalitete bitumena, oni ne sprječavaju njihov nastanak. Rješenje tog problema leži u istraživanju i primjeni alternativnih materijala kao što je beton, osobito u vrućim regijama. Međutim, čimbenici otkrivanja oštećenja i upravljanja procesima održavanja u slučaju vruće asfaltne mješavine (HMA) i betona s točnim procjenama utječu na svojstva kolnika [34, 35]. Istraživanja [36-39] pokazala su da betonski kolnici imaju visoku učinkovitost unatoč nedostacima, strukturnim slabostima i negativnim okolišnim utjecajima.

Asfaltni kolnici podliježu znatnim oštećenjima zbog temperaturnih čimbenika, pri čemu se kolotrasi ističu kao najvažniji. Kolotrasi se kao oštećenja mogu pojaviti na asfaltnim slojevima, ali i ostalim slojevima kolničke konstrukcije. Najvažnija prednost betonskih kolnika jest nepostojanje oštećenja vrste kolotruga. Iako su detaljna istraživanja o oštećenjima koja nastaju na kolniku uslijed temperaturnih čimbenika malobrojna, provedena su neka istraživanja na temelju kojih se mogu izvući

zaključci o njihovoj povezanosti. Utjecaj temperature okolišni je čimbenik koji se uzima u obzir prilikom dimenzioniranja kolnika [40]. Marshall i sur. [41] istraživali su sezonske varijacije u temperaturi savitljivih kolničkih konstrukcija u Tennesseeju i njihov utjecaj na svojstva kolnika. Zaključili su da promjene temperature, osobito zimi i ljeti, znatno utječu na oštećenja kolnika poput pukotina i kolotruga. Park i sur. [42] predložili su učinkovit model predviđanja temperature sloja i temperaturnu korekciju prilikom korištenja uređaja s padajućim teretom (engl. *falling-weight deflectometer – FWD*). Rezultati sugeriraju da predloženi model može učinkovito predvidjeti temperaturne profile kolnika. Ispitani su utjecaji različitih okolišnih čimbenika na asfaltni kolnik, uključujući temperaturu, vlagu i prometno opterećenje [43]. Navedeno je ispitivanje pokazalo da temperatura znatno utječe na svojstva kolnika, osobito u hladnim regijama, te da može dovesti do njegova oštećenja. Kang i sur. [44] proučavali su pravila raspodjele temperaturnog polja stvarnih mjerenja temperature asfaltnih kolnika primjenom regresijske analize. Rezultati istraživanja pokazuju da su na raspodjelu temperature unutar asfaltnoga kolnika utjecali različiti čimbenici, uključujući Sunčevo zračenje, brzinu vjetra i temperaturu zraka. Gang i sur. [45] istraživali su utjecaj okolišnih čimbenika, uključujući temperaturu, na predviđeni vijek trajanja asfaltnih kolnika. Istraživanja su pokazala da temperatura znatno utječe na svojstva kolnika i da može dovesti do njegova povećanog oštećenja i skraćenog vijeka trajanja. Antonio i Maria [46] analizirali su utjecaj temperature na progib asfaltnoga kolnika i zaključili da visoke temperature dovode do povećanog progiba kolničke konstrukcije. Breakah i sur. [47] ispitivali su učinke točnih klimatskih uvjeta na mehanički i empirijski postupak dimenzioniranja kolnika. Navedeni rezultati sugeriraju da primjena točnih klimatskih uvjeta može poboljšati točnost dimenzioniranja kolnika. Prethodno istraživanje [48] koje je ispitivalo temperaturno polje pokazalo je da na temperaturni profil asfaltnoga kolnika utječe nekoliko čimbenika, uključujući Sunčevo zračenje, temperaturu zraka i debljinu kolnika. Abu El-Maaty [49] istraživao je vijek trajanja asfaltnih kolnika u odnosu na zamor i pojavu kolotruga, a rezultati sugeriraju da struktura kolnika i prometno opterećenje znatno utječu na svojstva kolnika. U istraživanjima [50, 51] analizirala se osjetljivost MEPDG predviđanja ponašanja asfaltnoga kolnika u odnosu na klimatske čimbenike, a rezultati su pokazali da temperatura i oborine imaju najveći utjecaj na svojstva kolnika. Li i sur. [52] proučavali su potencijalne utjecaje klimatskih promjena na svojstva i projektiranje kolnika. Istraživanja su pokazala da klimatske promjene mogu znatno utjecati na svojstva kolnika, posebno u područjima koja su izložena ekstremnim vremenskim uvjetima kao što su visoke temperature ili jake oborine. Štoviše, Flavio i Leandro [53] ispitivali su učinak temperature na mehanička svojstva asfaltnih kolnika, uzimajući u obzir termoviskoelastično ponašanje materijala. Istraživanja su pokazala da temperatura znatno utječe na krutost i nosivost asfaltnih kolnika, što u konačnici može utjecati na njihov vijek trajanja. Sascha i Frohmut [54] ispitivali su učinak temperature

površine asfaltnoga kolnika na pojavu oštećenja uslijed zamora. Zaključili su da visoke temperature površine mogu povećati rizik od oštećenja asfaltnih kolnika uslijed zamora, osobito u područjima s teškim prometnim opterećenjem. Drugo je istraživanje [55] ispitalo utjecaj klimatskih čimbenika na svojstva asfaltnih kolnika i njihov vijek trajanja, a rezultati su pokazali da temperatura i oborine znatno utječu na svojstva kolnika, dok su brzina vjetra i vlažnost imali slabiji utjecaj. Maha i sur. [56] razvili su matematički model za procjenu utjecaja egipatskih klimatskih uvjeta na svojstva asfaltnih kolnika. Rezultati su pokazali da su visoke temperature i Sunčevo zračenje glavni čimbenici koji utječu na svojstva asfaltnih kolnika. Slično tome, Mohammad i Medhat [57] razvili su matematički model za distribuciju topline kroz slojeve kolnika Makkah. Rezultati su pokazali da sastav kolničke konstrukcije i klimatski uvjeti znatno utječu na raspodjelu topline kroz slojeve kolnika. Saha i sur. [58] procijenili su učinke kanadskih klimatskih uvjeta na MEPDG predviđanja vijeka trajanja asfaltnih kolnika. Zaključili su da je predviđeni vijek trajanja kolnika u kanadskim klimatskim uvjetima niži od onog u zadanim MEPDG klimatskim uvjetima. Fajing i sur. [59] dali su sažetak istraživanja temperaturnih profila asfaltnih kolnika, a rezultati sugeriraju da na temperaturne profile utječu različiti čimbenici, uključujući Sunčevo zračenje, temperaturu zraka i debljinu kolnika.

Brzo propadanje asfaltnoga kolnika autoceste Cizre – Silopi, odnosno predmeta ovog istraživanja, ponajprije je uzrokovano prometnim opterećenjem i djelovanjem visokih temperatura. S obzirom na to da je navedena autocesta međunarodna trgovačka ruta, to njome teče teški teretni promet. Iako su za rješavanje utjecaja prometa poduzete odgovarajuće mjere poput ograničenja osovinskog opterećenja i mjera kontrole, provedba preventivnih mjera protiv utjecaja temperatura koje dosežu do 50 °C u regiji nije moguća. Temperatura se smatra primarnim čimbenikom nastanka oštećenja na novoizgrađenim i postojećim cestovnim dionicama. Zato ovo istraživanje ispituje stabilnost i otpor deformaciji asfaltnih kolnika uzimajući u obzir temperaturu. Temperaturne karakteristike kolnika od betona (C25) i uvaljanog betona ((eng. *Roller Compacted Concrete* - RCC), ekološki prihvatljivijih alternativa vrućoj bitumenskoj mješavini, također su ispitane i uspoređene s karakteristikama asfaltnoga kolnika. U prvome poglavlju dan je pregled literature koja čini pozadinu ovog istraživanja, u 2. poglavlju prikazani su autocesta Cizre – Silopi i

sastav prometa, temperaturni uvjeti u regiji, eksperimentalni postupci i detalji o pripremi uzorka, a u 3. poglavlju prikazani su ispitivanje šteta uzrokovanih temperaturom na kolniku od vruće asfaltne mješavine, eksperimentalno određivanje svojstava vruće asfaltne mješavine, betona (C25) i RCC-a na temelju temperaturnih učinaka te rezultati. U posljednjem su poglavlju sažeti rezultati i dane preporuke.

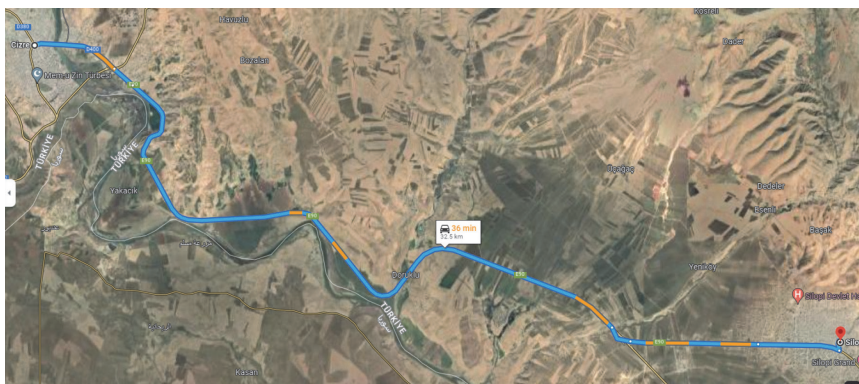
## 2. Studija slučaja, materijali i metode

