

Cementom stabilizirani nosivi slojevi kolničkih konstrukcija s otpadnom gumom

Zvonarić, Matija

Doctoral thesis / Doktorski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:988282>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)




DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Doktorski studij Građevinarstvo

Doktorski rad

Cementom stabilizirani nosivi slojevi kolničkih konstrukcija s otpadnom gumom

Matija Zvonarić, mag. ing. aedif.

Osijek, 1. prosinca 2023. godine

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering

Doctoral dissertation

Cement bound base course with waste rubber in pavement structures

Matija Zvonarić, M. Sc. in Civ. Eng.

Osijek, December 1, 2023

Prosudbena povjerenstva i bibliografski podaci

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada imenovano na 2. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 16. studenoga 2022. godine:

1. Prof. dr. sc. Sanja Dimter, dipl. ing. građ, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (predsjednic)
2. Izv. prof. dr. sc. Ivana Barišić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (članica)
3. Doc. dr. sc. Sanja Šurdonja, dipl. ing. građ. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet (članica),

Tema, mentorica i komentor doktorskog rada prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 3. redovitoj sjednici održanoj 14. prosinca 2022. godine.

Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada

Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada imenovano na 14. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 13. rujna 2023. godine:

1. Doc. dr. sc. Martina Zagvozda, mag. ing. aedif., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (predsjednica)
2. Prof. dr. sc. Irena Ištoka Otković, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (članica)
3. Izv. prof. dr. sc. Sanja Šurdonja, dipl. ing. građ., Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet (članica)

Doktorski rad prihvaćen je odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 2. redovitoj sjednici održanoj 22. studenoga 2023. godine.

Povjerenstvo za obranu doktorskog rada

Povjerenstvo za obranu doktorskog rada imenovano na 2. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 22. studenoga 2023. godine:

1. Doc. dr. sc. Martina Zagvozda, mag. ing. aedif., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (predsjednica)
2. Prof. dr. sc. Irena Ištoka Otković, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (članica)
3. Izv. prof. dr. sc. Sanja Šurdonja, dipl. ing. građ., Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet (članica)
4. Izv. prof. dr. sc. Ivan Radić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (zamjenski član)
5. Izv. prof. dr. sc. Mario Galić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek (zamjenski član)

Doktorski rad javno je obranjen 1.12.2023. godine na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Doktorski rad sadržava 202 stranice, 118 ilustracija, 37 tablica i 166 citiranih publikacija.

Mentor doktorskog rada je izv. prof. dr. sc. Ivana Barišić, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Komentor doktorskog rada je doc. dr. sc. Tihomir Dokšanović, mag. ing. aedif., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Istraživanje u okviru doktorskog rada pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

Izjava o akademskoj čestitosti

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je doktorski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem kako nisam prijavio doktorski rad s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Osijek, 1.12.2023.

Matija Zvonarić, mag. ing. aedif.

Predgovor

Ovaj doktorski rad izrađen je u okviru Uspostavnog istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost pod nazivom *Cementom stabilizirani nosivi slojevi s otpadnom gumom za održive kolnike* oznake UIP-2019-04-8195. Područje istraživanja ovoga rada obuhvaća ispitivanje mogućnosti primjene otpadne gume u cementom stabiliziranom nosivom sloju kolnika s ciljem smanjenja nastanka reflektivnih pukotina. Dodatno, rad obuhvaća primjenu novih, nestandardnih metoda ispitivanja s ciljem proširenja znanja i metoda u testiranju ovoga materijala.

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Ivani Barišić i komentoru doc. dr. sc. Tihomiru Dokšanoviću na uloženom trudu, pomoći, korisnim savjetima, usmjeravanju i strpljenju prilikom izrade ovoga doktorskog rada.

Hvala mojoj zaručnici Lori i mojoj obitelji na strpljenju, podršci i razumijevanju.

Sažetak

Kako bi se osigurala nosivost kolničkih konstrukcija namijenjenih velikom prometnom opterećenju, u takve se konstrukcije ugrađuje sloj cementom stabiliziranoga zrnatog materijala, nazvan cementom stabilizirani nosivi sloj (CNS). No, dodatkom cementa zrnatom materijalu razvijaju se unutarnja vlačna naprezanja koja iniciraju nastanak pukotina. Te se pukotine, zbog velike krutosti i male deformabilnosti ovoga materijala, šire pod utjecajem dinamičkoga opterećenja izazvanoga prometovanjem vozila. Kao rezultat te pojave javljaju se pukotine na voznoj površini kolnika koje narušavaju sigurnost i udobnost vožnje te povećavaju troškove održavanja i skraćuju životni vijek kolničke konstrukcije. Takve se pukotine nazivaju reflektivne pukotine.

U ovom doktorskom radu ispitana je mogućnost primjene otpadne gume u CNS-u koja zbog svoje elastičnosti pokazuje potencijal za smanjenje razvoja unutarnjih naprezanja, a samim time i razvoja pukotina. Provedena su eksperimentalna ispitivanja mehaničkih svojstava 17 mješavina CNS-a s dvije frakcije otpadne gume i tri različite količine cementa. Osim provedbe ispitivanja mehaničkih svojstava mješavina uobičajenih prilikom karakterizacije CNS-a provedene su i kemijske analize sastava gumenoga agregata, analiza specifične površine čestica agregata, mikroskopska analiza i analiza skupljanja mješavina CNS-a. Osim razornih metoda ispitivanja na razini materijala primijenjene su i nerazorne metode (mjerenje brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa i digitalna stereo fotogrametrija s korelacijom digitalne slike). Ispitana je i ekološka prihvatljivost uporabe otpadne gume u ovom građevinskom proizvodu. Temeljem dobivenih rezultata razvijeni su modeli funkcijskoga odnosa između rezultata nerazornih i razornih metoda ispitivanja koji se mogu koristiti kao pouzdani predikcijski modeli za brzu karakterizaciju materijala. Za ispitane mješavine provedena je i numerička analiza u, za ovo područje, nespecializiranom i specializiranom računalnom alatu. Osim provođenja ispitivanja na razini materijala definirana je metodologija ispitivanja i analize rezultata ispitivanja na razini konstrukcije primjenom digitalne stereo fotogrametrije s korelacijom digitalne slike. Naposljetku, stvoren je sustav vrednovanja cementom stabiliziranih nosivih slojeva kolnika.

Ključne riječi

cementom stabilizirani nosivi sloj, otpadna guma, nerazorne metode ispitivanja, skupljanje, numerička analiza, analiza na razini konstrukcije, digitalna stereo fotogrametrija s korelacijom digitalne slike, ekološki utjecaj

Abstract

To ensure the load – bearing capacity of pavement structures intended for heavy traffic loads, a layer of cement – stabilized granular material, referred to as cement – bound base course (CBC), is incorporated into such structures. However, the addition of cement to the granular material introduces internal tensile stresses that initiate crack formation. These cracks propagate due to the high stiffness and low deformability of this material under the influence of dynamic traffic load. This phenomenon results in cracks on the pavement surface, compromising driving safety and comfort, increasing maintenance costs, and shortening the lifespan of the pavement structure. Such cracks are commonly referred to as reflective cracks.

This doctoral dissertation explores the possibility of utilizing waste rubber in CBC, which, due to its elasticity, exhibits potential to reduce the development of internal stresses and thus the formation of cracks. Experimental tests were conducted on the mechanical properties of 17 CBC mixtures, incorporating two fractions of waste rubber and three different cement quantities. In addition to characterizing the CBC mixtures through standard mechanical testing procedures, chemical analyses of the rubber aggregate's composition, analysis of the aggregate's specific surface area, microscopic analysis, and shrinkage analysis of the CBC mixtures were performed. Non – destructive test methods (ultrasonic pulse velocity measurement and digital stereo photogrammetry with digital image correlation) were also employed alongside destructive material testing methods. The environmental suitability of utilizing waste rubber in this construction product was assessed. Based on the obtained results, functional relationships between non – destructive and destructive testing results were developed, serving as reliable predictive models for fast material characterization. Numerical analysis of the investigated mixtures was carried out using both general – purpose and specialized computational tools. Besides material – level testing, a methodology for testing and analyzing results at the structure level using digital stereo photogrammetry with digital image correlation was defined. Ultimately, an evaluation system for cement – stabilized base course was formulated.

Key words

cement – stabilized base course, waste rubber, non – destructive testing methods, shrinkage, numerical analysis, structural – level analysis, digital stereo photogrammetry with digital image correlation, environmental impact

Sadržaj

PREDGOVOR.....	I
SAŽETAK.....	III
ABSTRACT	IV
SADRŽAJ	VI
POPIS SLIKA	X
POPIS TABLICA.....	XIV
POPIS KRATICA I SIMBOLA.....	XVI
1 UVOD.....	1
1.1 CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	3
1.2 HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA	3
1.3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	3
1.4 OČEKIVANI ZNANSTVENI DOPRINOS	5
2 PREGLED STANJA PODRUČJA	6
2.1 CEMENTOM STABILIZIRANI NOSIVI SLOJEVI.....	6
2.1.1 <i>Općenito</i>	6
2.1.2 <i>Čvrstoća CNS-a</i>	8
2.1.3 <i>Krutost CNS-a</i>	10
2.1.4 <i>Otpornost CNS-a na utjecaj smrzavice</i>	12
2.1.5 <i>Reflektivne pukotine</i>	13
2.2 OTPADNA GUMA.....	16
2.3 GUMA U CNS-U.....	19
2.3.1 <i>Receptura mješavine CNS-a s otpadnom gumom</i>	21
2.3.2 <i>Čvrstoća i krutost CNS-a s otpadnom gumom</i>	24
2.3.3 <i>Ekološki utjecaj otpadne gume</i>	26
2.3.4 <i>Zaključno</i>	27
3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	28
3.1 MATERIJALI.....	28
3.1.1 <i>Agregat</i>	28
3.1.2 <i>Vezivo</i>	31
3.1.3 <i>Gustoća</i>	31
3.2 ISPITIVANJA NA RAZINI MATERIJALA	31
3.2.1 <i>Proctorovi elementi</i>	31
3.2.2 <i>Izrada i njega ispitnih uzoraka</i>	33
3.2.3 <i>Tlačna čvrstoća</i>	34
3.2.4 <i>Neizravna vlačna čvrstoća</i>	36
3.2.5 <i>Otpornost na utjecaj smrzavice</i>	37

3.2.6	<i>Dinamički modul elastičnosti</i>	39
3.2.7	<i>Statički modul elastičnosti</i>	42
3.2.8	<i>Ispitivanje ekološkog utjecaja</i>	44
3.2.9	<i>Vizualna i kemijska analiza</i>	45
3.2.10	<i>Specifična površina čestica</i>	46
3.2.11	<i>Mjerenje skupljanja uzoraka</i>	47
3.3	ISPITIVANJA NA RAZINI KONSTRUKCIJE	49
3.3.1	<i>Nevezani nosivi sloj</i>	49
3.3.2	<i>Cementom stabilizirani nosivi sloj</i>	50
3.3.3	<i>Asfaltni sloj (AC 11 surf)</i>	52
3.3.4	<i>Simulacija prometnoga opterećenja</i>	53
3.4	ZAKLJUČNO	55
4	REZULTATI ISPITIVANJA NA RAZINI MATERIJALA	56
4.1	GUSTOĆA AGREGATA I CEMENTA	56
4.2	RECEPTURA MJEŠAVINA	56
4.3	PROCTOROVI ELEMENTI	61
4.4	TLAČNA ČVRSTOĆA	68
4.5	NEIZRAVNA VLAČNA ČVRSTOĆA	73
4.6	OTPORNOST NA UTJECAJ SMRZAVICE	80
4.7	DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI	83
4.8	STATIČKI MODUL ELASTIČNOSTI	88
4.9	SEM I EDS ANALIZA GUMENOG GRANULATA	92
4.10	EKOLOŠKI UTJECAJ	95
4.11	REZULTATI MJERENJA SKUPLJANJA UZORAKA	97
4.12	ZAKLJUČNO	99
5	KORELACIJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA MJEŠAVINA	100
5.1	KORELACIJA TLAČNIH ČVRSTOĆA NAKON 7, 28 I 90 DANA NJEGE	101
5.2	KORELACIJA NEIZRAVNIH VLAČNIH ČVRSTOĆA NAKON 7, 28 I 90 DANA	104
5.3	KORELACIJE TLAČNE I NEIZRAVNE VLAČNE ČVRSTOĆE	106
5.4	KORELACIJA DINAMIČKIH MODULA ELASTIČNOSTI NAKON 7, 28 I 90 DANA	108
5.5	KORELACIJA STATIČKOGA MODULA ELASTIČNOSTI NAKON 7, 28 I 90 DANA	110
5.6	KORELACIJA DINAMIČKOG I STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI	112
5.7	KORELACIJA BRZINE ULTRAZVUČNOG IMPULSA I TLAČNE ČVRSTOĆE MJEŠAVINE	116
5.8	KORELACIJA BRZINE ULTRAZVUČNOG IMPULSA I STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI	118
5.9	ZAKLJUČNO	121
6	REZULTATI ISPITIVANJA NA RAZINI KONSTRUKCIJE	122

6.1	ANALIZA PONAŠANJA SUSTAVA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE BEZ UPOTREBE DIGITALNE STEREO FOTOGRAFIJE.....	123
6.2	ANALIZA PONAŠANJA SUSTAVA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE KORIŠTENJEM DIGITALNE STEREO FOTOGRAFIJE.....	129
6.3	VIZUALNA ANALIZA DEFORMACIJA SUSTAVA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE	135
6.4	VEZA VERTIKALNIH DEFORMACIJA I MEHANIČKIH SVOJSTAVA CEMENTOM STABILIZIRANOG NOSIVOG SLOJA	149
6.5	ZAKLJUČNO	152
7	ANALIZA NAPREZANJA I DEFORMACIJA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE RAČUNALNIM ALATIMA	153
7.1	ANALIZA U RAČUNALNOM PROGRAMU CIRCLY 6.0.	158
7.2	ANALIZA U RAČUNALNOM PROGRAMU ANSYS	163
7.3	VERIFIKACIJA REZULTATA DOBIVENIH RAČUNALNIM PROGRAMIMA CIRCLY 6.0 I ANSYS	171
7.4	ZAKLJUČNO	173
8	VREDNOVANJE CEMENTOM STABILIZIRANOG NOSIVOG SLOJA S OTPADNOM GUMOM.....	174
8.1	ZAKLJUČNO	177
9	ZAKLJUČAK I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA.....	179
9.1	ZAKLJUČAK.....	179
9.2	SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA.....	184
	BIBLIOGRAFIJA.....	185

Popis slika

SLIKA 2.1. TRI TIPA OTKAZIVANJA STRUKTURE CEMENTOM STABILIZIRANOG NOSIVOG SLOJA: OTKAZIVANJE CEMENTNE PASTE; B) KLIZANJE AGREGATA I C) LOM AGREGATA [23]	10
SLIKA 2.2. KARTA MINIMALNE TEMPERATURE ZRAKA [°C] ZA POVRATNO RAZDOBLJE 50 GODINA [30]	12
SLIKA 2.3. RAZVOJ REFLEKTIVNIH PUKOTINA [49]	15
SLIKA 2.4. POŽAR NA ODLAGALIŠTU OTPADNIH GUMA U BLIZINI OSIJEKA 2023. GODINE [50]	16
SLIKA 2.5. PRIMJENA RAZLIČITIH POLITIKA GOSPODARENJA OTPADOM U EUROPI [54]	17
SLIKA 2.6. SASTAV AUTOMOBILSKE GUME [58]	18
SLIKA 2.7. OBLIK I VELIČINA OBRADENE GUME NA TRŽIŠTU REPUBLIKE HRVATSKE [65]	19
SLIKA 3.1. RASPON ODGOVARAJUĆEG GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA CNS-A PREMA OTU [3]	28
3.2. PRIRODNI AGREGAT	29
3.3. SLOG SITA	30
3.4. GUMENI AGREGAT	30
SLIKA 3.5. OPREMA ZA IZRADU UZORAKA CNS-A: A) KALUP S MATERIJALOM; B) POSTUPAK ZBIJANJA	32
SLIKA 3.6. IZRAĐENI UZORCI CNS-A: A) UZORAK ZBIJEN U KALUPU; B) ISTISKIVANJE UZORKA; C) NJEGA UZORAKA	34
SLIKA 3.7. STANDARDNI UZORCI PRILIKOM ISPITIVANJA TLAČNE ČVRSTOĆE: A) ISPITIVANJE TLAČNE ČVRSTOĆE UZORKA; B) KARAKTERISTIČNI LOM UZORKA	35
SLIKA 3.8. PRIHVATLJIVI OBLICI LOMA UZORAKA PREMA NORMI EN 13286 – 41 [16]	35
SLIKA 3.9. STANDARDNI UZORCI PRILIKOM ISPITIVANJA NEIZRAVNE VLAČNE ČVRSTOĆE: A) ISPITIVANJE NEIZRAVNE VLAČNE ČVRSTOĆE UZORKA; B) KARAKTERISTIČAN LOM UZORKA	37
SLIKA 3.10. UZORCI POTOPLJENI U VODU I OTOPINU NATRIJEVOG KLOORIDA	38
SLIKA 3.11. TEMPERATURNI PROFIL PREMA HRS CEN/TS 13286 – 54 [102]	38
SLIKA 3.12. ODREĐIVANJE DIMENZIJA I MASE UZORKA	40
SLIKA 3.13. MJERENJE BRZINE ULTRAZVUČNOG IMPULSA	41
SLIKA 3.14. SUSTAV GOM ARAMIS ZA DIGITALNU STEREO FOTOGRAMETRIJU	42
SLIKA 3.15. UZORAK PRIPREMLJEN ZA ISPITIVANJE STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI	44
SLIKA 3.16. POSTUPAK PRIPREME ELUATA	45
SLIKA 3.17. PRETRAŽNI ELEKTRONSKI MIKROSKOP (ENG. SCANNING ELECTRONE MICROSCOPE – SEM)	46
SLIKA 3.18. UREĐAJ ZA ODREĐIVANJE SPECIFIČNE POVRŠINE MATERIJALA BET METODOM	47
SLIKA 3.19. MJERENJE SKUPLJANJA UZORKA	48
SLIKA 3.20. GRANIČNO PODRUČJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA NEVEZANOG NOSIVOG SLOJA PREMA OTU [3]	49
SLIKA 3.21. NEVEZANI NOSIVI SLOJ	50
SLIKA 3.22. PLOČE CNS – A: A) KALUP ZA IZRADU PLOČA CNS-A; B) MATERIJU UGRAĐEN U KALUP; C) DRUGA FAZA NJEGA UZORAKA	51
SLIKA 3.23. PLOČE CNS-A NAKON 28-DNEVNE NJEGE	52
SLIKA 3.24. A) VALJKASTI ZBIJAČ ZA IZRADU ASFALTNIH PLOČA; B) ASFALTNA PLOČA	52
SLIKA 3.25. SUSTAV KOLNIČKE KONSTRUKCIJE	53

SLIKA 3.26. KONTAKTNA POVRŠINA PNEUMATIK - ASFALNI ZASTOR [119].....	54
SLIKA 4.1. GRANULOMETRIJSKI SASTAV PRIRODNOG AGREGATA	57
SLIKA 4.2 GRANULOMETRIJSKI SASTAV GUMENOG AGREGATA	58
SLIKA 4.3. GRANULOMETRIJSKI SASTAV REFERENTNIH MJEŠAVINA I MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM	59
SLIKA 4.4. GRANULOMETRIJSKI SASTAV REFERENTNIH MJEŠAVINA I MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA.....	59
SLIKA 4.5. OPTIMALNA VLAŽNOST REFERENTNIH MJEŠAVINA I MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM.....	62
SLIKA 4.6. OPTIMALNA VLAŽNOST MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA	63
SLIKA 4.7. SEM ANALIZA ČESTICA: A) PIJESKA; B) GUMENOG GRANULATA; C) GUMENIH NITI	65
SLIKA 4.8. MAKSIMALNA SUHA PROSTORNA MASA REFERENTNIH MJEŠAVINA I MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM	66
SLIKA 4.9. MAKSIMALNA SUHA PROSTORNA MASA MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA	66
SLIKA 4.10. POLOŽAJ ČESTICA: A) GUMENOG GRANULATA I B) GUMENIH NITI U MATRICI MJEŠAVINE [65].....	67
SLIKA 4.11. TLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 7 DANA	70
SLIKA 4.12. TLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 28 DANA	71
SLIKA 4.13. TLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 90 DANA	71
SLIKA 4.14. TLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA NAKON 7, 28 I 90 DANA.....	72
SLIKA 4.15. NEIZRAVNA VLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 7 DANA.....	75
SLIKA 4.16. NEIZRAVNA VLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 28 DANA.....	75
SLIKA 4.17. NEIZRAVNA VLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 90 DANA.....	76
SLIKA 4.18. NEIZRAVNA VLAČNA ČVRSTOĆA MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA NAKON 7, 28 I 90 DANA.....	76
SLIKA 4.19. OMJER VLAČNE I TLAČNE ČVRSTOĆE MJEŠAVINA S GUMENIM GRANULATOM	79
SLIKA 4.20. OMJER VLAČNE I TLAČNE ČVRSTOĆE MJEŠAVINE S GUMENIM NITIMA	79
SLIKA 4.21. FAKTOR OTPORNOSTI NA SMRZAVANJE MJEŠAVINA S GUMENIM GRANULAMA	82
SLIKA 4.22. FAKTOR OTPORNOSTI NA SMRZAVANJE MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA	82
SLIKA 4.23. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 7 DANA	85
SLIKA 4.24. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 28 DANA	86
SLIKA 4.25. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 90 DANA	86
SLIKA 4.26. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA NAKON 7, 28 I 90 DANA	87
SLIKA 4.27. STATIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 7 DANA	90
SLIKA 4.28. STATIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 28 DANA	90
SLIKA 4.29. STATIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM NAKON 90 DANA	91
SLIKA 4.30. STATIČKI MODUL ELASTIČNOSTI MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA NAKON 7, 28 I 90 DANA	91
SLIKA 4.31. ODNOS ČESTICE A) GUMENOG GRANULATA I B) GUMENE NITI S OSTATKOM AGREGATA U MJEŠAVINI	93
SLIKA 4.32. ENERGETSKI DISPERZIJSKI SPEKTAR ČESTICE GUME	94
SLIKA 4.33. SEM SLIKA CINKOVOG OKSIDA	95
SLIKA 4.34. REZULTATI MJERENJA VOLUMNOG SKUPLJANJA MJEŠAVINA S 5% CEMENTA	98
SLIKA 5.1. KORELACIJE TLAČNIH ČVRSTOĆA ZA RAZLIČITA VREMENA NJEGE	103
SLIKA 5.2. KORELACIJE NEIZRAVNIH VLAČNIH ČVRSTOĆA ZA RAZLIČITA VREMENA NJEGE.....	105
SLIKA 5.3. KORELACIJA TLAČNIH I NEIZRAVNIH VLAČNIH ČVRSTOĆA	107

SLIKA 5.4. KORELACIJE DINAMIČKIH MODULA ELASTIČNOSTI ZA RAZLIČITA VREMENA NJEGE	109
SLIKA 5.5. KORELACIJE STATIČKIH MODULA ELASTIČNOSTI ZA RAZLIČITA VREMENA NJEGE	111
SLIKA 5.6. KORELACIJA DINAMIČKOG I STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI.....	113
SLIKA 5.7. KORELACIJA DINAMIČKOG I STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI S OBZIROM NA UDIO CEMENTA	115
SLIKA 5.8. KORELACIJA BRZINE ULTRAZVUČNOG IMPULSA I TLAČNE ČVRSTOĆE TRANSFORMIRANE PRIRODNIM LOGARITMOM	117
SLIKA 5.9. KORELACIJA BRZINE ULTRAZVUČNOG IMPULSA I STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI TRANSFORMIRANOG PRIRODNIM LOGARITMOM	119
SLIKA 6.1. ODNOS UNOSA SILE I POMAKA TRAVERZE ZA MJEŠAVINU C3R20.....	124
SLIKA 6.2. ODNOS UNOSA SILE I POMAKA TRAVERZE ZA MJEŠAVINU C5R20.....	125
SLIKA 6.3. ODNOS UNOSA SILE I POMAKA TRAVERZE ZA MJEŠAVINU C7R20.....	125
SLIKA 6.4. OSTVARENI POMAK ZA SVAKI INTERVAL OPTEREĆENJA ZA REFERENTNE MJEŠAVINE	126
SLIKA 6.5. OSTVARENI POMAK ZA SVAKI INTERVAL OPTEREĆENJA ZA MJEŠAVINE S 10% GRANULIRANE GUME .	126
SLIKA 6.6. OSTVARENI POMAK ZA SVAKI INTERVAL OPTEREĆENJA ZA MJEŠAVINE S 20% GRANULIRANE GUME .	126
SLIKA 6.7. OSTVARENI POMAK ZA SVAKI INTERVAL OPTEREĆENJA ZA MJEŠAVINE S 30% GRANULIRANE GUME .	127
SLIKA 6.8. OSTVARENI POMAK ZA SVAKI INTERVAL OPTEREĆENJA ZA MJEŠAVINE S 40% GRANULIRANE GUME .	127
SLIKA 6.9. OSTVARENI POMAK ZA SVAKI INTERVAL OPTEREĆENJA ZA MJEŠAVINE S GUMENIM NITIMA.....	127
SLIKA 6.10. RASPON DEFORMACIJA MJEŠAVINA S 3% CEMENTA I GUMENIM GRANULATOM	132
SLIKA 6.11. RASPON DEFORMACIJA MJEŠAVINA S 5% CEMENTA I GUMENIM GRANULATOM	132
SLIKA 6.12. RASPON DEFORMACIJA MJEŠAVINA SA 7% CEMENTA I GUMENIM GRANULATOM.....	133
SLIKA 6.13. RASPON DEFORMACIJA MJEŠAVINA SA 7% CEMENTA I GUMENIM NITIMA.....	133
SLIKA 6.14. LOM KONSTRUKCIJE USLIJED PONAVLJAJUĆEG OPTEREĆENJA	136
SLIKA 6.15. LOM CNS-A S 3% CEMENTA I: A) 0% GUME; B) 20% GUME I C) 40% GUMENOG GRANULATA.....	137
SLIKA 6.16. IZMJERENE DEFORMACIJE SUSTAVA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE S CNS-OM S 40% GUMENOG GRANULATA I 3% CEMENTA	138
SLIKA 6.17. LOM CNS-A S 5% CEMENTA I: A) 0% GUME; B) 30% GUME I C) 40% GUMENOG GRANULATA.....	139
SLIKA 6.18. IZMJERENE DEFORMACIJE SUSTAVA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE S CNS - OM S 30% GUMENOG GRANULATA I 5% CEMENTA	141
SLIKA 6.19. LOM CNS – A SA 7% CEMENTA I: A) 0% GUME; B) 30% GUME I C) 40% GUMENOG GRANULATA	142
SLIKA 6.20. IZMJERENE DEFORMACIJE SUSTAVA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE S CNS-OM S 30% GUMENOG GRANULATA I 7% CEMENTA	144
SLIKA 6.21. PLOČA CNS-A SA 7% CEMENTA I 5% GUMENIH NITI NAKON 4 CIKLUSA OPTEREĆENJA	145
SLIKA 6.22. IZMJERENE DEFORMACIJE SUSTAVA KOLNIČKE KONSTRUKCIJE S CNS-OM S 5% GUMENIH NITI I 7% CEMENTA.....	147
SLIKA 6.23. RASPODJELA VERTIKALNIH POMAKA NA KRAJU 4. CIKLUSA ZA MJEŠAVINE: A) C7R0; B) C7R20 I C) C7R40.....	148
SLIKA 6.24. ODNOS TLAČNE ČVRSTOĆE I POMAKA NAKON SVA 4 CIKLUSA OPTEREĆENJA I RASTEREĆENJA	149
SLIKA 6.25. ODNOS NEIZRAVNE VLAČNE ČVRSTOĆE I POMAKA NAKON SVA 4 CIKLUSA OPTEREĆENJA I RASTEREĆENJA.....	150

SLIKA 6.26. ODNOS DINAMIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI I POMAKA NAKON SVA 4 CIKLUSA OPTEREĆENJA I RASTEREĆENJA	150
SLIKA 6.27. ODNOS STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI I POMAKA NAKON SVA 4 CIKLUSA OPTEREĆENJA I RASTEREĆENJA	151
SLIKA 7.1. KARAKTERISTIČAN PRESJEK KOLNIČKE KONSTRUKCIJE S PARAMETRIMA ANALIZE PONAŠANJA KONSTRUKCIJE	154
SLIKA 7.2. USVOJENA KOLNIČKA KONSTRUKCIJA [CM].....	155
SLIKA 7.3. INICIJALNA NAPREZANJA U MJEŠAVINAMA S 3% CEMENTA (CIRCLY 6.0)	158
SLIKA 7.4. INICIJALNA NAPREZANJA U MJEŠAVINAMA S 5% CEMENTA (CIRCLY 6.0)	159
SLIKA 7.5. INICIJALNA NAPREZANJA U MJEŠAVINAMA SA 7% CEMENTA (CIRCLY 6.0)	159
SLIKA 7.6. INICIJALNA NAPREZANJA U MJEŠAVINAMA S GUMENIM NITIMA (CIRCLY 6.0)	160
SLIKA 7.7. CDF MJEŠAVINA S GRANULIRANOM GUMOM (CIRCLY 6.0)	162
SLIKA 7.8. CDF MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA (CIRCLY 6.0).....	162
SLIKA 7.9. KREIRANI MODEL KOLNIČKE KONSTRUKCIJE.....	166
SLIKA 7.10. PRIKAZ KONTAKTNE PLOHE RASPODJELE NAPREZANJA UNUTAR SLOJEVA.....	167
SLIKA 7.11. INICIJALNA VLAČNA NAPREZANJA MJEŠAVINA S 3% CEMENTA (ANSYS).....	168
SLIKA 7.12. INICIJALNA VLAČNA NAPREZANJA MJEŠAVINA S 5% CEMENTA (ANSYS).....	168
SLIKA 7.13. INICIJALNA VLAČNA NAPREZANJA MJEŠAVINA SA 7% CEMENTA (ANSYS).....	169
SLIKA 7.14. INICIJALNA VLAČNA NAPREZANJA MJEŠAVINA S GUMENIM NITIMA (ANSYS)	169
SLIKA 7.15. VEZA IZMEĐU NAPREZANJA U CNS-U IZRAČUNATIH POMOĆU DVA RAČUNALNA PROGRAMA	172

Popis tablica

2.1. ZAHTJEVANA TLAČNA ČVRSTOĆA STABILIZACIJSKIH MJEŠAVINA PREMA OTU [3]	8
2.2. REZULTATI TLAČNE, NEIZRAVNE VLAČNE I ČVRSTOĆE NA SAVIJANJE CNS-A DRUGIH ISTRAŽIVAČA	9
2.3. SASTAV MJEŠAVINA CNS-A S OTPADNOM GUMOM DRUGIH ISTRAŽIVAČA	21
2.4. REZULTATI TLAČNE, NEIZRAVNE VLAČNE I ČVRSTOĆE NA SAVIJANJE CNS-A S OTPADNOM GUMOM DRUGIH ISTRAŽIVAČA	25
3.1. KARAKTERISTIČNE VRIJEDNOSTI MEHANIČKIH, FIZIKALNIH I KEMIJSKIH SVOJSTAVA CEMENTA	31
4.1. GUSTOĆE KORIŠTENIH MATERIJALA	56
4.2. MASENI UDIO FRAKCIJA AGREGATA U MJEŠAVINAMA	60
4.3. VOLUMNI UDIO FRAKCIJA AGREGATA U MJEŠAVINAMA	60
4.4. OZNAKE PROJEKTIRANIH MJEŠAVINA	61
4.5. PROCTOROVI ELEMENTI PROJEKTIRANIH MJEŠAVINA	61
4.6. TLAČNA ČVRSTOĆA ISPITANIH MJEŠAVINA	68
4.7. NEIZRAVNA VLAČNA ČVRSTOĆA ISPITANIH MJEŠAVINA	73
4.8. UDIO VLAČNE U TLAČNOJ ČVRSTOĆI	77
4.9. OTPORNOST MJEŠAVINA NA UTJECAJ SMRZAVICE	80
4.10. BRZINA ULTRAZVUČNOG IMPULSA	83
4.11. DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI ISPITANIH MJEŠAVINA	84
4.12. STATIČKI MODUL ELASTIČNOSTI ISPITANIH MJEŠAVINA	89
4.13. ENERGETSKO-DISPERZIJSKA SPEKTROMETRIJSKA ANALIZA GUME	94
4.14. REZULTATI ISPITIVANJA ELUATA	96
4.15. REZULTATI MJERENJA VOLUMNOG SKUPLJANJA MJEŠAVINA S 5% CEMENTA	97
5.1. CHADDOKOVA LJESTVICA JAKOSTI VEZE	101
5.2. PARAMETRI KORELACIJA TLAČNIH ČVRSTOĆA	103
5.3. PARAMETRI KORELACIJA NEIZRAVNIH VLAČNIH ČVRSTOĆA	106
5.4. PARAMETRI KORELACIJA TLAČNE I NEIZRAVNE VLAČNE ČVRSTOĆE	107
5.5. PARAMETRI KORELACIJA DINAMIČKIH MODULA ELASTIČNOSTI ZA RAZLIČITA VREMENA NJEGE	109
5.6. PARAMETRI KORELACIJE STATIČKIH MODULA ELASTIČNOSTI ZA RAZLIČITA VREMENA NJEGE	111
5.7. PARAMETRI KORELACIJE DINAMIČKOG I STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI	113
5.8. PARAMETRI KORELACIJE DINAMIČKOG I STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI S OBZIROM NA KOLIČINU CEMENTA	115
5.9. PARAMETRI KORELACIJE BRZINE ULTRAZVUČNOG IMPULSA I TRANSFORMIRANE TLAČNE ČVRSTOĆE	117
5.10. PARAMETRI KORELACIJE BRZINE ULTRAZVUČNOG IMPULSA I PRIRODNOG LOGARITMA STATIČKOG MODULA ELASTIČNOSTI	120
6.1. PROSJEČNI VERTIKALNI POMACI ASFALTNE PLOČE NA KRAJU SVAKOG CIKLUSA OPTEREĆENJA I RASTEREĆENJA	131
7.1. MEHANIČKE KARAKTERISTIKE MATERIJALA ZA RAZLIČITA RAZDOBLJA	156
7.2. RASPODJELA PROMETNOG OPTEREĆENJA ZA RAZLIČITA RAZDOBLJA	156
7.3. KUMULATIVNI FAKTOR OŠTEĆENJA CNS – A (CIRCLY 6.0)	161

7.4. KUMULATIVNI FAKTOR OŠTEĆENJA CNS-A (ANSYS).....	171
8.1. SUSTAV VREDNOVANJA MJEŠAVINA CNS-A S OTPADNOM GUMOM.....	176
8.2. KARAKTERISTIKE MJEŠAVINA KOJE ZADOVOLJAVAJU UVJETE PREMA OTU [3].....	177

Popis kratica i simbola

ELT	<i>End of Life Tyre</i>
CNS	cementom stabilizirani nosivi sloj
E_{st}	statički modul elastičnosti
E_{din}	dinamički modul elastičnosti
OTU	opći tehnički uvjeti za radove na cestama
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
W_{opt}	optimalna vlažnost
ρ_{dmax}	maksimalna suha prostorna masa
W	udio vode
f_c	tlačna čvrstoća
F	najveća sila izmjerena pri opterećenju uzorka
A_c	površina baze uzorka
f_{it}	neizravna vlačna čvrstoća
H	visina uzorka
D	promjer uzorka
RTF	<i>resistance to frost</i>
f_{cA}	tlačna čvrstoća uzorka izloženoga ciklusima smrzavanja
f_{cB}	tlačna čvrstoća kontrolnoga uzorka
v	brzina ultrazvučnoga impulsa
L	duljina uzorka
T	vrijeme prolaska impulsa kroz uzorak
ν	Poissonov omjer u elastičnom stanju
3D DIC	<i>3D Digital Image Correlation</i>
LVDT	linearni varijabilni diferencijalni transformator
F_r	najveća zabilježena sila pri ispitivanju statičkoga modula elastičnosti
ϵ_3	uzdužni pomak uzorka pri sili $0.3F_r$
pH	mjera kiselosti ili lužnatosti otopine
EDS	<i>Energy – dispersive spectrometry</i>
SSA	<i>Specific Surface Area</i>
BET	Brunauer, Emmet i Teller
CBR	<i>California Bearing Ratio (hrv. kalifornijski indeks nosivosti)</i>
AC 11 surf	mješavina asfaltbetona namijenjena habajućem sloju nominalne veličine zrna 11 mm
3σ	3sigma područje

UPV	<i>ultrasonic pulse velocity (hrv. brzina ultrazvučnoga impulsa)</i>
R^2	koeficijent determinacije
ε	multiplikativna greška relacije

1 UVOD

Izgradnja cesta namijenjenih velikom prometnom opterećenju tehnološki je i financijski zahtjevan proces. Izgradnjom takvih cesta troše se velike količine kvalitetnoga prirodnog materijala. U današnje vrijeme, kada se nastoji povezati sva značajnija središta Europe prometnom infrastrukturom, potrebno je odgovorno pristupiti izgradnji cesta, odnosno iskorištavanju prirodnih dobara. Europska unija u sklopu Transeuropske prometne mreže (Trans-European Transport Network TEN – T) osim povezivanja važnih europskih središta ovim projektom nastoji ojačati socijalnu, ekonomsku i teritorijalnu koheziju unutar Unije [1]. Tom inicijativom planirana je izgradnja devet prometnih koridora unutar Europske unije do 2030. godine. Izgradnja takvih velikih projekata izaziva motivaciju za istraživanjem i unapređenjem postojećih znanja, materijala i tehnologija u području cestogradnje. Cestovni pravci koji su namijenjeni ponajviše za razmjenu dobara podrazumijevaju veliko prometno opterećenje, koje pak zahtijeva kolničku konstrukciju sposobnu preuzeti i prenijeti takvo opterećenje na temeljno tlo. Dovoljna nosivost kolničke konstrukcije osigurava se, između ostaloga, nosivim slojem vezanim hidrauličnim vezivom. Osim povećanja nosivosti kolničke konstrukcije ovaj sloj pruža i zadovoljavajuću ravnost za polaganje asfaltnih slojeva te sprečava ispumpavanje materijala iz slabonosivoga tla. Najčešće korištena hidraulična veziva u cestogradnji jesu cement i vapno. Dok se vapno uglavnom koristi za stabilizaciju glinovitih materijala, za stabilizaciju nekoherentnoga materijala koristi se cement. Sloj hidrauličnim vezivom vezanoga materijala ističe se po svojoj čvrstoći i velikoj nosivosti [2], a obično se polaže između nevezanoga nosivog sloja i asfaltnih slojeva [3]. Kako je prema *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama, Knjiga III* [3] propisano, materijali pogodni za ugradnju u kolničku konstrukciju jesu kamen, šljunak i pijesak dobiveni različitim procesima. Stoga se glina ne ugrađuje u kolničku konstrukciju pa vapno samim time nije zastupljeno prilikom stabilizacije nosivoga sloja.

Korištenje cementa za stabilizaciju nosivoga sloja ima, dakako, i svoje nedostatke. Najizraženiji je nedostatak razvoj unutarnjih naprezanja koja nastaju uslijed skupljanja materijala koje je pak rezultat hidratacije cementa. Kada unutarnja naprezanja dosegnu kritičnu vrijednost, dolazi do razvoja pukotina. Pukotine nastale na taj način šire se pod utjecajem dinamičkoga prometnog opterećenja i vremenskih uvjeta. Utjecaj vremenskih uvjeta najvidljiviji je u zimskom razdoblju kada se procijeđena voda pod utjecajem niskih temperatura smrzava, pri čemu povećava svoj

volumen i na taj način razara unutarnje veze u stabiliziranom sloju. Često je u zimskom razdoblju u procijeđenoj vodi prisutan natrijev klorid (NaCl) kao sredstvo za sprečavanje poledice što, također, negativno utječe na unutarnju strukturu mješavine. Pod utjecajem tih činitelja pukotine se šire do ruba stabiliziranoga sloja gdje se u vrhu pukotine koncentriraju naprezanja koja u kritičnom trenutku preuzimaju gornji asfaltni slojevi. Uslijed preuzimanja nepredviđenih naprezanja u asfaltnom sloju nastaju pukotine za koje se tvrdi da se reflektiraju s donjega sloja te pod utjecajem istih činitelja propagiraju sve do vozne površine kolnika. Kao rezultat pojavljuju se pukotine na voznoj površini kolnika koje narušavaju razinu sigurnosti i udobnosti vožnje te skraćuju životni vijek kolničke konstrukcije. Vozna površina oštećena na taj način izaziva i veće troškove održavanja, prijevremenu rekonstrukciju te povećava ekološku cijenu izvedene dionice.

Potencijal za sprečavanje ove negativne pojave leži u novim materijalima koji imaju mogućnost smanjenja unutarnjih naprezanja u cementom stabiliziranom nosivom sloju. Upravo takav potencijal ima otpadna guma (eng. *End of Life Tyre – ELT*), čije korištenje u nosivim slojevima kolnika ima i ekološku prednost. Korištenjem toga materijala smanjuje se količinu otpada koji je potrebno zbrinuti na odgovarajući način, a uz to smanjuje se i upotrebu kvalitetnoga prirodnog materijala. U Republici Hrvatskoj postupanje s otpadnom gumom regulirano je *Zakonom o gospodarenju otpadom* NN 84/2021 [4], *Pravilnikom o gospodarenju otpadom* NN 81/2020 [5] te *Pravilnikom o gospodarenju otpadnim gumama* NN 113/16 [6] kojima je zabranjeno odlaganje otpadnih guma na odlagalištima otpada te koji za ciljeve postavljaju:

- osigurati sustavno odvojeno sakupljanje otpadnih guma
- osigurati obradu svih odvojeno sakupljenih guma
- osigurati recikliranje najmanje 80% mase odvojeno sakupljenih guma

Prema *Izvešću o gospodarenju otpadnim vozilima i otpadnim gumama* za 2021. godinu [7] te je godine na tržište Republike Hrvatske stavljeno 33.731 t guma, sakupljeno ih je 26.022 t, a uporabljeno je 20.848 t. U spomenutom *Izvešću* vidljiv je stalan rast guma stavljenih na tržište, odvojeno sakupljenih te uporabljenih guma s iznimkom 2020. godine kada je uslijed pandemije virusa COVID-19 došlo do smanjenja broja guma stavljenih na tržište, pri čemu je broj odvojeno sakupljenih i uporabljenih guma rastao.

Društveno je odgovorno tražiti načine zbrinjavanja otpadnoga materijala, čuvanja prirodnih resursa te čuvanja javnih financijskih resursa, što će i biti tema ovoga doktorskog rada.

1.1 Ciljevi istraživanja

Ciljevi doktorskoga rada:

- utvrditi utjecaj otpadne gume na mehanička svojstva CNS-a pri zamjeni određenoga udjela prirodnoga pijeska u agregatu mješavine
- definirati sustav vrednovanja svojstava CNS-a s otpadnom gumom
- na temelju istraživanja mješavina s otpadnom gumom razviti model korelacije između rezultata nerazornih i razornih metoda ispitivanja
- istražiti utjecaj otpadne gume na mehanizme sloma i tijek razvoja pukotina CNS-a na razini sloja ugrađenoga u kolničku konstrukciju primjenom digitalne stereo fotogrametrije (3D-DIC)
- detektirati potencijalno negativan utjecaj primjene otpadne gume u CNS-u na okoliš

1.2 Hipoteze istraživanja

Postavljene su dvije hipoteze istraživanja, a one glase:

H1: Zamjenom prirodnoga pijeska otpadnom gumom moguće je izraditi CNS kolničke konstrukcije zadovoljavajućih mehaničkih svojstava.

H2: Upotreba otpadne gume u CNS-u kolničke konstrukcije tehnološki je i ekološki opravdana.

1.3 Metodologija istraživanja

Istraživanje u okviru doktorskoga rada obuhvatit će:

- pregled dosadašnjih spoznaja u području istraživanja primjene otpadne gume u CNS-u kolničkih konstrukcija
- eksperimentalni dio:
 - na razini materijala (cementom stabilizirane mješavine agregata)
 - na razini sloja ugrađenoga u CNS kolničke konstrukcije
- definiranje sustava vrednovanja svojstava CNS-a s otpadnom gumom

Pregled dosadašnjih spoznaja obuhvatit će pregled dostupne literature o metodama ispitivanja CNS-a s osvrtom na suvremene metode ispitivanja. Uz to, ovaj dio rada obuhvaća pregled provedenih istraživanja o načinima i mogućnostima primjene otpadne gume u cementom stabiliziranim mješavinama.

Ekperimentalni dio obuhvatit će ispitivanje granulometrijskoga sastava odabranoga materijala te definiranje granulometrijskoga sastava referentnih mješavina i mješavina s dodatkom otpadne gume. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala bit će provedeno u laboratorijima Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Pritom će biti analiziran utjecaj kemijskoga sastava gume na proces hidratacije cementa analizom gumenoga agregata u Nastavnom zavodu za javno zdravstvo „Dr. Andrija Štampar“.

Sastav ispitnih mješavina bit će definiran temeljem provedenih preliminarnih istraživanja i pregleda literature, a sukladno relevantnim normama. Na mješavinama bit će ispitana mehanička svojstva: tlačna čvrstoća, neizravna vlačna čvrstoća, statički i dinamički modul elastičnosti (sve nakon 7, 28 i 90 dana njege) te otpornost na utjecaj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja u prisustvu soli za odmrzavanje. Sva će ispitivanja biti provedena prema propisanim europskim normama. Dobiveni rezultati bit će statistički obrađeni kako bi se utvrdio stupanj varijabilnosti svojstava te eliminirao utjecaj odstupajućih vrijednosti na daljnje analize. Za određivanje statičkoga modula elastičnosti mješavina bit će korištene suvremene metode poput stereo fotogrametrije i korelacije digitalne slike, koje u zajedničkoj primjeni omogućuju uvid u tijek prostornih deformacija površine uzorka. Na taj će se način u što većoj mjeri ukloniti nepouzdanost rezultata nastala uslijed pogrešaka mjerenja koje se u ovom slučaju povezuju s nestalnosti mjernih uređaja koji se konvencionalno koriste. Upravo takav način praćenja pomaka omogućit će analizu i vrednovanje stanja deformacija raznih slojeva sustava kolničke konstrukcije, što predstavlja iskorak u razini mogućnosti uvida u takva stanja.

Na temelju svojstava materijala određenih tijekom laboratorijskih istraživanja bit će izvršeno numeričko modeliranje ponašanja prostorne slojevite konstrukcije u programskom paketu ANSYS. Dobiveni rezultati takvih modela usporedit će se s rezultatima jednostavnijih modela iz za ovo područje već verificiranoga programskog paketa. Uzimanjem u obzir potrebnih nelinearnosti i temeljem rezultata laboratorijskih istraživanja i mjerenja bit će provedena kalibracija i validacija razvijenih modela. Parametri će validacije pritom biti usmjereni na najvažnije pokazatelje ponašanja konstrukcije kako bi se pomoću izrađenih modela u budućnosti mogle provesti parametarske analize i proširenje baze rezultata na temelju drugačijih svojstava materijala i debljina slojeva.

Rezultati provedenih laboratorijskih istraživanja na razini samoga materijala, ali i kolničke konstrukcije u cjelini, služit će kao ulazni parametri za izradu sustava vrednovanja svojstava CNS-a s otpadnom gumom kojim će se odrediti optimalni sastav mješavine.

U konačnici bit će provedene analize potencijalnih ekoloških utjecaja u vidu otpuštanja štetnih elemenata iz CNS-a s otpadnom gumom u okolno tlo i podzemnu vodu. Ta analiza bit će provedena u Nastavnom zavodu za javno zdravstvo Osječko-baranjske županije.

1.4 Očekivani znanstveni doprinos

Znanstveni doprinos provedenih istraživanja definira se kroz:

- utvrđivanje utjecaja dodatka različitih frakcija i udjela otpadne gume na mehanička svojstva i ponašanje kolničke konstrukcije kao složenoga slojevitog sustava različitih materijala
- profiliranje optimalnoga sastava cementom stabilizirane mješavine s dodatkom otpadne gume za primjenu u CNS-u kolničke konstrukcije
- definiranje metodologije ispitivanja i analize rezultata cementom stabiliziranih zrnatih materijala i sustava kolničke konstrukcije primjenom stereo fotogrametrije s korelacijom digitalne slike
- izradu modela funkcijskoga odnosa između rezultata nerazornih i razornih metoda ispitivanja kod mješavina s otpadnom gumom

2 PREGLED STANJA PODRUČJA

2.1 Cementom stabilizirani nosivi slojevi

2.1.1 Općenito

Kolničke konstrukcije slojeviti su sustavi sastavljeni od slojeva različitih mehaničkih karakteristika (krutost, čvrstoća i sl.) koji nisu u potpunosti međusobno povezani. Prema tipu može ih se podijeliti na savitljive i krute. Pod savitljivim kolnicima podrazumijeva se asfaltne kolničke konstrukcije, dok se pod krutim kolnicima podrazumijeva betonske kolničke konstrukcije. Osnovna je razlika između tih dviju skupina kolnika u načinu prijenosa opterećenja. Krute kolničke konstrukcije preuzeto opterećenje prenose na veću podlogu zbog svoje vrlo velike krutosti. Savitljive kolničke konstrukcije imaju manju krutost pa samim time i preuzeto opterećenje prenose na manju površinu te se zbog toga razvijaju veća naprezanja u nosivim slojevima kolnika [8,9]. U savitljive kolničke konstrukcije kao nosivi sloj može se ugraditi i sloj zrnatoga materijala stabiliziran hidrauličnim vezivom. Najčešće je korišteno hidraulično vezivo u tim slojevima cement. Uobičajena je količina cementa 2 – 8%, a sloj se izvodi u debljini 15 – 30 cm [8,10,11]. Mala količina cementa tijekom procesa miješanja i ugradnje mješavine omogućuje oblikovanje cementne paste pri čemu zarobljava i akumulira određenu količinu finih čestica. Cementna pasta potom obavija zrna agregata i potpomaže miješanje [12]. Takve kolnike naziva se polukrutim kolničkim konstrukcijama. Polukrute kolničke konstrukcije koriste se za ceste namijenjene većem prometnom opterećenju i autoceste. Analogno razlici između krutih i savitljivih kolničkih konstrukcija, polukrute konstrukcije opterećenje prenose na veću površinu od savitljivih konstrukcija. CNS je prvi put korišten 1935. godine za poboljšanje nosivoga sloja ceste State Highway 41 u blizini Johnsonvilla (Južna Karolina, SAD) [13]. S obzirom na kompleksnost toga sloja, različite materijale koji se ugrađuju u različitim količinama te mehaničke karakteristike sloja, različiti autori definiraju CNS na više načina:

- *Nosivi sloj od zrnatog kamenog materijala stabiliziranog (vezanog) hidrauličnim vezivom kao dio kolničke konstrukcije ugrađuje se, u pravilu, između nosivog sloja od zrnatog kamenog materijala bez veziva i bitumeniziranog nosivog sloja autocesta i cesta s vrlo teškim prometnim opterećenjem. [3]*

- Cement se koristi kao stabilizirajuće sredstvo pri čemu, uz prisutnost vode, kalcijevi silikati i aluminati oblikuju hidrate koji posljedično tvore snažnu, tvrdnu matricu koja povezuje čestice agregata. Tretirani materijal na taj način postaje dio matrice [14].
- Cementom stabilizirani nosivi sloj opći je pojam koji se odnosi na čvrstu mješavinu prirodnoga tla ili proizvedenoga agregata s određenim količinama portlandskoga cementa i vode koji se stvrdnjava nakon zbijanja i njege oblikujući čvrst i izdržljiv materijal otporan na djelovanje smrzavice [13].
- Hidraulički vezani nosivi sloj predstavlja materijal proizveden od nekoherentnoga materijala određenoga granulometrijskog sastava, vode i hidrauličnoga veziva koji sporo veže, što omogućuje odgovarajuće postavljanje zrna agregata [15].

Jednostavnije rečeno, CNS je mješavina agregata odgovarajućega granulometrijskog sastava, cementa i vode, a ugrađuje se u nosive slojeve kolnika neposredno ispod asfaltnih slojeva. Taj se materijal u literaturi može pronaći pod nazivima cementom stabilizirano/tretirano tlo, cementom stabilizirani agregat, cementom stabilizirani makadam, mršavi beton (UK) i sl.

Mnoge su prednosti ovoga materijala [13]:

- CNS pruža jaču i kruću podlogu u odnosu na nevezani nosivi sloj. Krutost toga sloja osigurava veću otpornost na razvoj defleksije pod utjecajem prometnoga opterećenja. Na taj način osigurava se razvoj manjih unutarnjih naprezanja što izravno utječe na produljenje životnoga vijeka konstrukcije.
- Zbog veće nosivosti debljina CNS-a manja je od debljine nevezanoga nosivog sloja. Osim uštede prirodnoga materijala prednost je i smanjenje opterećenja prenesenoga na posteljicu.
- CNS smanjuje mogućnost otkazivanja nosivoga sloja te pojave udarnih rupa.
- Različiti materijali mogu se stabilizirati cementom što omogućava upotrebu materijala iz iskopa i smanjuje troškove kupnje i transporta materijala.
- Smanjuje pojavu pukotina u habajućim asfaltnim slojevima.
- Onemogućuje prodiranje vode i ispumpavanje materijala iz slabo nosivoga temeljnog tla u betonskim kolnicima.
- Povećava otpornost konstrukcije na utjecaj smrzavice.
- CNS razvija čvrstoću s vremenom što pruža dobru podlogu prometnom opterećenju.

2.1.2 Čvrstoća CNS-a

Osnovna mjera kvalitete mješavine CNS-a njezina je čvrstoća. Tri su oblika čvrstoće koja se ispituju na cementom stabiliziranom materijalu ovisno o načinu djelovanja opterećenja: tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća te čvrstoća na savijanje. Čvrstoća CNS-a određuje se nakon određenih razdoblja njege uzoraka ili nakon određenoga vremena nakon ugradnje. Tako različiti istraživači čvrstoću na laboratorijskim uzorcima ispituju nakon 1, 3, 7, 28, 45, 90, 180 te 365 dana. Pri tome, u *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] postoji preporučeni raspon tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana od ugradnje mješavine, a rasponi su dani za dvije kategorije cesta, što je prikazano tablicom 2.1.

2.1. Zahtijevana tlačna čvrstoća stabilizacijskih mješavina prema OTU [3]

Sloj	Tlačna čvrstoća stabilizacijske mješavine (MN/m ²)	
	nakon 7 dana	nakon 28 dana
Nosivi sloj kolničke konstrukcije autocesta i cesta vrlo teškoga prometnog opterećenja	2.0 – 5.5	3.0 – 6.0
Nosivi sloj kolničke konstrukcije cesta teškoga i srednje teškoga prometnog opterećenja	1.5 – 5.5	2.5 – 6.0

Zahtjevi za druge oblike čvrstoće nisu postavljeni, no kako je već spomenuto, vrijednost vlačne čvrstoće vrlo je važan parametar iz perspektive razvoja radijalnih vlačnih napreznja uslijed skupljanja materijala te preuzimanja prometnoga opterećenja. Najmanje zastupljeno ispitivanje jest ispitivanje čvrstoće na savijanje jer ta metoda nije niti normirana za ove materijale, dok su postupci ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće propisani normama [16,17]. Autori Lv i drugi [18] ispitali su tlačnu, neizravnu vlačnu te čvrstoću na savijanje pod različitim intenzitetima napreznja cementom stabiliziranoga makadama miješanih dvjema različitim metodama. Vrijeme njege iznosilo je 90 dana, a unos opterećenja variran je od 5 do 50 MPa/s. Vrijednosti tlačne čvrstoće mješavina miješanih vibracijskom metodom iznose 11.957 – 18.625 MPa. Vrijednosti neizravne vlačne čvrstoće istih uzoraka iznose oko 10% tlačne čvrstoće, i to 1.209 – 1.812 MPa. Čvrstoće na savijanje tih uzoraka pak iznose 1.392 – 2.417 MPa. Nadalje, mješavine cementom stabiliziranoga šljunka s 2% i 4% cementa nakon 28 dana njege postižu tlačne čvrstoće u iznosu 1.38 MPa i 2.99 MPa [19]. Autori Barišić i drugi [20] ispitali su tlačnu i neizravnu vlačnu čvrstoću cementom stabiliziranoga šljunka s 2%, 4% i 6% cementa nakon 7, 28 i 90 dana njege. Tlačne čvrstoće za 7 dana postižu vrijednosti 0.82 – 3.93, za 28 dana 1.07

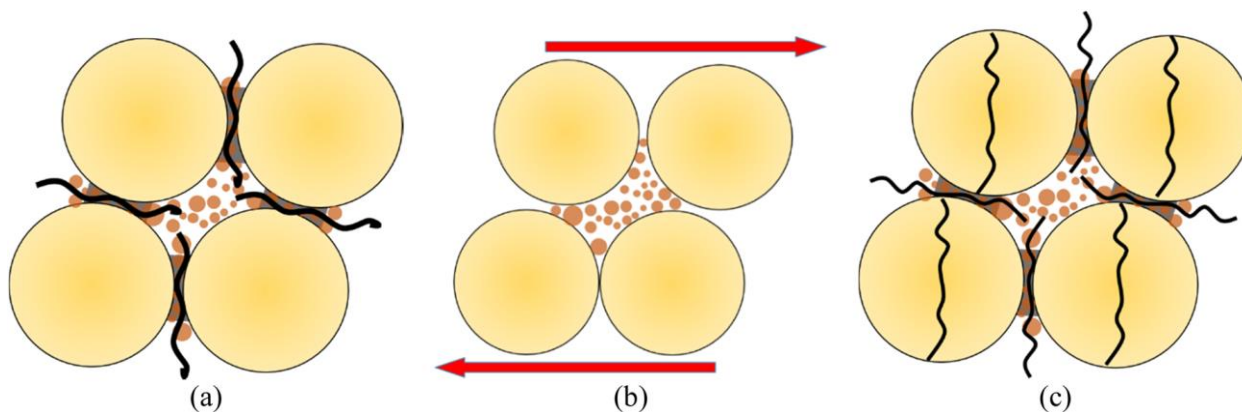
– 9.67 i za 90 dana 1.97 – 8.62 MPa. S druge strane, neizravne vlačne čvrstoće za ista razdoblja postižu vrijednosti 0.06 – 0.75 MPa, 0.16 – 1.52 MPa i 0.30 – 1.46 MPa. U radu autora Lan i drugih [21] ispitane su tlačna i neizravna vlačna čvrstoća cementom stabiliziranoga makadama s 4%, 5% i 6% cementa. Sedmodnevna tlačna čvrstoća iznosi između 3.5 i 8.5 MPa, a vlačna čvrstoća između 0.3 i 0.65 MPa. Uzorci ispitani nakon 28 dana postižu tlačnu čvrstoću između 6 i 11.5 MPa, a vlačnu između 0.45 i 1 MPa. U svome radu autori Lv i drugi [22] ispitivali su tlačnu čvrstoću cementom stabiliziranoga vapnenca s 3%, 3.5%, 4%, 4.5% i 5% cementa, temeljem čega su odabrali optimalnu količinu cementa u iznosu od 4.5%. Optimalnoj su mješavini ispitivali tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje nakon 3, 7, 14, 28, 60 i 90 dana njege. Odabrana mješavina je postigla tlačnu čvrstoću u rasponu 2.8 – 5.7 MPa i čvrstoću na savijanje u rasponu 0.860 – 1.962 MPa. Autori zaključuju kako se povećanjem vremena njege koeficijent varijacije smanjuje, što znači da se duljim vremenom njege dobivaju pouzdaniji rezultati. Iz dostupnih radova može se zaključiti da vlačna čvrstoća iznosi od 10% do 15% tlačne čvrstoće, dok čvrstoća na savijanje iznosi između 10% i 35% tlačne čvrstoće mješavine. Rezultati relevantnih istraživanja dostupnih u znanstvenoj literaturi sažeti su u tablici 2.2.

2.2. Rezultati tlačne, neizravne vlačne i čvrstoće na savijanje CNS-a drugih istraživača

Autori	Prirodni agregat	Količina cementa	Vrijeme njege [dani]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Neizravna vlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća na savijanje [MPa]
Lv, Guo, Xia, Wang, You, Cabrera, Li [18] (ispitivanje pod različitim intenzitetima naprezanja)	-	4.5%	90	11.957 13.652 15.998 17.302 17.842 18.625	1.209 1.357 1.542 1.663 1.718 1.812	1.392 1.660 2.045 2.236 2.330 2.417
Barišić, Dokšanović, Draganić [19]	Šljunak	2.0% 4.0%	28	1.38 2.99	-	-
Barišić, Dimter, Rukavina [20]	Šljunak	2.0% 4.0% 6.0%	7/28/90	0.82/1.07/1.97 2.94/3.31/6.47 3.93/9.67/8.62	0.06/0.16/0.30 0.36/0.61/1.15 0.75/1.52/1.46	-
Lan, Zhang, Haom Wang [21]	Vapnenac	4.0% 5.0% 6.0%	7/28	> 3.5/>6.0 > 6.0/>8.5 >8.0/>10.5	>0.3/>0.45 >0.5/>0.7 >0.6/>0.95	-
Lv, Xia, Liu, You, Qu, Zhong, Yang, Washko [22]	Vapnenac	4.5%	3 7 14	2.8 3.8 4.3	-	0.860 1.179 1.284

			28	4.6		1.656
			60	5.5		1.831
			90	5.7		1.962

Iz navedenih radova može se zaključiti da čvrstoća ovisi o količini cementa i vremenu njege mješavine. Naime, hidratacija cementa vremenski je uvjetovan proces, a važan je čimbenik i dovoljna količina vode za hidrataciju. Smatra se kako nakon 28 dana njege mješavina postiže oko 80% svoje pune čvrstoće. Tako autori Lv i drugi [22] navode kako se čvrstoća ubrzano razvija između 7. i 14. dana njege, nakon čega taj rast znatno usporava. No, čimbenik koji najviše utječe na čvrstoću mješavine jest količina cementa. Tako autori Li i drugi [23] navode kako dolazi do triju različitih tipova otkazivanja mješavine. Prvi je od njih otkazivanje cementne paste koja obavija i spaja zrna agregata (slika 2.1. a). Taj događaj prethodi sljedećem tipu otkazivanja mješavine, a to je pojava klizanja agregata u unutarnjoj strukturi mješavine (slika 2.1. b). Do te pojave dolazi kada veze između agregata nisu dovoljno jake da se preuzmu izazvana naprezanja. Kao treći tip otkazivanja mješavine javlja se lom čestica agregata do čega dolazi kada preuzeta naprezanja nadilaze čvrstoću samoga kamenog materijala (slika 2.3. c). Osim količine cementa i vremena njege veliku ulogu u odabiru optimalne količine cementa ima i vrsta agregata, pa tako prilikom stabiliziranja vapnenca potrebno je koristiti više veziva nego kod stabiliziranja kvalitetnijega dolomitnog materijala [24].



Slika 2.1. Tri tipa otkazivanja strukture cementom stabiliziranog nosivog sloja: a) otkazivanje cementne paste; b) klizanje agregata i c) lom agregata [23]

2.1.3 Krutost CNS-a

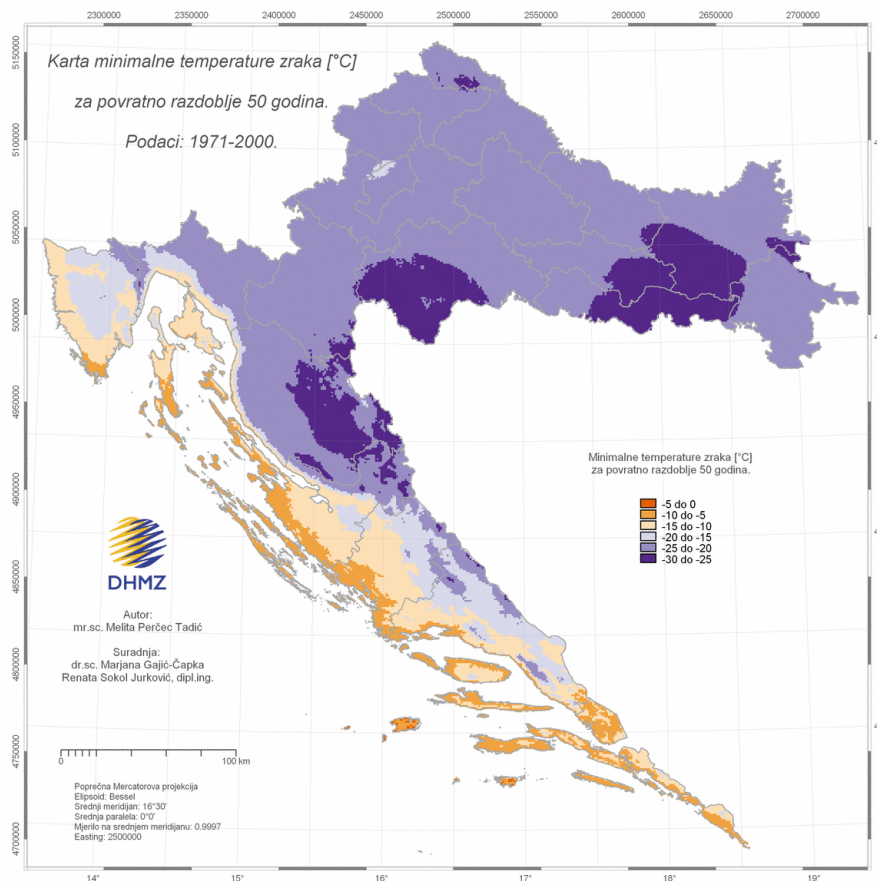
Osim čvrstoće vrlo je važno mehaničko svojstvo materijala i njegova krutost, odnosno otpornost prema deformiranju. Krutost materijala izražava se pomoću modula elastičnosti. No, tu je karakteristiku vrlo teško precizno odrediti i ne postoji konsenzus o prihvatljivim vrijednostima modula elastičnosti. Još jednu prepreku pri određivanju modula elastičnosti

CNS-a predstavlja hrapava površina toga materijala, što otežava precizna mjerenja pomaka površine uzorka prilikom laboratorijskih ispitivanja. Krutost CNS-a može se odrediti statičkim i dinamičkim metodama [25]. Statička metoda, ujedno i općeprihvaćena u karakterizaciji CNS-a jest određivanje statičkoga modula elastičnosti (E_{st}) koji se određuje iz linearnih odnosa naprezanja i deformacija. Statički modul elastičnosti može se odrediti prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće, izravne vlačne čvrstoće i neizravne vlačne čvrstoće, a uobičajeno je da se ispituje tijekom tlačnoga testa te se tako dobivena vrijednost koristi za karakterizaciju materijala. Nadalje, autori Lv i drugi [26] usporedili su module elastičnosti dobivene ispitivanjem savijanja u četiri točke na istim mješavinama cementom stabiliziranoga makadama. U radu se navodi kako tijekom doživljenja zamora materijal prolazi kroz tri faze: preliminarnu fazu, fazu stabilnosti te fazu loma. Rezultati toga istraživanja pokazuju velike razlike između ta dva modula, a autori ističu kako je faza stabilnosti prilikom vlačnoga opterećenja mješavine kraća od faze stabilnosti tijekom tlačnoga opterećenja te će faza loma ranije nastupiti u vlačnoj zoni. Dinamički se modul elastičnosti (E_{din}) može odrediti mjerenjem brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa ili mjerenjem rezonantne frekvencije. Određivanje dinamičkoga modula elastičnosti uobičajeno je provoditi kod karakterizacije betona, no sve je više zastupljeno i u karakterizaciji CNS-a. Kod tih mješavina uslijed skupljanja materijala dolazi do razvoja mikropukotina što znatno utječe na vrijednost dinamičkoga modula elastičnosti [27]. Velike krutosti nosivoga sloja dovode do nastanka kolotruga i smanjenja otpornosti kolnika na zamor, dok mješavine malih krutosti ne pružaju dovoljnu nosivost [28]. Tako se u literaturi [8] navodi da te pukotine uvelike smanjuju dinamički modul elastičnosti te da se E_{din} može znatno razlikovati za uzorke izrađene u laboratoriju u odnosu na sloj izveden na gradilištu. Pri tome su razlike između dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti velike. U dostupnoj literaturi može se uočiti kako nije uobičajeno u znanstvenim radovima izražavati modul elastičnosti uz čvrstoću materijala, a ta su svojstva međusobno povezana. Mjerenjem svih svojstava materijala na dovoljnom broju uzoraka omogućuje se razvoj predikcijskih modela koji pak omogućuju ispitivanje samo jednoga svojstva, temeljem čega se mogu pouzdano predvidjeti rezultati ostalih mehaničkih svojstava. Takav je pristup vrlo koristan, osobito u situacijama ograničenoga broja uzoraka, kao npr. prilikom ispitivanja bušenih jezgri iz kolnika. Neki od autora prikazuju i rezultate modula elastičnosti koji će biti prikazani u nastavku s ciljem određivanja uobičajenih vrijednosti tih svojstava. Autori Barišić i drugi [19] izmjerili su statički i dinamički modul elastičnosti na mješavinama stabiliziranoga šljunka s 2% i 4% cementa nakon 28 dana njege. Za mješavine s 2% cementa E_{din} iznosi 9.55 GPa, a E_{st}

0.936 GPa, dok za mješavine s 4% cementa E_{din} iznosi 17.55 GPa, a E_{st} 3.617 GPa. Znatno povećanje dinamičkoga modula elastičnosti s dodatkom cementa prirodnom agregatu izmjerena tijekom troosnoga ispitivanja ovoga materijala prikazano je u radu [23].

2.1.4 Otpornost CNS-a na utjecaj smrzavice

Vrlo je važno svojstvo CNS-a i otpornost na štetno djelovanje smrzavice, osobito u područjima s izraženim zimskim vremenskim uvjetima, kao što je područje istočne Hrvatske, gdje se temperature niže od 0°C javljaju u prosincu, siječnju i veljači [29]. Prema Državnom hidrometeorološkom zavodu gotovo se cijela Hrvatska nalazi u području na kojemu su izmjerene minimalne temperature za povratno razdoblje od 50 godina između -20°C i -25°C (slika 2.2.) [30].



Slika 2.2. Karta minimalne temperature zraka [$^{\circ}\text{C}$] za povratno razdoblje 50 godina [30]

U nekoherentnom materijalu nema unutarnjih sila koje bi držale čestice agregata zajedno i takav je materijal podložan deformacijama tijekom zimskih uvjeta. No, dodatkom cementa stvaraju se sile koje pružaju otpor volumnim deformacijama čime se povećava otpornost materijala na zimske uvjete. Tako je u OTU [3] definirano kako smanjenje tlačne čvrstoće uzoraka izloženih

smrzavici ne smije biti veće od 20%. Odnosno, čvrstoća uzoraka izloženih smrzavici smije iznositi minimalno 80% čvrstoće uzoraka ispitanih bez izlaganja smrzavici. Autori Jie i drugi [31] i Wang i drugi [32] ispitali su utjecaj izostavljanja dvije sitne frakcije agregata iz cementom stabiliziranoga makadama s 3%, 5% i 7% cementa. Iz provedenoga istraživanja autori zaključuju kako pozitivniji utjecaj na čvrstoću materijala ima izostavljanje sitnije frakcije agregata te kako mješavine s većom količinom cementa imaju veću otpornost na utjecaj smrzavice. Kao razlog navode kako su u takvim mješavinama manje pore koje mogu biti ispunjene vodom pa se samim time i stvaraju manja naprezanja uslijed širenja vode tijekom smrzavanja. No, s obzirom na to da veće količine cementa izazivaju skupljanje materijala, kao optimalna količina preporučeno je 5% cementa za te mješavine [31,32]. Nadalje, otpornost mješavina poroznoga cementom stabiliziranoga makadama na smrzavanje ispitana je u radu [33]. Autori navode kako voda zarobljena u makroporama takve mješavine pod utjecajem smrzavice širi pore te pri odmrzavanju ispire sitne čestice agregata i cementne paste što rezultira gubitkom mase materijala. Ta je pojava izraženija s povećanjem broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

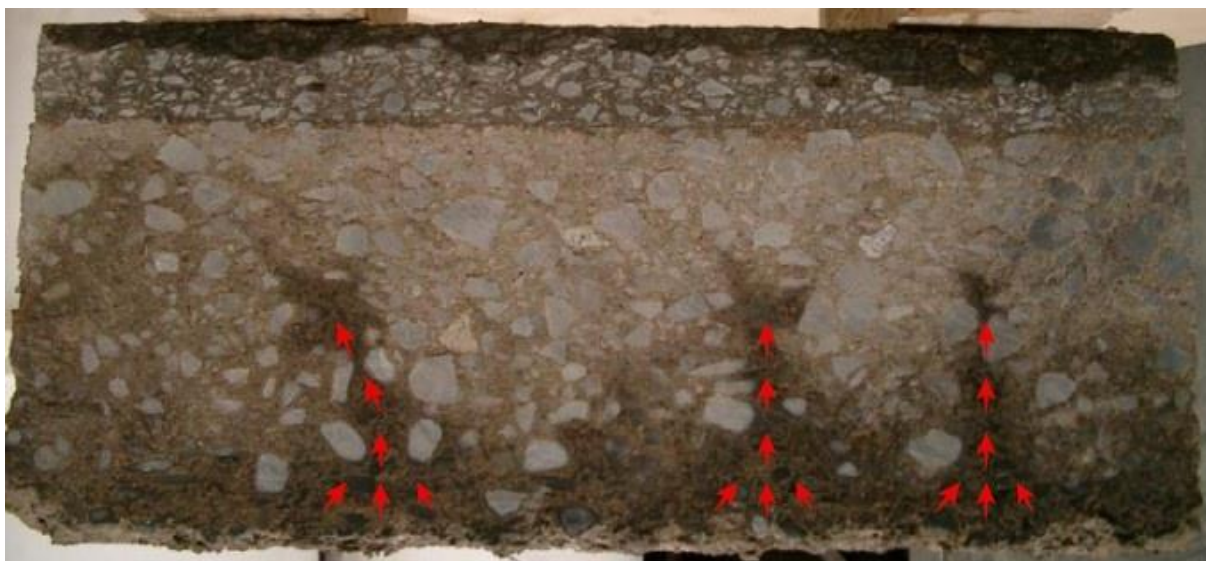
2.1.5 Reflektivne pukotine

Cementom stabilizirani nosivi sloj osigurava veću nosivost kolničke konstrukcije, pruža ravnost za polaganje asfaltnih slojeva te sprečava ispumpavanje materijala iz temeljnoga tla u betonskim kolnicima [34]. Velika je prednost CNS-a i povećanje otpornosti na štetan utjecaj smrzavice. Naime, CNS zbog svoje nepropusnosti onemogućava kapilarno podizanje vode koje se u zimskim uvjetima smrzava pri čemu povećava svoj volumen i na taj način uništava unutarnju strukturu mješavine. Upotreba cementa kao veziva povećava krutost i čvrstoću mješavine koja igra značajnu ulogu u povećanju nosivosti konstrukcije. No, upravo taj cement tijekom hidratacije izaziva skupljanje materijala kod cementnih kompozita uslijed čega se razvijaju unutarnja vlačna naprezanja. Kao rezultat dosezanja kritične vrijednosti vlačnih naprezanja nastaju pukotine. Na engleskom jeziku taj je proces poznat pod nazivom *drying shrinkage*. Intenzitet skupljanja ovisi o tipu agregata, stupnju zbijenosti, trajanju njege, udjelu cementa, temperaturi i promjenama vlažnosti [35]. Osim skupljanja uslijed sušenja ti materijali podložni su različitim drugim tipovima skupljanja. Tako se javljaju temperaturno skupljanje (eng. *thermal shrinkage*), autogeno skupljanje (eng. *autogenous shrinkage*) i karbonatizacijsko skupljanje (eng. *carbonation shrinkage*). Temperaturno skupljanje nastaje kao posljedica hlađenja uzorka nakon inicijalnoga zagrijavanja izazvanoga hidratacijskim procesima.