### 2.1. Autocesta Cizre – Silopi i sastav prometa

Cizre i Silopi, prikazani na slici 1., dva su okruga u pokrajini Şırnak u Turskoj. Şırnak jest pokrajina smještena u jugoistočnoj regiji Turske, koja graniči sa Sirijom i Irakom. Budući da se zbog svojega položaja na granicama s dvjema državama nalazi na važnoj točki, Şırnak dobiva posebnu važnost, osobito zbog graničnog prijelaza Habur koji se nalazi u Silopiju, a koji služi kao glavna trgovačka ruta između Turske i Iraka. Većina trgovinske distribucije između Turske i Iraka obavlja se zahvaljujući cestovnome prometu. Autocesta Cizre – Silopi, prikazana na slici 2., posljednja je dionica navedene trgovinske logistike. Autocesta je, kao što je to prikazano na slici 3., odvojak autoceste Mersin – Adana – Gaziantep – Şanlıurfa – Habur (0.52) i važna

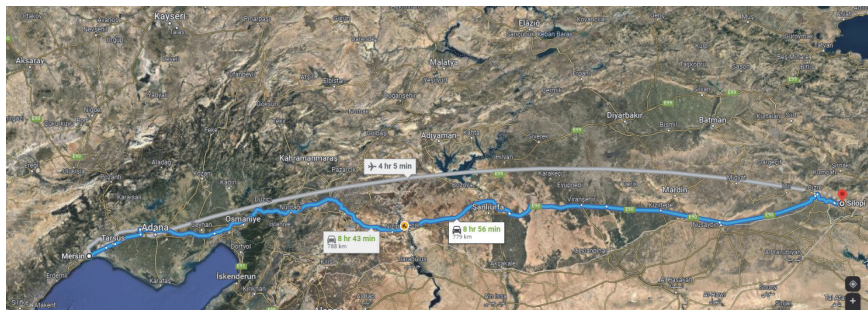


Slika 1. Cizre i Silopi (prikaz s Google Eartha) [60]



Slika 2. Autocesta Cizre – Silopi (prikaz s Google karata) [61]





Slika 3. Autocesta Mersin – Adana – Gaziantep – Şanlıurfa – Habur (O.52) (prikaz s Google karata) [61]

Tablica 1. AADT vrijednosti za 2022. za autocestu Cizre – Silopi [62]

Vrsta vozila	Broj	Postotak [%]
Automobil	5465	53,31
MCV*	696	6,79
Autobus	66	0,64
Kamion	230	2,25
Tegljač	3794	37,01
<b>AADT - Ukupno</b>	<b>10251</b>	<b>100</b>

\*Srednje gospodarsko vozilo, AADT - Prosječni dnevni opseg prometa



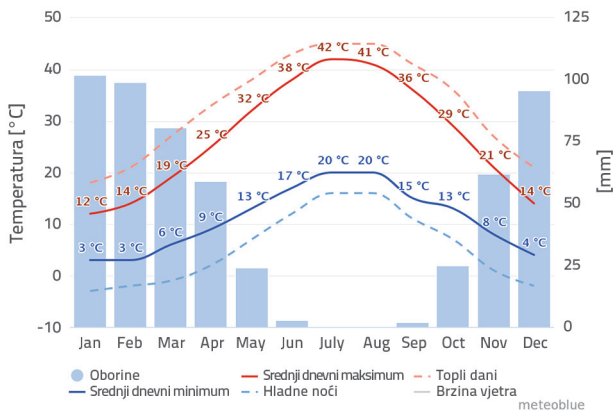
Slika 4. Kolnički trak autoceste Cizre – Silopi i prikaz kolnika (Google Earth) [60]

je ruta za trgovinsku logistiku iz mjera Istanbula, Ankare i Izmira. Vodi do Cizrea te preko Diyarbakira i Mardina dalje do granice. Zbog toga po toj autocesti teče teški teretni prijevoz. S obzirom na važnost autoceste, nedostaci na prometnoj infrastrukturi i kolničkoj konstrukciji rezultiraju problemima povezanim s prometnom sigurnošću. Veliki opseg prometa i većinska zastupljenost kamiona doprinose progresivnome propadanju prometne infrastrukture, posebno kolnika. U tablici 1. prikazani su podaci o prosječnoj godišnjoj dnevnoj prometnoj (eng. *annual average daily traffic* - AADT) u 2022. [62]. Prema njoj, 39,26 % opsega cestovnog prometa obavlja se kamionima i tegljačima. Ako se uzmu u obzir autobusi, teška su vozila činila gotovo 40 % opsega prometa, što je znatno više od prosječne vrijednosti te predstavlja ozbiljan problem osovinskog

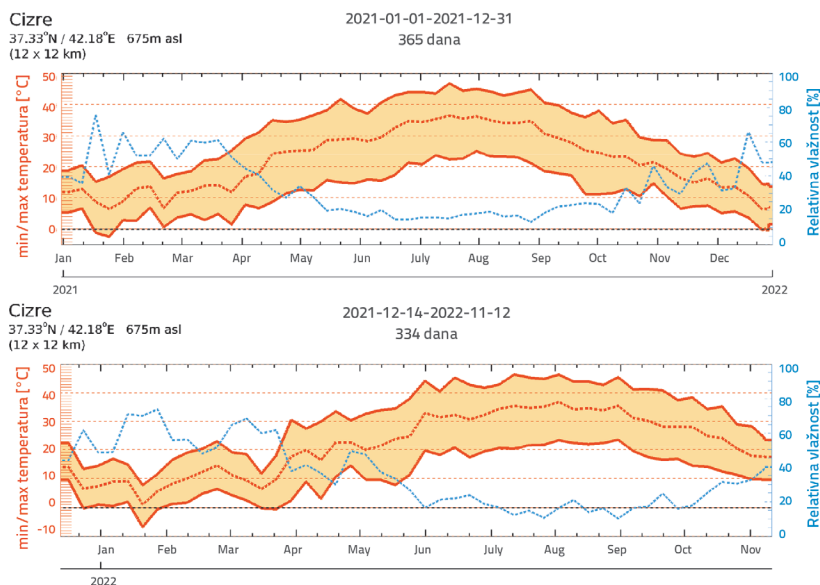
opterećenja za kolnike. Dionica autoceste Cizre – Silopi na kojoj je provedena analiza infrastrukture na temelju temperaturnog čimbenika prikazana je na slici 4. Autocesta ima središnji razdjelni pojas i četiri kolnička traka, po dva u svakome smjeru (2 x 2). Na površini kolnika mogu se uočiti oštećenja kao što su uzdužne i poprečne pukotine, pukotine nastale zbog zamora, mrežaste pukotine i kolotrazi. Detaljna analiza oštećenja koja su vidljiva na površini kolnika prikazana je u poglavlju 4.1.

## 2.2. Temperatura u regiji

Najvažniji je aspekt ovog istraživanja temperaturna učinkovitost postojeće cestovne infrastrukture s kolnicima od vruće bitumenske mješavine. U istraživanju ispitivani su utjecaji temperature na asfaltne kolnike (HMA) te kolnike izvedene od betona (C25) i uvaljanog betona (RCC). Zato je važno uzeti u obzir temperaturne uvjete u regiji, posebno tijekom ljetnih mjeseci, ali i prosječne godišnje temperature. Prosječne temperaturne vrijednosti po satu u posljednjih 30 godina u okrugu Cizreu prikazane su na slici 5. Kao što je vidljivo na slici, temperatura je od travnja do studenog ostala iznad 25 °C. U Silopiju vladaju sličnih uvjeti kao u Cizreu, s prosječnom temperaturom nižom za oko 1 °C. U Cizreu je godišnja maksimalna prosječna temperatura oko 27 °C, a u Silopiju oko 26 °C [63].



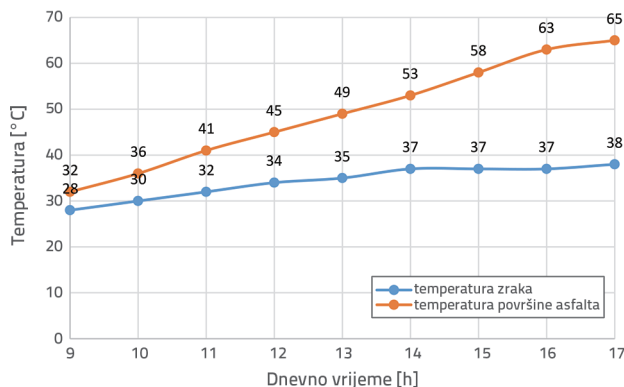
Slika 5. Prosječne temperature u Cizreu [63]



Slika 6. Minimalne/maksimalne temperature u Cizreu za 2021. i 2022. [63]

Kao što je to prikazano na slici 6., u 2021. i 2022. u Cizreu je izmjerena najviša maksimalna temperatura koja je iznosila oko 50 °C u srpnju i kolovozu [63]. Ta je temperatura zabilježena i u ostatku Turske.

U uvodu navedeni su negativni utjecaji temperature na asfaltna kolnika. Temperaturni uvjeti u regiji u kojoj je istraživanje provedeno bili su poput gore navedenih. U ovom je slučaju korisno pratiti promjenu temperature površine asfaltnoga kolnika ovisno o temperaturi zraka. Asfaltni kolnici upijaju Sunčevu svjetlost, uzrokujući da se kolnik zagrijava više od okolnog zraka. Zbog tamne boje i niske refleksije asfaltni kolnik zadržava energiju. Zbog toga površinska temperatura asfaltnoga kolnika može biti nekoliko stupnjeva viša od temperature zraka, osobito ljeti. U istraživanju provedenom ljeti [64] temperaturna razlika između zraka i površine asfaltnoga kolnika tijekom dana prikazana je na slici 7.



Slika 7. Temperatura zraka u odnosu na temperaturu površine asfaltnoga kolnika [64]

Temperatura površine asfaltnoga kolnika bila je iznad temperature zraka tijekom cijelog dana, a temperaturna se razlika povećavala s povećanjem temperature zraka. Temperatura površine asfaltnoga kolnika prelazi 70 °C na mjestima gdje temperatura zraka doseže 40 – 50 °C. Osjetljivost asfaltnoga kolnika na toplinu i njegova sklonost zagrijavanju znatno jačem od zagrijavanja zraka nepovoljno utječu na njegova mehanička svojstva. Navedena je karakteristika temeljni uzrok nastanka oštećenja na asfaltnome kolniku. Osim negativnih učinaka temperature na mehanička svojstva, osobito u gradskim središtima, zagrijani asfaltni kolnik zrači toplinu u okolinu, čime pridonosi efektu urbanoga toplinskog otoka. Navedeni fenomen dovodi do temperatura koje su više u gradskim središtima nego u ruralnim područjima [64].