Autogeno skupljanje makroskopsko je skupljanje neopterećenoga uzorka u nepropusnim i izotermnim uvjetima, a rezultat je kemijskih reakcija. Karbonatizacijsko skupljanje pak predstavlja dugoročan odziv uzorka na ugljični dioksid iz okoliša [11,36]. No, najveći utjecaj ima skupljanje uslijed sušenja koje je rezultat gubitka unutarnje vlage u poroznoj strukturi cementnoga kompozita. Razvoj unutarnjih sila uslijed sušenja opisan je kroz četiri teorije: Gibbs – Banghamov efekt (eng. *Gibbs-Bangham effect*), kapilarna napetost (eng. *capillary tension*), razdvajajući tlak (eng. *disjoining pressure*) i međuslojno kretanje vode iz C – S – H gela (eng. *interlayer water movement from C – S – H – gel*) [37]. Do Gibbs-Banghamova efekta dolazi uslijed niske razine vlažnosti unutar mješavine. Tada je skupljanje i širenje uzrokovano promjenama u površinskoj energiji zbog apsorpcije i desorpcije vode s vanjskoga sloja cementne paste. Nastavkom toga procesa dolazi do volumne nestabilnosti cementne paste. [37,38]. Kapilarnu napetost također izaziva nedostatak vlage. Odnosno, gubitkom vlage narušava se ravnoteža opne na kontaktu kapilarne vode i zraka, što uzrokuje hidrostatska vlačna naprezanja [38,39]. Razdvajajući tlak nastaje uslijed interakcije dviju međusobno okomitih sila na površini dviju suprotnih međufaza. Te su sile ili disperzijske prirode, makroskopske elektrostatske sile ili strukturne interakcijske sile koje djeluju u međupovršinskom području molekula. Kao rezultat djelovanja tih sila razvija se vlačno naprezanje u porama što uzrokuje tlačno naprezanje u krutoj matrici. Ovaj proces okarakteriziran je kao dugotrajan proces [40,41]. Do migracije vode iz C – S – H gela dolazi pri vrlo niskim razinama relativne vlažnosti izazivajući skupljanje svakoga pojedinog sloja C – S – H, tako sužavajući međuslojni prostor. Kao posljedica toga nastaje volumenska deformacija [37,42]. Očito je kako je količina vlažnosti vrlo bitna za kvalitetnu hidrataciju cementa.

Nadalje, osim skupljanja pukotine mogu nastati i kao rezultat velikih temperaturnih razlika tijekom različitih razdoblja dana. Uslijed promjena temperature dolazi do skupljanja i širenja materijala čime također nastaju pukotine istim mehanizmom kao i kod pukotina uzrokovanih skupljanjem zbog hidratacije cementa. U slučaju takvoga opterećenja znatnu ulogu igra debljina asfaltnih slojeva koja djeluje kao svojevrsna izolacija stabiliziranoga sloja [43–45]. Osim temperaturnih i atmosferskih utjecaja velik utjecaj na širenje pukotina ima i prometno opterećenje [45]. Prometno je opterećenje dinamičko ponavljajuće opterećenje koje dovodi do zamora materijala. Istraživanja pokazuju kako kod stabiliziranih slojeva u uvjetima maloga naprezanja i deformacije dolazi do gubitka kontakta između zrna s nedostatkom cementne paste, pri čemu nastaju mikropukotine. One se pod utjecajem prometnoga opterećenja šire [46]. Nadalje, pokazalo se da je cementom stabilizirani makadam osjetljiviji na različita opterećenja

od vrućih asfaltnih mješavina, primjerice splitmastiksasfalta. Pri tome je ponavljajuće osno opterećenje izazvalo najveću štetu na tom materijalu, a upravo ponavljajućem prometnom opterećenju izložena je kolnička konstrukcija [47]. Naime, prelaskom vozila preko pukotine razvijaju se posmična naprezanja na licu pukotine što dovodi do njezinoga širenja. Nastale pukotine šire se kroz sloj CNS-a do gornjega ruba sloja (eng. *bottom-up tensile fatigue*). Naprezanja se koncentriraju u vrhu pukotine kao rezultat prethodno opisanih utjecaja. Značajnu ulogu imaju i inicijalna duljina pukotine (duljina pukotine uzrokovana unutarnjim procesima, neprometnim opterećenjem). Također, veći nagib inicijalne pukotine usporava širenje pukotine zbog projekcije sile na inicijalnu pukotinu [48]. Pukotine razvijene na taj način prikazane su slikom 2.3. Kada ta naprezanja u vrhu pukotine dosegnu razinu kritičnoga naprezanja gornjega sloja (najčešće bitumenizirani nosivi sloj), pukotina se *reflektira* na taj gornji sloj i nastavlja se širiti istim mehanizmom. Opisani fenomen naziva se *reflektivne pukotine* (eng. *reflective cracks*).



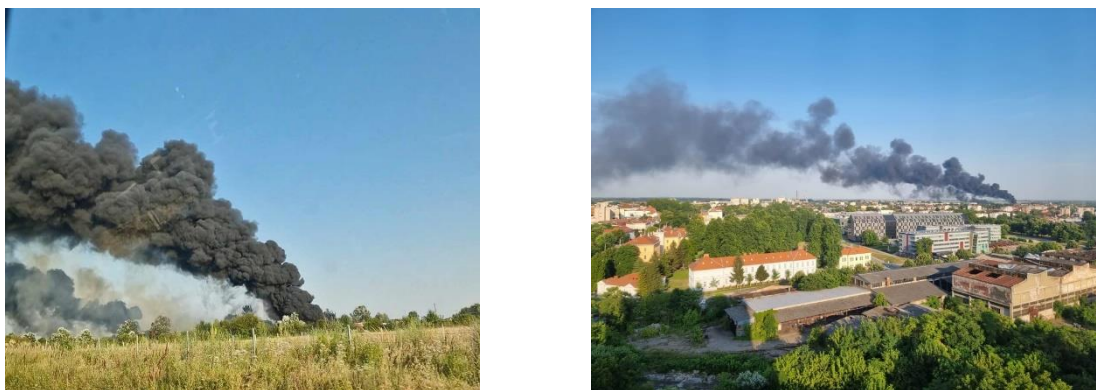
Slika 2.3. Razvoj reflektivnih pukotina [49]

Reflektivne pukotine skraćuju životni vijek kolničkih konstrukcija i povećavaju troškove održavanja te ukupne troškove kolničke konstrukcije. Uz to, izazivaju neravnost vozne površine čime smanjuju udobnost i sigurnost vožnje. Nadalje, s obzirom na to da nastaju u nosivom sloju kolnika, sanacija takvih oštećenja zahtjevan je posao. Bez obzira što je poznat mehanizam nastanka takvih pukotina, njihovo je predviđanje vrlo teško. Naime, na razvoj reflektivnih pukotina utječu kvaliteta ugrađenoga materijala, povezanost slojeva konstrukcije, prometno opterećenje i vremenski uvjeti. Vrlo veliku ulogu ima i krutost mješavine. Razvoj tih pukotina

najveći je nedostatak polukrutih kolničkih konstrukcija pa se kao najodgovorniji pristup borbi protiv reflektivnih pukotina nameću sprečavanje ili odgoda njihovoga nastanka [34].

2.2 Otpadna guma

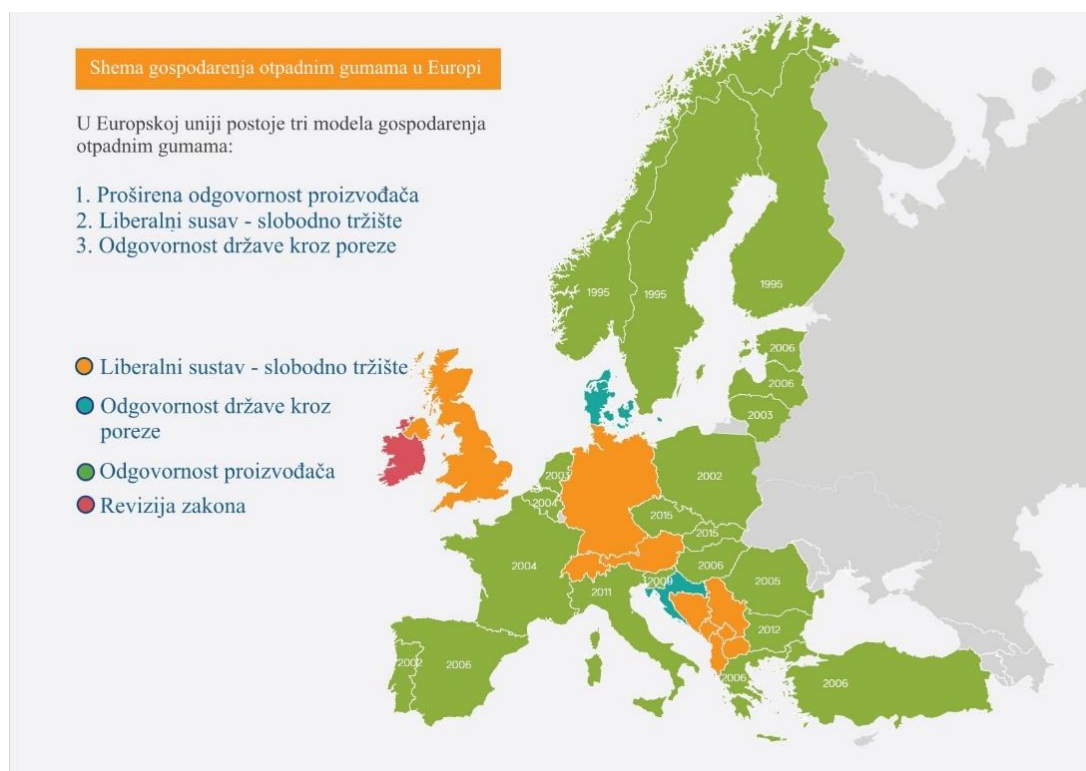
Povećanjem količine otpadnih guma raste i svijest o potrebi za njihovim pravilnim zbrinjavanjem. Osobito je važno pronaći područje primjene za otpadne gume kako bi se izbjegli scenariji zapaljenja odlagališta otpadnih guma, poput onoga 2023. godine u blizini grada Osijeka, gdje se procjenjuje da se zapalilo oko 15 t guma (slika 2.4.).



Slika 2.4. Požar na odlagalištu otpadnih guma u blizini Osijeka 2023. godine [50]

Na samom početku eksploatacije automobilskih i kamionskih guma, početkom 20. stoljeća, proizvodnja pneumatika od prirodne gume bila je vrlo skupa, što je dovelo do reciklaže više od 50% proizvedenih guma. Kasnije, proizvodnjom sintetičke gume, cijena guma značajno se smanjila, što je dovelo do manje potrebe za reciklažom. Tome je doprinijelo i korištenje različitih materijala prilikom proizvodnje gume, što je dodatno otežalo obradu sakupljenih guma i separaciju materijala [51]. No, 2016. godine je u Europi 94% svih korištenih guma sakupljeno i obrađeno [52]. Procjenjuje se kako se godišnje generira oko jedna milijarda otpadnih guma (eng. *End-of-life tyre – ELT*), odnosno kako se odbacuje jedna guma po stanovniku razvijenoga svijeta [53]. Kako bi se osigurala obrada otpadnih guma, prvo je potrebno regulirati proces njihovoga sakupljanja. Sakupljanje otpadnih guma provodi se kroz tri poznata pristupa: proširena odgovornost proizvođača (eng. *Extended Producer Responsibility*), liberalni sustav – slobodno tržište (eng. *Liberal system – Free market*) i odgovornost države kroz poreze (eng. *Government responsibility through a tax*). Prvi pristup podrazumijeva obvezivanje proizvođača da osigura odgovoran i ekološki prihvatljiv način deponiranja svojih proizvoda. Drugi pristup, liberalni, regulira to područje na način da propisuje ciljeve koje treba postići, no ne imenuje odgovorne za postizanje tih ciljeva. U trećem pristupu

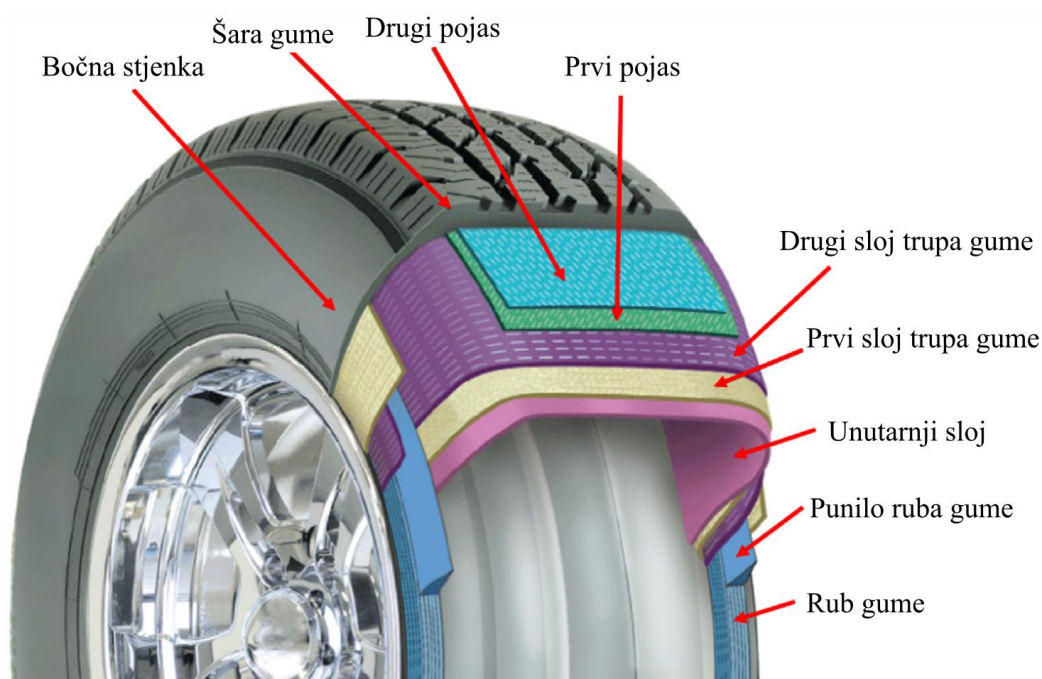
odgovornost snosi država na način da se oporezuje proizvodnja guma, što na kraju plaćaju potrošači, a sredstvima prikupljenim iz toga poreza osigurava se sakupljanje i gospodarenje otpadnim gumama [54]. Republika Hrvatska usvojila je upravo taj treći pristup, kao i Kraljevina Danska, a karta provođenja pojedine politike gospodarenja otpadnim gumama u Europi može se vidjeti na slici 2.4. Gospodarenje otpadnim gumama u Republici Hrvatskoj regulirano je *Zakonom o gospodarenju otpadom* (NN 88/21) [4], *Pravilnikom o gospodarenju otpadom* (NN 106/22) [5] i *Pravilnikom o gospodarenju otpadnim gumama* (NN 113/16) [6]. Svi su ti pravni dokumenti u skladu s *Direktivom* 2008/98/EZ Europskoga parlamenta i vijeća [55]. U 2022. godini u Republici Hrvatskoj registrirano je 13 sakupljača otpadnih guma, dok je za uporabu registrirano njih troje [56]. Sakupljena guma namijenjena je uporabi, odnosno postupku kojim se osigurava da otpad bude koristan zamjenjujući druge materijale. Kod sakupljanja otpadne gume ne govori se o ponovnoj uporabi jer ona podrazumijeva postupke kojim se proizvodi i njihovi dijelovi koriste u istu svrhu za koju su proizvedeni [55].



Slika 2.5. Primjena različitih politika gospodarenja otpadom u Europi [54]

Prema istraživanjima, oko 45% mase pneumatika čini guma, od čega jedan dio čini prirodna, a drugi sintetička guma, čelične žice, tekstilna vlakna, punila i aditivi [57–59]. Pri tome se automobilske i kamionske gume razlikuju u svojem sastavu, a osnovnu razliku čine omjeri prirodne i sintetičke gume. Naime, u kamionskim gumama znatno veći udio zauzima prirodna

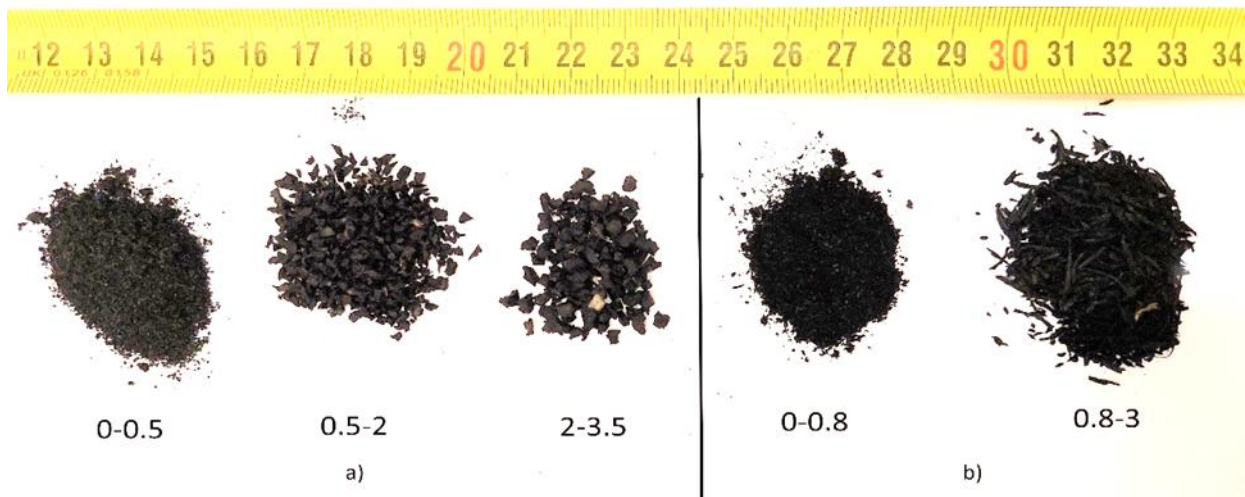
guma u odnosu na sintetičku. Struktura automobilske gume prikazana je slikom 2.6. Jedan dio sakupljenih guma koristi se za dobivanje električne energije u spalionicama čime dolazi do znatne emisije CO₂. Tim se postupkom može ponovno generirati samo oko 25% energije utrošene u proizvodnju gume pa uz oslobađanje znatne količine CO₂ prilikom sagorijevanja ne čini taj pristup rješenjem na koji bi se trebalo oslanjati [60]. Autori Chittella i dr. [61] navode kako se guma obrađuje termalnim, mehaničkim, kemijskim, fizikalnim i biološkim postupcima. No, za primjenu gume u cestogradnji zanimljivija je mehanički obrađena, odnosno usitnjena guma koja najčešće dolazi u obliku gumenoga granulata i gumenih niti različitih dimenzija. Automobilske gume sastoje se od različitih materijala, a za upotrebu u cestogradnji potrebno je separirati te sastavne dijelove. Proces obrade i ponovnoga korištenja otpadnih guma dodatno kompliciraju namjerno izazvane nepovratne kemijske reakcije kojima se postiže stvaranje prostornih veza unutar strukture gume što povećava otpornost i trajnost guma.



Slika 2.6. Sastav automobilske gume [58]

Samim time, nije moguće sastavne dijelove gume vratiti u početno stanje [62]. Prilikom procesa obrade sakupljenih guma, gume se prvo usitne rezanjem na manje komade i kao takve mogu se procesuirati u uređajima za usitnjavanje. Mehanička obrada gume može se provoditi na tri načina. Prvi je od njih usitnjavanje koje se uglavnom provodi rezanjem u dvije faze, a rezultira gumenom sirovinom nepravilnih zrna veličine 10 – 50 mm koja se kao takva može koristiti kao sirovina u građevinarstvu. Drugi je način obrade ambijentalno usitnjavanje koje podrazumijeva usitnjavanje gume na sobnoj temperaturi, koje se može odvijati u više faza ovisno o željenoj

veličini čestica gume. Pri tom procesu metalni se dijelovi odvajaju pomoću magneta, a tekstil iz gume odvaja se zračnim separatorom na samom kraju obrade. Treći postupak naziva se kriogensko usitnjavanje, a kao ulazna sirovina koriste se ili veći komadi gume ili guma dobivena ambijentalnim usitnjavanjem. Postupak se provodi pri niskim temperaturama čime se izaziva povećanje krutosti gume koja se potom drobi i kao rezultat nastaju čestice gume oštrijih rubova u usporedbi s onima dobivenima ambijentalnim usitnjavanjem. Za snižavanje temperature gume najčešće se koristi tekući dušik [63, 64]. Na slici 2.7. prikazane su veličine i oblici obrađene otpadne gume koji se mogu kupiti na našem tržištu sa svrhom korištenja kao građevinski materijal. Na tržištu Republike Hrvatske nalazi se ambijentalno proizvedena guma koju karakteriziraju nepravilna zrna s vrlo hrapavom površinom čestica. Za takvu gumu potrebno je naći novo područje primjene.



Slika 2.7. Oblik i veličina obrađene gume na tržištu Republike Hrvatske [65]

2.3 Guma u CNS-u

Guma se zbog svoje elastične prirode i male gustoće znatno razlikuje od ostalih prirodnih kamenih materijala koji se uobičajeno koriste u cestogradnji. Stoga se ona u cementom stabiliziranim nosivim slojevima koristi uglavnom kao zamjena dijela prirodnoga agregata. Guma kao sintetički materijal nije biorazgradiva i životni joj je vijek vrlo dug te je kao takva pogodna za ugradnju u prometne građevine. Uz to, prometne građevine linijske su građevine za čiju se izgradnju troše vrlo velike količine materijala, većinom prirodnih, neobnovljivih, čime se stvara potencijal za zbrinjavanje značajne količine otpadne gume [66], kao i ekološko pozitivan učinak. S ekološkoga gledišta, korištenje gume u građevinarstvu ima dvojaku ulogu. S jedne strane rješava se problem deponiranja materijala koji uz vrlo dug životni vijek zauzima

i vrlo velik volumen u odnosu na ostali otpad na odlagalištima otpada. Procjenjuje se kako guma zauzima oko 75% volumena odlagališta otpada te predstavlja opasnost od nekontroliranoga širenja požara [57]. S druge strane, primjenom gume kao agregata smanjuje se potrošnja prirodnih resursa. No, osim smanjenja potrošnje prirodnih resursa smanjuju se i troškovi eksploatacije tih resursa, a samim time i emisije CO₂ u atmosferu koja nije neznatna prilikom uporabe teške mehanizacije. Osim navedenoga industrijski pogoni za preradu otpadnih guma nalaze se u urbanim sredinama što taj materijal čini lokalno dostupnijim u odnosu na prirodni materijal koji je potrebno dopremiti iz prirodnih nalazišta udaljenih od urbanih sredina. Ekonomski, pak, aspekt ne ide u korist korištenja gume čija je cijena na tržištu oko 600 €/t, što je znatno viša cijena od cijene prirodnoga agregata pogodnoga za ugradnju u cementom stabilizirane nosive slojeve kao što su šljunak i pijesak. Upravo su pijesak i šljunak najčešći materijali koji se koriste u stabiliziranim slojevima. Ova usporedba odnosi se na materijale u manjim pakiranjima pogodnim za laboratorijska istraživanja, dok za potrebe gradilišta materijali u rasutom stanju postižu niže cijene. No, s obzirom na sve veću ekološku osviještenost i uhodani proces organiziranoga sakupljanja i obrade gume, očekuje se pad cijene gume u budućnosti. S obzirom na opću korist upotrebe otpadne gume u građevinama, standardizacijom tih postupaka realno je i očekivati određene poticaje nadležnih tijela. Osim navedenoga, *Tehnički propis za asfaltne kolnike* (NN 48/2021) [67] navodi kako svaki projekt kolničke konstrukcije s asfaltnim zastorom mora osigurati održivu uporabu prirodnih izvora na način da minimalno 2% ukupne količine materijala bude iz ponovno uporabljivih izvora. Kako bi se zadovoljio taj uvjet, inženjeri uglavnom ugrađuju reciklirani asfaltni materijal u nosive slojeve kolnika, no s obzirom na veliku razliku u količini asfaltnoga materijala i materijala ugrađenoga u nosive slojeve, sve je teže zadovoljiti taj kriterij. Isto tako, kvaliteta recikliranoga asfaltnog materijala ovisi o recepturi asfaltne mješavine pa je prilikom ugradnje takvoga materijala potrebno dokazati svojstva materijala laboratorijskim ispitivanjima što poskupljuje i usporava proces ugradnje. S druge strane, na gumu se može gledati i kao na građevinski materijal, a ne kao otpad. Iz te perspektive guma zbog svoje elastičnosti pokazuje velik potencijal za smanjenje krutosti mješavina cementom stabiliziranoga nosivog sloja što može dodatno naglasiti prednost takve vrste kolničkih konstrukcija. Osim smanjenja krutosti, od gume se očekuje apsorpiranje vlačnih naprezanja razvijenih prilikom hidratacije cementa te apsorpiranje radijalnih vlačnih naprezanja razvijenih uslijed prometnoga opterećenja u donjoj zoni sloja. Kao rezultat takvoga djelovanja gume, životni vijek kolničke konstrukcije produžio bi se i samim time smanjili bi se troškovi održavanja i ukupni troškovi konstrukcije.

2.3.1 Receptura mješavine CNS-a s otpadnom gumom

U CNS-u se najčešće koristi sitna frakcija gume, često nazivana i gumeni prah (eng. *rubber powder*), kao zamjena za sitnu frakciju prirodnoga agregata. Uzimajući u obzir već spomenute velike količine otpadne gume, potrebno je pronaći odgovarajuće područje primjene za sakupljenu sirovinu. Uobičajeno je da se agregat mijenja gumom u volumnom udjelu upravo zbog male specifične težine gume. Zamjena prirodnoga agregata gumom u masenom udjelu rezultirala bi znatno većim volumenom ukupnoga agregata u mješavini što, pak, zahtijeva veću količinu cementne paste kako bi se ostvarila obavijenost i povezanost svih zrna agregata. Malo je relevantnih znanstvenih radova koji obrađuju temu cementom stabiliziranoga nosivog sloja kolnika s otpadnom gumom uzimajući u obzir relativno novu ideju primjene gume u nosivim slojevima ceste. Tablica 2.3. prikazuje osnovne podatke o sastavu mješavina CNS-a s otpadnom gumom prikazane u dostupnoj literaturi.

2.3. Sastav mješavina CNS-a s otpadnom gumom drugih istraživača

Autori	Oblik gume	Veličina zrna	Prirodni agregat	Količina		
				Guma	Cement	Voda
Sun, Wu, Yang, Yang [68]	prah	40# (0.4 mm) 60# (0.25 mm) 80# (0.18 mm)	vapnenac	1.0% 1.5% 2.0%	4.0%	4.5%
Li, Guo, Chen [69]	prah	40# (0.4 mm)	vapnenac	0.5% 1.0% 1.5%	5.0%	-
Farhan, Dawson, Thom, Adam, Smith [70–74]	granulat	0 – 6 mm	vapnenac	2.1% 4.2% 6.2%	5.0%	4.6%
Farhan, Dawson, Thom [75]	granulat	0 – 6 mm	vapnenac	3.9%	3.0% 5.0% 7.0%	4.5% 4.6% 4.7%
Zvonarić, Barišić, Netinger Grubeša [65]	prah granulat niti	0 – 0.5 mm 0.5 – 2 mm 2 – 3.5 mm 0 – 0.8 mm 0.8 – 3 mm	šljunak i pijesak	oko 2.0%	5.0%	5.79% 6.81% 6.66% 5.46% 6.28%
Yang, Li, Zhu, Zhu, Dong, Wu [76]	granulat	80# (0.18 mm)	šljunak	0.5% 1.0% 1.5%	-	-
Chen, Li, Wang, Wang, Guan, Zhang, Wang, Hu, Zhang, Chen, Li [77]	granulat	1 – 2 mm	šljunak	0.5% 1.0%	3.0% 4.0% 5.0% 6.0% 7.0%	4.1% 4.4% 5.2% 5.5% 5.8%

Iz tablice 2.3. vidljivo je kako je kao zamjena za prirodni agregat korištena guma sitne granulacije. Neki od autora definiraju da je korišten gumeni granulat [68], dok ostali korištenu frakciju gume definiraju kao gumeni prah. Autori Farhan i suradnici u radovima [70–75] ne definiraju točnu veličinu gume, ali navode kako granulometrijski sastav gume odgovara granulometrijskom sastavu sitne frakcije vapnenca za čiju je zamjenu guma korištena. No, uobičajeno je gumu manju od 0.5 mm nazivati gumenim prahom, dok je veća guma nazvana gumenim granulatom. Sukladno tome, u tablici su nazivi čestica gume prilagođeni uobičajenom nazivlju. Gumene čestice tih veličina uglavnom djeluju kao punilo u mješavinama jer su manje od najmanje frakcije agregata u kojima ispunjavaju zračne pore, što rezultira manjim procjeđivanjem vode te manjom apsorpcijom vode uzimajući u obzir hidrofobnost gume [78]. U većini prikazanih radovima guma je korištena kao zamjena za vapnenac s obzirom na relativno ograničen broj materijala korištenih u CNS-u. Naime, uz vapnenac, koji je u Aziji uobičajeno korišten materijal za izradu CNS-a, na ovim se područjima za tu svrhu koriste ponajprije šljunak, potom pijesak ili drobljeni kamen [3]. Drobljeni kamen suviše je kvalitetan materijal pa njegova primjena u ovom sloju nema veliku zastupljenost. Udjeli gume prikazani su kao volumni udjeli ukupnoga agregata u mješavini i vidljivo je kako su korištene vrlo male količine toga agregata u volumenu mješavine. Prilikom projektiranja mješavine obično se definira volumna zamjena gume za prirodni agregat sitne frakcije, tako su autori Farhan i dr. [70–74] koristili gumu kao volumnu zamjenu za sitnu frakciju vapnenca u iznosima 15%, 30% i 45%, što odgovara ukupnom volumenu agregata u iznosu 2.1%, 4.2% i 6.2%. U radovima [68,69] količina gume odmah je iskazana kao zamjena volumena ukupnoga agregata u mješavini. Također je vidljivo kako je količina cementa u mješavinama u okviru preporučenih vrijednosti [8,10], a najzastupljenije su mješavine s 5% cementa. U radu [77] se navodi kako količina cementa ne bi trebala prelaziti iznos od 5.5% zbog oslobađanja velike topline hidratacije. Cementom stabilizirani nosivi slojevi ugrađuju se pri optimalnoj vlažnosti određenoj prema Proctorovu pokusu, a u prikazanim se radovima može vidjeti da za korištene materijale ona iznosi oko 4.5%. Neki od autora navode kako prilikom variranja količine cementa i gume nisu varirali količinu vode, već su koristili optimalnu vlažnost definiranu za referentnu mješavinu [70–74]. Utjecaj veličine i oblika gume na optimalnu vlažnost i maksimalnu suhu prostornu masu mješavine ispitan je u radu [65]. U tom istraživanju analizirani su Proctorovi elementi šest mješavina CNS-a, jedne referentne i pet mješavina s gumom. Guma je korištena kao volumna zamjena za pijesak u iznosu od 20%, što čini oko 2% mase agregata mješavine. Analiziran je utjecaj gumenoga granulata frakcija 0 – 0.5 mm, 0.5 –

2 mm i 2 – 3.5 mm te gumenih niti frakcija 0 – 0.8 mm i 0.8 – 3 mm. Analiza pretražnim elektronskim mikroskopom (eng. *Scanning Electron Microscope* – SEM) te analiza specifične površine čestica pokazale su kako čestice gume s ravnijom površinom zahtijevaju veću količinu vode za postizanje optimalne vlažnosti i kako veći utjecaj na optimalnu vlažnost ima oblik čestice u odnosu na njezinu veličinu. No, razlike u vrijednosti optimalne vlažnosti vrlo su male. Općenito, iz rada se može zaključiti kako se utjecaj gume u tim količinama na optimalnu vlažnost može zanemariti te kako se mješavine mogu proizvoditi pri optimalnoj vlažnosti definiranoj za referentnu mješavinu. Taj zaključak uvelike olakšava praktični postupak primjene otpadne gume u CNS-u. Govoreći o maksimalnoj suhoj prostornoj masi, neupitno je kako guma utječe na smanjenje iste zbog svoje niske specifične težine. U pogledu troškova prijevoza to je pozitivan učinak. S druge strane, količina gume ima veći utjecaj na maksimalnu suhu prostornu masu u odnosu na njezin utjecaj na optimalnu vlažnost mješavine pa se ne može izvući generalni zaključak. Upotrebom veće količine gume smanjivat će se maksimalna suha prostorna masa jer je izravno ovisna o specifičnoj težini materijala. U radu [65] je istaknuto kako oblik gume, odnosno gumene niti, ima veći utjecaj na smanjenje maksimalne suhe prostorne mase u odnosu na gumeni granulati, odnosno gumeni prah.

Znatno je više istražena mogućnost primjene gume u betonu, no zbog velikih razlika u omjerima materijala običan beton nije usporediv s cementom stabiliziranim nosivim slojem. Sličniji materijal CNS-u mršavi je ili lagani beton, odnosno beton niske čvrstoće, koja obično iznosi do 20 MPa [79,80]. Kod toga materijala autori su također koristili gumu kao zamjenu sitne frakcije agregata uz zadržavanje istoga vodocementnog omjera. Tako su Wang i drugi [81] te Huang i drugi [82] koristili gumu kao volumnu zamjenu agregata u iznosima 10% – 40%, povećavajući količinu gume u inkrementima do 10%. Korištena je guma veličine zrna do 4.75 mm, što se može klasificirati kao gumeni granulati i veća je u odnosu na gumu korištenu u CNS-u. Kao zamjenu za sitnu frakciju agregata guma je korištena i u radu autora Akbari i drugi [83] u iznosima od 5%, 10%, 15% i 20%. Pri tome mješavinu gume čini 47% zrna gume veličine između 2.36 i 4.75 mm, 32% zrna veličine između 1.18 i 2.36 mm, dok ostatak čine sitnije čestice. Nadalje, autori Akinyele [79] koristili su gumu kao zamjenu za pijesak pritom ne navodeći veličinu čestica gume. U radu se navodi kako je guma slabo graduirana te kako joj je granulometrijski sastav vrlo sličan pijesku. Može se zaključiti kako je korištena guma veličine do 2 mm. Autori Ul Islam i drugi [84,85] istaknuli su činjenicu kako gumeni agregat unutar čestica ima šupljine ispunjene zrakom te su na te šupljine pokušali utjecati drugačijim načinom

proizvodnje uzoraka, kompresijom. No, autori su u svojim istraživanjima koristili gumu znatno veće nominalne veličine zrna, 15 mm i 25 mm, u odnosu na ostale istraživače.

2.3.2 Čvrstoća i krutost CNS-a s otpadnom gumom

Temeljem rezultata ispitivanja konvencionalnih mješavina može se zaključiti kako čvrstoća raste s porastom količine cementa i vremena njege uzoraka. Nadalje, tlačne čvrstoće nakon 28 dana dosežu vrijednosti do 10 MPa, dok su vlačne čvrstoće mjerene neizravnim postupkom između 10% i 15% vrijednosti tlačne čvrstoće. Dostupne vrijednosti čvrstoća na savijanje pokazuju da su te čvrstoće nešto veće od vlačne čvrstoće uzoraka. Upotrebom gume u stabilizacijskim mješavinama očekuje se povećanje vlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje zbog elastične prirode gume koja u takvim mješavinama apsorbira naprezanja pa samim time povećava spomenuta svojstva materijala. S druge strane, očekuje se pad tlačne čvrstoće uzoraka s gumom jer se ona koristi kao zamjena za materijal znatno veće čvrstoće. Rezultati istraživanja prikazani u radu [68] pokazali su kako dodatkom gume u iznosima 1%, 1.5% i 2% dolazi do pada tlačne čvrstoće s 5.5 na 4 MPa, dok je pad neizravne vlačne čvrstoće manje izražen. Pad tlačne čvrstoće s dodatkom gume prikazan je i u radu [76]. Nadalje, utjecaj gume na čvrstoće u iznosima od 0.5%, 1% i 1.5% ispitan je u radu [69]. Sva tri tipa čvrstoće ispitan su nakon 90 dana njege, a rezultati pokazuju kako povećanje količine gume izaziva pad svih tipova čvrstoća, no taj je pad najmanje izražen kod čvrstoće na savijanje. Znatn rast tlačne čvrstoće između 7. i 14. dana njege vidljiv je i kod mješavina s gumom, a taj se rast smanjuje nakon 28 dana njege, što odgovara ponašanju konvencionalnih mješavina. Stoga se može zaključiti da guma ne mijenja svoja svojstva s vremenom te razvoj čvrstoće s protekom vremena ovisi o hidrataciji cementa. Najopsežnija istraživanja na mješavinama CNS-a s gumom proveli su istraživači Farhan i drugi [70,71,73–75]. U navedenim je radovima guma korištena kao zamjena za vapnenac u tri različita masena udjela ukupnog agregata od 2.1%, 4.2% i 6.2%, a cement je isto korišten u tri različite količine, 3%, 5% i 7%. Kao osnovne zaključke ističu kako se povećanjem cementa i vremena njege povećava čvrstoća mješavine, a guma negativno utječe na čvrstoće mješavina. Nadalje, njihove mješavine postižu bolje rezultate čvrstoće na savijanje u odnosu na neizravnu vlačnu čvrstoću dok su postignute tlačne čvrstoće svih mješavina vrlo visoke. Također, navode i problem grupiranja čestica gume u mješavinama s velikim količinama gume, što dodatno izaziva smanjenje tlačne čvrstoće i izaziva nepouzdan rezultate. Ističu kako je prikladnije koristiti gumu u mješavinama s manjim udjelima cementa, odnosno u mješavinama niže čvrstoće, jer u takvim mješavinama guma ima manji negativni utjecaj na razvoj čvrstoće u

odnosu na kvalitetnije mješavine. Mješavine cementom stabiliziranoga šljunka s volumnim dodatkom gume u iznosu od 0.5%, 1% i 1.5% pokazuju povećanje otpornosti na utjecaj smrzavice s povećanjem udjela gume u mješavini [76]. Rezultati ispitanih tlačnih, neizravnih vlačnih te čvrstoća na savijanje u CNS-u s gumom ostalih istraživača sažeto su prikazani tablicom 2.4.

2.4. Rezultati tlačne, neizravne vlačne i čvrstoće na savijanje CNS-a s otpadnom gumom drugih istraživača

Autori	Prirodni agregat	Količina cementa	Količina gume	Vrijeme njege [dani]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Neizravna vlačna čvrstoća [MPa]	Čvrstoća na savijanje [MPa]
Sun, Wu, Yang, Yang [68]	vapnenac	4.5%	1.0% 1.5% 2.0%	7/28/90	>5.5/>9.5/ >10.0 >4.5/>9.0/>9.5 5 >4.0/>8.5/>9.0	>0.5 (90 dana) >0.5 (90 dana) >0.4 (90 dana)	-
Li, Guo, Chen, Wang, Chen, He, Yang, Wang [69]	vapnenac	-	0.5% 1.0% 1.5%	7/28/90	4.77/7.85/8.62 4.21/6.27/7.05 4.09/5.79/6.52	0.77 (90 dana) 0.65 (90 dana) 0.51 (90 dana)	1.97 (90 dana) 1.87 (90 dana) 1.75 (90 dana)
Farhan, Dawson, Thom [73]	vapnenac	5.0%	2.1% 4.2% 6.2%	7/28/365	>18.0/>22.0/ >24.0 >21.0/>26.0/ >29.0 >22.0/>25.0/ >30.0	-	-
Farhan, Dawson, Thom [70]	vapnenac	3.0% 5.0% 7.0%	4.2%	7/28/365	>13.0/>16.0/ >18.0 >21.0/>24.0/ >25.0 >26.0/>27.0/ >34.0	>1.0/>1.5/ >2.0 >2.0/>2.5/ >3.0 >2.5/>3.0/ >3.5	-
Farhan, Dawson, Thom [74]	vapnenac	5.0%	2.1% 4.2% 6.2%	7/28	-	>2.0/>3.0 >2.0/>2.5 >1.5/>2.5	-
Farhan, Dawson, Thom, Smith [71]	vapnenac	5.0%	2.1% 4.2% 6.2%	28	-	-	>4.0 >3.5 >3.0
Farhan, Dawson, Thom [75]	vapnenac	3.0% 5.0% 7.0%	4.2%	28	-	-	>2.0 >3.5 >4.0
Yang, Li, Zhu, Zhu, Dong, Wu [76]	šljunak	-	0.5% 1.0% 1.5%	7/28	>5/>10.0 >6/>10.5 >7/>11.5	-	-

Pregledom dostupne literature na temu čvrstoća CNS-a s otpadnom gumom vidljivo je kako je to područje relativno neistraženo i usko vezano samo uz jedan tip agregata, a to je vapnenac.

Na ovom geografskom području na raspolaganju stoje velike količine riječnog šljunka i pijeska pa su ti materijali i najzastupljeniji u izgradnji nosivih slojeva kolničkih konstrukcija. Najzastupljeniji materijal u stabiliziranom sloju jest šljunak pa se ističe potreba za detaljnijim istraživanjem razvoja čvrstoća cementom stabiliziranoga šljunka s otpadnom gumom.

2.3.3 Ekološki utjecaj otpadne gume

Prilikom upotrebe otpadnog materijala u nekom građevinskom elementu ili građevini osobito je važno imati na umu očuvanje okoliša i moguće negativne posljedice korištenja toga materijala na okoliš. Deponiranje gume samo po sebi potencijalno je štetno jer cjelovite gume omogućuju nakupljanje vode i samim time razmnožavanje komaraca, a velike količine gume na jednom mjestu predstavljaju opasnost od požara. Naime, guma je materijal koji vrlo lako gori i u slučaju zapaljenja požar bi se vrlo brzo proširio. Takav bi događaj imao vrlo štetne posljedice na kvalitetu zraka okolnoga područja [57]. Osim toga, još 1987. godine provedeno je istraživanje kojim je dokazano kako se u blizini prometnica u prašini mogu naći teški metali čija se koncentracija smanjuje s povećanjem udaljenosti od prometnice. Toksičnost gume ovisi o njezinom sastavu, odnosno kemijskim dodacima dodanim tijekom proizvodnje, a vrsta i količina tih kemijskih dodataka ovise o namjeni gume [86]. Neki od potencijalno ekološki neprihvatljivih spojeva prisutnih u gumama jesu policiklički aromatski ugljikovodici (PAH), teški metali te benztiazol [87]. Nadalje, cink se koristi kao aktivator prilikom vulkanizacije gume te se on, zbog relativno visokoga masenog udjela u sastavu gume (1% – 2%), ističe kao potencijalna prijetnja zdravlju i okolišu [88]. Izluživanje cinka iz asfaltbetona s otpadnom gumom znatno je manje u odnosu na ono kada se promatra sama otpadna guma s obzirom na to da je u mješavini asfaltbetona površina čestica gume fizički blokirana, tj. prekrivena asfaltnom mješavinom te je znatno smanjena mogućnost doticaja s vodom. Također je zabilježeno da se količina cinka smanjuje tijekom projektiranoga životnog vijeka materijala koji sadrži otpadnu gumu sve do njegove zanemarive količine u eluatu [78]. Osim cinka zabilježene su i povećane količine izlužene žive i aluminija iz asfaltnih mješavina s otpadnom gumom, kao i benztiazola [78,89]. Zabilježeno je i da je udio otpuštenih policikličkih aromatskih ugljikovodika ovisan o volumnom udjelu granula otpadne gume u asfaltnoj mješavini, kao i o tipu veziva [90]. U preglednom radu autori Kriech i Osborn [91] ističu kako je prilikom analize procjedne vode s prometnica najčešće analizirana prisutnost policikličkih aromatskih ugljikovodika i teških metala. No, uz policikličke aromatske ugljikovodike u gumama su prisutni i lakohlapljivi aromatski ugljikovodici koje karakterizira niska točka

ključanja i lako isparavanje. U dostupnoj literaturi nisu pronađeni radovi koji procjenjuju utjecaj gume korištene u cementom stabiliziranom nosivom sloju kolnika na okoliš i zdravlje ljudi.

2.3.4 Zaključno

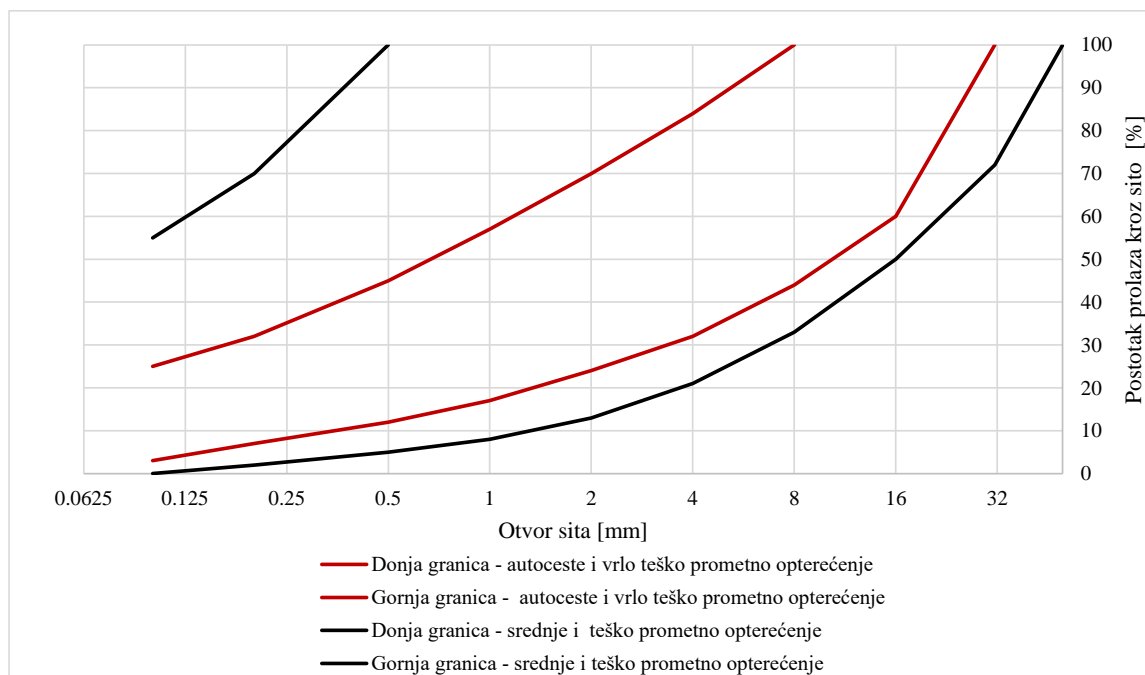
Pregledom stanja područja prikazana su stečena saznanja o upotrebi otpadne gume u CNS-u. Počevši od tehnologije izvedbe, može se zaključiti kako dodavanjem gume u taj materijal ne poskupljuje tehnološki proces proizvodnje stabilizacijskih mješavina te se proizvodnja takve mješavine može odvijati na već sagrađenim, nemodificiranim betonarama. Nadalje, različiti autori koriste različite oblike i veličine čestica reciklirane gume, uglavnom kao zamjenu za sitni prirodni agregat stabilizacijske mješavine. Korištenje gume rezultira smanjenjem čvrstoće mješavine, no određeno poboljšanje vidljivo je u smanjenju krutosti, odnosno povećanju elastičnosti takvih mješavina. Pregledom literature uočen je nedostatak istraživanja o utjecaju gume na štetno djelovanje smrzavice te je također neistražen ekološki utjecaj gume ugrađene u nosivi sloj kolnika na okoliš. Osim toga, sva su dosadašnja istraživanja ograničena na razmatranje karakteristika CNS-a isključivo kao zasebnoga materijala, izvan utjecaja ostalih slojeva kolničke konstrukcije.

3 Metodologija istraživanja

3.1 Materijali

3.1.1 Agregat

Za potrebe istraživanja u svrhu izrade ovoga doktorskog rada nastojalo se koristiti lokalne materijale u laboratorijskim ispitivanjima kako bi rezultati istraživanja mogli pronaći stvarnoj primjenu u lokalnoj cestogradnji. *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] propisane su granične vrijednosti za granulometrijsku krivulju dviju različitih stabilizacijskih mješavina i to jednu namijenjenu za autoceste i ceste vrlo teškoga prometnog opterećenja, a drugu namijenjenu cestama teškoga i srednje teškoga prometnog opterećenja. Granične vrijednosti tih mješavina prikazane su slikom 3.1.



Slika 3.1. Raspon odgovarajućeg granulometrijskog sastava CNS-a prema OTU [3]

Osim *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* granulometrijski sastav krivulje propisan je i europskom normom *HRN EN 14227 – 1* [92] u kojoj nisu postavljeni različiti zahtjevi za kolnike različitoga prometnog opterećenja. Tako prema normi *HRN EN 14227 – 1* [92] postoji pet različitih granulometrijskih sastava stabilizacijskih mješavina, među kojima postoji mješavina čiji granulometrijski sastav, uključujući gornju i donju granicu, može biti definiran od strane proizvođača.

S obzirom na to da je cilj procijeniti mogućnosti primjene vrlo sitnih čestica otpadne gume u nosivim slojevima autocesta i cesta vrlo teškoga prometnog opterećenja, prilikom definiranja recepture mješavine bit će uzeta u obzir mješavina definirana europskom normom čiji granulometrijski sastav definira proizvođač. Naime, za korištenje otpadnih materijala nema definiranih uputa, a ne može se očekivati da se ti materijali ponašaju kao prirodni agregat. Stoga istraživanje u ovoj fazi neće biti ograničeno nacionalnim uputama koje ne razmatraju korištenje nekonvencionalnih materijala u cestogradnji.

Imajući na umu kontinuiranu granulometrijsku krivulju CNS-a, odabrane su različite frakcije agregata. Tako je za potrebe izrade cementom stabiliziranoga nosivog sloja (CNS) dobavljen dravski pijesak frakcije 0 – 2 mm te tri frakcije separiranoga savskog šljunka frakcije 0 – 4 mm, 4 – 8 mm te 8 – 16 mm (slika 3.2.). Granulometrijski sastav svake pojedine frakcije agregata određen je metodom prosijavanja propisanom europskom normom *HRN EN 933 – 1* [93]. Metoda prosijavanja podrazumijeva dijeljenje agregata u više skupina prema veličini zrna pomoću sloga sita (slika 3.3.).



0 – 2 mm

0 – 4 mm

4 – 8 mm

8 – 16 mm

3.2. Prirodni agregat



3.3. Slog sita

Osim prirodnoga agregata dobavljena je i otpadna guma u dva oblika i veličine. Sitnija frakcija gume gumeni je granulat veličine zrna 0 – 0.5 mm, koja se može nazvati i gumeni prah, a veća frakcija gume gumene su niti veličine 0.8 – 3 mm. Dobavljena je guma kupljena na domaćem tržištu, a produkt je obrade sakupljenih automobilskih guma, guma teretnih vozila, autobusa te poljoprivrednih i građevinskih strojeva. Gumeni granulat i gumene niti dobiveni su ambijentalnom obradom sakupljenih guma, odnosno usitnjavanjem guma na sobnoj temperaturi, čemu je prethodila separacija čeličnih i tekstilnih dijelova gume. Gumeni granulat i gumene niti prikazane su slikom 3.4.



Gumeni granulat 0 – 0.5 mm



Gumene niti 0.8 – 3 mm

3.4. Gumeni agregat

Pomoću poznatoga granulometrijskog sastava svih frakcija agregata, kombinacijom njihovih udjela definirane su recepture mješavina kako će biti prikazano u poglavlju 4.2.

3.1.2 Veživo

Kao veživo cementom stabilizirane mješavine korišten je miješani *Portland cement* pod nazivom *Nexe TREND*. To je cement razreda čvrstoće 32.5R oznake CEM II/B–M (P–S) 32.5R. Karakteristične vrijednosti mehaničkih, fizikalnih i kemijskih svojstava cementa te zahtjevi prema normi *HRN EN 197 – 1* [94] prikazani su tablicom 3.1.

3.1. Karakteristične vrijednosti mehaničkih, fizikalnih i kemijskih svojstava cementa

Mehanička i fizikalna svojstva	CEM II/B–M(P–S) 32.5R	HRN EN 197 – 1:2012
Početak veživanja (min)	200	≥ 75
Postojanost volumena po Le Chatelieru	0.4	≤ 10
Tlačne čvrstoće nakon 2 dana (MPa)	16	≥ 10
Tlačne čvrstoće nakon 28 dana (MPa)	42	$\geq 32.5 \leq 52.5$
Kemijska svojstva		
SO ₃ (%)	3.20	≤ 3.5
CL ⁻ (%)	0.009	≤ 0.10

3.1.3 Gustoća

Gustoća prirodnoga agregata izmjerena je piknometarskom metodom pomoću vode prema normi *HRN EN 1097 – 6* [95], dok je gustoća gumenoga agregata izmjerena istim postupkom, no za mjerenje korišten je etanol. Pokazalo se kako guma pluta na vodi zbog vrlo slične gustoće, što onemogućava precizno određivanje gustoće, stoga je korištena tekućina manje gustoće.

Gustoća cementa određena je piknometarskom metodom prema normi *HRN EN 196 – 6* [96], a pri određivanju gustoće korišten je petrolej.

3.2 Ispitivanja na razini materijala

3.2.1 Proctorovi elementi

Svakoj definiranoj kombinaciji agregata i cementa potrebno je odrediti optimalnu vlažnost (w_{opt}) i maksimalnu suhu prostornu masu (ρ_{dmax}). Te se veličine još skupno nazivaju i Proctorovi elementi jer se uobičajeno određuju Proctorovim pokusom čija je primjena započela još 1933. godine. Optimalna vlažnost označava vlažnost mješavine pri kojoj je uz propisanu energiju zbijanja moguće postići najveću gustoću. Razlikujemo dvije energije zbijanja, a to su energija

zbijanja standardnoga Proctorova pokusa koja iznosi $0.56 - 0.63 \text{ MJ/m}^3$ i energija zbijanja modificiranoga Proctorova pokusa koja iznosi $2.56 - 2.80 \text{ MJ/m}^3$. Prilikom zbijanja nekoherentnih materijala, kao što su pijesak, šljunak ili drobljeni kamen, primjenjuje se modificirani Proctorov pokus [97,98]. No, u *in situ* uvjetima nekoherentni se materijali ugrađuju vibracijskim sredstvima pa je stoga za određivanje Proctorovih elemenata korištena metoda zbijanja vibrirajućim čekićem prema normi *HRN EN 13286 - 4* [99]. Tome u prilog govori i rad [100] u kojemu je provedena usporedba rezultata Proctorovih elemenata i kalifornijskoga indeksa nosivosti (CBR) nekoherentnoga materijala te Proctorovih elemenata i tlačne čvrstoće CNS-a s i bez dodatka otpadne gume proizvedenih pomoću dvije metode – Proctorove metode i metode zbijanja vibrirajućim čekićem. Cilj istraživanja bila je ocjena učinkovitosti zbijanja tih dviju metoda na različitim mješavinama. Rezultati su pokazali kako se vibrirajućim čekićem mogu postići vrlo slične vrijednosti maksimalne suhe prostorne mase uz nešto drugačije količine vode. Upotrebom vibrirajućega čekića osigurava se ugradnja materijala pomoću vibracija, a prilikom ugradnje operater mora unijeti silu između 300 i 400 N i pri tome uzeti u obzir masu čekića. Materijal se ugrađuje u čelične kalupe otporne na koroziju promjera $152 \pm 0.5 \text{ mm}$ i visine $127 \pm 1 \text{ mm}$, postavljene na čelično postolje minimalne debljine 10 mm. Materijal se zbija u tri sloja u trajanju od 60 ± 2 sekunde po svakom sloju. Zbijanje vibrirajućim čekićem prikazano je slikom 3.5. Nakon zbijanja površina se uzorka poravna te se određuje masa mokroga zbijenog uzorka.



a)



b)

Slika 3.5. Oprema za izradu uzoraka CNS-a: a) kalup s materijalom; b) postupak zbijanja

Zbijeni uzorak potom se rastavlja te se suši u sušioniku 24 sata na 105°C. Potom slijedi vaganje suhoga uzorka te izračun udjela vode i gustoće uzorka prema formuli (3.1):

$$\rho_d = \frac{100 \times \rho}{100 + w} \quad (3.1)$$

Gdje su:

ρ – gustoća [Mg/m³]

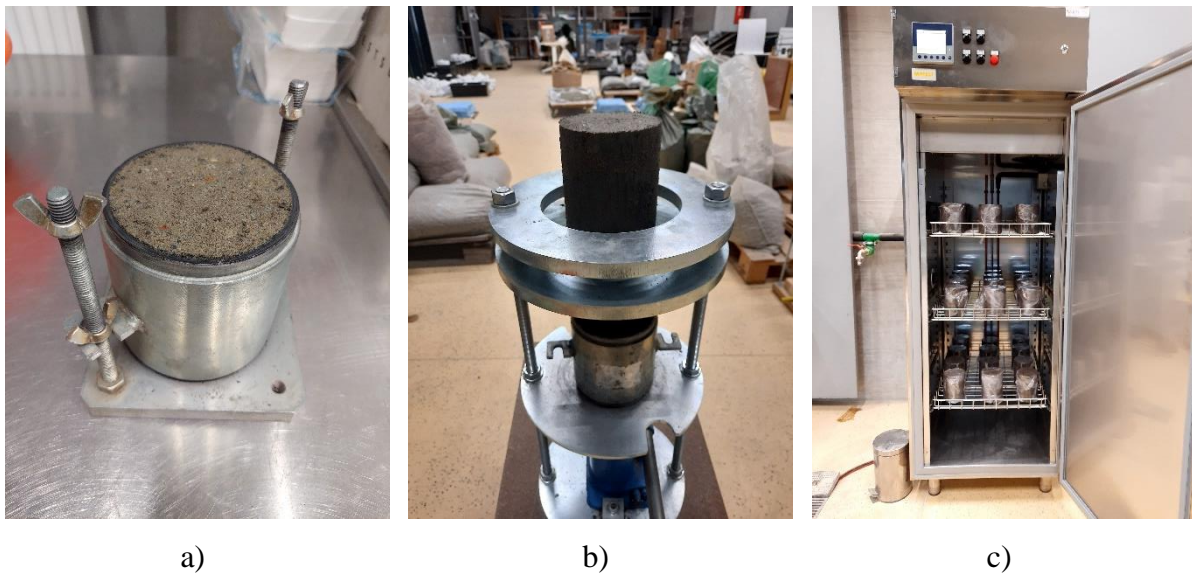
ρ_d – gustoća suhoga uzorka [Mg/m³]

w – udio vode [%]

Dobiveni se rezultati ucrtavaju u grafikon. Na isti način priprema se minimalno pet uzoraka iste mješavine kojima se varira količina vode u inkrementima 1% – 2% na način da se barem dvije vrijednosti u grafikonu nalaze s lijeve i barem dvije s desne strane optimalne vlažnosti. Prema navedenoj normi moguće je dobiti tri različite krivulje: konkavnu, konveksnu i ravnu. Osim vrijednosti vlažnosti i suhe prostorne mase za svaku se mješavinu crtaju i krivulje koje predstavljaju 0%, 5% i 10% zračnih pora. Pomoću tih krivulja određuje se optimalna vlažnost svake mješavine koja se primjenjuje prilikom izrade ispitnih uzorak, a postupak je pobliže opisan *Aneksom B* korištene norme [99].

3.2.2 Izrada i njega ispitnih uzoraka

Određena optimalna vlažnost mješavine koristi se za definiranje recepture mješavine za izradu laboratorijskih ispitnih uzoraka. Uzorci se izrađuju prema normi *HRN EN 13286 – 51* [101] vibrirajućim čekićem. Prema navedenoj normi za mješavine s najvećim zrnom do 22.4 mm izrađuju se uzorci u čeličnom kalupu otpornom na koroziju promjera 100 mm i visine 127 mm. Uzorci se zbijaju u tri sloja, 60 sekundi po svakom sloju. Važno je nakon zbijanja razrahliti površinu svakoga sloja kako bi se osigurala dobra povezanost slojeva. Prilikom zbijanja gornjega sloja na površinu sloja potrebno je staviti lubriciranu najlonsku foliju kako bi se, uslijed visoke temperature izazvane trenjem, spriječilo lijepljenje materijala za bat vibrirajućega čekića i tako osigurala ravna površina uzorka. Tako pripremljeni uzorci istiskuju se iz kalupa pomoću hidraulične preše brzinom do 2 mm/s kako bi se osigurala neporemećenost ispitnoga uzorka. Uzorci se omataju prijanjajućom plastičnom folijom kako bi se onemogućio gubitak vlage i osigurala hidratacija cementa. Tako omotani uzorci postavljaju se u klima komoru na njegu. Njega uzoraka podrazumijeva skladištenje uzoraka u klima komori pri relativnoj vlažnosti zraka od 90% i temperaturi od 20°C.



Slika 3.6. Izrađeni uzorci CNS-a: a) uzorak zbijen u kalupu; b) istiskivanje uzorka; c) njega uzoraka

Uzorci svih mješavina njegovani su u klima komori 7, 28 i 90 dana. Proizvodnja uzoraka u nekoliko koraka prikazana je slikom 3.6. a), b) i c). *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] propisana je tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana njege, a kako bi se utvrdio utjecaj gume i hidratacije cementa na čvrstoću mješavine tijekom vremena, jedna je skupina uzoraka njegovana i 90 dana. Prema autorima Adaska i Luhr [35] produljeno vrijeme njege cementom stabiliziranoga materijala rezultira povećanjem tlačne i vlačne čvrstoće te užim pukotinama na većim međusobnim razmacima u *in situ* uvjetima.

3.2.3 Tlačna čvrstoća

Najvažnije svojstvo cementom stabiliziranoga nosivog sloja jest tlačna čvrstoća koja se definira kao naprezanje pri slomu uzorka ispitivanoga jednoosnim naprezanjem sa slobodnom deformacijom. Tlačna čvrstoća označava se oznakom f_c te joj se u indeksu još označava broj dana nakon kojega je tlačna čvrstoća određena. Ispitivanje tlačne čvrstoće CNS-a provodi se prema normi *HRN EN 13286 – 41* [16] na način da se cilindrični uzorak opterećuje jednoosnom vertikalnom silom s kontinuiranim prirastom bez trzaja. Taj postupak proveden je automatiziranim testnim uređajem Shimadzu Autograph AG – X Series s kontrolom sile i pomaka pomoću računalnoga programa TRAPEZIUM X. Ispitivanje i karakteristični lom uzorka prikazani su slikom 3.7. Pri tome je propisano kako lom uzorka mora nastati u rasponu između 30. i 120. sekunde od početka unošenja opterećenja. Tlačna čvrstoća uzorka računa se kao naprezanje prilikom loma uzorka tijekom jednoosnoga opterećenja uzorka prema formuli (3.2):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.2)$$

Gdje su:

f_c – tlačna čvrstoća uzorka [N/mm^2]

F – najveća sila izmjerena prilikom opterećenja uzorka [N]

A_c – površina baze uzorka [mm^2]



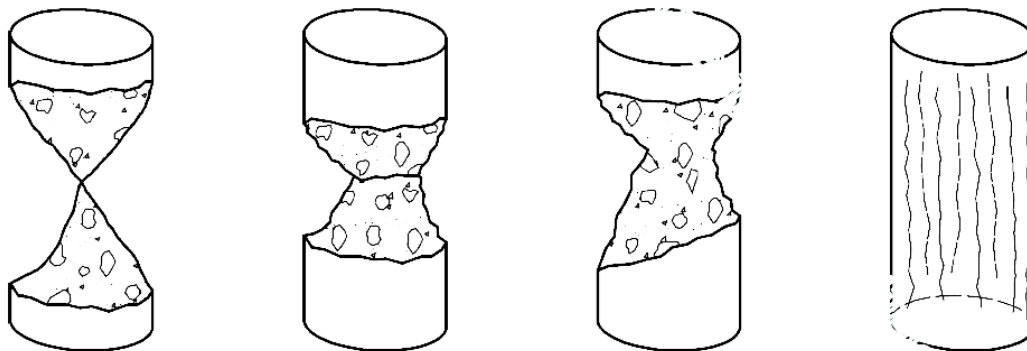
a)



b)

Slika 3.7. Standardni uzorci prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće: a) ispitivanje tlačne čvrstoće uzorka; b) karakteristični lom uzorka

Prilikom određivanja tlačne čvrstoće provodi se i vizualna analiza loma uzorka. Normom su dani prihvatljivi (slika 3.8.) i neprihvatljivi oblici lomova uzorka prema kojima se također određuje primjenjivost, odnosno neprimjenjivost ispitane mješavine u nosivom sloju kolnika.



Slika 3.8. Prihvatljivi oblici loma uzoraka prema normi EN 13286 – 41 [16]

Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je na tri jednaka uzorka svake mješavine kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata te kako bi se odbacile eventualne greške nastale prilikom izrade ili njege uzorka. Tlačna čvrstoća mješavine računa se kao srednja vrijednost tlačnih čvrstoća tri ispitana uzorka, a ako te vrijednosti međusobno odstupaju za više od 20%, odstupajuća vrijednost odbacuje se i ne uzima u proračun [92].

3.2.4 Neizravna vlačna čvrstoća

Ispitivanje vlačne čvrstoće CNS-a može se provesti izravnim i neizravnim vlačnim testom. U ovom je istraživanju korišten neizravni vlačni test propisan normom *EN 13286 – 42* [17], još nazvan i *brazilska metoda*, zbog jednostavnosti ispitivanja i mogućnosti korištenja opreme koja se koristi i za ispitivanje tlačne čvrstoće. Ispitivanje neizravne vlačne čvrstoće provodi se na način da se cilindrični uzorak postavi horizontalno na drvene letvice propisanih dimenzija. Na suprotnu izvodnicu uzorka također se postavlja letvica preko koje se unosi jednoosna vertikalna tlačna sila bez trzaja. Brzina unosa opterećenja određena je ograničenim unosom naprezanja koji iznosi najviše 0.2 MPa/s. Za ispitivanje korišten je testni uređaj Shimadzu Autograph AG – X Series s kontrolom sile i pomaka pomoću računalnoga programa TRAPEZIUM X. Neizravna vlačna čvrstoća računa se pomoću sile zabilježene prilikom loma uzorka prema formuli (3.3):

$$f_{it} = \frac{2F}{\pi HD} \quad (3.3)$$

Gdje su:

f_{it} – neizravna vlačna čvrstoća [MPa]

F – najveća sila izmjerena prilikom opterećenja [N]

H – visina uzorka [mm]

D – promjer uzorka [mm]

Uobičajeno oznaka za neizravnu vlačnu silu je f_{it} te joj se u indeksu još označava broj dana nakon kojega je neizravna vlačna čvrstoća ispitana. Postupak ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće i karakterističan lom uzorka prikazani su slikom 3.9.



a)



b)

Slika 3.9. Standardni uzorci priilikom ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće: a) ispitivanje neizravne vlačne čvrstoće uzorka; b) karakterističan lom uzorka

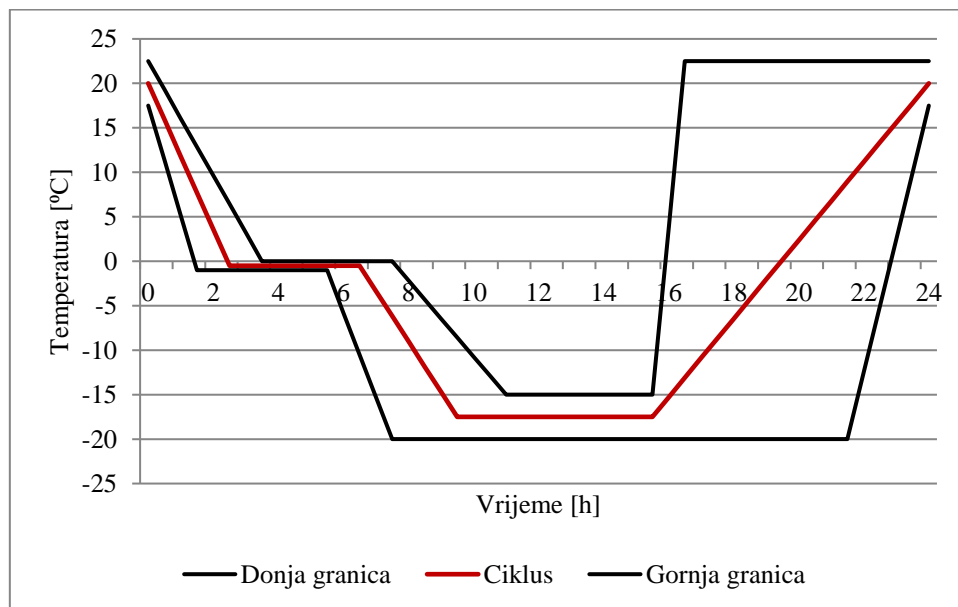
3.2.5 Otpornost na utjecaj smrzavice

Otpornost na utjecaj smrzavice vrlo je važno svojstvo cementom stabiliziranih mješavina, osobito u područjima s izraženim zimskim uvjetima te je i *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] propisana tražena otpornost na utjecaj smrzavice. U stručnoj se terminologiji ta otpornost izražava kao otpornost na mraz (eng. *resistance to frost* – RTF). Otpornost mješavine na mraz ispituje se prema tehničkoj specifikaciji *HRS CEN/TS 13286 – 54* [102]. Imajući na umu da se u ovim krajevima kao sredstvo za sprečavanje nastanka poledice na kolniku najviše koristi natrijev klorid – NaCl koji smanjuje otpornost CNS-a na smrzavicu, ispitivanje je provedeno prema *Aneksu B* tehničke specifikacije [102]. Prema specifikaciji za provođenje toga ispitivanja potrebno je proizvesti šest uzoraka prema normi *HRN EN 13286 – 51* [101] podijeljenih u dvije jednake skupine (skupine A i B). Pri tome je skupina B kontrolna skupina. Svi uzorci nakon zbijanja prolaze propisanu njegu pri 90% relativne vlažnosti i 20°C tijekom 28 dana omotani prijanjajućom plastičnom folijom s ciljem sprečavanja gubitka vlage tijekom razvoja čvrstoće. Nakon proteka 28 dana njege jedna se skupina uzoraka potapa u vodu pri sobnoj temperaturi (skupina B), dok se druga skupina uzoraka potapa u 1%-tnu otopinu natrijevog klorida (skupina A), kako je prikazano slikom 3.10. Uzorci u otopini natrijevog klorida stoje 48 sati, nakon čega se stavljaju u klima komoru na deset ciklusa smrzavanja i odmrzavanja prema profilu prikazanom na slici 3.11.



Slika 3.10. Uzorci potopljeni u vodu i otopinu natrijevog klorida

Po završetku ciklusa smrzavanja i odmrzavanja uzorci se ponovno potapaju u otopinu natrijevog klorida na 24 sata. Tijekom toga postupka prva skupina uzoraka stoji potopljena u vodi. Po završetku propisane njege uzoraka potrebno je osigurati ocjeđivanje uzoraka i potom se ispituje njihova tlačna čvrstoća prema normi *EN 13286 – 41* [16].



Slika 3.11. Temperaturni profil prema HRS CEN/TS 13286 – 54 [102]

Tlačna čvrstoća uzoraka ispitana je pomoću automatiziranoga testnog uređaja Shimadzu Autograph AG – X Series s kontrolom sile i pomaka pomoću računalnoga programa TRAPEZIUM X. Kao rezultat otpornosti mješavine na utjecaj smrzavice u prisustvu soli računa

se omjer tlačne čvrstoće uzoraka izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja i kontrolnih uzoraka prema formuli (3.4):

$$RTF = \frac{f_{cA}}{f_{cB}} \quad (3.4)$$

Gdje su:

RTF – indeks otpornosti prema smrzavanju [%]

f_{cA} – tlačna čvrstoća uzorka izloženog ciklusima smrzavanja [N/mm^2]

f_{cB} – tlačna čvrstoća kontrolnog uzorka [N/mm^2]

Kako bi mješavina zadovoljila zahtjeve postavljene *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3], treba imati minimalnu otpornost na smrzavicu u iznosu od 80%. Preciznije, čvrstoća uzoraka nakon izlaganja simuliranim zimskim uvjetima ne smije pasti za više od 20%.