## 2.3. Eksperimenti i postupak ispitivanja

### 2.3.1. Miješalica za beton

Miješalica za beton primjenjuje se za pripremu materijala kao što je beton, koji se sastoji od različitih sirovina kao što su cement, voda i agregati, u laboratorijske okruženju. Materijali su se miješali dok nisu postigli određenu konzistenciju te su kasnije upotrijebljeni. Navedeni se postupak može primjenjivati za pripremu betona (C25) i uvaljanog betona.

### 2.3.2. Bušilice za uzimanje uzoraka jezgri

Bušilice za uzimanje jezgri betona uređaji su koji se primjenjuju za lakše i brže uzimanje uzoraka iz betonskih stupova, greda i ploča te iz materijala kao što su asfaltni kolnik ili kamen bez oštećivanja. U ovom su istraživanju uzorci izvađeni iz asfaltnoga kolnika. Cilindrični uzorci dobiveni metodom uzimanja uzoraka jezgri naknadno su podvrgnuti Marshallovu ispitivanju.

### 2.3.3. Ispitivanje slijeganjem

Provedeno je ispitivanje slijeganjem kako bi se utvrdila konzistencija materijala, posebno u slučaju betona. U ovom je istraživanju ispitivanje slijeganjem primijenjeno za ispitivanje konzistencije betona (C25) i uzoraka RCC-a. Točnije, za uzorke RCC-a poželjno je slijeganje jednako nuli. Nakon što je u miješalici dobivena homogena smjesa, prije pripreme uzoraka izmjereno je slijeganje RCC materijala. Prije pripreme uzoraka napravljene su potrebne prilagodbe kako bi se postigla vrijednost slijeganja nula.

### 2.3.4. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće, koje se obično primjenjuje za procjenu čvrstoće betona, provedeno je radi mjerenja čvrstoće materijala pod osnim opterećenjem. U ovom su istraživanju ispitivanja tlačne čvrstoće provedena na kockastim uzorcima betona (C25) i RCC-a kako bi se odredili njihova tlačna čvrstoća i povezana mehanička svojstva. Uzorci prethodno izloženi različitim temperaturama, 20 °C, 30 °C, 40 °C i 50 °C, podvrgnuti su navedenome ispitivanju kako bi se odredili tlačna čvrstoća i druga mehanička svojstva.

### 2.3.5. Marshallovo ispitivanje stabilnosti

Marshallovo ispitivanje provedeno je kako bi se odredile vrijednosti stabilnosti i deformacija vruće bitumenske mješavine. U istraživanju navedeno je ispitivanje primijenjeno za mjerenje promjene i stabilnosti mehaničkih svojstava uzoraka jezgri vruće bitumenske mješavine koji su bili pohranjeni 24 sata na različitim temperaturama, točnije na 20 °C, 30 °C, 40 °C i 50 °C. Umjesto tlačnog ispitivanja na uzorku asfaltnoga kolnika dobivenog na terenu bušilicom za uzimanje jezgri, za procjenu mehaničkih svojstva prednost se daje Marshallovu ispitivanju. Cilj je ovog ispitivanja istražiti promjene u mehaničkim svojstvima na uzorcima asfaltnog kolnika, betona (C25) i uvaljanog betona pri različitim temperaturama. S obzirom na to da su u istraživanje uključeni različiti materijali, umjesto provođenja ispitivanja pod istim uvjetima, za procjenu utjecaja temperature ključnom se smatra promjena mehaničkih svojstava. Glavni je cilj ovog ispitivanja ispitati smanjenje čvrstoće materijala povezane s temperaturom.

Uz ispitivanje stabilnosti po Marshallu još su dva ispitivanja primijenjena za simulaciju trajnih deformacija u asfaltnim kolnicima. Navedena ispitivanja uključuju ispitivanje kolotražnja i ciklično tlačno ispitivanje.

- Ispitivanja kolotražnja omogućuju izravnu simulaciju opterećenja kotača te ih je zato moguće izravno povezati s otpornošću mješavine na kolotrage, što ih čini vrijednima pri rutinskoj izradi mješavina i kontroli kvalitete.
- Ciklična tlačna ispitivanja nude detaljan uvid u temeljna svojstva materijala i ponašanje pod cikličkim opterećenjem,

što je ključno za naprednu karakterizaciju materijala i razvoj modela.

Međutim, s obzirom na to da je cilj ovog istraživanja usporediti utjecaje različitih temperatura na svojstva kolnika izvedenih od različitih materijala kao što su vruća bitumenska mješavina, beton i uvaljani beton, za analizu bitumenskih mješavina primijenjeno je jednostavnije i u praksi učestalije Marshallovo ispitivanje.

### 2.3.6. Laboratorijska peć

Kako bi se istražio utjecaj temperature, u ovom je istraživanju upotrijebljena peć za zagrijavanje uzoraka do različitih temperatura. Prije podvrgavanja mehaničkome ispitivanju uzorci vrućega asfaltnoga kolnika, betona (C25) i uvaljanog betona stavljeni su u peć na različite temperature, točnije na 20 °C, 30 °C, 40 °C i 50 °C tijekom 24 sata. Uzorci su zatim izvađeni iz peći i odmah podvrgnuti mehaničkome ispitivanju.

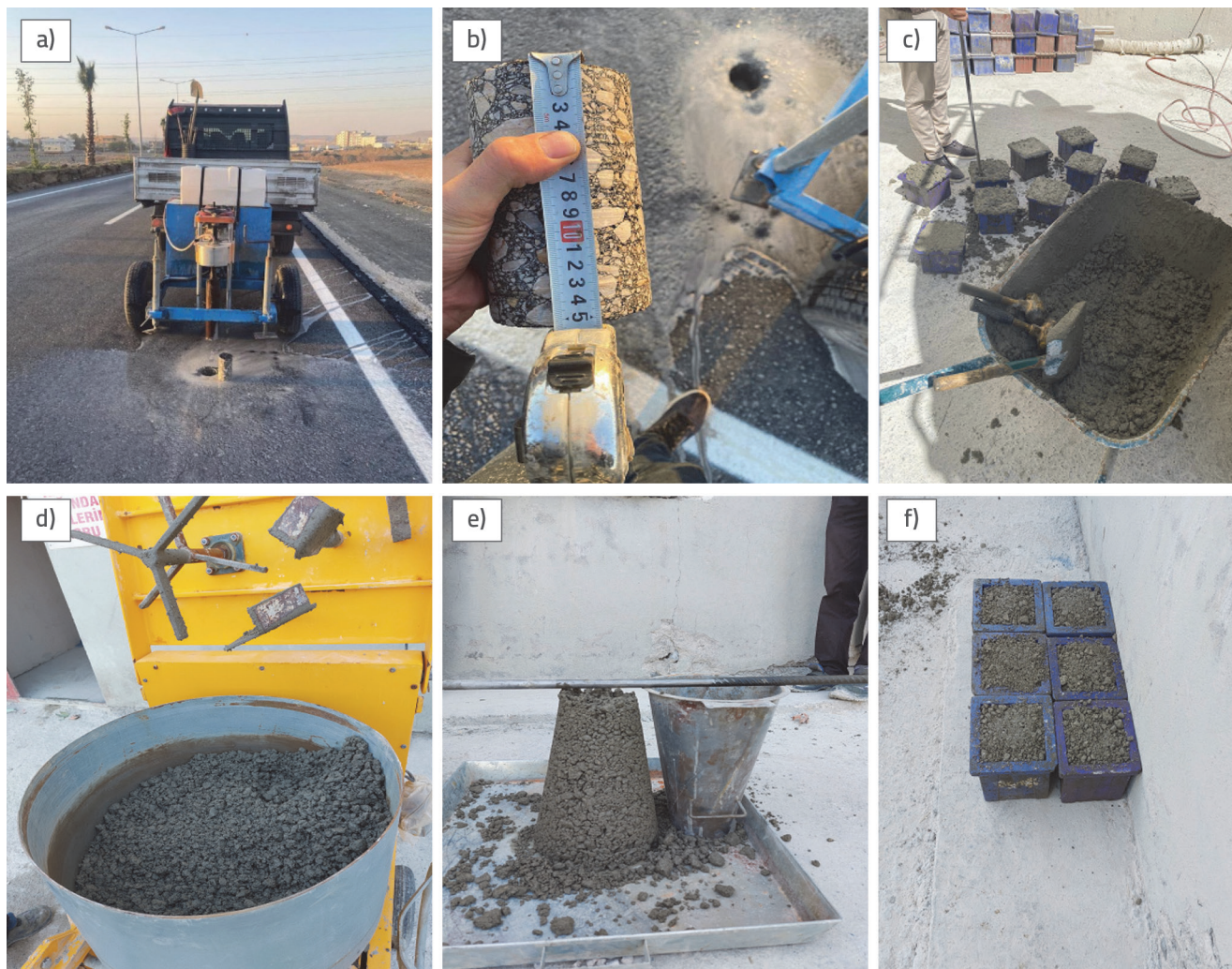
## 2.4. Priprema uzoraka

Sastavni materijal i njihovi udjeli u uzorcima vruće bitumenske mješavine (eng. *Hot Mix Asphalt* - HMA), betona (C25) i uvaljanog betona (eng. *Roller Compacted Concrete* - RCC) navedeni su u tablici 2. Udio sastavnih materijala u vrućoj bitumenskoj mješavini predstavlja primijenjeni udio materijala tijekom izgradnje asfaltnoga kolnika. Uzorci asfaltnoga kolnika dobiveni su uzimanjem jezgre iz izgrađenoga kolnika s lica mjesta umjesto da su pripremljeni u laboratoriju jer terenski uzorak bolje reprezentira stvarni kolnik. Na slici 8. prikazana je priprema uzoraka. Na slici 8.a može se vidjeti uzimanje uzoraka asfaltnoga kolnika s lica mjesta pomoću bušilice za vađenje uzoraka jezgri. Kao što je to prikazano na slici 8.b, uzorak jezgre bio je cilindričnog oblika, promjera 100 mm i duljine 150 mm. Priprema kockastih uzoraka betona (C25) veličine 150 x 150 x 150 mm prikazana je na slici 8.c. Priprema uzoraka uvaljanog betona prikazana je na slici 8.d, pri čemu je zbijanje obavljeno pomoću valjka tijekom lijevanja mješavine, što je rezultiralo gustom mješavinom i približno nultom vrijednošću slijeganja kao što je to pokazano na slici 8.e prilikom ispitivanja slijeganja. Uzorci uvaljanog betona veličine 150 x 150 x 150 mm prikazani su na slici 8.f.