3.2.6 Dinamički modul elastičnosti

Krutost materijala izražava se modulom elastičnosti. Dinamički modul elastičnosti (E_{din}) određen je korištenjem nerazorne metode mjerenja brzine prolaska ultrazvučnog impulsa kroz uzorak prema normi HRN EN 12504 – 4 [103]. Ta je metoda namijenjena testiranju betona, no sve je zastupljenija njezina primjena i u drugim materijalima stabiliziranim cementom [25,104]. Također, kao prednost te metode istaknuta je jednostavnost primjene, nerazornost i mogućnost razvoja modela za preliminarnu predikciju čvrstoće materijala samo na osnovi izmjerene brzine impulsa [20]. Dinamički modul elastičnosti izmjeren je na uzorcima pripremljenim prema normi *HRN EN 13286 – 51* [101], a na kojima je potom ispitana tlačna čvrstoća. Mjerenju prethodi izračun gustoće uzoraka temeljem izmjerenih dimenzija i mase uzorka. Dimenzije uzoraka izmjerene su korištenjem digitalnoga pomičnog mjerila točnosti ± 0.1 mm, dok je masa uzoraka izmjerena pomoću digitalne vage točnosti ± 0.1 g (slika 3.12.). Mjerenje se provodi na način da se na baze horizontalno postavljenoga cilindričnog uzorka prisloni predajnik i prijemnik uređaja za mjerenje brzine prolaska ultrazvučnog impulsa. Zbog hrapave površine CNS-a na kontaktu predajnika i prijemnika s bazom uzorka aplicira se gel koji osigurava potpun kontakt između tih tijela, što osigurava neometan prolazak ultrazvučnih valova. Ispitivanje se pokreće emitiranjem ultrazvučnih valova pri čemu se mjeri vrijeme potrebno za njihov prolazak kroz uzorak.



a)



b)

Slika 3.12. Određivanje dimenzija i mase uzorka

Za svaki uzorak mjerenje je ponovljeno triput, a kao rezultat usvojena je srednja vrijednost tri uzastopna mjerenja. Postupak mjerenja prikazan je slikom 3.13. Mjerenje je provedeno uređajem Proceq Pundit Lab (+) s frekvencijom od 54 kHz, pri čemu odabir frekvencije ovisi o vrsti materijala, veličini uzorka i mogućnostima raspoložive opreme, a izračun se provodi prema teoriji elastičnosti [105]. Izmjereno vrijeme koristi se za izračun brzine prolaska impulsa prema formuli (3.5):

$$v = \frac{L}{T} \quad (3.5)$$

Gdje su:

v – brzina ultrazvučnog impulsa [km/s]

L – duljina uzorka [mm]

T – vrijeme prolaska impulsa kroz uzorak [μ s]



Slika 3.13. Mjerenje brzine ultrazvučnog impulsa

Ultrazvučni impuls brže prolazi kroz matricu veće krutosti, tako da nesavršenosti, praznine i greške unutar uzorka uvelike utječu na vrijeme potrebno impulsu da prođe kroz uzorak. Dinamički modul elastičnosti izračunava se prema formuli (3.6):

$$E_{din} = \rho v^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (3.6)$$

Gdje su:

E_{din} – dinamički modul elastičnosti [MN/m²]

ρ – gustoća uzorka [kg/m³]

v – brzina ultrazvučnog impulsa [km/s]

ν – Poissonov omjer u elastičnom stanju

Vrijednost Poissonova omjera određuje se pomoću odnosa relativnih deformacija u dva međusobno okomita smjera, u elastičnom području ponašanja. No, tu je vrijednost vrlo teško precizno odrediti, a utjecaj Poissonova omjera na dinamički modul elastičnosti vrlo je mali [106] pa je stoga usvojena preporučena vrijednosti definirana literaturom i prijašnjim istraživanjima. Raspon unutar kojega se nalazi Poissonov omjer CNS-a jest 0.15 – 0.30, a obično se usvaja 0.25 [8]. Prema tome, za potrebe ovoga istraživanja usvojena je vrijednost Poissonova omjera od 0.25. Dinamički modul elastičnosti vrlo je bitan parametar ponašanja materijala u sferi teorijskoga dimenzioniranja kolničkih konstrukcija.

3.2.7 Statički modul elastičnosti

Statički modul elastičnosti (E_{st}) određuje se prema postupku definiranom normom *HRN EN 13286 – 43* [107]. Prema navedenoj normi statički modul elastičnosti može se odrediti tijekom ispitivanja izravne i neizravne vlačne čvrstoće uzorka te tlačne čvrstoće uzorka. U tom istraživanju određivanje statičkoga modula elastičnosti provedeno je tijekom tlačnoga testa za jednoosno stanje naprezanja pomoću Hookeova zakona [108]. Tijekom provođenja testa bilježe se sila i pomak. Propisani postupak podrazumijeva izračun statičkoga modula elastičnosti pri iznosu od 30% maksimalne sile i odgovarajućeg pomaka. Takav je postupak vrlo dugotrajan i neprecizan iz razloga što uređaji kojima se provodi tlačni test nemaju mogućnost mjerenja pomaka specifičnih točaka uzorka, već mjere pomak ispitne glave uređaja. Nadalje, za mjerenje pomaka specifične točke uzorka predviđeno je korištenje digitalnoga mjerača (eng. *digital gauge*) koji se montira na plašt uzorka, no zbog već spomenute hrapavosti površine i zakrivljenosti cilindričnoga uzorka odgovarajući kontakt između uzorka i mjerača vrlo je teško postići [19]. Stoga se u tom istraživanju za mjerenje pomaka koristila metoda 3D digitalne stereo fotogrametrije (eng. *3D digital image correlation – 3D DIC*) pomoću sustava GOM ARAMIS (slika 3.14.). Ta je metoda istaknuta kao napredan pristup mjerenju deformacija [109].



Slika 3.14. Sustav GOM ARAMIS za digitalnu stereo fotogrametriju

Sustav ARAMIS sastoji se od opreme za mjerenje pomaka, prikupljanje podataka i njihovu obradu. Osnovne su komponente sustava dvije kamere za osiguranje trodimenzionalnoga mjerenja, stalak za kamere s LED osvjetljenjem, napajanje i upravljač kamere te softverski paket i računalo. Koristeći tu metodu, osigurava se precizno prostorno mjerenje u stvarnom vremenu, a sustav kamere zamjenjuje kontaktne uređaje kao što su linearni varijabilni

diferencijalni transformator (eng. *Linear Variable Differential Transformer – LVDT*), mjerач pomaka (eng. *strain gauge*), ekstenzometar (eng. *extensometer*) i sl. Optičkim se mjerenjem zapravo mjeri pomak više kontrastnih točaka na uzorku tijekom tlačnoga testa te je omogućena i vizualna analiza pomoću arhiviranih fotografija. Osim pripreme uzorka provođenje toga postupka zahtijeva i kalibraciju kamera pomoću certificirane i kodirane ploče za kalibraciju [110]. Priprema uzorka podrazumijeva stvaranje kontrasta između podloge i nanesenih točaka koji je ostvaren bojanjem površine uzorka u bijelu boju na koju su potom nanesene crne točke (slika 3.15.). Veličina točaka ovisi o veličini uzorka te očekivanim pomacima, odnosno od praćenoga mjernog volumena. Takav vizualni pristup omogućava precizno mjerenje pomaka. Statički modul elastičnosti računa se prema formuli (3.7):

$$E_{st} = \frac{1.2 \times F_r}{\pi D^2 \varepsilon_3} \quad (3.7)$$

Gdje su:

E_{st} – statički modul elastičnosti [MPa]

F_r – najveća zabilježena sila [N]

D – promjer uzorka [mm]

ε_3 – uzdužni pomak uzorka pri sili $0.3F_r$

Ovisnost modula elastičnosti o jednoj točki unutar dijagrama može unijeti nerealan rasap u rezultate pa se često primjenjuje metoda određivanja nagiba regresijskoga pravca u željenom području dijagrama, što predstavlja pouzdaniju metodu koja je manje ovisna o nesigurnosti ispitnih uređaja.



Slika 3.15. Uzorak pripremljen za ispitivanje statičkog modula elastičnosti

Statički modul elastičnosti svake mješavine izmjeren je na tri uzorka iste mješavine te je kao rezultat usvojena njihova srednja vrijednost. U slučaju da rezultati međusobno odstupaju više od 20%, takve odstupajuće vrijednosti nisu uzete u proračun.

3.2.8 Ispitivanje ekološkog utjecaja

Otpadni se materijali u građevinama moraju koristiti na odgovoran i održivi način te taj materijal ne smije imati negativan utjecaj na okoliš. Stoga su, radi procjene utjecaja na okoliš kroz izluživanje opasnih metala u okolno tlo i vodu, provedena istraživanja izluživanja sukladno preporukama tehničke specifikacije *HRS CEN/TS 16637 – 1* [111] za ispitivanje izluživanja na materijalima i građevinskim proizvodima. Sukladno tehničkoj specifikaciji korištena je pojednostavljena metoda ispitivanja izluživanja jednostupanjskim postupkom kod omjera tekuće – čvrsto od 10 l/kg za materijale s veličinom čestica manjom od 4 mm prema normi *HRN EN 12457 – 2* [112]. Ta metoda navodi se kao dozvoljena neizravna metoda s obzirom na to da tehničke specifikacije propisuju ispitivanje koje traje najmanje 64 dana s prikupljanjem 8 uzoraka eluata po jednom ispitnom uzorku materijala, što predstavlja dugotrajan i vrlo skup postupak. Aparatura za postupka pripreme eluata prikazana je slikom 3.16.



Slika 3.16. Postupak pripreme eluata

Za pripremu eluata u tom istraživanju korištena je granulirana guma frakcije 0 – 0.5 mm koja je korištena i kao zamjena za pijesak u ispitanim mješavinama. Osim određivanja količine otpuštenih teških metala iz samoga gumenog granulata analizirana je i količina otpuštenih teških metala iz mješavina cementom stabiliziranoga nosivog sloja s otpadnom gumom. Prema postupku opisanom u normi potrebno je pripremiti eluat pomoću demineralizirane vode, no u tom je istraživanju, osim demineralizirane vode, korištena i kišnica. Naime, prethodna istraživanja pokazala su kako količina otpuštenih teških metala ovisi i o pH vrijednosti tekućine korištene za pripremu uzorka [113]. Prilikom pripreme eluata guma je korištena u dobavljenom obliku, dok je uzorak stabilizacijske mješavine dobiven usitnjavanjem standardnoga cilindričnog uzorka i prosijavanjem kroz sito veličine otvora 4 mm. Pri tome korišten je uzorak starosti 28 dana. Pripremljeni uzorci analizirani su u Nastavnom zavodu za javno zdravstvo Osječko-baranjske županije.

3.2.9 Vizualna i kemijska analiza

Morfologija zrna agregata analizirana je pomoću pretražnoga elektronskog mikroskopa (eng. *scanning electron microscope* - SEM). Fokus vizualne analize stavljen je na morfologiju gumenoga agregata, s obzirom na to da interakcija površine gume s cementnom pastom nije poznata. Ranije je dokazano kako oblik i hrapavost površine čestice imaju utjecaj na optimalnu

vlažnost mješavine [65]. Dodatno, uzimajući u obzir sličnost granulometrijskoga sastava gume i pijeska, i pijesak je analiziran pomoću pretražnoga elektronskog mikroskopa (slika 3.17.).



Slika 3.17. Pretražni elektronski mikroskop (eng. Scanning Electrone Microscope – SEM)

Cilj analize bio je usporediti kontakt između gume i cementne paste te pijeska i cementne paste. Postoje indikacije kako guma usporava hidrataciju cementa [68]. Osim morfologije čestice provedena je i kemijska analiza čestica gume energetske-disperzijskom spektrometrijskom analizom (eng. *Energy – dispersive spectrometry analysis – EDS analysis*) s ciljem utvrđivanja utjecaja sastavnih elemenata gume na proces hidratacije cementa. Kemijskom se analizom, osim sastavnih elemenata gume, analizirala i prisutnost cinkovog oksida (ZnO) i olovovog oksida (PbO). Naime, dokazano je kako ZnO usporava hidrataciju cementa i utječe na smanjenje konačne čvrstoće cementnoga kompozita [114,115], dok PbO usporava proces hidratacije cementa [115]. Rezultati te analize uspoređeni su s rezultatima pregledne rendgenske analize (eng. *X-ray*) provedenim u Nastavnom zavodu za javno zdravstvo „Dr. Andrija Štampar“ u Zagrebu.

3.2.10 Specifična površina čestica

Različito porijeklo prirodnih i otpadnih materijala korištenih u ovom istraživanju pokazalo je potrebu za analizom površine čestica. Naime, prirodni agregat dobiven iskopom iz riječnoga

korita pravilnoga je oblika zrna s glatkom površinom čestica. No, otpadna guma dobivena je mehaničkim usitnjavanjem, a zbog svoje kompleksne strukture i elastične prirode njezina površina nije pravilnoga oblika. Stoga je provedena analiza specifične površine čestice BET metodom (eng. *specific surface area* – SSA) u uređaju Qauntachrome NOVA 4200e (slika 4.18.) prema normi ISO 9277 [116]. Taj postupak provodi se na način da se uzorak poznate mase postavi u epruvete uređaja za određivanje specifične površine materijala BET metodom.



Slika 3.18. Uređaj za određivanje specifične površine materijala BET metodom

Potom se provodi postupak degasiranja, odnosno uklanjanja nečistoća i vlage iz uzorka pri povišenoj temperaturi. Daljnji postupak temelji se na određivanju razlike adsorbiranoga plina i ukupne količine plina. Prema normi moguće je koristiti dva različita plina: dušik pri temperaturi vrenja (77.3 K) ili argon pri temperaturi tečenja (87.27 K). U tom istraživanju korišten je tekući dušik i analiza je provedena za pijesak i oba oblika otpadne gume.

3.2.11 Mjerenje skupljanja uzoraka

Kao jedan od osnovnih uzroka nastanka pukotina u CNS-u ističe se skupljanje materijala uslijed hidratacije cementa. Kako je u pregledu stanja područja navedeno, guma pokazuje potencijal za smanjenje toga skupljanja te je to bio i jedan od motiva ovoga istraživanja. Za mjerenje skupljanja CNS-a ne postoji normom propisana metoda, stoga je za potrebe ovoga istraživanja

osmišljen postupak mjerenja skupljanja standardnih uzoraka izrađenih prema normi *HRN EN 13286 – 51* [101] uz pomoć linearnih varijabilnih diferencijalnih transformatora (LVDT) kako je prikazano slikom 3.19.



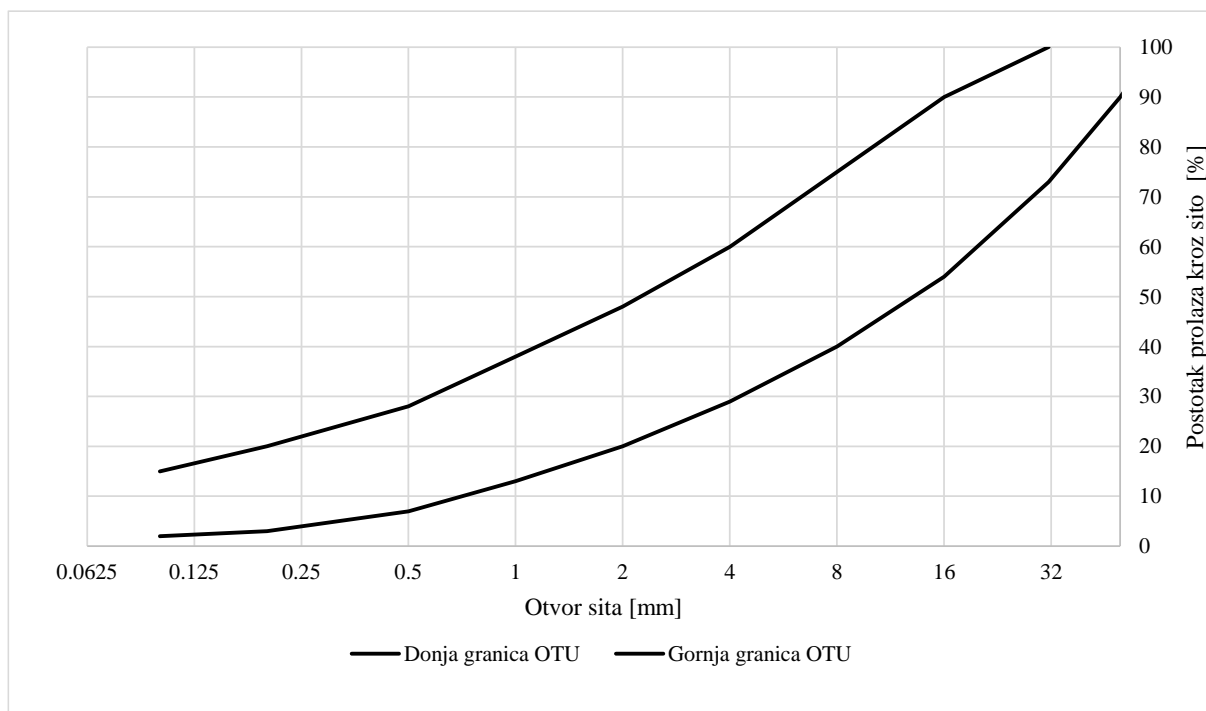
Slika 3.19. Mjerenje skupljanja uzorka

Naime, postupak se provodi na način da se uzorci neposredno po zbijanju istiskuju iz kalupa pomoću hidraulične preše, na plašt uzorka postavlja se elastični prsten, a na vrh uzorka aluminijska kvadratna pločica dimenzija $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$. Jedan LVDT postavlja se okomito na kvadratnu pločicu i namijenjen je mjerenju vertikalne deformacije uzorka, dok se dva LVDT-a postavljaju okomito na dvije suprotne izvodnice na sredinu visine uzorka. Na taj način se mjeri bočni pomak uzorka. Korištenjem elastičnoga prstena i pločice onemogućava se utiskivanje igle mjernoga uređaja u uzorak. Mjerenje se provodi 7 dana bez prekida. Iz dobivenih rezultata računa se relativna volumna promjena za svakih 24 sata ispitivanja. Za bilježenje i arhiviranje podataka potreban je sustav za prikupljanje podataka (eng. *data aquisition system*) i pripadni programski paket. U ovom ispitivanju korišten je sustav DEWESoft SIRIUS HD 16xLV s pripadnim programskim paketom DEWESoftX. Mjerenje skupljanja provedeno je na uzorcima koji su, temeljem ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, pokazali zadovoljavajuće rezultate.

3.3 Ispitivanja na razini konstrukcije

3.3.1 Nevezani nosivi sloj

Nevezani nosivi sloj kolničke konstrukcije sastoji se od nekoherentnoga prirodnog materijala korištenoga i za stabilizacijske mješavine (pijesak i tri frakcije šljunka). Granulometrijski sastav mješavine nevezanoga nosivog sloja sastavljen je tako da zadovolji zahtjeve postavljene *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] koji su prikazani slikom 3.20.



Slika 3.20. Granično područje granulometrijskog sastava nevezanog nosivog sloja prema OTU [3]

Kao i za ispitivanja na razini materijala Proctorovi elementi mješavine nevezanoga nosivog sloja određeni su metodom vibrirajućega čekića prema normi *HRN EN 13286 – 4* [99] detaljnije opisanom u poglavlju 4.2.1.

Nevezani nosivi sloj izrađen od prirodnoga šljunka mora imati kalifornijski indeks nosivosti (eng. *California Bearing Ratio* – CBR) najmanje 40%. Kalifornijski indeks nosivosti mjera je nosivosti materijala, a ispituje se postupkom opisanim u normi *HRN EN 13286 – 47* [117]. Uzorak za ispitivanje zbijaje se u kalup propisanih dimenzija i ostavi potopljen u vodi 96 sati opterećen utezima propisane mase. Nakon njege, vrši se ispitivanje utiskivanjem klipa dimenzije 50 ± 0.5 mm brzinom 1.27 mm/min. Prilikom ispitivanja bilježi se odnos sile i prodiranja, a kao mjerodavne vrijednosti uzimaju se sila pri prodiranju od 2.5 mm i 5 mm. Te dvije izmjerene sile zatim se stavljaju u omjer s mjerodavnim silama izmjerenim za tucanik

koje iznose 13.2 kN i 20 kN. Veća od dvije dobivene vrijednosti usvaja se kao CBR ispitana materijala.

Nevezani materijal ugrađen je u posebno izrađene kalupe od nehrđajućega čelika dimenzija 50 × 50 × 10 cm (slika 3.21.). Zbijanje je vršeno vibrirajućim čekićem u trajanju od 10 minuta. Za svaku mješavinu CNS-a izrađen je po jedan uzorak nevezanoga nosivog sloja kako bi se umanjio utjecaj varijacija u kvaliteti toga sloja na rezultat cjelokupnoga sustava, skratilo vrijeme ispitivanja i uštedjelo na materijalu. Dimenzije sloja odabrane su temeljem veličine opreme potrebne za ispitivanje.



Slika 3.21. Nevezani nosivi sloj

3.3.2 Cementom stabilizirani nosivi sloj

U cementom stabiliziranom nosivom sloju sustava kolničke konstrukcije korištene su sve stabilizacijske mješavine ispitane na razini materijala. Sloj CNS-a u ovom je ispitivanju postavljen na nevezani nosivi sloj između kojih je postavljen geotekstil kao sredstvo razdvajanja materijala i kako bi se neutralizirale greške nastale kao posljedica međusobnoga namještanja dvaju materijala prilikom inicijalnoga opterećenja. Za tu svrhu korišten je geotekstil specifične težine 300 g/m² kao materijal najčešće korišten u kolničkim konstrukcijama sa svrhom razdvajanja materijala.

Ploče stabilizacijske mješavine ugrađene su u posebno izrađene drvene kalupe dimenzija 35 × 45 × 10 cm pomoću vibracijskoga čekića u trajanju od 10 minuta. Kalupe je potrebno prethodno namazati oplatnim uljem kako bi se spriječilo lijepljenje materijala za stjenke kalupa i omogućilo vađenje uzoraka iz kalupa bez narušavanja uzorka. Zbijanje materijala vršeno je u

jednom sloju. Kako bi se osigurala ravnost površine ploče, zbijanje je vršeno preko drvenoga pločastog elementa. Ravnost površine ploče vrlo je važna zbog potpunoga nalijeganja asfaltne ploče na CNS te osiguranja dobrog kontakta između materijala. Prilikom izrade ploča kontrolirana je postignuta gustoća koja je trebala zadovoljiti 98% maksimalne gustoće mješavine. Proizvedeni su uzorci njegovani u dvije faze. Prva je faza obuhvatila jedan dan nakon zbijanja uzoraka u kojima je uzorak ostao u kalupu te je pokriven vlažnim krpama kako bi se onemogućio gubitak vlage. Nakon 24 sata uzorci su raskalupljeni te omotani vlažnim krpama i tako njegovani sljedećih 27 dana. Nakon 28 dana njege uzorci su ispitani. Posebno izrađeni kalup, uzorak u prvoj fazi njege i uzorak u drugoj fazi njege prikazani su slikom 3.22. a), b) i c).



a)

b)

c)

Slika 3.22. Ploče CNS – a) kalup za izradu ploča CNS-a; b) materija ugrađen u kalup; c) druga faza njege uzoraka

Ploče nakon 28- dnevne njege prikazane su slikom 3.23. Za svaku mješavinu CNS-a izrađene su tri iste ploče kako bi se osigurala pouzdanost i točnost rezultata, što je rezultiralo 51 pločom stabilizacijske mješavine.



Slika 3.23. Ploče CNS-a nakon 28-dnevne njege

3.3.3 Asfaltni sloj (AC 11 surf)

Za simulaciju habajućega sloja kolničke konstrukcije izrađene su asfaltna ploče dimenzija $30 \times 40 \times 4$ cm postupkom opisanim normom *HRN EN 12697 – 33* [118]. Ploče su izrađene pomoću valjkastoga zbijajača koji simulira ugradnju asfalta glatkim statičkim valjkom u Laboratoriju za prometnice Građevinskog fakulteta u Rijeci. Valjkasti zbijajač i asfaltna ploča prikazani su slikom 3.24. Zbijanje se odvija na način da se u kalup napuni asfaltnom mješavinom te se opterećuje preko čeličnoga valjka ujednačenom brzinom. Pri tome važno je spriječiti lijepljenje materijala za kalup. U kalupe je ugrađena mješavina AC 11 surf koja se prema *Tehničkom propisu za asfaltna kolnike* (NN 48/2021) [67] koristi za habajuće slojeve kolnika. Najveće zrno agregata te mješavine ima promjer 11 mm.



a)

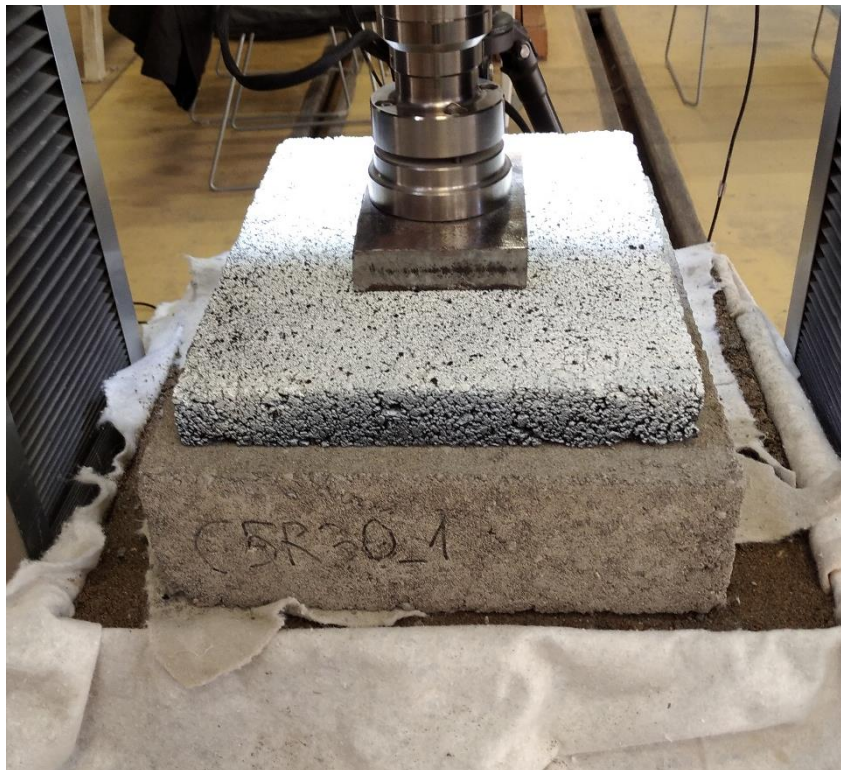


b)

Slika 3.24. a) valjkasti zbijajač za izradu asfaltnih ploča; b) asfaltna ploča

Analiza ponašanja kolničke konstrukcije provedena je digitalnom stereo fotogrametrijom pomoću sustava GOM ARAMIS te je stoga bilo potrebno asfaltna ploče pripremiti za ispitivanje. Ploče su obojane u bijelu boju te su na bijelu podlogu nanosene crne točkice

stohastičkog uzorka. Osim točkica korištene su pomoćne naljepnice kružnoga oblika za određivanje referentne ravnine i praćenje vertikalnih pomaka konstrukcije. Na taj način osiguran je kontrast između promatranih točaka i podloge. Sustavom GOM ARAMIS stvara se digitalni 3D snimak površine uzorka s ciljem utvrđivanja utjecaja različitih stabilizacijskih mješavina na razvoj deformacija asfalta pri ponavljajućem opterećenju različitoga intenziteta. Na slici 3.25. prikazan je osmišljeni sustav kolničke konstrukcije koji se sastoji od nevezanoga nosivog sloja, cementom stabiliziranoga sloja te asfaltnoga sloja.

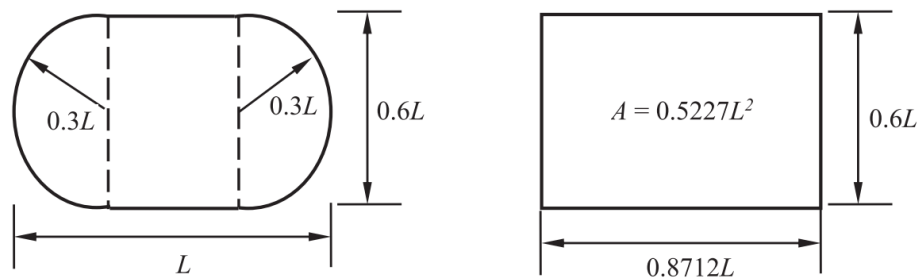


Slika 3.25. Sustav kolničke konstrukcije

3.3.4 Simulacija prometnoga opterećenja

Prometno opterećenje simulirano je automatiziranim testnim uređajem Shimadzu Autograph AG – X Series s kontrolom sile i pomaka pomoću računalnoga programa TRAPEZIUM X opterećivanjem i rasterećivanjem uzorka u jednakim intervalima ponavljajućim opterećenjem s četiri različita intenziteta. Kontaktna ploha između pneumatika i asfaltnoga zastora poprima oblik pravokutnika s dva polukruga, no za potrebe simulacije prometnoga opterećenja ta je površina svedena na ekvivalentan pravokutnik. Za simulaciju kontakta korištena je čelična pločica tlocrtnih dimenzija $114 \times 116 \times 30$ mm. Dimenzija pločice odabrana je u skladu s preporukama danim u [119], a prikazana je slikom 3.26. Kao početno naprezanje na površini

kolnika usvojeno je naprezanje od 750 kPa te je ono povećavano u inkrementima od 250 kPa sve do 1500 kPa.



Slika 3.26. Kontaktna površina pneumatik - asfaltni zastor [119]

Izazvana naprezanja u konačnici veća su od onih u stvarnim uvjetima, no korištena su kako bi se izazvala znatna oštećenja sustava kolničke konstrukcije u vremenu prihvatljivom za laboratorijska ispitivanja. Na taj način osigurano je ispitivanje sva tri uzorka iste mješavine u jednom danu kako bi uzorci bili ispitani pri istoj starosti. S obzirom na to da je prometno opterećenje najutjecajniji čimbenik na širenje pukotina i zamor materijala [47], za svako stanje naprezanja ponovljeno je 50 ciklusa opterećenja i rasterećenja konstrukcije. Na taj se način simuliralo ponavljajuće prometno opterećenje, odnosno prelazak osovina preko karakterističnoga poprečnog presjeka ceste. Svaki od 50 ciklusa pri četiri zadana naprezanja kontroliran je na isti način – prirast naprezanja brzinom od 250 kPa/s do zadane vrijednosti, zatim je ta vrijednost zadržana 5 s, nakon čega slijedi rasterećenje s padom 250 kPa/s. Dakle, ukupno je za svaki od uzoraka napravljeno 200 ciklusa opterećenje – rasterećenje. To je ispitivanje provedeno na tri ista sustava kolničke konstrukcije za svaku mješavinu cementom stabiliziranoga nosivog sloja. U sustavu ispitane kolničke konstrukcije variran je CNS, dok su ostali slojevi sustava ostali nepromijenjeni.

Ispitivanje je praćeno i snimano pomoću sustava GOM ARAMIS, frekvencijom fotografiranja od 4 Hz, što je za svaki uzorak osiguralo nekoliko tisuća fotografija. Osim toga, cijelo ispitivanje praćeno je i samim uređajem za ispitivanje, odnosno frekvencijom od 10 Hz praćeni su pomak traverze i iznos sile. Kao rezultat toga ispitivanja nakon obrade dobiveni su grafički prikazi deformacija asfaltnih ploča prilikom opterećenja uzorka. Pri tome su kao mjerodavne faze ispitivanja promatrana stanja deformacija na kraju svakoga ciklusa opterećenja. Osim grafičkoga prikaza deformacija površine uzorka ispis rezultata sadrži i mjernu skalu s vrijednostima deformacija na kraju svakoga ciklusa opterećenja. Pod pretpostavkom normalne distribucije rezultata, za prikaz vrijednosti deformacija korišten je statistički koncept 3σ

područja. Koristeći taj pristup, očekuje se da će se 99.7% rezultata nalaziti u području tri standardne devijacije i na taj se način mogu detektirati ekstremne vrijednosti rezultata koji mogu ukazivati na neobične i nepravilne rezultate mjerenja. Prije obrade rezultata izvršeno je poravnanje očitavanja svih vrijednosti pomaka prema ravnini koja je dobivena kao najbolje uklapanje u površinu asfaltnoga zastora prije opterećenja metodom najmanjih kvadrata.

3.4 Zaključno

Ispitivanja provedena u sklopu ovoga istraživanja u skladu su s *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3], još uvijek važećom tehničkom regulativom iako se radi o dokumentu iz 2001. godine. U radu su primijenjene europske norme za ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava CNS-a, ali i neke nove, suvremene metode. Modernim tehnologijama (digitalna stereo fotogrametrija, SEM, BET) nadopunjena su istraživanja standardnim metodama radi preciznijih i sveobuhvatnijih analiza karakteristika nestandardnoga materijala kolničke konstrukcije. Također, provedena je i analiza utjecaja na okoliš u smislu potencijala izlučivanja štetnih tvari, kao i analiza sustava kolničke konstrukcije, što čini odmak od uobičajenih i ograničenih ispitivanja CNS-a na razini samoga materijala.

4 Rezultati ispitivanja na razini materijala

4.1 Gustoća agregata i cementa

Opis metode ispitivanja prikazan je u poglavlju 3.1.3. Izmjerene gustoće korištenih materijala prikazane su tablicom 4.1.

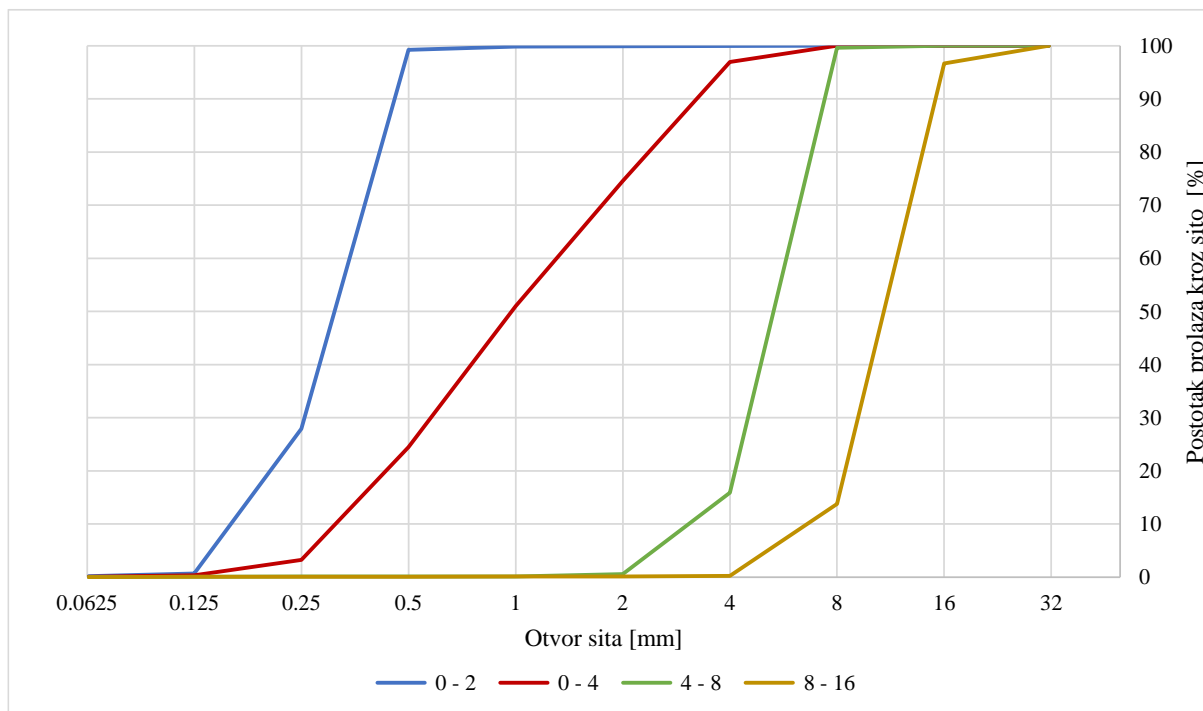
4.1. Gustoće korištenih materijala

Materijal	Gustoća [g/cm^3]
pijesak 0 – 2 mm	2.86
šljunak 0 – 4 mm	2.96
šljunak 4 – 8 mm	2.63
šljunak 8 – 16 mm	2.70
guma 0 – 0.5 mm	1.12
guma 0.8 – 3 mm	1.12
cement	2.92

Iz prikazanih podataka može se zaključiti kako je gustoća svih frakcija prirodnoga agregata vrlo slična i nalazi se u rasponu $2.63 - 2.96 \text{ g}/\text{cm}^3$, dok je gustoća gume znatno manja i iznosi $1.12 \text{ g}/\text{cm}^3$. Obje frakcije gume imaju istu gustoću jer su dobivene od istoga materijala, a razlikuju se samo u obliku i veličini čestica. Gustoća prirodnoga agregata u skladu je s očekivanjima temeljenim na inženjerskom iskustvu, dok je gustoća gume podjednaka gustoći gume korištenoj u drugim istraživanjima [70,74,77]. Gumi korištenoj u spomenutim istraživanjima izmjerena je gustoća $1.12 \text{ g}/\text{cm}^3$ i $1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$.

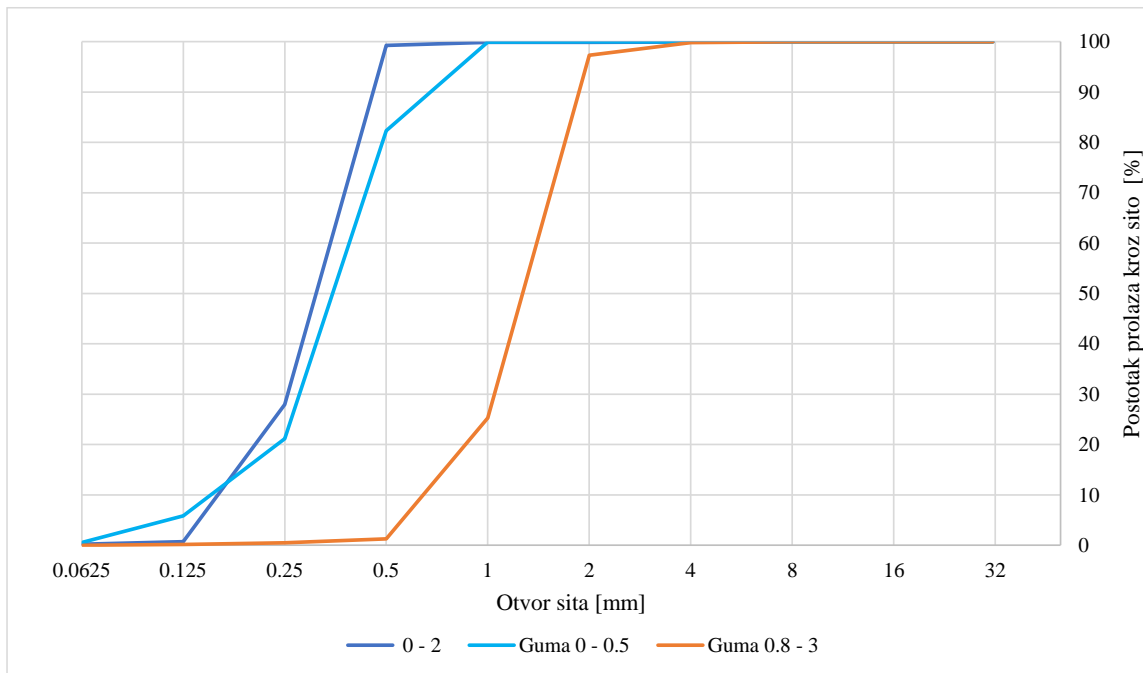
4.2 Receptura mješavina

Na slici 4.1. prikazan je granulometrijski sastav pijeska (0 – 2 mm) i tri frakcije šljunka (0 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm). Iz prikazanoga granulometrijskog sastava može se vidjeti kako komercijalni nazivi dobavljenih frakcija agregata odgovaraju njihovom granulometrijskom sastavu.



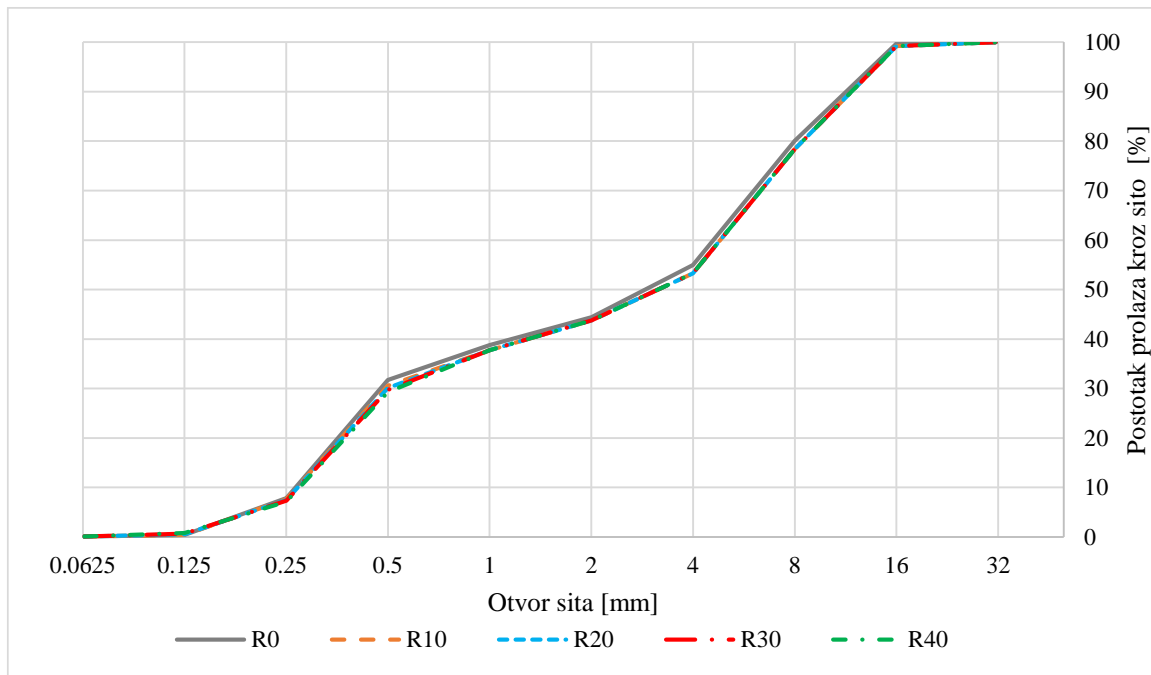
Slika 4.1. Granulometrijski sastav prirodnog agregata

Temeljem granulometrijskog sastava pojedine frakcije agregata, projektiran je granulometrijski sastav referentnih mješavina. Referentna mješavina agregata označena je kao R0 što znači da u svom sastavu sadrži 0% gume. Maseni udio veziva u mješavinama iznosi 3%, 5% i 7% što je u skladu s već navedenim količinama cementa u stabilizacijskim mješavinama, a koje iznose 2% – 8%. Nadalje, određen je i granulometrijski sastav gumenoga granulata i gumenih niti te je prikazan slikom 4.2. Na istoj slici prikazana je i granulometrijska krivulja pijeska na temelju koje se vidi sličnost u tim materijalima. U potpoglavlju 2.3.1. utvrđeno je kako je uobičajeno u takvim mješavinama gumeni granulati koristiti kao volumnu zamjenu sitne frakcije agregata. Zbog sličnosti u granulometrijskom sastavu pijeska i granulirane gume frakcije 0 – 0.5 mm odlučeno je kako će se gumeni granulati koristiti kao volumna zamjena za pijesak u iznosima 10%, 20%, 30% i 40%. Preliminarnim ispitivanjem pokazalo se kako je količina od 60% gume kao zamjene za pijesak neprikladna zbog nemogućnosti postizanja potrebne tlačne čvrstoće uzoraka te teškoga rukovanja takvim uzorcima [100,120]. No, gumene niti ne pokazuju sličnost u granulometriji niti s jednom frakcijom agregata, a razlikuju se i oblikom čestica. Stoga su niti korištene kao volumni dodatak referentnoj mješavini sa 7% veziva. Dodatak gumenih niti upravo mješavini s najvećim udjelom cementa odabran je temeljem očekivanja znatnoga negativnog utjecaja na čvrstoću uzrokovanoga veličinom čestica gumenih niti.

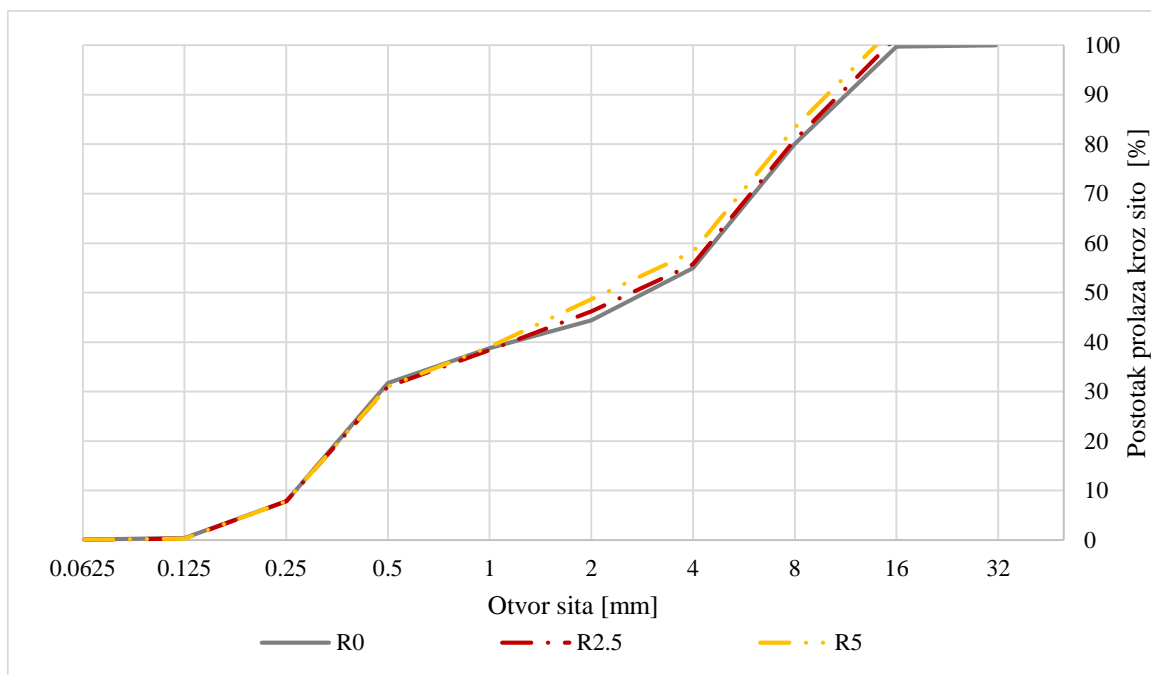


Slika 4.2 Granulometrijski sastav gumenog agregata

Projektiran je sastav tri skupine mješavina. Prvu skupinu čine referentne mješavine i označene s oznakom R0. Drugu skupinu čine mješavine s volumnom zamjenom pijeska s granuliranom gumom i označene su oznakama R10, R20, R30 i R40 za volumne zamjene u iznosima 10%, 20%, 30% i 40%. Dok treću skupinu čine mješavine s volumnim dodatkom gumenih niti referentnoj mješavini u iznosima od 2.5% i 5% koje su označene oznakama R2.5 i R5. Granulometrijski sastavi projektiranih mješavina prikazani su slikama 4.3. i 4.4. na način da je na slici 4.3. prikazan sastav referentne mješavine i mješavina s granuliranom gumom, a na slici 4.4. sastav referentne mješavine i mješavina s gumenim nitima.



Slika 4.3. Granulometrijski sastav referentnih mješavina i mješavina s granuliranom gumom



Slika 4.4. Granulometrijski sastav referentnih mješavina i mješavina s gumenim nitima

Očekivano, sastav modificiranih mješavina vrlo je sličan sastavu referentnih mješavina što čini temelj za usporedbu tih mješavina. S obzirom na znatnu razliku u specifičnoj težini između gumenoga granulata i prirodnoga agregata tablicama 4.2 i 4.3 iskazani su i maseni i volumni sastav mješavina agregata.

4.2. Maseni udio frakcija agregata u mješavinama

Maseni udio frakcija agregata u mješavinama [%]						
Gumeni granulat 0 – 0.5						
	Guma	0 - 2 mm	0 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	Ukupno
R0	0.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	100.00
R10	0.9953	22.8472	25.3858	25.3858	25.3858	100.00
R20	2.0217	20.6270	25.7838	25.7838	25.7838	100.00
R30	3.0809	18.3360	26.1944	26.1944	26.1944	100.00
R40	4.1743	15.9709	26.6182	26.6182	26.6182	100.00
Gumene niti 0.8 – 3 mm						
R2.5	0.9988	24.7503	24.7503	24.7503	24.7503	100.00
R5	1.9778	24.5056	24.5056	24.5056	24.5056	100.00

Iz prikaza masenih udjela pojedinih frakcija u mješavinama može se zaključiti kako mješavine sa zamjenom pijeska gumom u iznosima 10%, 20%, 30% i 40% sadrže otprilike 1%, 2%, 3% i 4% mase gume. Kod mješavina s gumenim nitima volumni dodatak gume čini oko 1% i 2% mase agregata za 2.5% i 5% dodatka gume. Takav sastav čini temelj za usporedbu mješavina sa sličnim masenim udjelom gume i analizu utjecaja oblika gume na mehanička svojstva materijala.

4.3. Volumni udio frakcija agregata u mješavinama

Volumni udio frakcija agregata u mješavinama [%]						
Gumeni granulat 0 – 0.5 mm						
	Guma	0 - 2 mm	0 - 4 mm	4 - 8 mm	8 - 16 mm	Ukupno
R0	0.0000	24.2888	23.5289	26.4196	25.7626	100.00
R10	2.4289	21.8600	23.5289	26.4196	25.7626	100.00
R20	4.8578	19.4311	23.5289	26.4196	25.7626	100.00
R30	7.2867	17.0022	23.5289	26.4196	25.7626	100.00
R40	9.7155	14.5733	23.5289	26.4196	25.7626	100.00
Gumene niti 0.8 – 3 mm						
R2.5	2.4390	23.6964	22.9550	25.7753	25.1343	100.00
R5	4.7619	23.1322	22.4085	25.1616	24.5358	100.00

Kombinacija različitih količina cementa i gume rezultira sa 17 različitih mješavina. Mješavine su označene oznakama oblika CxRy gdje x označava količinu cementa, a y označava količinu gume u mješavini. Na primjer, mješavina s 5% cementa i 20% volumne zamjene pijeska s granuliranom gumom označena je oznakom C5R20, dok je mješavina sa 7% cementa i 5% volumnoga dodatka gumenih niti označena oznakom C7R5. Analogno tome, nazivi svih mješavina prikazani su tablicom 4.4.

4.4. Oznake projektiranih mješavina

1. skupina	C3R0	C5R0	C7R0
2. skupina	C3R10	C5R10	C7R10
	C3R20	C5R20	C7R20
	C3R30	C5R30	C7R30
	C3R40	C5R40	C7R40
3. skupina	–	–	C7R2.5
	–	–	C7R5

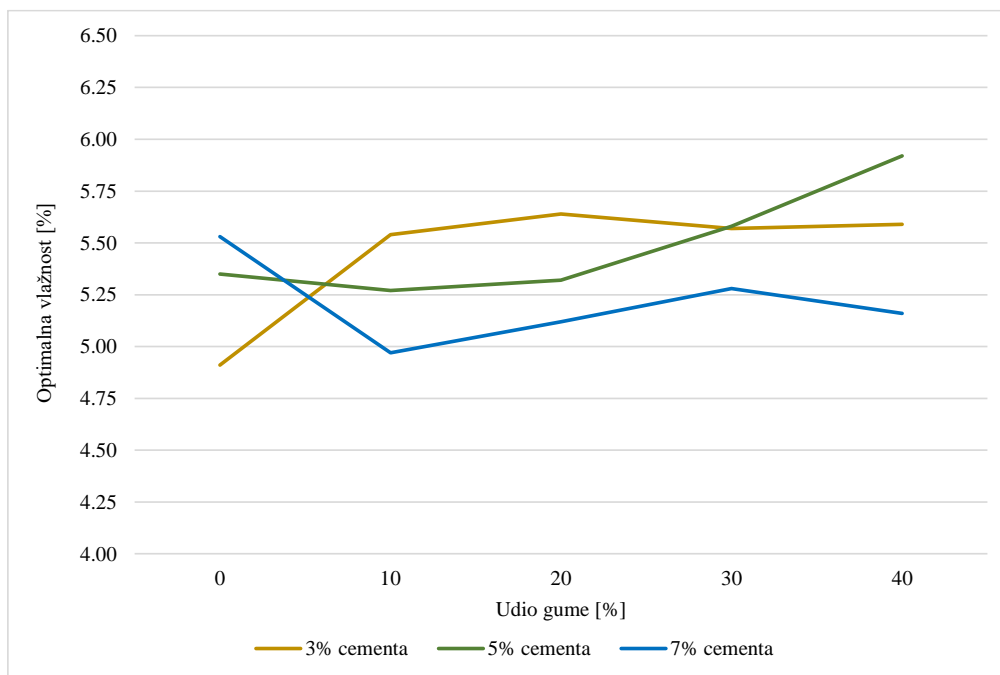
4.3 Proctorovi elementi

Svakoj od projektiranih mješavina određena je optimalna vlažnost (w_{opt}) i maksimalna suha prostorna masa (ρ_{dmax}). Ovim ispitivanjem definiran je točan sastav mješavina cementom stabiliziranoga nosivog sloja s i bez otpadne gume. Postupak određivanja Proctorovih elemenata metodom vibrirajućega čekića opisan je u potpoglavlju 3.2.1., a rezultati su dani u tablici 4.5.

4.5. Proctorovi elementi projektiranih mješavina

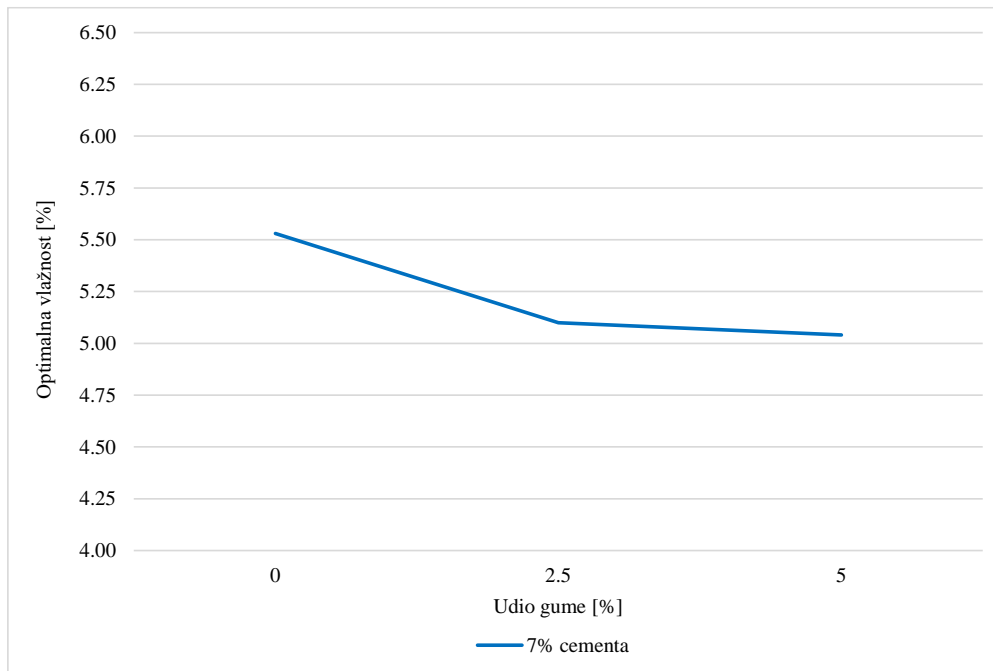
Mješavina	Optimalna vlažnost [%]	Maksimalna suha prostorna masa [g/cm ³]
C3R0	4.91	2.08
C5R0	5.35	2.12
C7R0	5.53	2.15
C3R10	5.54	2.07
C3R20	5.64	2.04
C3R30	5.57	2.01
C3R40	5.59	1.95
C5R10	5.27	2.13
C5R20	5.32	2.10
C5R30	5.58	2.04
C5R40	5.92	2.00
C7R10	4.97	2.15
C7R20	5.12	2.11
C7R30	5.28	2.05
C7R40	5.16	1.99
C7R2,5	5.10	2.13
C7R5	5.04	2.09

U nastavku je prikazana ovisnost optimalne vlažnosti o količini gume i cementa. Na slici 4.5. prikazano je kretanje optimalne vlažnosti za referentne mješavine i mješavine s granuliranom gumom, dok je na slici 4.6. prikazano kretanje optimalne vlažnosti za mješavinu C7R0 i mješavine s gumenim nitima.



Slika 4.5. Optimalna vlažnost referentnih mješavina i mješavina s granuliranom gumom

Iz prikazanoga trenda kretanja optimalne vlažnosti ne može se utvrditi jasan utjecaj granulirane gume na optimalnu vlažnost mješavine. Rezultati referentnih mješavina pokazuju kako je za mješavinu s najmanje cementa potrebna najmanja količina vode, dok, očekivano, povećanje količine cementa zahtijeva veću količinu vode za postizanje optimalne vlažnosti uslijed hidratacije cementa. Povećanjem količine cementa u mješavini potrebna je veća količina vode za hidrataciju cementa, što rezultira većim iznosom optimalne vlažnosti [77]. No, dodatkom gume gubi se trend uočen kod referentnih mješavina. Analizom rezultata mješavina s 3% cementa može se utvrditi jasan porast optimalne vlažnosti s dodatkom 10% i 20% gume, nakon čega dolazi do blagoga pada optimalne vlažnosti za 30% i 40% gume. Promatrajući rezultate mješavina s 5% cementa, dodatkom 10% i 20% gume dolazi do blagoga pada optimalne vlažnosti, no taj je pad neznatan. Daljnjim povećanjem udjela gume dolazi do povećanja optimalne vlažnosti. Analizom mješavina sa 7% cementa može se uočiti pad optimalne vlažnosti s dodatkom 10% gume. Daljnjim povećanjem udjela gume do 30% dolazi do povećanja optimalne vlažnosti, dok se kod udjela gume od 40% javlja pad optimalne vlažnosti.



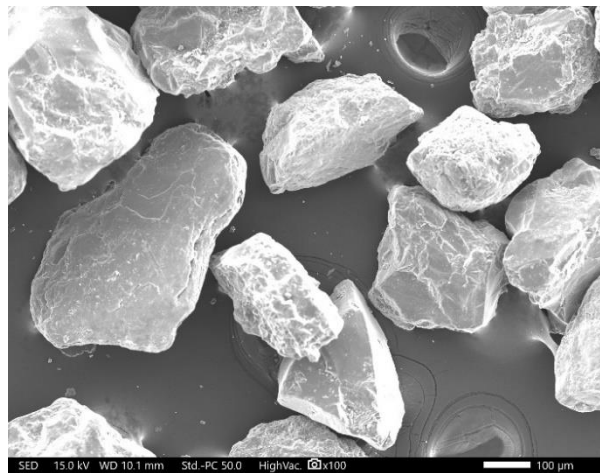
Slika 4.6. Optimalna vlažnost mješavina s gumenim nitima

Posebno su promatrane mješavine s gumenim nitima zbog razlike u sastavu mješavine te obliku i veličini gumenih čestica. Na slici 4.6. može se vidjeti kako je optimalna vlažnost mješavina s gumenim nitima manja od optimalne vlažnosti referentne mješavine sa 7% cementa. Do pada optimalne vlažnosti dolazi dodatkom 2.5% gumenih niti, no daljnjim povećanjem količine gume optimalna vlažnost smanjuje se vrlo malo.

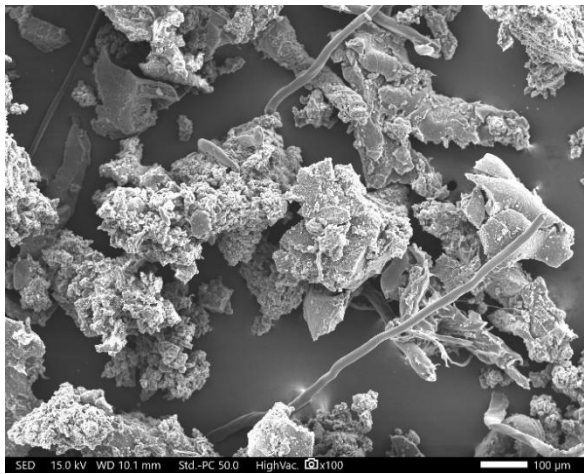
Generalno, varijacije optimalne vlažnosti vrlo su male i nalaze se unutar 0.73% za mješavine s 3% cementa, 0.65% za mješavine s 5% cementa i 0.56% za mješavine sa 7% cementa. Kod mješavina s gumenim nitima optimalna vlažnost varira unutar 0.49%. S obzirom na to da su prema *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] dopuštena odstupanja od $\pm 2\%$ od optimalne vlažnosti, može se zaključiti kako nije potrebno određivati optimalnu vlažnost za različite udjele gume i kako je moguće koristiti optimalnu vlažnost referentne mješavine ovisno o količini cementa. Vrlo mali utjecaj gume na promjenu optimalne vlažnosti u skladu je s istraživanjima ostalih autora koji su prilikom varijacije količine gume u mješavinama koristili istu količinu vode [68,70–74,77]. Smanjenje količine prethodnih ispitivanja uvelike olakšava i ubrzava proces proizvodnje stabilizacijske mješavine i upotrebu takve mješavine približava realnom sektoru. No, u nastavku istraživanja uzorci su proizvedeni prema optimalnim vlažnostima svake pojedine mješavine.

Kako provedenom analizom nisu utvrđeni jasni trendovi kretanja optimalne vlažnosti s različitim udjelima cementa i gume, a uočeno je kako s povećanjem količine gume uglavnom dolazi do povećanja optimalne vlažnosti, daljnje istraživanje je usmjereno na utvrđivanje utjecaja oblika čestica gume na optimalnu vlažnost mješavine. Provedena je vizualna analiza pomoću pretražnoga elektronskog mikroskopa (SEM) postupkom opisanim u potpoglavlju 3.2.9. na česticama pijeska, gumenoga granulata i gumenih niti. Analiza je provedena u visokom vakuumu pri povećanju od 100 puta. To povećanje pokazalo se prikladnim uzimajući u obzir veličinu promatranih čestica. Uvećane čestice pijeska prikazane su slikom 4.7. a), gumenog granulata slikom 4.7. b) i gumene niti slikom 4.7. c). Na slici je vidljivo kako pijesak ima pravilnu kristalnu strukturu oštih bridova i ravnih ploha, dok granulirana guma ima nepravilnu reljefnu strukturu. Kod gumenoga granulata također se vide pravilne izdužene strukture koje predstavljaju tekstilne niti zaostale u gumenom granulatu iz čega je zaključeno kako gumeni granulata ima određene primjese za razliku od pijeska. Na slici 4.7. c) prikazan je vrh gumene niti. Gumene niti imaju znatno ravniju površinu od gumenih granula, no i dalje je izraženija hrapavost površine u odnosu na čestice pijeska. Kao posljedica nepravilne površine gume javlja se zarobljavanje molekula vode i zraka, što uzrokuje varijacije u optimalnoj vlažnosti mješavine [100,121]. Uz to treba uzeti u obzir kako nije samo površina gume utjecajni činitelj optimalne vlažnosti, već i vodoupojnost materijala. Naime, pijesak ima hidrofilni karakter i upija određenu količinu vode, dok je guma hidrofobne prirode koja izaziva migraciju hidrauličnih faza od gume i time oslabljuje veze između gume i ostalih čestica u mješavini [122]. Stoga se smanjenjem količine pijeska javlja manja potreba za vodom, dok se upotrebom gume javlja veća potreba za vodom u cilju postizanja optimalne vlažnosti mješavine.

Razlike u morfologiji promatranih čestica dokazane su i mjerenjem specifične površine čestica (eng. *specific surface area* – SSA) BET metodom opisanom u potpoglavlju 3.2.10. Rezultati toga mjerenja pokazuju kako čestice pijeska imaju specifičnu površinu 3.14 m²/g, gumeni granulata 12.79 m²/g, a gumene niti 8.47 m²/g.



a)



b)



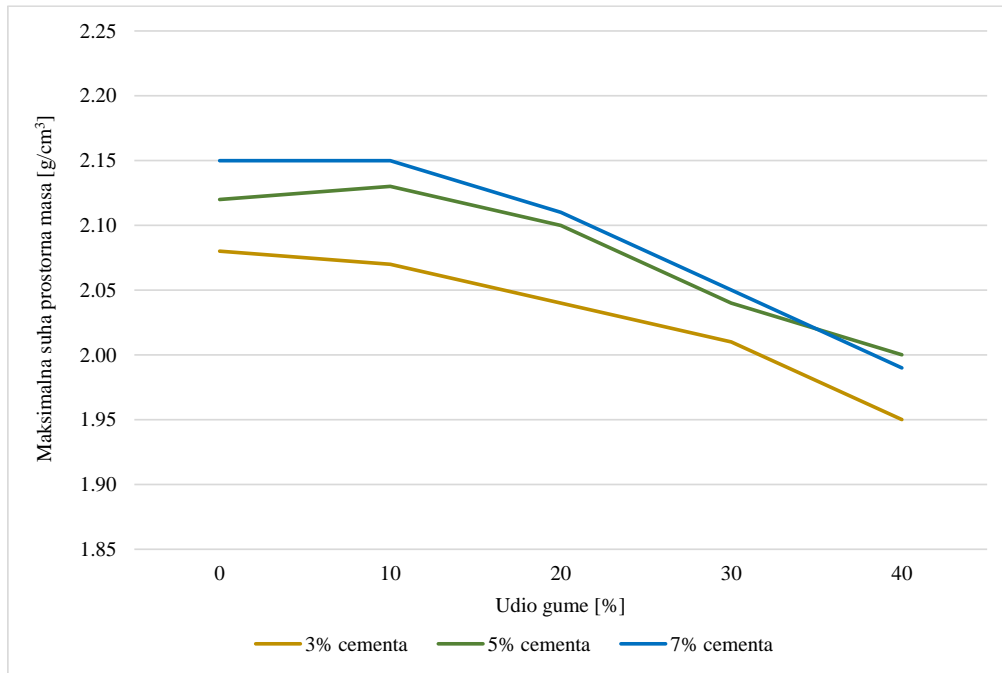
c)

Slika 4.7. SEM analiza čestica: a) pijeska; b) gumenog granulata; c) gumenih niti

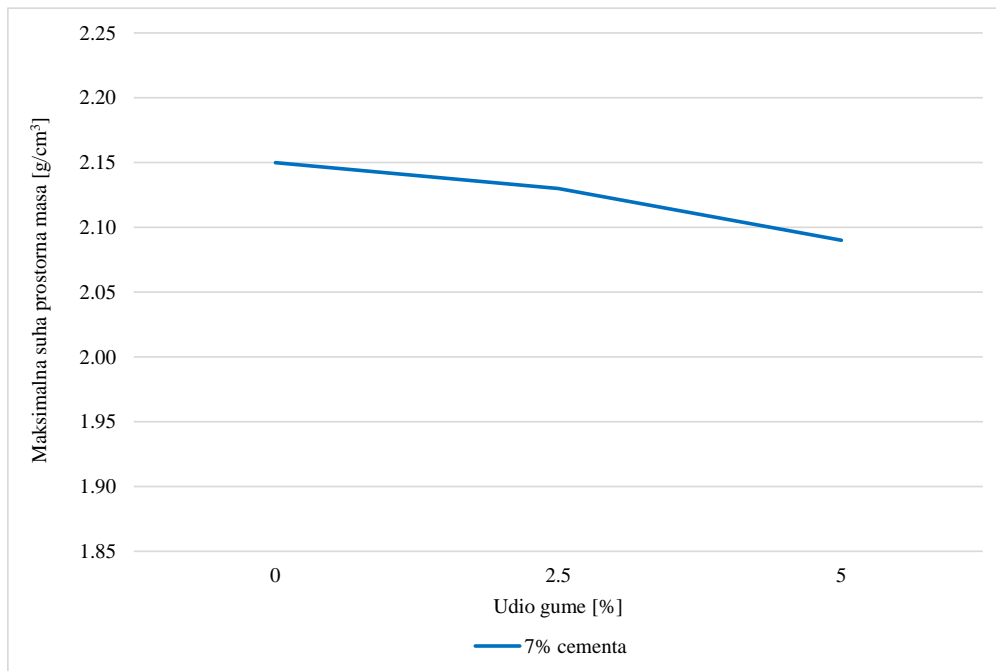
Ovisnost maksimalne suhe prostorne mase o količini gume i cementa prikazana je slikom 4.8. za referentne mješavine i mješavine s granuliranom gumom te slikom 4.9. za mješavinu C7R0 i mješavine s gumenim nitima.

Za razliku od kretanja vrijednosti optimalne vlažnosti, kod maksimalne suhe prostorne mase mogu se utvrditi jasni trendovi. Na slici 4.8. vidljivo je kako najmanje maksimalne suhe prostorne mase ostvaruju mješavine s 3% cementa, dok se povećanjem količine cementa i maksimalne suhe prostorne mase povećavaju. Dakle, povećanjem količine cementa u mješavini povećavaju se optimalna vlažnost i maksimalna suha prostorna masa. Cement za hidrataciju koristi vodu pa veća količina cementa zahtijeva veću količinu vode [70]. Nadalje, specifična težina cementa veća je od specifične težine većine prirodnih agregata korištenih u tim mješavinama, što utječe na povećanje maksimalne suhe prostorne mase jer cement popunjava sitne pore unutar matrice koje nisu ispunjene zrnima agregata. Može se uočiti veći skok

maksimalne suhe prostorne mase s povećanjem količine cementa s 3% na 5%, dok je taj skok manji za povećanje količine cementa s 5% na 7%.



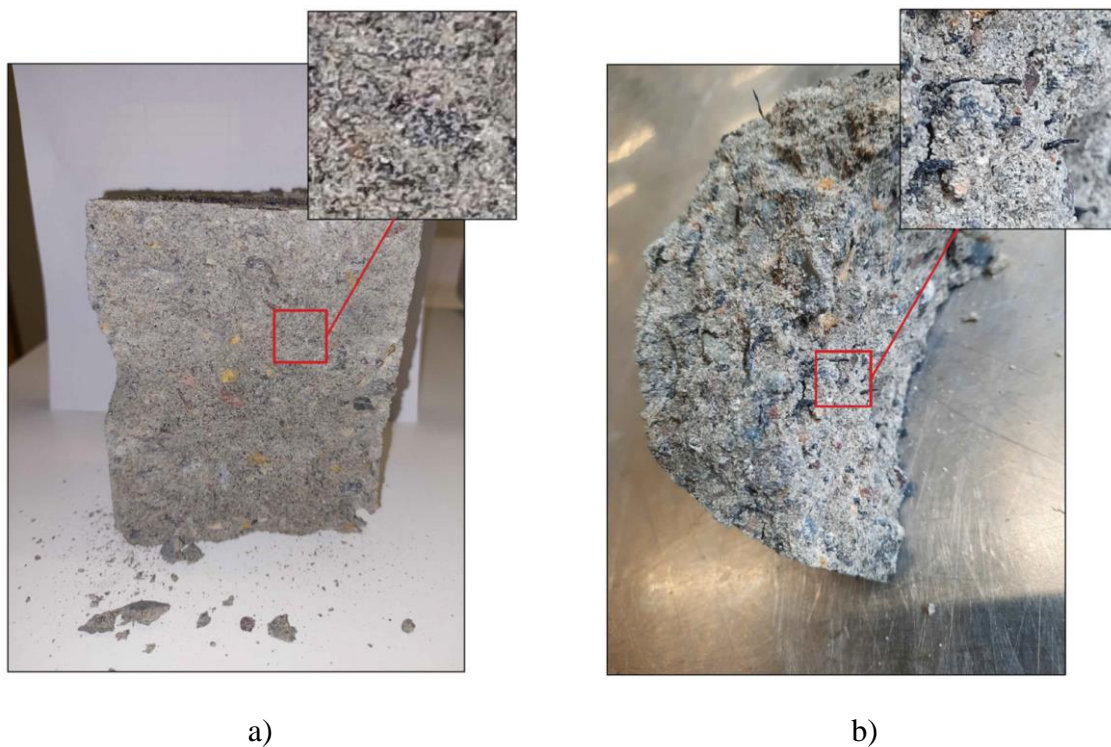
Slika 4.8. Maksimalna suha prostorna masa referentnih mješavina i mješavina s granuliranom gumom



Slika 4.9. Maksimalna suha prostorna masa mješavina s gumenim nitima

Osim jasnoga utjecaja količine cementa na maksimalnu suhu prostornu masu može se utvrditi i jasan utjecaj povećanja količine gume. Naime, dodatkom gume smanjuje se maksimalna suha prostorna masa mješavine kao posljedica male specifične težine gume (1.12 g/cm^3) u odnosu

na pijesak za čiju se zamjenu koristi guma (2.86 g/cm^3). Do značajnijega pada maksimalne suhe prostorne mase dolazi tek za udjele gume u iznosima 20% i više. Povećanjem količine gume, maksimalne suhe prostorne mase mješavina s različitim količinama cementa prate vrlo slične trendove. Na slici 4.8. može se uočiti kako je maksimalna suha prostorna masa mješavine C7R40 manja od maksimalne suhe prostorne mase mješavine C5R40, no ta je razlika vrlo mala. Uzimajući u obzir veličinu čestica gume i cementa i njihovo pozicioniranje u porama mješavine, može se zaključiti kako je kod mješavine C7R40 došlo do potpunoga zasićenja pora te su cementna pasta i guma počele zauzimati mjesto agregata u mješavini. Dakle, fine čestice cementa i gume zauzele su sve raspoložive pore unutar agregatne matrice mješavine i počele zauzimati položaj čestica agregata u mješavini. Kao rezultat dolazi do pada maksimalne suhe prostorne mase te mješavine. Ta pojava upućuje na zaključak kako količina gume u mješavini treba iznositi manje od 40%. Položaj čestice gumene granule i gumene niti u presjeku standardnoga uzorka prikazan je slikom 4.10. Čestice gumenoga granulata unutar mješavine mogu se vidjeti na slici 4.10. a) iz koje se može zaključiti kako gumene čestice zbog svoje veličine zauzimaju mjesto unutar pora agregatnoga skeleta mješavine ne narušavajući unutarnju strukturu mješavine, dok se na slici 4.10. b) može vidjeti kako gumene niti izlaze iz ravnine i na taj način stvaraju slabo mjesto u materijalu.



Slika 4.10. Položaj čestica: a) gumenog granulata i b) gumenih niti u matrici mješavine [65]

Nadalje, i kod mješavina s gumenim nitima dolazi do smanjenja maksimalne suhe prostorne mase s dodatkom gume. Naime, mješavine s 10% granulirane gume i 2.5% gumenih niti imaju oko 1% gume u masi agregata, dok mješavine s 20% granulirane gume i 5% gumenih niti imaju oko 2% gume u masi agregata. Usporedbom maksimalnih suhih prostornih masa tih mješavina može se zaključiti kako oblik gume ne utječe znatno na promjenu maksimalne suhe prostorne mase mješavine.

4.4 Tlačna čvrstoća

Ispitivanje tlačne čvrstoće pripremljenih mješavina provedeno je prema metodi opisanoj u potpoglavlju 3.2.3. na standardnim cilindričnim uzorcima proizvedenim prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.2.2. Tlačna čvrstoća ispitana je nakon 7, 28 i 90 dana njege uzoraka, a rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.6. Pri tome su podebljano označene mješavine čije tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana zadovoljavaju uvjete za ugradnju u autoceste i ceste vrlo teškoga prometnog opterećenja prema *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3]. Postavljeni zahtjevi iznose 2.0 MPa – 5.5 MPa i 3.0 MPa – 6.0 MPa za 7 i 28 dana starosti uzoraka. Tlačna čvrstoća mješavine izračunata je temeljem rezultata ispitivanja tri uzorka, a kao čvrstoća mješavine usvojena je srednja vrijednost minimalno dva ispitana uzorka čije čvrstoće međusobno ne odstupaju više od 20%.