Tablica 2. Udio sastavnih materijala uzoraka HMA-e (vruća bitumenska mješavina), betona (C25) i RCC-a (uvaljani beton)

HMA		Beton (C25)		RCC [65]	
Gustoća	2420 kg/m <sup>3</sup>	Cement	285 kg/m <sup>3</sup>	Cement	250 kg/m <sup>3</sup>
Bitumen	4,05 %	Voda	213,5 l/m <sup>3</sup>	Voda	95,5 l/m <sup>3</sup>
Agregat 0-5 mm	48 %	Pijesak	615 kg/m <sup>3</sup>	Pijesak	735 kg/m <sup>3</sup>
Agregat 5-12 mm	22 %	Agregat 5-10 mm	415 kg/m <sup>3</sup>	7-14 mm	810 kg/m <sup>3</sup>
Agregat 12-19 mm	14 %	Agregat 10-20 mm	825 kg/m <sup>3</sup>	Agregat 14-20 mm	420 kg/m <sup>3</sup>
Agregat 19-25 mm	16 %				





Slika 8. a) Vađenje jezgre HMA-e; b) Uzorci jezgre HMA-e; c) Priprema mješavine betona (C25) i uzorci; d) Priprema RCC-a u miješalici; e) Ispitivanje slijeganjem; f) Uzorci RCC-a

### 3. Analize i rezultati

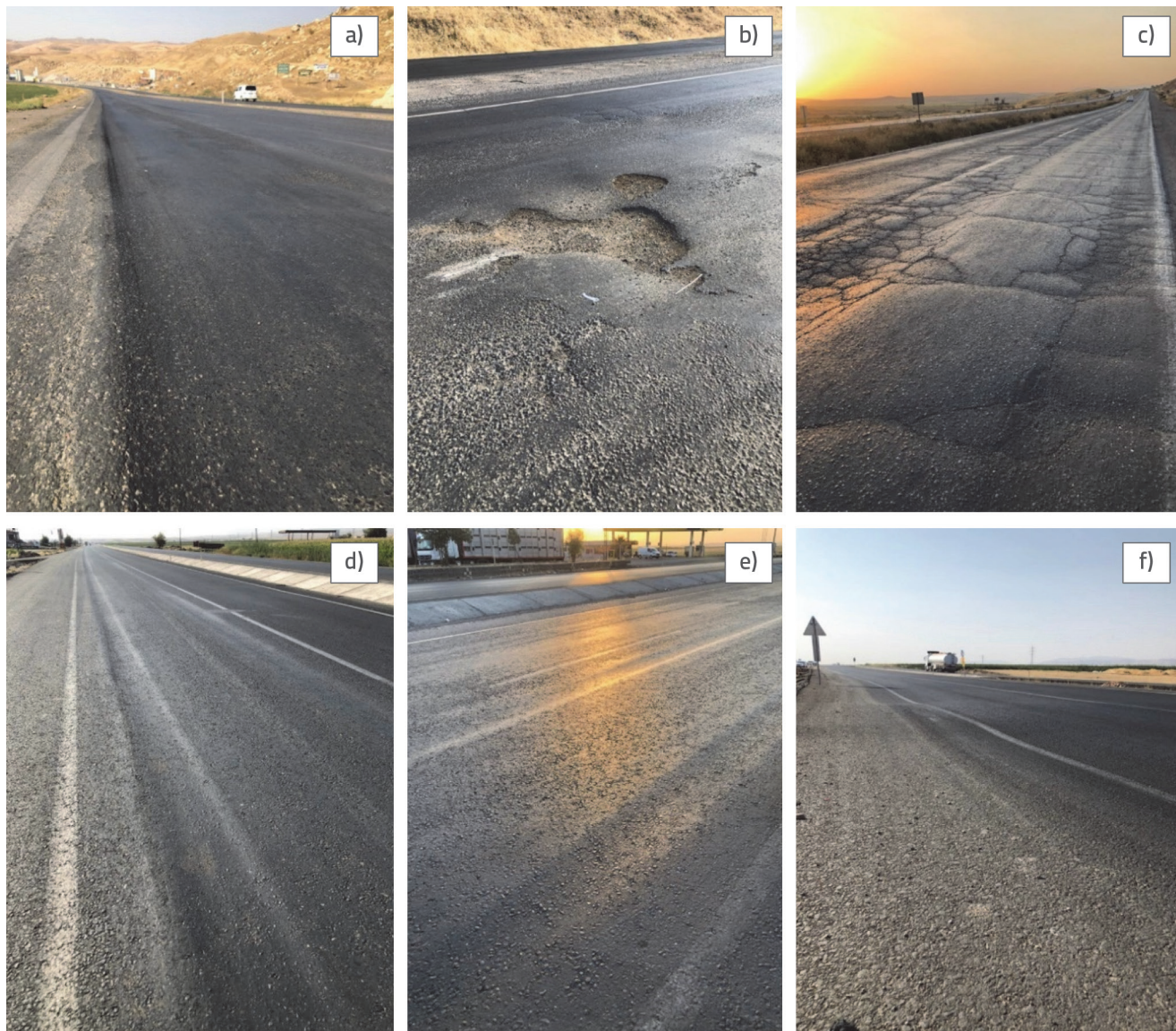
#### 3.1. Analiza pogoršanja stanja autoceste i utjecaja temperature

Na slici 9. prikazana su oštećenja na postojećim (starim) i novoizgrađenim asfaltnim kolnicima temeljeni na vizualnome pregledu provedenome na autocesti koja je predmet istraživanja. Fotografije u gornjemu redu prikazuju oštećenja uočena na postojećemu (starome) asfaltnom kolniku. Na slici 9.a prikazani su kolotrazi i valovanje, na 9.b kolotrazi, zamor materijala i udarne rupe, a na 9.c kolotrazi, zamor, blok-pukotine i mrežaste pukotine. Kolotrazi su najčešći problem uočen na postojećim (starim) asfaltnim kolnicima. Duž cijele trase autoceste Cizre – Silopi primijećena su oštećenja uzrokovana kolotražanjem. U donjemu redu slike 9. nalaze se fotografije novoizgrađenih asfaltnih kolnika na odgovarajućim dionicama. Kao što

se to vidi na slikama 9.d, 9.e i 9.f, unatoč tome što je novoizgrađen, na kolniku su se već tijekom prvog ljeta pojavila oštećenja u vidu kolotruga i valovanja. Slično kao i kod postojećega (staroga) kolnika, dominantno oštećenje na novoizgrađenome kolniku su kolotrazi.

Kao što je to spomenuto u uvodu, bitumen je temperaturno osjetljiv materijal [14-19] te pokazuje viskoelastično ponašanje pri visokim temperaturama [9, 13, 14, 18]. Osim toga temperatura je jedan od najvažnijih čimbenika koji utječu na učinkovitost asfaltnoga kolnika u smislu otpornosti na oštećenja vrste kolotruga, pukotina, zamora i sličnih [23-25], pri čemu temperatura dominantno utječe na nastanak kolotruga [26-30]. U tom su kontekstu glavni uzroci nastanka kolotruga na postojećim (starim) i novoizgrađenim asfaltnim kolnicima ponajprije teška vozila kao što su kamioni, koji čine gotovo 40 % prijevoznih sredstava na toj autocesti (tablica 1.) i, što je najvažnije, rekordno visoke temperature koje u regiji dosežu i do 50 °C tijekom ljetnih mjeseci (slika 6.).





Slika 9. Oštećenja staroga asfaltnog kolnika: a) kolotrazi i valovanje; b) kolotrazi, pukotine nastale zamorom i udarne rupe; c) kolotrazi, pukotine nastale zamorom i blok pukotine, mrežaste pukotine, oštećenja novoga asfaltnog kolnika; d, e, f) kolotrazi

### 3.2. Mehanička svojstva uzoraka vruće bitumenske mješavine pri različitim temperaturama

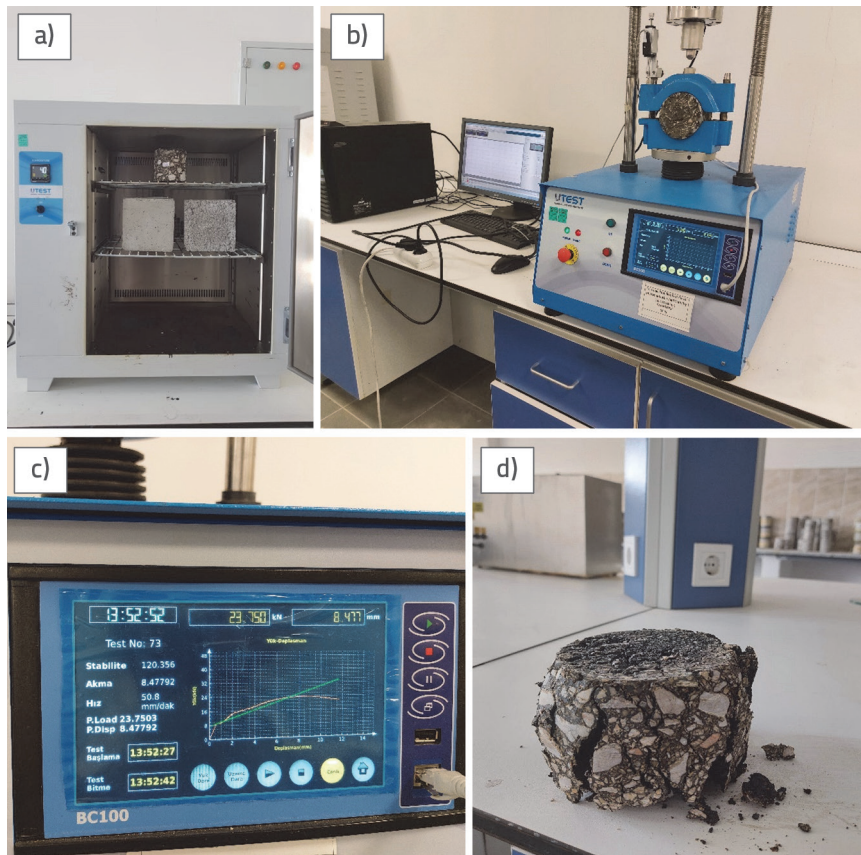
Bitumenske mješavine osjetljive su na temperaturu. U ovom su istraživanju, uzimajući u obzir temperaturni raspon od prosječne temperature (20 °C) do maksimalne temperature tijekom

ljetnih mjeseci u regijama Cizreu i Silopiju (50 °C), ispitani stabilnost i otpornost na deformaciju primjenom Marshallova ispitivanja za temperaturne vrijednosti od 20 °C, 30 °C, 40 °C i 50 °C. U tu svrhu uzorci jezgra asfaltnoga kolnika dobiveni bušenjem stvarnoga kolnika držani su u peći za sušenje 24 sata, kao što je to prikazano na slici 10.a. Nakon toga uzorci

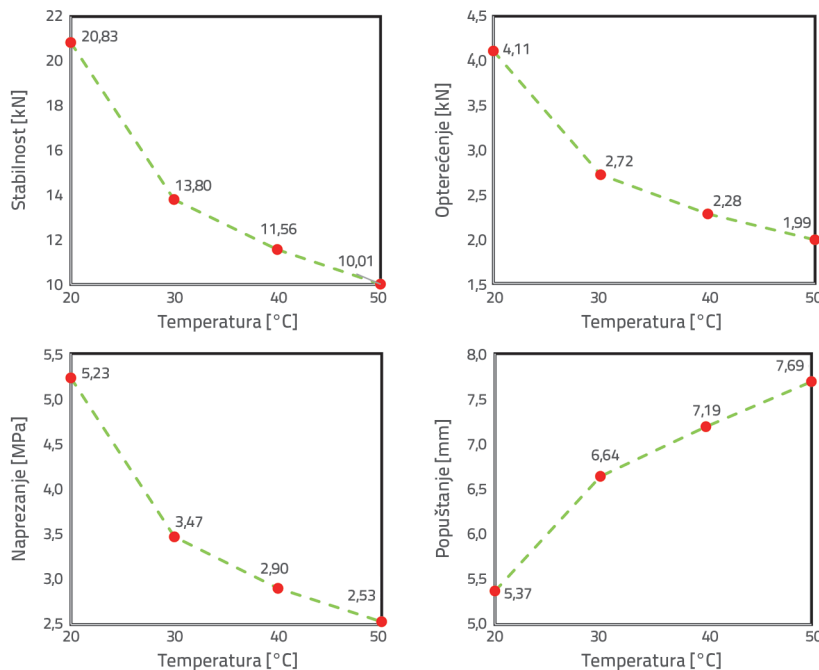
Tablica 3. Promjene mehaničkog ponašanja u uzorku vruće asfaltne mješavine ovisno o temperaturi

Temperatura [°C]	Stabilnost [kN]	Opterećenje [kN]	Naprezanje [MPa]	Deformacija [mm]
20	20,83	4,11	5,23	5,37
30	13,80	2,72	3,47	6,64
40	11,56	2,28	2,90	7,19
50	10,01	1,99	2,53	7,69





Slika 10. a) Zagrijavanje uzoraka u pećnici; b) Marshallov uređaj za ispitivanje stabilnosti; c) Status analize i dobiveni podaci; d) Uzorak vruće bitumenske mješavine nakon ispitivanja



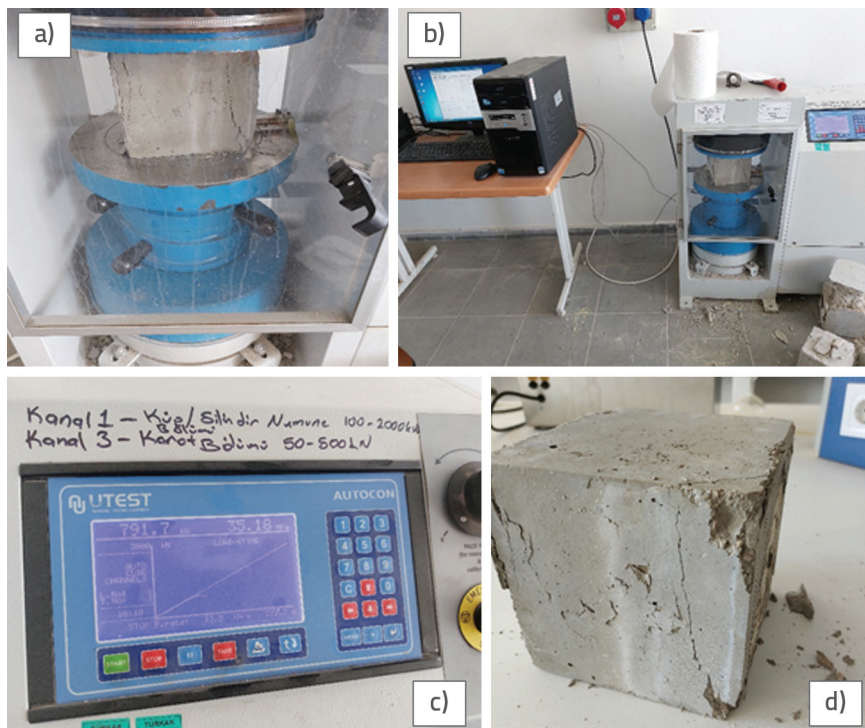
Slika 11. Grafički prikaz promjena mehaničkih svojstava na uzorcima vruće bitumenske mješavine ovisno o temperaturi

su ispitani u Marshallovu uređaju, kao što je to prikazano na slici 10.b, kako bi se odredili stabilnost i otpornost na deformacije vruće bitumenske mješavine pri različitim temperaturama. Na slici 10.c prikazani su dobiveni podaci o deformacijama i stabilnosti, a na slici 10.d primjer promjene oblika uzorka vruće bitumenske mješavine nakon ispitivanja.

Stabilnost, opterećenja, vrijednosti deformacija i naprezanja uzoraka vruće bitumenske mješavine prikazani su u tablici 3. i na slici 11., uzimajući u obzir utjecaj temperature. Iz rezultata ispitivanja vidljiva je znatna promjena mehaničkih svojstava uzorka vruće bitumenske mješavine s povećanjem temperature. S porastom temperature s 20 °C na 50 °C dolazi do smanjenja vrijednosti stabilnosti, opterećenja, naprezanja i povećanja deformacija do 52 %. Prema grafikonima na slici 11., najkritičniji temperaturni raspon je između 20 °C i 30 °C. Unutar tog raspona vrijednosti su naglo padale odnosno rasle, a nakon 30 °C trend opadanja/rasta bio je blaži. Točnije, s porastom temperature vrijednost deformacije vruće bitumenske mješavine pokazuje znatan porast od približno 43 %. S porastom temperature bitumen postaje fluidniji i viskozniiji. Upotreba materijala koji je podložan utjecaju temperature, posebno u regijama kao što su Cizre i Silopi u kojima temperature dosežu 50 °C te na cestama po kojima teče teški teretni prijevoz, može rezultirati ubrzanim propadanjem cestovne infrastrukture. Unatoč novoizgrađenosti, pojava oštećenja poput kolotraga i valovanja na kolniku tijekom prvog ljeta upotrebe pokazuje negativan utjecaj temperature i prometa teških teretnih vozila na vijek trajanja kolnika, što je vidljivo i iz dobivenih rezultata.

### 3.3. Mehanička svojstva uzoraka betona (C25) pri različitim temperaturama

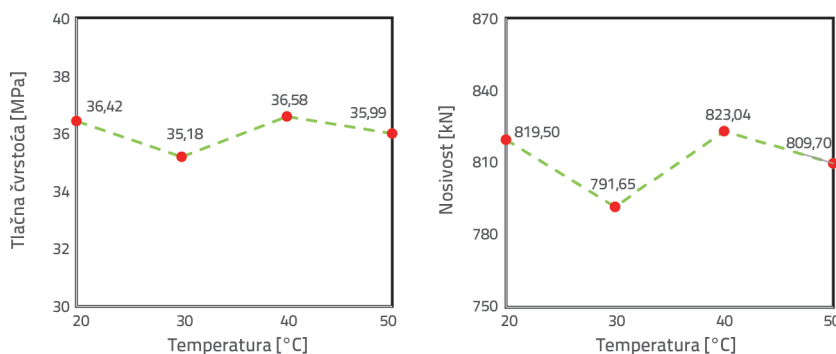
Uzorcima betona (C25) ispitani su na temelju njihove tlačne čvrstoće nakon sedmodnevnog njegovanja i sušenja.