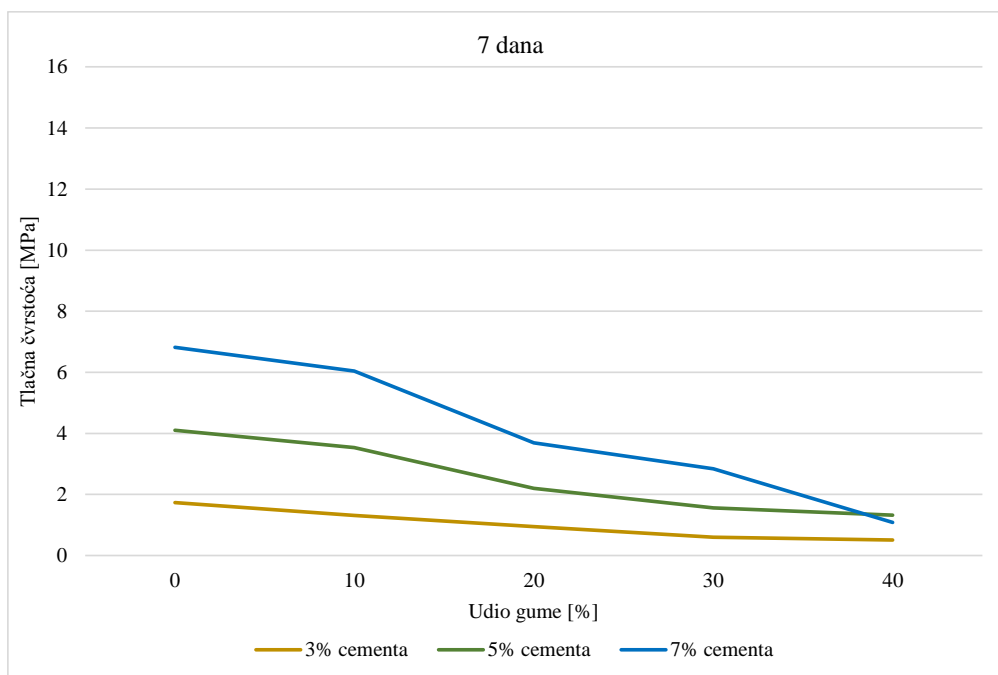
4.6. Tlačna čvrstoća ispitanih mješavina

Tlačna čvrstoća mješavina [MPa]						
Udio cementa [%]	Tip gume	Udio gume [%]	Naziv mješavine	Vrijeme njege [dani]		
				7	28	90
3	Granulirana guma	0	C3R0	1.73	2.69	3.32
		10	C3R10	1.31	2.07	3.88
		20	C3R20	0.94	1.15	2.24
		30	C3R30	0.60	0.85	1.13
		40	C3R40	0.51	0.59	0.84
5	Granulirana guma	0	C5R0	4.11	6.45	7.55
		10	C5R10	3.54	3.99	7.67
		20	C5R20	2.20	3.01	4.85
		30	C5R30	1.56	1.94	2.78
		40	C5R40	1.32	1.51	2.13
7	Granulirana guma	0	C7R0	6.82	8.89	11.57
		10	C7R10	6.04	7.81	12.95
		20	C7R20	3.69	4.36	7.85
		30	C7R30	2.84	3.32	4.30

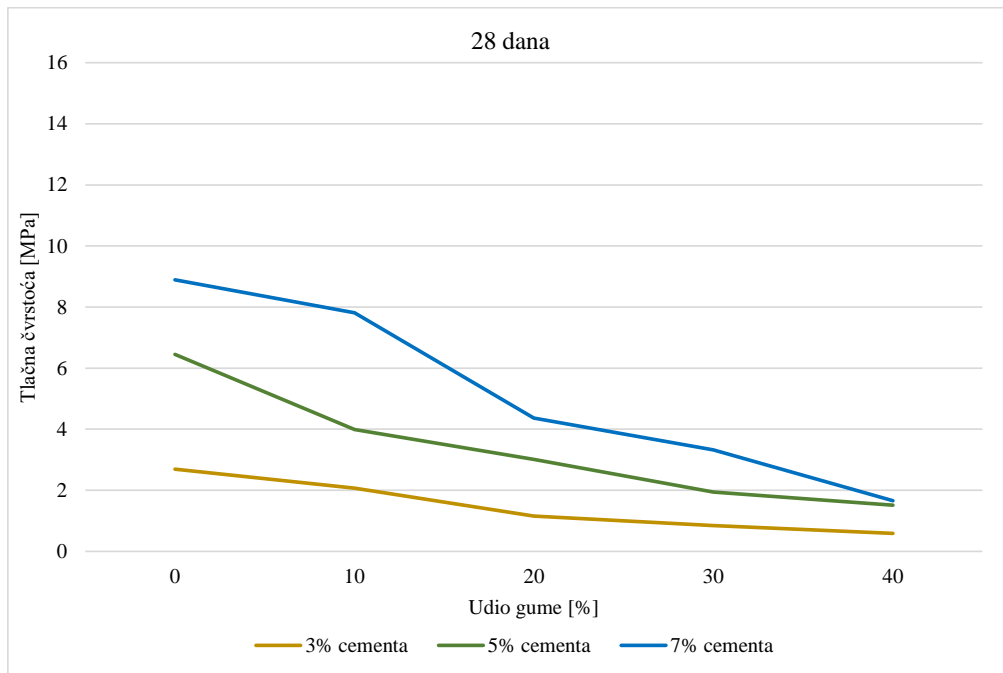
		40	C7R40	1.09	1.66	2.34
	Gumene niti	2.5	C7R2.5	3.61	5.31	9.23
		5	C7R5	2.41	2.76	4.46

Prema dobivenim rezultatima, može se zaključiti kako je povećanje vremena njege te povećanje udjela cementa uzrokovalo porast tlačne čvrstoće. Ti su rezultati i očekivani s obzirom na to da se korištenjem veće količine cementa stvara i veća količina cementne paste u mješavini. Nadalje, hidratacija cementa vremenski je uvjetovan proces pa je, isto tako, očekivano da se s produljenjem njege uzoraka povećava i njihova tlačna čvrstoća. Bez obzira što je kao vezivo korišten brzovežući cement, uočen je znatan porast čvrstoće između 28. i 90. dana njege uzoraka. Očekivano je kako će korišteni cement izazvati gotovo potpuni razvoj čvrstoće unutar prvih 28 dana njege, no pokazalo se da je prirast čvrstoće pri duljem vremenu njege uzoraka značajan, što se može pripisati usporavanju procesa hidratacije pod utjecajem olovovog oksida u gumenom agregatu. Utjecaj kemijskoga sastava gume na razvoj čvrstoće bit će prikazan u poglavlju 4.9. Prosječan porast tlačne čvrstoće nakon 28 dana njege u odnosu na 7 dana starosti uzoraka iznosi 26.43%, 21.40% i 22.02% za mješavine s 3%, 5% i 7% cementa. Dok, prosječan porast tlačne čvrstoće nakon 90 dana njege u odnosu na 28 dana starosti uzoraka iznosi 33.94%, 31.91% i 31.83% za mješavine s 3%, 5% i 7% njege. Iz navedenoga može se zaključiti kako količina cementa nema znatan utjecaj na vremenski razvoj tlačne čvrstoće. Veći prosječni porast tlačne čvrstoće vidljiv je između 28. i 90. dana njege, no taj je vremenski raspon veći u odnosu na onaj između 7. i 28. dana njege. Porast tlačne čvrstoće s povećanjem količine cementa u skladu je s radovima [19,20] za cementom stabilizirani šljunak te [18,21] za cementom stabilizirani vapnenac. Nadalje, i mješavine s otpadnom gumom bilježe porast tlačne čvrstoće s povećanjem cementa, što je prikazano u radu [70]. Pri tome, tlačne čvrstoće mješavina stabiliziranoga šljunka autora Barišić i dr. [19,20] postižu slične vrijednosti kao referentne mješavine ispitane u okviru toga istraživanja. Također, slične vrijednosti tlačne čvrstoće za mješavine stabiliziranoga vapnenca s otpadnom gumom prikazane su u radovima autora Sun i dr. [68] i Li i dr. [69]. Postavljene zahtjeve za tlačnu čvrstoću za ugradnju mješavine u autoceste i ceste vrlo teškoga prometnog opterećenja zadovoljilo je samo pet mješavina. To su mješavine C5R10 s čvrstoćama 3.53 i 3.99 MPa za 7 i 28 dana, C5R20 s čvrstoćama 2.20 i 3.01 MPa za 7 i 28 dana, C7R20 s čvrstoćama 3.69 i 4.36 MPa za 7 i 28 dana, C7R30 s čvrstoćama 2.84 i 3.32 MPa za 7 i 28 dana te C7R2.5 s čvrstoćama 3.61 i 5.31 MPa za 7 i 28 dana. Pri tome niti jedna referentna mješavina nije zadovoljila tražene zahtjeve.

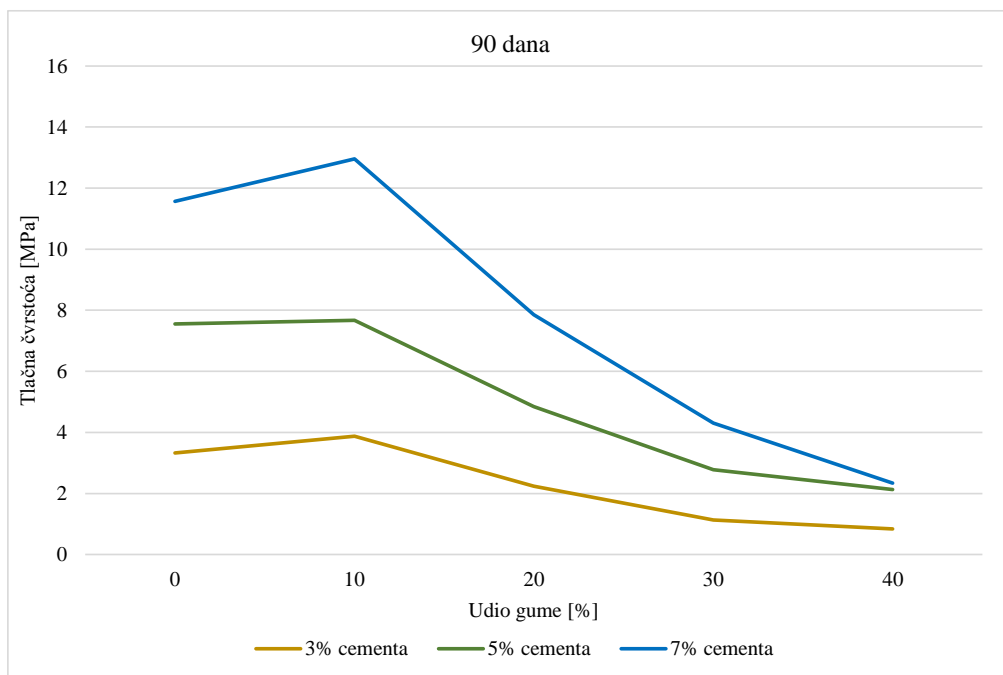
Također, niti jedna mješavina s 3% cementa nije razvila minimalne potrebne tlačne čvrstoće. Stoga se može zaključiti kako je količina od 3% cementa nedovoljna za ugradnju ispitanih agregata u nosive slojeve cesta najvećega prometnog opterećenja. Referentna mješavina s 3% cementa zadovoljava zahtjeve tlačne čvrstoće za nižu kategoriju cesta (ceste srednjega i teškoga prometnog opterećenja), no dodatkom i najmanje količine gume ta mješavina ne postiže tražene tlačne čvrstoće, što je čini neprikladnom za kombinaciju s otpadnom gumom. Referentna mješavina s 5% cementa razvija nešto veću 28 – dnevnu tlačnu čvrstoću od dozvoljene, što je čini neodgovarajućom za tu namjenu jer takvu mješavinu određuju vrlo velika krutost i podložnost razvoju pukotina. Veći je prirast čvrstoće uočen između 28. i 90. dana njege nego između 7. i 28. dana njege. Pri tome su definirane zadovoljavajuće vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana, dok za 90 dana njege nisu postavljeni uvjeti. Samim time, ne može se ocijeniti uočen prirast čvrstoće nakon produženoga vremena njege. Osim razvoja pukotina takva mješavina nema dovoljnu elastičnost da inhibira preuzeta dinamička opterećenja od prometnoga opterećenja te je podložna širenju pukotina. Dodatkom 7% cementa referentnoj mješavini razvijene čvrstoće premašuju propisani raspon i takve su mješavine zbog vrlo velike krutosti neprikladne za upotrebu u nosivim slojevima kolnika. Ovisnost tlačne čvrstoće mješavine o količini cementa i gume prikazana je slikama 4.11., 4.12., 4.13. za sva tri vremena njege za mješavine s granuliranom gumom te slikom 4.14. za sva tri vremena njege za mješavine s gumenim nitima.



Slika 4.11. Tlačna čvrstoća mješavina s granuliranom gumom nakon 7 dana



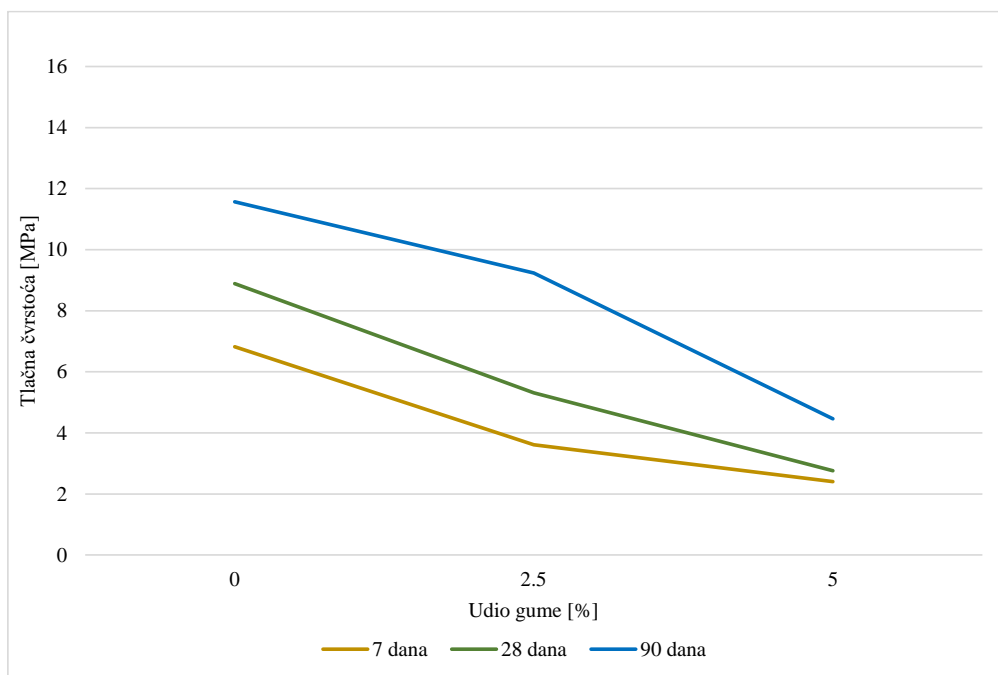
Slika 4.12. Tlačna čvrstoća mješavina s granuliranom gumom nakon 28 dana



Slika 4.13. Tlačna čvrstoća mješavina s granuliranom gumom nakon 90 dana

Na navedenim grafičkim prikazima jasno se vidi kako se porast čvrstoće s povećanjem količine cementa smanjuje kod 30% i 40% udjela gume u mješavini. Isto tako, količina od 40% gume uzrokovala je velik pad čvrstoće mješavine C7R40 te je ona gotovo jednaka čvrstoći mješavine C5R40. Stoga se smatra kako je 40% gume prevelika količina gume te kako se pri toj količini gume gubi doprinos cementa na čvrstoću mješavine. Granulirana guma pokazuje pozitivan

učinak na tlačnu čvrstoću kod zamjene pijeska u volumnom udjelu od 10%. To svojstvo dolazi do izražaja kod najduljega vremena njege, odnosno 90 dana nakon izrade uzoraka. Temeljem navedenoga može se zaključiti kako je guma spriječila razvoj unutarnjih napreznja i nastanka inicijalnih pukotina te na taj način doprinijela čvrstoći uzorka. Tu tvrdnju opravdava i najveći doprinos 10% volumne zamjene gume u mješavini s najvećim udjelom cementa, C7R10, jer upravo pri najvećoj količini cementa nastaju najveća unutarnja napreznja uslijed hidratacije veziva. Mješavina C7R10 razvija 10.70% veću tlačnu čvrstoću nakon 90 dana njege u odnosu na referentnu mješavinu C7R0. Doprinos tlačnoj čvrstoći korištenjem gume prikazan je u radu [73], gdje je korištena guma veličine do 6 mm, dok je smanjenje tlačne čvrstoće s povećanjem količine gume prikazano u radovima [68,69]. No, temeljem uvjeta tlačne čvrstoće neke mješavine s većim udjelom gume pokazale su zadovoljavajuća svojstva, što ih čini ekološki prihvatljivijima u odnosu na tu mješavinu kod koje je manja količina gume doprinijela porastu tlačne čvrstoće.



Slika 4.14. Tlačna čvrstoća mješavina s gumenim nitima nakon 7, 28 i 90 dana

Gumene niti imaju veći utjecaj na smanjenje čvrstoće mješavine, a produljeno vrijeme njege od 90 dana također donosi znatan prirast čvrstoće. Uzimajući u obzir sličan udio gume mješavina C7R10 i C7R2.5 koji iznosi oko 1% mase agregata te mješavina C7R20 i C7R5 koji iznosi oko 2% mase agregata, njihove će čvrstoće biti uspoređene. Mješavina C7R10 razvila je čvrstoće 40.25%, 32.00% i 28.73% veće za 7, 28 i 90 dana njege u odnosu na mješavinu C7R2.5. Nadalje, mješavina C7R20 razvila je čvrstoće 34.90%, 36.70% i 43.20% veće za 7, 28 i 90 dana

njege u odnosu na mješavinu C7R5. Dakle, može se zaključiti kako gumene niti u istim masenim udjelima kao i gumene granule imaju izraženiji negativni utjecaj na razvoj tlačne čvrstoće, koji se može pripisati veličini čestica te manjoj specifičnoj površini čestica koja rezultira manjom povezanosti s cementnom pastom.

4.5 Neizravna vlačna čvrstoća

Ispitivanje neizravne vlačne čvrstoće provedeno je neizravnim metodom opisanom u potpoglavlju 3.2.4. na standardnim cilindričnim uzorcima proizvedenim prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.2.2. Neizravna vlačna čvrstoća ispitana je nakon 7, 28 i 90 dana njege uzoraka, a rezultati su prikazani u tablici 4.7. Neizravna vlačna čvrstoća mješavine izračunata je temeljem rezultata ispitivanja tri uzorka, a kao čvrstoća mješavine usvojena je srednja vrijednost minimalno dva ispitana uzorka čije čvrstoće međusobno ne odstupaju više od 20%.

4.7. Neizravna vlačna čvrstoća ispitanih mješavina

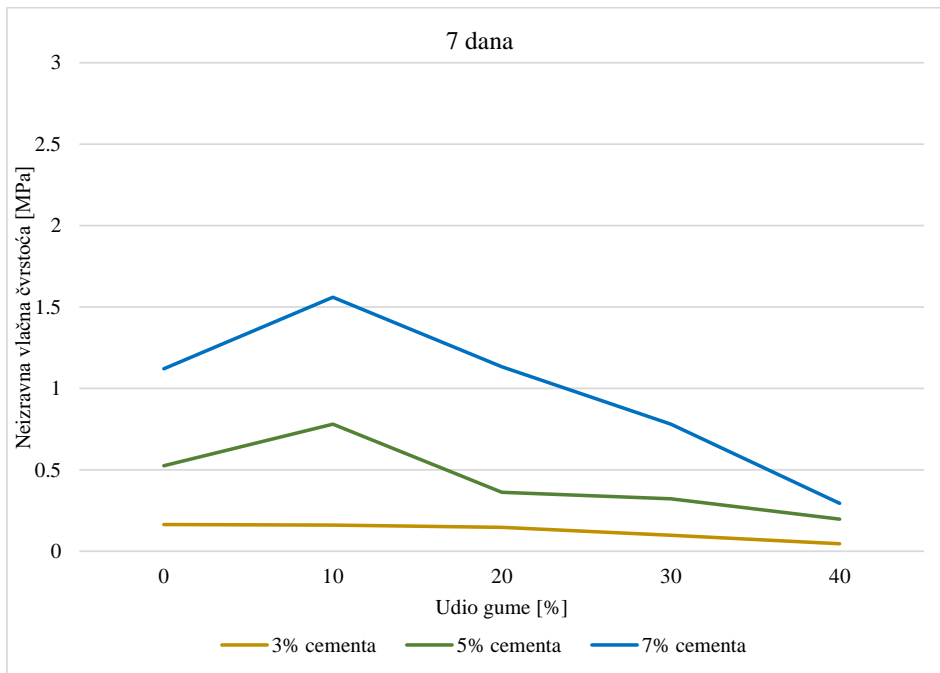
Vlačna čvrstoća mješavina [MPa]					
Udio cementa [%]	Tip gume	Udio gume [%]	Vrijeme njege [dani]		
			7	28	90
3	Granulirana guma	0	0.16	0.36	0.82
		10	0.16	0.29	0.50
		20	0.15	0.23	0.33
		30	0.10	0.14	0.22
		40	0.05	0.10	0.14
5	Granulirana guma	0	0.53	1.05	1.70
		10	0.78	1.14	1.29
		20	0.36	0.75	0.95
		30	0.32	0.45	0.58
		40	0.20	0.23	0.37
7	Granulirana guma	0	1.12	1.77	2.49
		10	1.56	2.09	2.36
		20	1.13	1.29	1.51
		30	0.78	0.87	1.11
		40	0.29	0.29	0.50
	Gumene niti	2.5	1.37	1.52	1.98
		5	1.00	0.74	1.00

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako je povećanje količine cementa rezultiralo povećanjem neizravne vlačne čvrstoće materijala. Kako je i očekivano, najniže vlačne čvrstoće

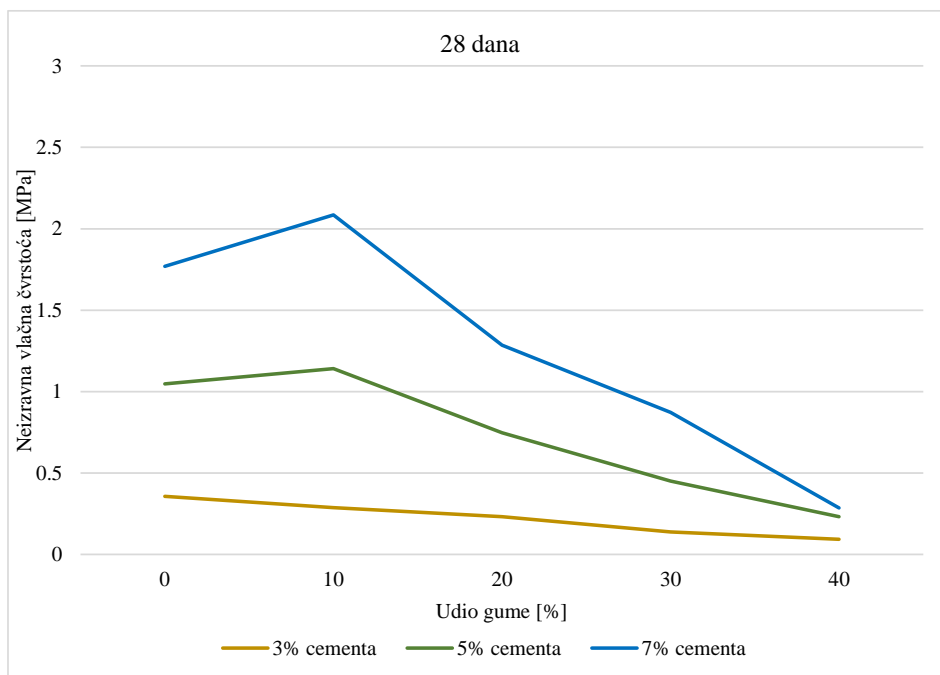
razvile su mješavine s 3% cementa, dok su najveće vlačne čvrstoće razvile mješavine sa 7% cementa. Nadalje, s duljim vremenom njege uzoraka došlo je i do povećanja vlačne čvrstoće mješavina. Prosječni porast neizravne vlačne čvrstoće nakon 28 dana u odnosu na 7 dana starosti iznosi 42.31%, 35.21% i 16.28% za mješavine s 3%, 5% i 7% cementa. Dok prosječni porast vlačne čvrstoće nakon 90 dana u odnosu na 28 dana njege iznosi 39.74%, 26.10% i 23.83% na mješavine s 3%, 5% i 7% cementa. Može se zaključiti kako se povećanjem količine cementa porast neizravne vlačne čvrstoće smanjuje, što je rezultat razvoja veće rane čvrstoće uslijed velike količine cementne paste unutar mješavine.

Ovisnost neizravne vlačne čvrstoće o udjelu cementa i udjelu gumenoga granulata prikazana je slikama 4.15. za uzorke starosti 7 dana, 4.16. za uzorke starosti 28 dana i 4.17. za uzorke starosti 90 dana, dok je ovisnost neizravne vlačne čvrstoće o udjelu gume i vremenu njege prikazana slikom 4.18. Na slikama se može vidjeti kako je volumnom zamjenom pijeska s 10% granulirane gume postignuta veća neizravna vlačna čvrstoća mješavina s 5% i 7% cementa nakon 7 i 28 dana njege. Nakon 90 dana njege mješavina C7R10 razvija samo 5.16% nižu vlačnu čvrstoću u odnosu na referentnu mješavinu C7R0. Temeljem tih rezultata može se zaključiti kako guma doprinosi razvoju rane neizravne vlačne čvrstoće mješavina s 5% i 7% cementa, ali taj zaključak ne vrijedi za čvrstoću nakon duljega razdoblja njege. Mogući razlog za takvo ponašanje mješavina jest doprinos elastičnosti gume prije razvoja visoke krutosti mješavina, no nakon duljega razdoblja kada mješavina postigne veliku krutost, utjecaj gume se gubi. Taj trend prati i trend uočen kod tlačne čvrstoće gdje je 10% gume također donijelo određeno povećanje čvrstoće. Pri količini od 40% gume i kod neizravne vlačne čvrstoće se vrijednosti za mješavine s 5% i 7% cementa međusobno približavaju pa se ocjenjuje kako je 40% prevelika količina gume pri kojoj utjecaj cementa slabi.

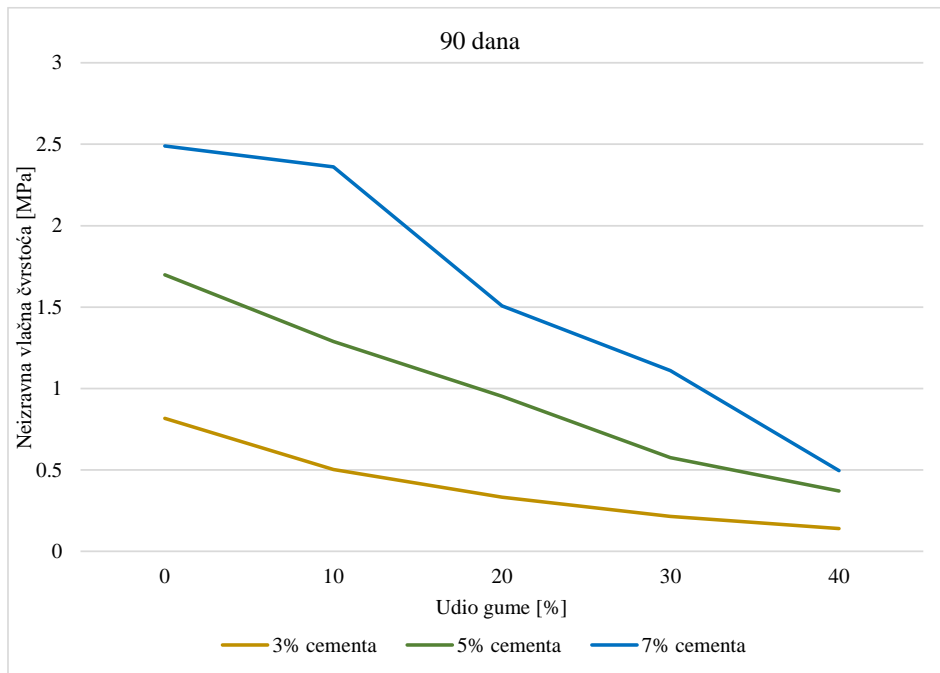
Vrijednosti neizravne vlačne čvrstoće za referentne mješavine u skladu su s rezultatima ostalih istraživača za mješavine stabiliziranoga šljunka [20] i stabiliziranoga vapnenca [21].



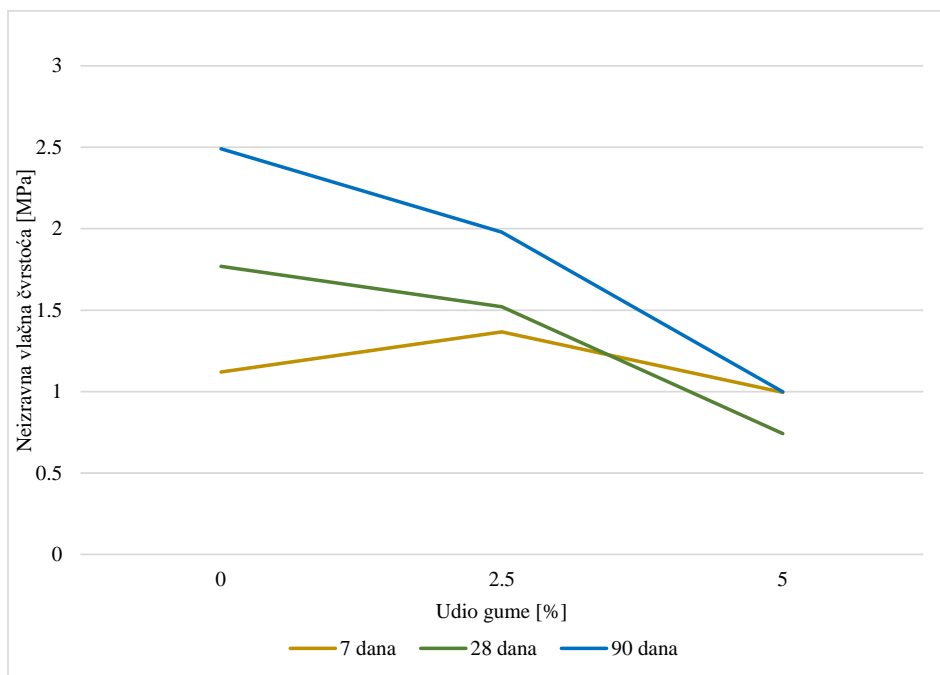
Slika 4.15. Neizravna vlačna čvrstoća mješavina s granuliranom gumom nakon 7 dana



Slika 4.16. Neizravna vlačna čvrstoća mješavina s granuliranom gumom nakon 28 dana



Slika 4.17. Neizravna vlačna čvrstoća mješavina s granuliranom gumom nakon 90 dana



Slika 4.18. Neizravna vlačna čvrstoća mješavina s gumenim nitima nakon 7, 28 i 90 dana

Promatrajući rezultate neizravne vlačne čvrstoće mješavina s gumenim nitima, može se zaključiti kako nakon kraćega vremena njege manji udio gume doprinosi vlačnoj čvrstoći. No, taj se doprinos gubi s produljenjem vremena njege. Nadalje, dodatno povećanje udjela gume na 5% volumnoga dodatka agregatu dovodi do značajnoga pada neizravne vlačne čvrstoće. Uzimajući u obzir izduženi oblik gumenih niti, očekivano je kako će one djelovati kao

svojevrсна armatura unutar mješavine i time najviše utjecati na povećanje vlačne čvrstoće, no rezultati pokazuju suprotno. Izrazita elastičnost toga materijala može se navesti kao razlog zbog kojega gumene niti ne djeluju kao armatura unutar mješavine. Ostali razlozi leže u maloj količini cementne paste unutar stabilizacijske mješavine koja ne obavija zrno agregata u potpunosti te se zbog toga ne osigurava povezanost gumene niti s agregatnom matricom mješavine. Nadalje, krutost gume znatno je manja od krutosti cementne paste, što u kombinaciji sa znatno većom deformabilnošću gumenih čestica u odnosu na cementnu pastu rezultira nemogućnošću preuzimanja vlačnih naprežanja.

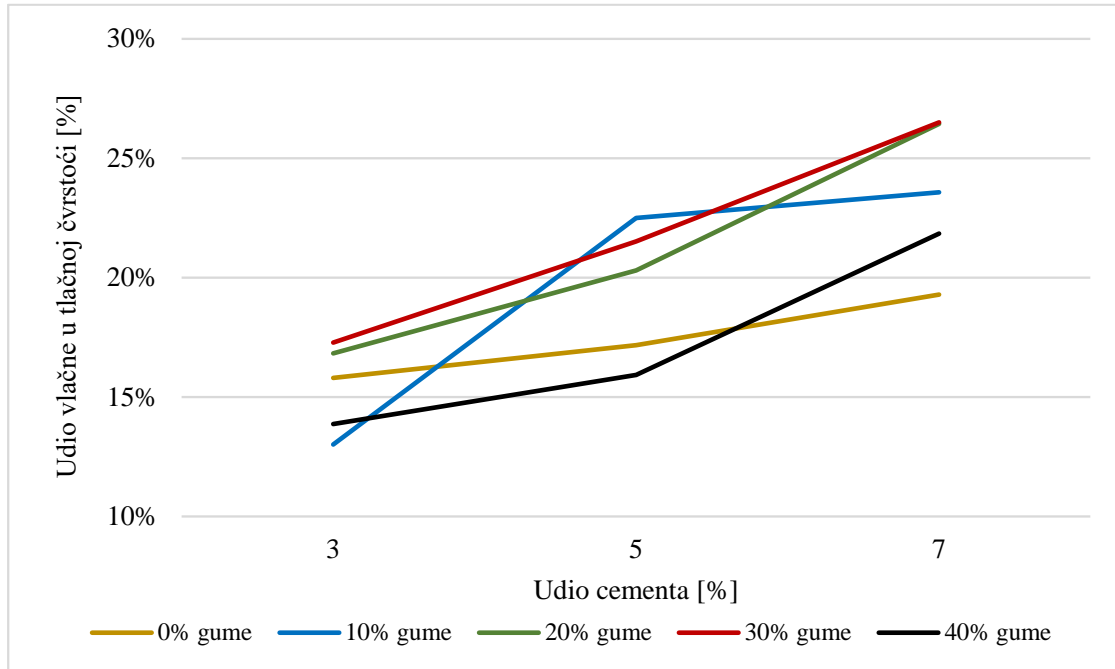
Prethodno je istaknuto kako udio neizravne vlačne čvrstoće u tlačnoj čvrstoći cementom stabiliziranih mješavina iznosi oko 10% – 15%. Taj omjer izračunat je i za rezultate ovoga istraživanja s obzirom na veliku važnost vlačne čvrstoće u preuzimanju radijalnih vlačnih naprežanja unutar sloja cementom stabiliziranoga agregata koja su osnovni faktor narušavanja nosivosti tih slojeva. Postotni udio vlačne čvrstoće u tlačnoj čvrstoći ispitanih mješavina prikazan je tablicom 4.8.