Slika 12. a) Uređaj za tlačno ispitivanje; b) i c) Status ispitivanja i dobiveni podaci; d) Uzorak betona (C25) nakon ispitivanja

Tablica 4. Promjene u mehaničkim svojstvima uzoraka betona (C25) ovisno o temperaturi

Temperatura [°C]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Nosivost [kN]
20	36,42	819,50
30	35,18	791,65
40	36,58	823,04
50	35,99	809,70



Slika 13. Grafički prikaz promjena mehaničkih svojstava na uzorcima betona (C25) ovisno o temperaturi

Kao što je to prikazano na slici 10.a, prije ispitivanja tlačne čvrstoće uzorci su podvrgnuti 24-satnom procesu njegovanja u pećnici pri temperaturama od 20 °C, 30 °C, 40 °C i 50 °C. Na slici 12. prikazani su uređaj za tlačno ispitivanje (a), ispitivanje

i prikupljanje podataka (b) i (c) te primjer uzorka nakon ispitivanja (d). Mehanička svojstva uzoraka vruće bitumenske mješavine određena su Marshallovim ispitivanjem. Uzorci betona podvrgnuti su ispitivanju tlačne čvrstoće kako bi se ocijenila njihova mehanička svojstva. Glavni je cilj bio utvrditi na koji se način mehanička svojstva vruće bitumenske mješavine i betona mijenjaju s promjenom temperature. Zato je fokus bio na promjenama mehaničkih svojstava pod utjecajem temperature, a ne na specifičnim primijenjenim metodama.

Pri upotrebi betona u projektiranju konstrukcija primarno se uzima u obzir tlačna čvrstoća. Osim toga poznavanje tlačne čvrstoće betona i uvaljanog betona, za razliku od uzoraka vruće bitumenske mješavine, može dati indicaciju o njihovim drugim mehaničkim svojstvima. Postoji povezanost između tlačne i vlačne čvrstoće betona, a velika tlačna čvrstoća upućuje na malu propusnost i veliku trajnost.

Tlačne čvrstoće i nosivosti betonskih uzoraka ovisno o temperaturi navedene su u tablici 4. i prikazane na slici 13. Za razliku od vruće asfaltna mješavine, mehanička svojstva betona neovisna su o temperaturi. Unatoč porastu temperature, tlačna čvrstoća i nosivost uzoraka ostale su približno konstantne. Poznato je da je vruća bitumska mješavina osjetljiva na temperaturu, što potvrđuju gornji rezultati. U regijama Cizreu i Silopiju, gdje je prosječna temperatura tijekom cijele godine oko 26 °C do 27 °C i doseže 45 °C do 50 °C ljeti, umjesto temperaturno osjetljive vruće bitumenske mješavine kao materijal za izgradnju kolnika trebao bi se upotrebljavati beton koji ima veliku tlačnu čvrstoću te je temperaturno neosjetljiv. Beton ne mijenja svoja mehanička svojstva pod utjecajem temperature i ima veliku tlačnu čvrstoću pa se ne pojavljuju oštećenja poput kolotruga. Betonski kolnici mogu biti alternativno rješenje za te probleme, posebno za oštećenja poput kolotruga i valovanja uzrokovanih velikim osovinskim opterećenjima zbog prometa teških teretnih vozila.



### 3.4. Mehanička svojstva uzoraka uvaljanog betona pri različitim temperaturama

Uzorci uvaljanog betona (RCC) poput uzoraka betona (C25) ocijenjeni su na temelju njihove tlačne čvrstoće nakon sedmodnevnog njegovanja. Prije ispitivanja uzorci su držani u pećnici na temperaturi od 20 °C, 30 °C, 40 °C i 50 °C tijekom 24 sata, a zatim su podvrgnuti tlačnome ispitivanju. Na slici 14. prikazani su uređaj za tlačno ispitivanje (a), ispitivanje i prikupljanje podataka (b) i (c) te primjer uzorka uvaljanog betona nakon ispitivanja (d). Utvrđene su tlačne čvrstoće i nosivosti uzoraka od uvaljanog betona. Kolnik od uvaljanog betona ima isti sastav kao tradicionalni beton, no omjeri sastavnih materijala u mješavini su različiti. Za razliku od betona, uvaljani beton, tj. kruta i suha mješavina koja se zbija valjkom, ne zahtijeva moždanike, sidra ili čeličnu armaturu te se kolnike od uvaljanog betona može otvoriti za promet uz znatno kraći period njege. Navedene karakteristike čine kolnike od uvaljanog betona jednostavnijima, bržima i isplativijima od betonskih kolnika.

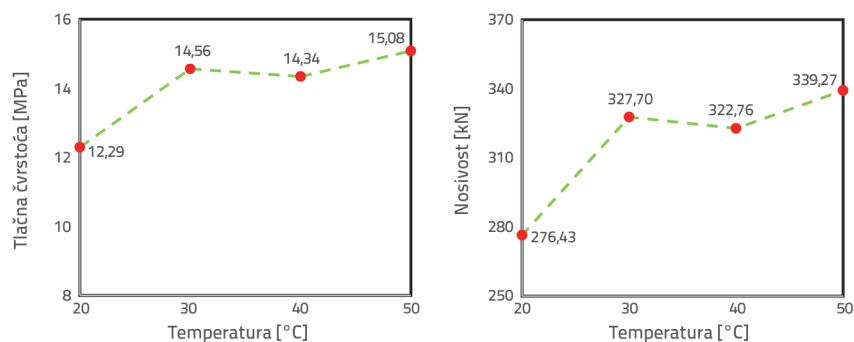
Promjene tlačne čvrstoće i nosivosti uzoraka uvaljanog betona s temperaturnim varijacijama prikazane su u tablici 5. odnosno na slici 15. Dok je tlačna čvrstoća betona (C25) dosegla 36 MPa, čvrstoća uzoraka uvaljanog betona ostala je konstantna, tj. iznosila je 15 MPa. Svojstvena čvrstoća kolnika od uvaljanog betona bila je oko 30 MPa jer navedeni kolnik ima nizak udio vode i dobiva na čvrstoći zbijanjem *in situ*. Međutim, u ovom je istraživanju uzorak uvaljanog betona zbijen udarcem čekićem u kockaste uzorke nakon pripreme u miješalici. Zato je dobivena tlačna čvrstoća bila nešto manja od čvrstoće koja se može očekivati *in situ*. Međutim, u ovome istraživanju fokus nije bio samo na čvrstoći uvaljanog betona, već i na njegovu ponašanju i promjenama pod utjecajem temperature. Iznađujuće, tlačna čvrstoća i nosivost uvaljanog betona porasle su s porastom



Slika 14. a) Uređaj za tlačno ispitivanje; b) i c) Status ispitivanja i dobiveni podaci; d) Uzorak uvaljanog betona nakon ispitivanja

Tablica 5. Promjene mehaničkih svojstava na uzorku uvaljanog betona ovisno o temperaturi

Temperatura [°C]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Nosivost [kN]
20	12,29	276,43
30	14,56	327,70
40	14,34	322,76
50	15,08	339,27



Slika 15. Grafički prikaz promjena mehaničkih svojstava na uzorcima uvaljanog betona ovisno o temperaturi

temperature. Mehanička su se svojstva uzorka uvaljanog betona znatno povećala pri temperaturi između 20 °C i 30 °C, dok je pri temperaturi između 30 °C i 50 °C uočeno

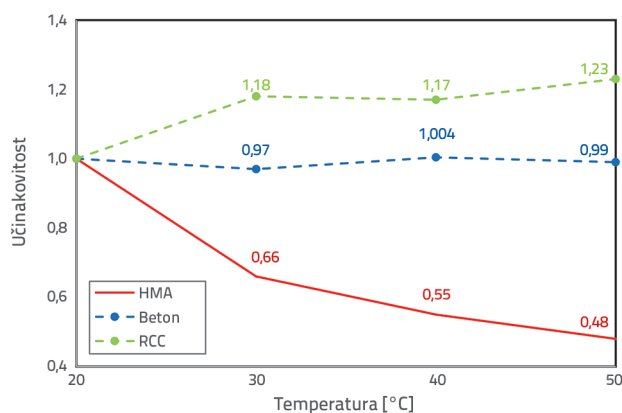
stabilno ponašanje. Međutim, s povećanjem temperature došlo je do ukupnog povećanja tlačne čvrstoće od 23 % u usporedbi s vrijednosti pri temperaturi od 20 °C. S obzirom na njegova temperaturna svojstva i prednosti prilikom same izgradnje, kolnik od uvaljanog betona bolja je alternativa klasičnome betonskom kolniku. U usporedbi provedenoj u laboratorijskome okružju uvaljani beton pokazao se boljim od običnog betona (C25) u pogledu otpornosti mehaničkih svojstava na okolišne utjecaje [66].

### 3.5. Usporedba svih rezultata

Temperaturne karakteristike uzoraka vruće bitumenske mješavine, betona (C25) i uvaljanog betona (RCC) navedene su u tablici 6. i prikazane na slici 16. Kao referentna vrijednost određena je temperatura od 20 °C, tj. temperatura u normalnim uvjetima. Kritični konstrukcijski parametri naprezanja i tlačne čvrstoće odabrani su kao pokazatelji mehaničkih svojstava. Promjene između 20 °C i 50 °C prikazane su na slici na temelju svojstava uzoraka pri referentnoj temperaturi. S povećanjem temperature vrijednost naprezanja uzorka vruće bitumenske mješavine smanjila se za 52 %. Tlačna čvrstoća C25 betona ostala je stabilna bez obzira na temperaturne promjene, dok se tlačna čvrstoća uvaljanog betona s povećanjem temperature povećala za 23 %. Kao što je to prethodno spomenuto, bitumenske mješavine osjetljive su na temperaturu. Dobiveni rezultati potkrepljuju tu hipotezu. Kritični temperaturni prelazak za bitumenske mješavine događa se između 20 °C i 30 °C, što upućuje na znatne promjene u ponašanju kada je temperatura iznad prosječne. Ponašanje bitumenskog materijala prelazi iz elastičnog u visokoelastično. Visoke temperature u regiji i teška teretna vozila glavni su uzroci nastanka oštećenja na asfaltnim kolnicima. Osjetljivost asfaltnoga kolnika na temperaturu evidentna je, a bolje rješenje za kolnike u vrućim regijama bio bi beton C25 koji ne gubi čvrstoću s porastom temperature, već pokazuje i njezino povećanje, te kolnik od uvaljanog betona. Također, C25 i kolnik od uvaljanog betona pokazali su veliku tlačnu čvrstoću. Vrijednost naprezanja vruće bitumenske mješavine s porastom temperature pada za 52 %, s 5,23 MPa na 2,53 MPa. Tlačna čvrstoća C25 bila je stabilna i iznosila 36 MPa, dok je čvrstoća uvaljanog betona rasla s porastom temperature, dosegnuvši 15 MPa. Tlačna čvrstoća betona C25 bila je 14 puta veća od naprezanja vruće bitumenske mješavine odnosno šest puta veća od tlačne čvrstoće uvaljanog betona. Zato, a s obzirom na promet teških teretnih vozila, u usporedbi s asfaltnim kolnikom, kolnik od betona C25 i kolnik od uvaljanog betona mogu bolje podnijeti osovinska opterećenja. Iz navedenih rezultata vidljive su izvanredne karakteristike betona povezane s temperaturom i tlačnom čvrstoćom u usporedbi s karakteristikama vruće bitumenske mješavine.

Tablica 6. Promjene mehaničkih svojstava vruće bitumenske mješavine (HMA), betona (C25) i uvaljanog betona (RCC) u odnosu na referentnu temperaturu

Temperatura [°C]	HMA	Beton (C25)	RCC
20	1,00	1,00	1,00
30	0,66	0,97	1,18
40	0,55	1,004	1,17
50	0,48	0,99	1,23



Slika 16. Grafički prikaz temperaturnih karakteristika vruće bitumenske mješavine (HMA), betona (C25) i uvaljanog betona (RCC)

## 4. Zaključak

U ovome su radu istraženi uzroci i predložena rješenja problema prisutnih na asfaltnome kolniku autoceste Cizre – Silopi. Unatoč stalnim popravcima i obnovama stanje autoceste pogorša se prije nego što prođe ljeto, a zbog inzistiranja nadležnih tijela na primjeni vruće bitumenske mješavine pri izgradnji kolnika problem je postao kroničan. Ocijenjeno je stanje stare i novoizgrađene dionice autoceste, pri čemu je identificiran najčešći tip oštećenja kolnika. Prosječna godišnja temperatura u regiji je 26 do 27 °C, dosežući rekordne razine do 50 °C tijekom ljetnih mjeseci. U ovome istraživanju provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava uzoraka vruće bitumenske mješavine uzete iz novoizgrađenoga kolnika te uzoraka betona (C25) i uvaljanog betona pri temperaturnim vrijednostima od 20 °C, 30 °C, 40 °C i 50 °C. S obzirom na to da se 40 % opsega prometa na autocesti obavlja teškim teretnim vozilima velikih osovinskih opterećenja, izvedeni su sljedeći zaključci:

- Vruća bitumenska mješavina izgubila je otprilike 52 % stabilnosti po Marshallu pri rasponu temperature od 20 °C do 50 °C. Deformacija se povećala za otprilike 43 %, a ponašanje je postalo viskoznije. Kritični temperaturni prelazak za vruće bitumenske mješavine događa se između 20 °C i 30 °C, što upućuje na znatne promjene u ponašanju asfaltnoga kolnika kada je temperatura iznad prosječne. Ponašanje vrućih bitumenskih mješavina prelazi iz elastičnog u viskoelastično.
- Najčešća vrsta oštećenja starih i novih dijelova autoceste Cizre – Silopi su kolotrazi. S povećanjem temperature uzorci



vruće bitumenske mješavine postali su fluidniji i viskoziji. Dakle, s obzirom na temperaturu koja doseže do 50 °C tijekom cijele godine i činjenice da se 40 % opsega prometa na relevantnoj cesti obavlja teškim teretnim vozilima, navedeni čimbenici igraju veliku ulogu u stvaranju kolotruga.

- Promjene temperature nisu utjecale na beton (C25), a njegova mehanička svojstva ostala su stabilna pri temperaturama od 20 °C do 50 °C.
- Tlačna čvrstoća i nosivost kolnika od uvaljanog betona povećavaju se s povećanjem temperature.
- Osim što pokazuju bolju temperaturnu učinkovitost od vruće bitumenske mješavine, beton i uvaljani beton imaju znatno veću tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća vruće bitumenske mješavine s porastom temperature pada za 52 %, točnije s 5,23 MPa na 2,53 MPa. Suprotno tome, beton je zadržao tlačnu čvrstoću od 36 MPa, a uvaljani beton pokazao je povećanje tlačne čvrstoće, dosegnuvši 15 MPa s porastom temperature. Zato će, a s obzirom na teški teretni promet, betonski kolnik i kolnik od uvaljanog betona bolje podnijeti osovinska opterećenja u usporedbi s asfaltnim kolnikom.
- Visoke temperature u regiji i teška teretna vozila glavni su uzroci oštećenja kolnika od vruće bitumenske mješavine. Dok je bitumen osjetljiv na temperaturu i gubi čvrstoću, beton, koji ne gubi čvrstoću i čak pokazuje povećanu čvrstoću u slučaju uvaljanog betona, bolje je rješenje za cestovne površine.
- Primjena betona (C25) ili kolnika od uvaljanog betona umjesto vruće bitumenske mješavine znatno smanjuje štete uzrokovane temperaturom i teretnim vozilima, koje zahtijevaju kontinuirano održavanje i popravke, što pridonosi prednosti u smislu smanjenja troškova održavanja.

## LITERATURA

- [1] Hanson, C., Noland, R., Cavale, K.: Life-cycle greenhouse gas emissions of materials used in road construction, *Journal of Transportation Research Board*, 2287 (2012), pp. 174-181
- [2] Butt, A.A., Toller, S., Birgisson, B.: Life cycle assessment for the green procurement of roads: A way forward, *Journal of Cleaner Production*, 90 (2015), pp. 163-170
- [3] Ma, F., Sha, A., Lin, R., Huang, Y., Wang, C.: Greenhouse gas emissions from asphalt pavement construction: A Case Study in China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13 (2016), p. 351, <https://doi.org/10.3390/ijerph13030351>
- [4] Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H.H., Lee, S.: Quantifying the environmental burdens of the hot mix asphalt (HMA) pavements and the production of warm mix asphalt (WMA), *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (2016), pp. 190-201, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>
- [5] Gedik, A.: A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements, *Resources, Conservation & Recycling*, 161 (2020), p. 161, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104882>
- [6] Gedik, A., Selcuk, S., Lav, A.H.: Investigation of recycled fluorescent lamps waste as mineral filler in highway construction: A case of asphaltic pavement layers, *Resources, Conservation & Recycling*, 168 (2021), p. 105290, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105290>
- [7] Gedik, A., Ozcan, O., Ozcanan, S.: Recycling COVID-19 health care wastes in bitumen modification: A case of disposable medical gloves, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30 (2023), pp. 74977-74990, <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27488-y>
- [8] Özcanan, S., Akpınar, M.V.: Esnek üstyapılarda kritik tekerlek ve aks konfigürasyonlarının mekanistik analizlere göre tespit edilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 6625 (2014), p. 413
- [9] Gao, Y., Zhang, Y., Yang, Y., Zhang, J., Gu, F.: Molecular dynamics investigation of interfacial adhesion between oxidised bitumen and mineral surfaces, *Applied Surface Science*, 479 (2019), pp. 449-462, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.230>
- [10] Villalba Sanchis, I., Insa Franco, R., Martínez Fernández, P., Salvador Zuriaga, P., Font Torres, J.B.: Risk of increasing temperature due to climate change on high-speed rail network in Spain, *Transportation Research: Part D*, 82 (2020), pp. 102312, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102312>
- [11] Wang, F., Li, N., Hoff, I., Wu, S., Li, J., Barbieri, D.M., Zhang, L.: Characteristics of VOCs generated during production and construction of an asphalt pavement, *Transportation Research: Part D*, 87 (2020), p. 102517, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102517>
- [12] Blaauw, S.A., Maina, J.W., Mturi, G.A.J., Visser, A.T.: Flexible pavement performance and life cycle assessment incorporating climate change impacts, *Transportation Research: Part D*, 104 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103203>
- [13] Gao, Y., Zhang, Y., Zhang, C., Liu, X., Jing, R.: Quantifying oxygen diffusion in bitumen films using molecular dynamics simulations, *Construction and Building Materials*, 331 (2022), p. 127325, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127325>
- [14] Li, L., Gao, Y., Zhang, Y.: Crack length-based healing characterization of bitumen at different levels of cracking damage, *Journal of Cleaner Production*, 258 (2020), p. 120709, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120709>
- [15] Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Clark, G., Ge, Y.: Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation and planning, *Transportation Research: Part D*, 88 (2020), p. 102553, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102553>
- [16] Chen, X., Wang, H., Horton, R., DeFlorio, J.: Life-cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement, *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 91 (2021), p. 102697, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102697>
- [17] Zhang, C., Tan, Y., Zhang, L., Li, G., Zhang, J., Wang, Y.: Developing fragility curves for asphalt mixture to assess the uncertainty of the permanent deformation performance, *Construction and Building Materials*, 310 (2021), p. 125272, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125272>

- [18] Basit, A., Shafiee, M., Bashir, R., Perras, M.A.: Climate change and asphalt binder selection across Ontario: A quantitative analysis towards the end of the century, *Construction and Building Materials*, 361 (2022), p. 129682, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129682>
- [19] Elliot, T., Carter, A., Ghattuwar, S., Levasseur, A.: Environmental impacts of road pavement rehabilitation, *Transportation Research: Part D*, 118 (2023), p. 103720, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103720>
- [20] Meagher, W., Daniel, J.S., Jacobs, J., Linder, E.: Method for evaluating implications of climate change for design and performance of flexible pavements, *Transp. Res. Rec.*, 2305 (2012) 1., pp. 111-120
- [21] Underwood, B.S., Guido, Z., Gudipudi, P., Feinberg, Y.: Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise, *Nature Climate Change*, 7 (2017), <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3390>
- [22] Jitsangiam, P., Kumlai, S., Nikraz, H.: New theoretical framework for temperature-effect integration into asphalt concrete pavement life prediction with respect to Australian pavement conditions, *Road Materials and Pavement Design*, 23 (2022) 3, pp. 583-600, <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1834440>
- [23] Qiao, Y., Dawson, A.R., Parry, T., Flintsch, G.W.: Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and life-cycle costs, *Transportation Research: Part D*, 41 (2015), pp. 492-503, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.019>
- [24] Knott, J.F., Sias, J.E., Dave, E.V., Jacobs, J.M.: Seasonal and long-term changes to pavement life caused by rising temperatures from climate change, *Transp. Res. Rec.*, 2673 (2019) 6, pp. 267-278
- [25] Stoner, A.M.K., Daniel, J.S., Jacobs, J.M., Hayhoe, K., Scott-Fleming, I.: Quantifying the impact of climate change on flexible pavement performance and lifetime in the United States, *Transportation Research Record*, 2673 (2019) 1, pp. 110-122, <https://doi.org/10.1177/0361198118821877>
- [26] Mills, B.N., Tighe, S.L., Andrey, J., Smith, J.T., Huen, K.: Climate change implications for flexible pavement design and performance in Southern Canada, *J. Transp. Eng.*, 135 (2009) 10, pp. 773-782
- [27] Qiao, Y., Flintsch, G.W., Dawson, A.R., Parry, T.: Examining effects of climatic factors on flexible pavement performance and service life, *Transp. Res. Rec.*, 2349 (2013) 1, pp. 100-107
- [28] Gudipudi, P.P., Underwood, B.S., Zalghout, A.: Impact of climate change on pavement structural performance in the United States, *Transportation Research: Part D*, 57 (2017), pp. 172-184, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.022>
- [29] Bairgi, B.K., Tarefder, R.A., Ahmed, M.U.: Long-term rutting and stripping characteristics of foamed warm-mix asphalt (WMA) through laboratory and field investigation, *Construction and Building Materials*, 170 (2018), pp. 790-800, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.055>
- [30] Zhang, C., Tan, Y., Gao, Y., Fu, Y., Li, J., Li, S., Zhou, X.: Resilience assessment of asphalt pavement rutting under climate change, *Transportation Research: Part D*, 109 (2022), p. 103395, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103395>
- [31] Anupam, B.R., Sahoo, U.C., Chandrappa, A.K.: A methodological review on self-healing asphalt pavements, *Construction and Building Materials*, 321 (2022), p. 126395, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126395>
- [32] Gedik, A., Ozcan, O., Ozcanan, S.: Novel approaches and materials for healing asphalt cracks, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 9, pp. 907-917, <https://doi.org/10.14256/JCE.3721.2023>
- [33] Zhang, C., Wang, H., You, Z., Gao, J., Irfan, M.: Performance test on Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) modified asphalt based on the different evaluation methods, *Applied Sciences*, 9 (2019) 3, pp. 467, <https://doi.org/10.3390/app9030467>
- [34] Zhang, Y., Li, H., Zhang, Y., Zang, W., Yao, K.: Optimal prioritization of asphalt pavement maintenance using gray relation analysis and cost-benefit analysis, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 12, pp. 1155-1164, <https://doi.org/10.14256/JCE.3822.2023>
- [35] Pradena, M., Houben, L.: Influence of early-age behaviour on structural design of sustainable thinner concrete slabs, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 10, pp. 839-847, <https://doi.org/10.14256/JCE.2472.2018>
- [36] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Investigation of use potential of fiber added concretes as road pavement on weak soils, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 7, pp. 665-678, <https://doi.org/10.14256/JCE.3619.2022>
- [37] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Benefit-cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 23-37, <https://doi.org/10.14256/JCE.3570.2022>
- [38] Chen, X., Wang, L.: Temperature-water-load coupling study on stress characteristics of BFRP-CRCP pavement, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024). (3), 247-256, <https://doi.org/10.14256/JCE.3547.2022>
- [39] Pradena, M., Houben, L., César, A.: Experimental evaluation of load transfer efficiency of non-dowelled concrete pavements, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 3, pp. 179-187, <https://doi.org/10.14256/JCE.2844.2019>
- [40] American Association of State Highway Officials: AASHTO guide for the design of pavement structures, Washington, D.C., 1993., p. 403.
- [41] Marshall, C., Meier, R.W., Welsh, M.: Seasonal temperature effects on flexible pavements in Tennessee, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2001., pp. 89-96
- [42] Park, D., Buch, N., Chatti, K.: Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections, *Transportation Research Record*, 1764 (2001), pp. 97-112
- [43] Gang, Z.: Impacts of environmental factors on flexible pavements, Ph.D. thesis, University of Tennessee, Knoxville, 2003.
- [44] Kang, H., Zheng, Y., Cal, Y.: Regression analysis of actual measurement of temperature field distribution rules of asphalt pavement, *China Journal of Highway and Transport*, 20 (2007) 6, pp. 13 -18
- [45] Gang, Z., Eric, C., Roger W.: Environmental effects on the predicted service life of flexible pavements, *Journal of Transportation Engineering*, 133 (2007), pp. 47-56
- [46] Antonio, R.G., Maria, C.: Analysis of the temperature influence on flexible pavement deflection, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 3530-3539
- [47] Breakah, T., Williams, R., Herzmann, D., Takle, E.: Effects of using accurate climatic conditions for mechanistic-empirical pavement design, *Journal of Transportation Engineering*, 137 (2011) 1, pp. 84-90
- [48] YuanXun, Z., YingChun, C., YaMin, Z.: Study on temperature field of asphalt concrete pavement, *Emerging Technologies for Material, Design, Rehabilitation, and Inspection of Roadway Pavements*, Geotechnical Special Publication No. 218 © ASCE, 2011., pp. 266-273
- [49] El-Maaty, A.: Fatigue and rutting lives in flexible pavement, *Ain Shams Engineering Journal*, 3 (2012), pp. 367-374



- [50] Bayomy, F., El-Badawy, S., Awed, A.: Implementation of the MEPDG for flexible pavements in Idaho- Report No. FHWA-ID-12-193, National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho, Idaho, U.S., 2012.
- [51] Byram, D., Xiao, D.X., Wang, K.C.P., Hall, K.: Sensitivity analysis of climatic influence on MEPDG flexible pavement performance prediction, Proceedings of the Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Washington, D.C., 2012.
- [52] Li, Q., Mills, L., McNeil, S., Attoh-Okine, N.: Exploring the impact of climate change on pavement performance and design, Proceedings of the Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Paper No. 12-2096, 2012.
- [53] Flavio, V.S., Leandro, S.C.: Effect of temperature on the mechanical response of thermo-viscoelastic asphalt pavements, Construction and Building Materials, 30 (2012), pp. 574-582
- [54] Sascha, K., Frohmut, W.: Impact of surface temperature on fatigue damage in asphalt pavement, Journal of Highway and Transportation Research and Development, 7 (2013) 3, pp.1-6
- [55] Yaning, Q., Gerardo, W., Andrew, R., Tony P.: Examining the effects of climatic factors on flexible pavement performance and service life, Journal of the Transportation Research Board, 2349 (2013), <https://doi.org/10.3141/2349-12>.
- [56] Maha, A.E., Sherif, M.E., El-Sayed, A.S.: Development and impact of the Egyptian climatic conditions on flexible pavement performance, American Journal of Civil Engineering and Architecture, 2 (2014) 3, pp. 115-121
- [57] Mohammad, H.A., Medhat, M.H.: A mathematical model for the distribution of heat through pavement layers in Makkah roads, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 26 (2014), pp. 41-48
- [58] Saha, J., Nassiri S., Bayat, A., Soleymani, H.: Evaluation of the effects of Canadian climate conditions on the MEPDG predictions for flexible pavement performance, International Journal of Pavement Engineering, 15 (2014) 5, pp. 392-401
- [59] Fajing, Pan., Lei, W., Jinke, J., Wang, J.: A research review of flexible pavement temperature profile, Proceedings of The International forum on energy, Environment Science and Materials, 2015., pp. 724-727
- [60] Google Earth: <https://earth.google.com/web/search/Cizre>, [31.7.2023.]
- [61] Google Maps: <https://www.google.com/maps/dir/Cizre,+%C5%9E%C4%B1rnak/Silopi>, [31.7.2023.]
- [62] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM): <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikHacimHaritalari2022.aspx>, [31.7.2023.]
- [63] Meteoblue: [https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/cizre\\_turkey\\_318253](https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/cizre_turkey_318253), [31.7.2023.]
- [64] Zafra, M.: How concrete, asphalt and urban heat islands add to the misery of heat waves, Reuters, <https://www.reuters.com/graphics/CLIMATE-CHANGE/URBAN-HEAT/zgpormdkevdl/>, [31.7.2023.]
- [65] Courard, L., Michel, F., Delhez, P.: Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete, Construction and Building Materials, 24 (2010) 3, pp. 390-395
- [66] Shafigh, P., Hashemi, M., Nam, B.H., Asadi, I.: Laboratory comparison of roller-compacted concrete and ordinary vibrated concrete for pavement structures, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 2, pp. 127-137, <https://doi.org/10.14256/JCE.2572.2018>