4.8. Udio vlačne u tlačnoj čvrstoći

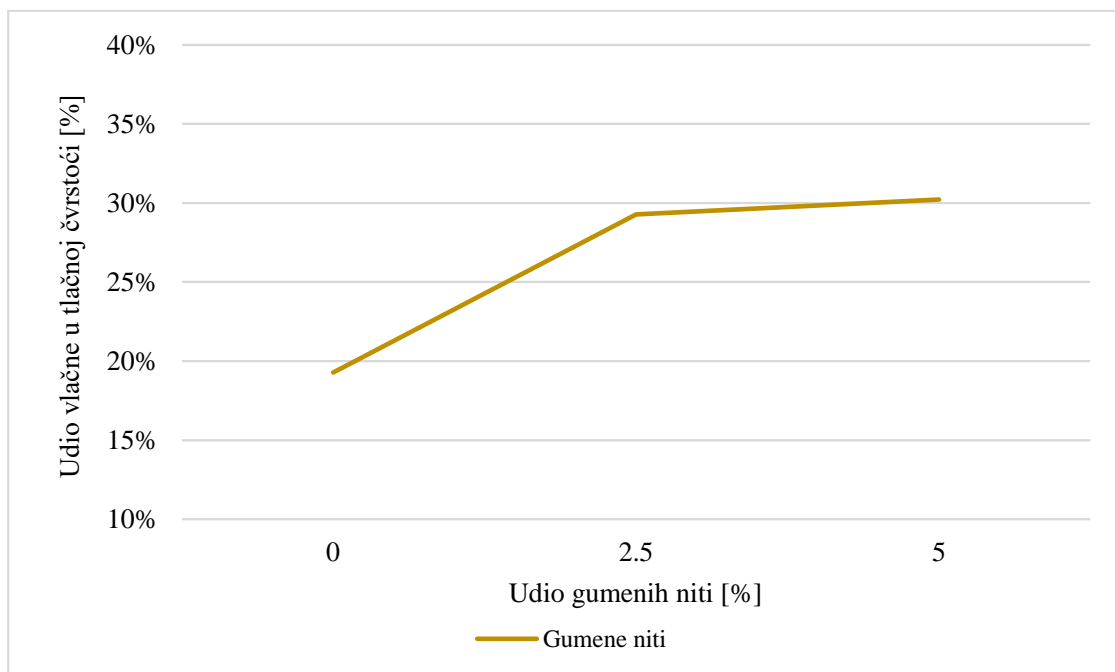
Udio vlačne u tlačnoj čvrstoći [%]					
Udio cementa [%]	Tip gume	Udio gume [%]	Vrijeme njege [dani]		
			7	28	90
3	Granulirana guma	0	9.49	13.29	24.60
		10	12.22	13.87	12.95
		20	15.62	20.01	14.84
		30	16.57	16.27	19.00
		40	9.19	15.87	16.55
5	Granulirana guma	0	12.80	16.23	22.48
		10	22.07	28.60	16.81
		20	16.44	24.83	19.62
		30	20.68	23.19	20.67
		40	14.98	15.31	17.46
7	Granulirana guma	0	16.42	19.90	21.53
		10	25.79	26.68	18.23
		20	30.67	29.46	19.19
		30	27.43	26.24	25.81
		40	27.11	17.23	12.16
	Gumene niti	2.5	37.84	28.61	21.42
		5	41.42	26.86	22.37

Rezultati prikazani tablicom 4.8. prikazuju kako su omjeri vlačne i tlačne čvrstoće ispitanih mješavina nešto veći od omjera prikazanih radovima drugih istraživača, temeljem čega se može zaključiti kako su mješavine u ovom istraživanju dobro projektirane i otpornije na nastanak pukotina uslijed vlačnih radijalnih naprezanja u cementom stabiliziranom nosivom sloju. Za mješavine s granuliranom gumom najmanji izračunati udio iznosi 9.19% (C3R40), dok je najveći izračunati udio 30.67% (C7R20). Za mješavine s gumenim nitima i 7% cementa najmanji i najveći udio vlačne u tlačnoj čvrstoći iznose 16.42% (C7R0) i 41.42% (C7R5). S obzirom na to da udjeli vlačne u tlačnoj čvrstoći ne pokazuju jasan trend porasta ili smanjenja za povećanje vremena njege, za svaku su mješavinu uprosječeni omjeri za sva tri vremena njege i grafički prikazani na način da se može utvrditi ovisnost porasta ili smanjenja omjera tih mehaničkih karakteristika s obzirom na povećanje udjela cementa u mješavinama za pojedinu količinu gume. Na slici 4.19. grafički su prikazani rezultati mješavina s granuliranom gumom, dok su na slici 4.20. prikazani rezultati mješavina s gumenim nitima. Rezultati mješavina s gumenim nitima pokazuju kako povećanje udjela cementa doprinosi povećanju promatranoga omjera, odnosno kako mješavine s većim udjelom cementa postižu veći udio vlačne čvrstoće u tlačnoj čvrstoći. S obzirom na to da je za ugradnju stabilizacijske mješavine u nosivi sloj kolničke konstrukcije potrebno zadovoljiti uvjet tlačne čvrstoće, a kritična naprezanja u tom sloju izazvana eksploatacijom kolničke konstrukcije vlačna su naprezanja, povećanje toga omjera s povećanjem udjela gume pozitivna je karakteristika. Naime, mješavine zadovoljavajuće tlačne čvrstoće koje sadrže veće udjele gume mogu preuzeti veća vlačna naprezanja bez dosezanja vlačne čvrstoće i otkazivanja sloja. Takve su mješavine C5R10, C5R20, C7R20, C7R30 i C7R2.5. Pri tome, prema ovom omjeru kao najpovoljnije mješavine pokazale su se mješavina C7R20 i C7R30 jer ostvaruju najveći udio vlačne u tlačnoj čvrstoći. Uz to, ta mješavina sadrži znatan udio gume. No, uzimajući u obzir i ekonomski i ekološki aspekt, mješavine C5R20 i C5R30, koje sadrže manje cementa, postižu udio vlačne u tlačnoj čvrstoći više od 20%. Nadalje, i dodatkom gumenoga granulata dolazi do povećanja toga omjera, osim za udio gume u iznosu 40%. Pri tome najveće omjere vlačne i tlačne čvrstoće postižu mješavine s 10%, 20% i 30% gume te 5% i 7% cementa. Osim navedenih mješavina dobre rezultate pokazuje i mješavina C7R40. Navedene mješavine ostvaruju omjere između 20% i 30%, što označava znatan napredak u odnosu na ostale mješavine prikazane u dostupnoj literaturi. Rezultati mješavina s gumenim nitima pokazuju kako povećanje udjela gumenih niti utječe na povećanje udjela vlačne u tlačnoj čvrstoći.

Promatrajući utjecaj količine cementa, može se reći kako vlačne čvrstoće mješavina s 3% cementa ostvaruju najmanje udjele u tlačnoj čvrstoći, a s povećanjem količine cementa povećava se i omjer tih veličina.



Slika 4.19. Omjer vlačne i tlačne čvrstoće mješavina s gumenim granulatom



Slika 4.20. Omjer vlačne i tlačne čvrstoće mješavine s gumenim nitima

4.6 Otpornost na utjecaj smrzavice

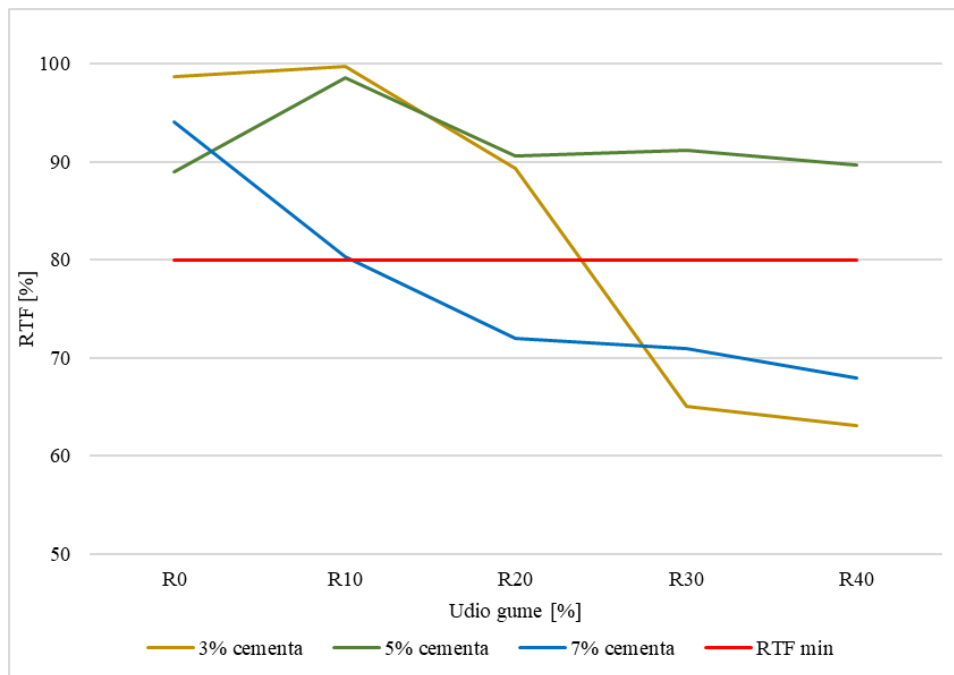
Otpornost na utjecaj smrzavice ispitana je prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.2.5. na ispitnim uzorcima proizvedenim prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.2.2. To ispitivanje provedeno je na tri istovjetna para standardnih uzoraka pri čemu u izračun faktora otpornosti na smrzavanje (RTF) nisu uzimani oni uzorci čiji rezultati međusobno odstupaju za više od 20%. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće skupine A i skupine B te njihov omjer, faktor otpornosti na smrzavanje, prikazani su tablicom 4.9.

4.9. Otpornost mješavina na utjecaj smrzavice

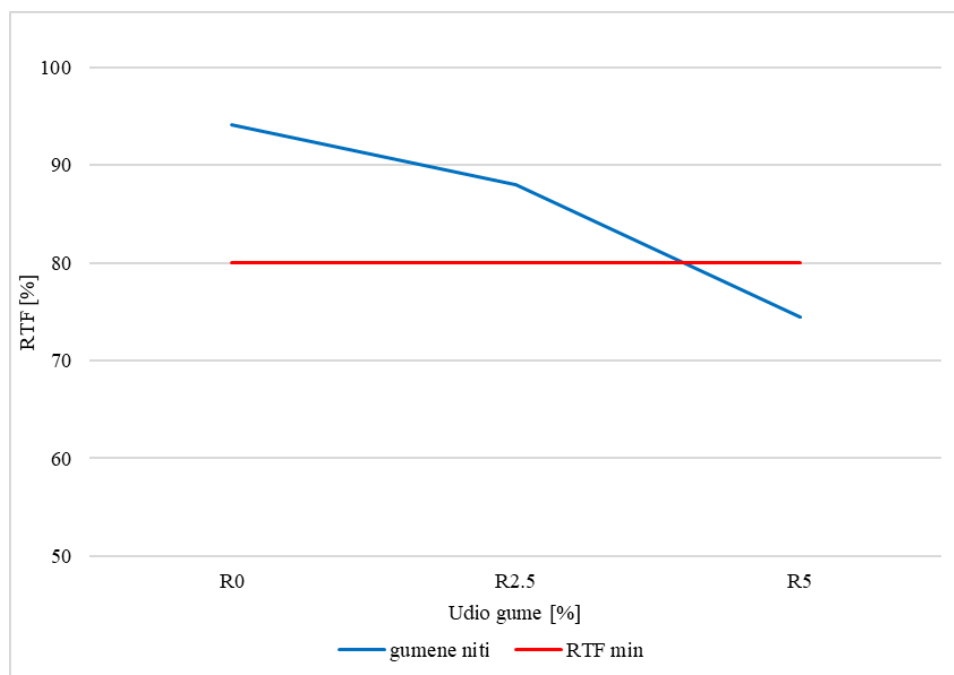
Otpornost na utjecaj smrzavice [%]					
Udio cementa [%]	Tip gume	Udio gume [%]	f_{cA} [Mpa]	f_{cB} [Mpa]	RTF [%]
3	Granulirana guma	0	2.66	2.70	98.68
		10	1.27	1.27	99.72
		20	0.88	0.99	89.37
		30	0.44	0.67	65.08
		40	0.30	0.48	63.05
5	Granulirana guma	0	6.09	6.85	88.98
		10	4.20	4.26	98.61
		20	2.22	2.45	98.6
		30	1.54	1.69	91.22
		40	0.82	0.92	89.63
7	Granulirana guma	0	9.38	9.97	94.09
		10	7.18	8.93	80.37
		20	3.37	4.68	71.94
		30	2.09	2.95	70.96
		40	1.42	2.09	67.91
	Gumene niti	2.5	4.07	4.62	88.04
		5	1.74	2.34	74.49

Dopušteni pad čvrstoće nakon izlaganja mješavina utjecaju smrzavice iznosi najviše 20% da bi mješavina bila prihvatljiva za ugradnju u cementom stabilizirani nosivi sloj kolnika. Dakle, faktor otpornosti mješavine (RTF) mora iznositi minimalno 80%. Mješavine koje su zadovoljile taj uvjet označene su podebljano u tablici 4.9., a to su mješavine C3R0 (98.68%), C3R10 (99.72%), C3R20 (89.37%), C5R0 (88.98%), C5R10 (98.61%), C5R20 (98.60%), C5R30 (91.22%), C5R40 (89.63%), C7R0 (94.09%), C7R10 (80.37%) i C7R2.5 (88.04%). Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako sve referentne mješavine imaju zadovoljavajući

faktor otpornosti na smrzavicu. Nadalje, sve mješavine s 5% cementa zadovoljavaju traženu otpornost na utjecaj smrzavice. Smanjenje faktora otpornosti na utjecaj smrzavice vidljivo je kod mješavina s 3% cementa i 30% i 40% gume te kod mješavine sa 7% cementa i 20%, 30% i 40% gumenih granula te kod 5% gumenih niti. Ističe se činjenica da mješavine s gumenim nitima pokazuju veći faktor otpornosti u odnosu na mješavine s gumenim granulatom. Osobito je zanimljivo kako su mješavine s gumenim nitima postigle veću otpornost na smrzavanje (88.04% i 74.49%) u odnosu na odgovarajuće mješavine s gumenim granulatom (80.37% i 71.94%). Temeljem tih rezultata može se zaključiti kako gumene niti imaju pozitivniji učinak na otpornost na smrzavanje u odnosu na gumene granule. Upravo veličina tih čestica, koja je imala negativan učinak na tlačnu i neizravnu vlačnu čvrstoću, pokazala se kao važan faktor prilikom apsorpcije unutarnjih naprezanja uzrokovanih smrzavanjem i širenjem vode unutar mješavine. Pri tome, gumene granule popunjavaju već postojeće praznine unutar mješavine, no matrica koju čini prirodni agregat i cementna pasta je i dalje vrlo kruta, što mješavinu čini podložnom nastanku pukotina uslijed razvoja unutarnjih naprezanja. Najveće razlike u tlačnim čvrstoćama referentne skupine uzoraka i skupine uzoraka izloženih smrzavanju mogu se uočiti kod mješavina sa 7% cementa. Te mješavine imaju vrlo veliku krutost zbog velike količine cementne paste i stoga su osjetljivije na razvoj unutarnjih naprezanja izazvanih širenjem vode uslijed smrzavanja. Rezultat tako krute mješavine nedovoljna je otpornost na utjecaj smrzavice. Niti guma nije pridonijela povećanju te otpornosti. Kod tih je mješavina uočen znatan pad čvrstoća prilikom korištenja veće količine gume. Promatrajući ostale skupine mješavina, može se zaključiti kako korištenje veće količine gume ne donosi povećanje otpornosti na smrzavanje. Kod mješavina s manjim udjelom cementa manja je i razlika između tlačnih čvrstoća dviju skupina uzoraka. Općenito se može zaključiti kako značajniji utjecaj na razvoj odgovarajuće otpornosti na utjecaj smrzavice ima optimalna količina cementa. Dobiveni rezultati faktora otpornosti na utjecaj smrzavice prikazani su slikom 4.21. za mješavine s gumenim granulama i 4.22. za mješavine s gumenim nitima. Na slici 4.21. vidljivo je kako je 10% gumenoga granulata doprinijelo određenom poboljšanju otpornosti na smrzavanje za mješavine s 3% i 5% cementa. Nadalje, jasno je vidljivo kako mješavine s 5% cementa imaju vrlo dobru otpornost prema utjecaju smrzavice i količina od 5% cementa ističe se kao optimalna količina u vidu postojanosti mješavine u zimskim uvjetima. Povećanje otpornosti na utjecaj smrzavice upotrebom gume u mješavini cementom stabiliziranoga šljunka prikazano je i u radovima [76,77].



Slika 4.21. Faktor otpornosti na smrzavanje mješavina s gumenim granulama



Slika 4.22. Faktor otpornosti na smrzavanje mješavina s gumenim nitima

4.7 Dinamički modul elastičnosti

Mjerenje dinamičkoga modula elastičnosti provedeno je prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.2.6. na standardnim uzorcima pripremljenim za ispitivanje tlačne čvrstoće za sva tri vremena njege, 7, 28 i 90 dana. Rezultati mjerenja brzine ultrazvučnoga impulsa usvojeni su kao srednja vrijednost tri mjerenja na svakom ispitnom uzorku koja međusobno ne odstupaju više od 20%. Rezultati mjerenja brzine ultrazvučnoga impulsa prikazani su tablicom 4.10.

4.10. Brzina ultrazvučnog impulsa

Brzina ultrazvučnog impulsa [km/s]					
Udio cementa [%]	Tip gume	Udio gume [%]	Vrijeme njege [dani]		
			7	28	90
3	Granulirana guma	0	2.46	2.89	3.19
		10	2.26	2.55	3.61
		20	1.34	1.94	2.93
		30	1.00	1.61	2.03
		40	0.60	1.02	1.15
5	Granulirana guma	0	3.23	3.76	3.71
		10	3.09	3.32	3.86
		20	2.44	2.76	3.21
		30	1.78	2.19	2.69
		40	1.54	1.91	2.14
7	Granulirana guma	0	3.72	4.02	4.06
		10	3.53	3.87	4.09
		20	2.83	3.18	3.75
		30	2.23	2.61	2.97
		40	1.55	1.56	1.96
	Gumene niti	2.5	2.40	3.10	3.95
		5	1.07	1.98	2.98

Posebno su prikazane vrijednosti brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa jer će taj podatak biti korišten za utvrđivanje korelacije i razvoj predikcijskoga modela tlačne čvrstoće te statičkoga modula elastičnosti. Mjerenje brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa nerazorna je metoda te je stoga taj podatak vrlo vrijedan, osobito za predikciju rezultata razornih metoda ispitivanja. Osim toga, dinamički modul elastičnosti najčešće se koristi prilikom teorijskoga dimenzioniranja kolničkih konstrukcija jer je pri dimenzioniranju kolničkih konstrukcija bitno i trajanje opterećenja i jer je određivanje dinamičkoga modula znatno jednostavnije od određivanja statičkoga modula elastičnosti. Nadalje, za potrebe izračuna dinamičkoga modula elastičnosti potrebno je poznavati Poissonov omjer materijala, gustoću uzorka i brzinu prolaska

ultrazvučnoga impulsa. Za potrebe ovoga istraživanja usvojen je Poissonov omjer u iznosu od 0.25. Vrijednosti izračunatih dinamičkih modula elastičnosti prikazani su tablicom 4.11.

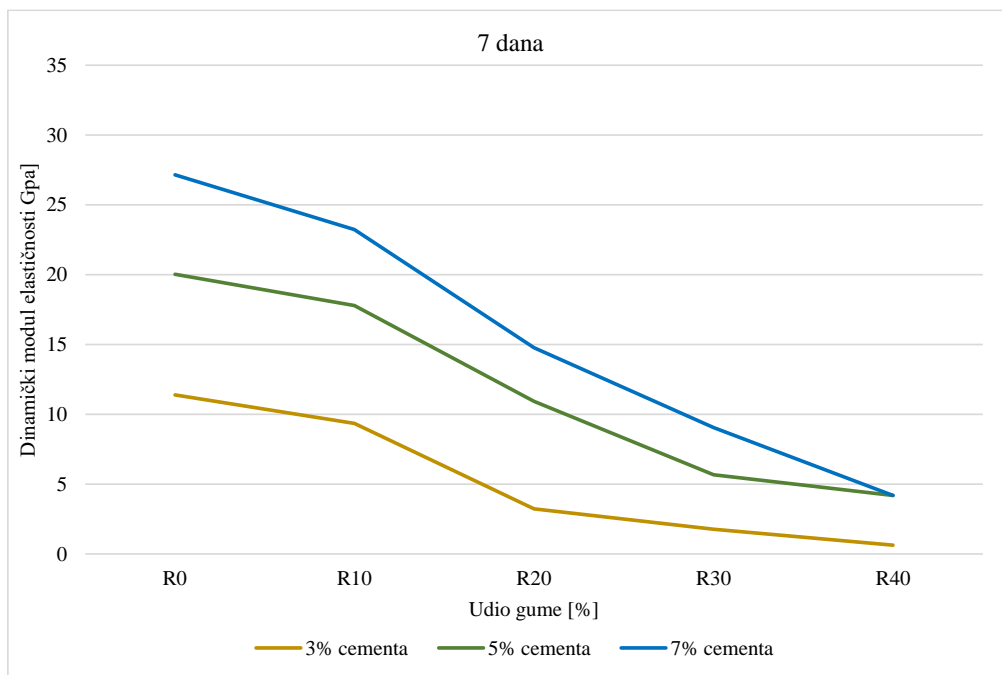
4.11. Dinamički modul elastičnosti ispitanih mješavina

Dinamički modul elastičnosti [GPa]					
Udio cementa [%]	Tip gume	Udio gume [%]	Vrijeme njege [dani]		
			7	28	90
3	Granulirana guma	0	11.390	15.640	18.770
		10	9.347	11.903	24.233
		20	3.226	6.724	15.497
		30	1.758	4.579	7.194
		40	0.620	1.798	2.260
5	Granulirana guma	0	20.037	27.046	25.705
		10	17.795	20.432	27.600
		20	10.934	13.883	18.890
		30	5.656	8.588	12.938
		40	4.184	6.427	8.014
7	Granulirana guma	0	27.141	31.330	31.594
		10	23.218	28.097	31.294
		20	14.757	18.670	26.138
		30	9.050	12.311	15.951
		40	4.187	4.236	6.696
	Gumene niti	2.5	10.654	17.817	29.296
		5	2.041	6.988	16.230

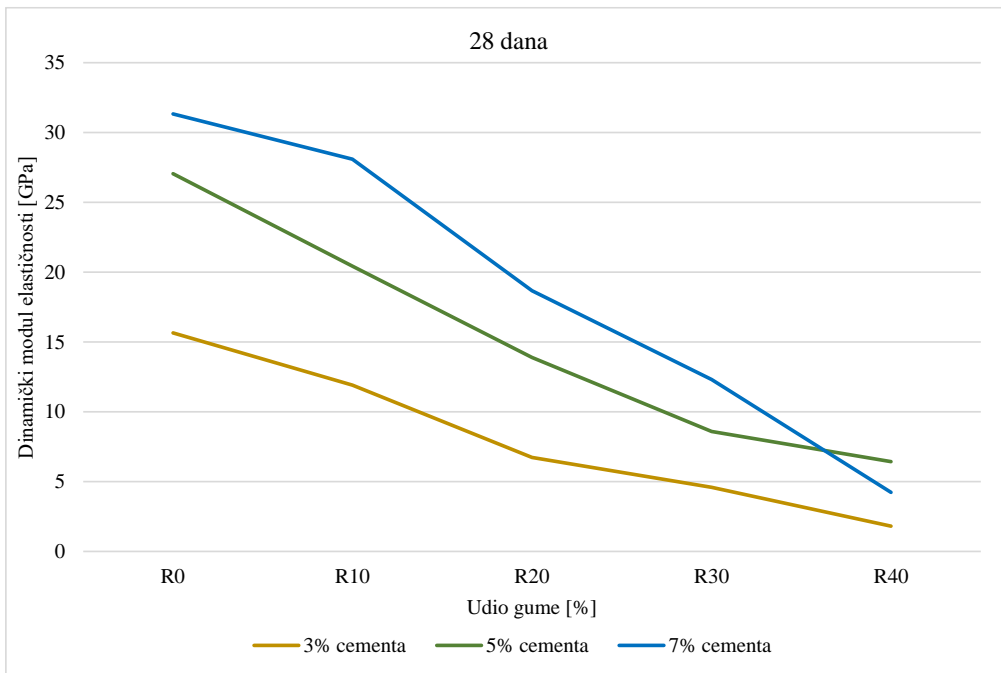
Iz tablice 4.11. može se zaključiti kako povećanje količine cementa i produljenje njege uzoraka uzrokuje povećanje dinamičkoga modula elastičnosti. Modul elastičnosti mjera je krutosti materijala i veći je za kruće materijale. Veća količina cementa u mješavini uslijed hidratacije stvara matricu veće krutosti i takvi materijali imaju veći modul elastičnosti. Dodatno se produljenjem vremena njege omogućuje potpuna hidratacija, što također rezultira povećanjem krutosti materijala. Kod takvih, vrlo krutih, materijala dolazi do razvoja velikih unutarnjih naprezanja te nastanka inicijalnih pukotina. Takve se pukotine pod utjecajem ponavljajućega prometnog opterećenja šire kroz krutu matricu. Veća elastičnost mješavine smanjila bi nastanak inicijalnih pukotina te bi mogla apsorbirati određeni dio naprezanja uzrokovan prometnim opterećenjem, što bi rezultiralo manjim širenjem pukotina, a samim time i duljim životnim vijekom konstrukcije.

Analizirajući rezultate mješavina s gumenim nitima, može se zaključiti kako su gumene niti imale veći utjecaj na smanjenje dinamičkoga modula elastičnosti u odnosu na gumeni granulat.

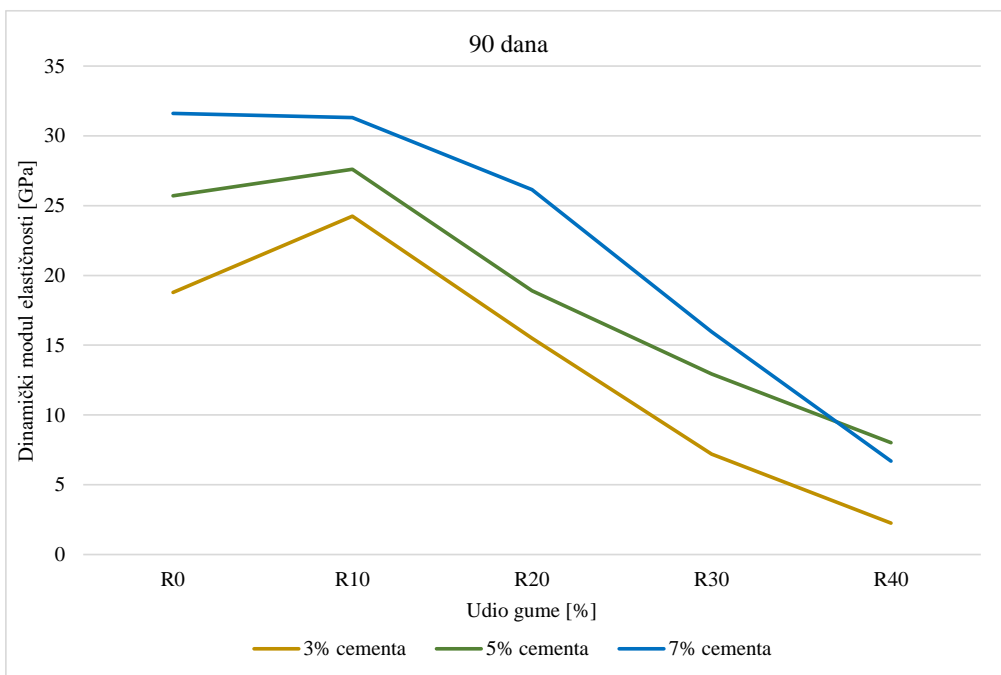
Rezultati pokazuju kako su referentne mješavine razvile najveće dinamičke module elastičnosti. Dodatkom gume vrijednosti modula elastičnosti opadaju, što je i očekivano. Naime, ultrazvučni impuls prodire kroz česticu gume sporije u odnosu na prirodni agregat zbog male gustoće gume. Što se više gume nalazi na putu prolaska ultrazvučnoga impulsa, on postiže manju brzinu. Samim je time i dinamički modul elastičnosti takvih mješavina manji. Ovisnost dinamičkoga modula elastičnosti o količini cementa i gume prikazan je slikama 4.23., 4.24. i 4.25. za mješavina s granuliranom gumom i 4.26. za mješavine s gumenim nitima.



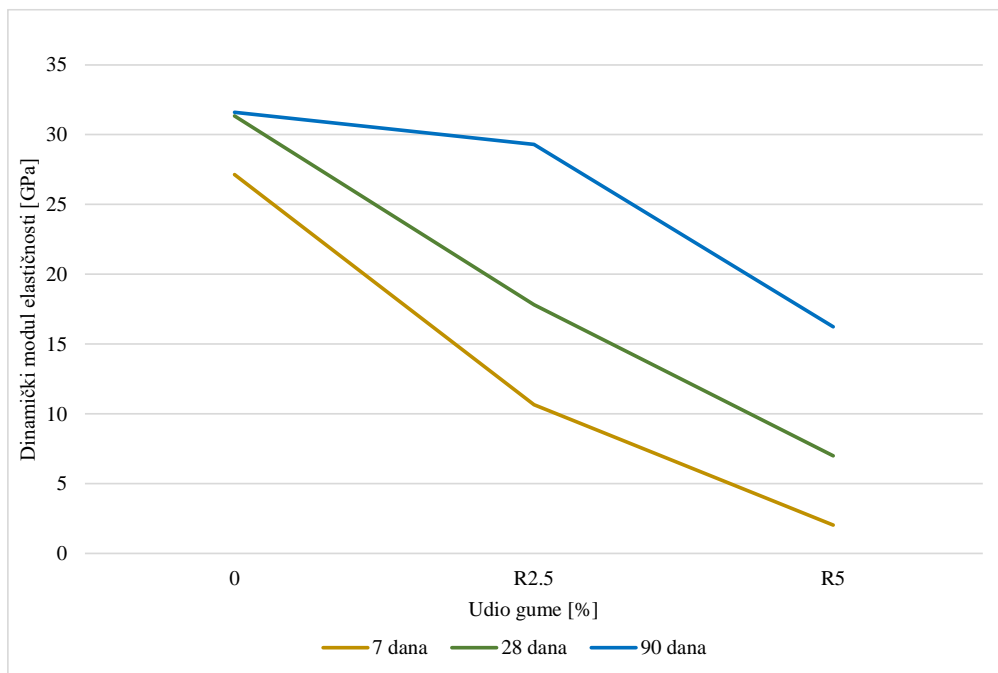
Slika 4.23. Dinamički modul elastičnosti mješavina s granuliranom gumom nakon 7 dana



Slika 4.24. Dinamički modul elastičnosti mješavina s granuliranom gumom nakon 28 dana



Slika 4.25. Dinamički modul elastičnosti mješavina s granuliranom gumom nakon 90 dana



Slika 4.26. Dinamički modul elastičnosti mješavina s gumenim nitima nakon 7, 28 i 90 dana

Na grafičkim prikazima rezultata može se vidjeti kako količina od 10% gume doprinosi povećanju dinamičkoga modula elastičnosti mješavina s 3% i 5% cementa nakon duljega vremena njege (90 dana). Grafički prikazi koji prikazuju vrijednosti dinamičkoga modula elastičnosti nakon 90 dana njege dokaz su kako produljeno vrijeme njege uzoraka utječe na razvoj krutosti mješavine, a samim time i čvrstoće [35]. Za kraća razdoblja njege isto se može vidjeti kako je nagib pravca između referentnih mješavina i mješavina s 10% gume manji u odnosu na mješavine s većim udjelom gume. Nadalje, mješavina C7R40 pokazuje manje dinamičke module elastičnosti od mješavine C5R40, što je vjerojatno rezultat jako narušene strukture mješavine ili grupiranja gumenih čestica s obzirom na to da je povećanje količine cementa kod svih drugih mješavina rezultiralo i povećanjem dinamičkoga modula elastičnosti. Osim navedenoga grupiranja čestica gume sama razlika između gustoće gumenoga granulata i prirodnoga agregata uzrokuje smanjenje brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa, a posljedično i dinamičkoga modula elastičnosti. Kao i kod ispitivanja tlačne i neizravne vlačne čvrstoće količina od 40% gume pokazala se nepouzdana i neprikladna za ugradnju u mješavine cementom stabiliziranog nosivog sloja.

Gumene niti uzrokuju vrlo velik pad dinamičkoga modula elastičnosti. Kod tih mješavina ultrazvučni impuls nailazi na velike gumene čestice, odnosno područja niske gustoće, čime se usporava brzina prolaska toga impulsa. Dinamički modul elastičnosti tih mješavina znatno je manji od modula elastičnosti mješavina sa sličnim masenim udjelom gumenoga granulata.

Dakle, upotreba gumenih granula u maloj količini pridonosi povećanju dinamičkoga modula elastičnosti, dok gumene niti uzrokuju pad dinamičkoga modula elastičnosti. Povećanjem udjela gumenih granula dolazi do smanjenja dinamičkoga modula elastičnosti. Nadalje, dinamički modul elastičnosti uvelike ovisi o količini cementne paste zbog njezine krutosti i bržeg prolaska ultrazvučnoga impulsa. Pokazalo se kako je nakon duljega vremena njege došlo do značajnoga razvoja dinamičkoga modula elastičnosti pa se stoga zaključuje kako i vrijeme njege ima velik utjecaj na tu mehaničku karakteristiku materijala.

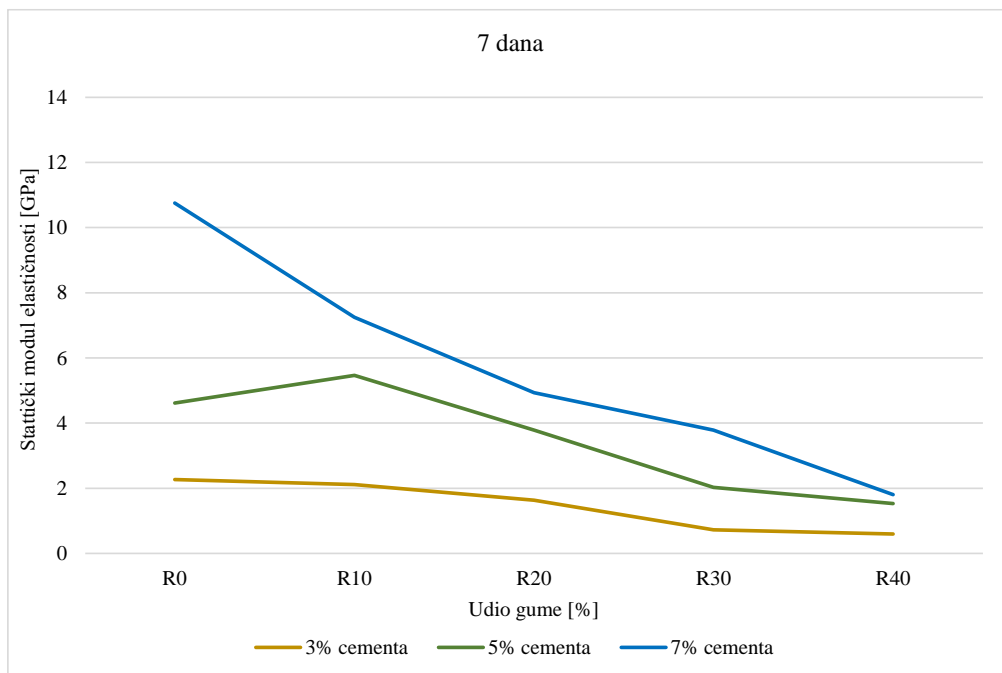
4.8 Statički modul elastičnosti

Ispitivanje statičkoga modula elastičnosti provedeno je prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.2.7., na ispitnim uzorcima namijenjenim ispitivanju tlačne čvrstoće. Ispitivanje je provedeno na tri uzorka svake mješavine, a za izračun su korišteni rezultati koji međusobno ne odstupaju za više od 20%. Rezultati ispitivanja prikazani su tablicom 4.12. Rezultati statičkoga modula elastičnosti pokazuju isti trend kao i rezultati dinamičkoga modula elastičnosti. Povećanje količine cementa izaziva povećanje krutosti mješavine pa samim time i statičkoga modula elastičnosti. S druge strane, upotrebom gume u stabilizacijskim mješavinama smanjuje se krutost mješavine i statičkoga modula elastičnosti. Vrijednosti statičkoga modula elastičnosti znatno su manje od vrijednosti dinamičkoga modula elastičnosti i iznose prosječno 40.83% za mješavine s 3% cementa, 29.33% za mješavine s 5% cementa i 22.04% za mješavine sa 7% cementa. Dakle, povećanjem udjela cementa smanjuje se razlika između statičkoga i dinamičkoga modula elastičnosti. Povećanje modula s povećanjem količine cementa te smanjenje modula s povećanjem količine gume prikazano je i u radu autora Farhan i dr. [70]. Krutost mješavine ovisi o krutosti njezinih sastavnih dijelova pa samim time povećanje količine cementne paste velike krutosti dovodi do povećanja krutosti mješavine. Veći udio cementa osigurava ispunjenje pora unutar mješavine materijalom veće gustoće, zbog čega također dolazi do povećanja krutosti mješavine, dok povećanje količine gume kao zamjene za prirodni materijal dovodi do smanjenja krutosti mješavine kao rezultat razlike u krutosti ta dva materijala.

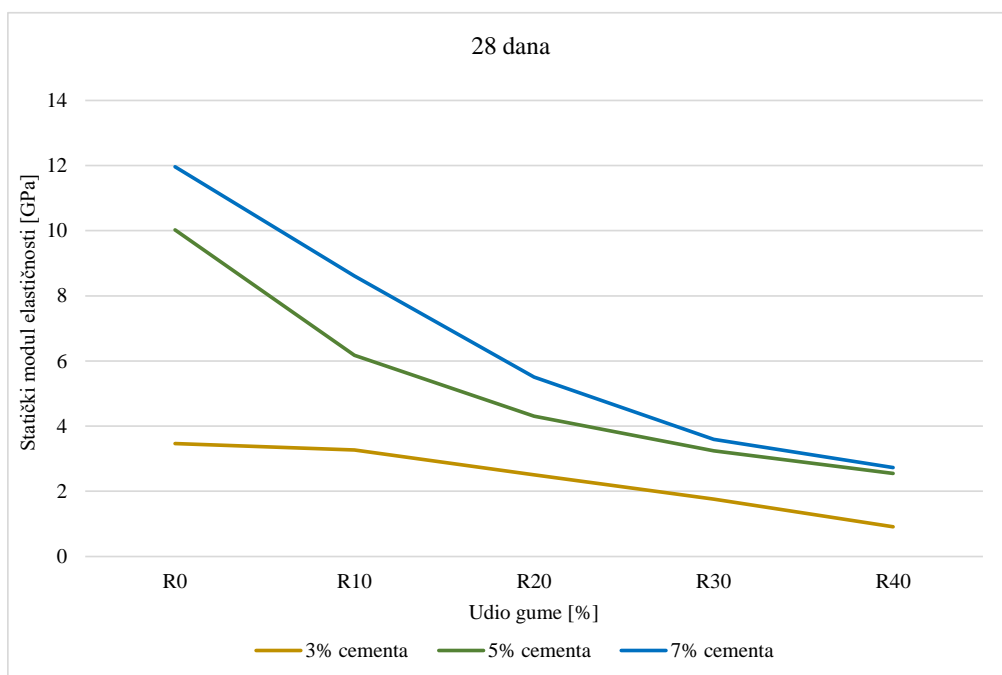
4.12. Statički modul elastičnosti ispitanih mješavina

Statički modul elastičnosti [GPa]					
Udio cementa [%]	Tip gume	Udio gume [%]	Vrijeme njege [dani]		
			7	28	90
3	Granulirana guma	0	2.265	3.463	4.657
		10	2.111	3.267	5.260
		20	1.628	2.509	5.800
		30	0.725	1.760	3.058
		40	0.591	0.913	0.915
5	Granulirana guma	0	4.612	10.028	9.540
		10	5.461	6.179	11.421
		20	3.785	4.306	8.475
		30	2.026	3.240	4.715
		40	1.533	2.552	3.071
7	Granulirana guma	0	10.756	11.960	12.688
		10	7.251	8.610	13.422
		20	4.935	5.509	12.917
		30	3.782	3.593	5.956
		40	1.799	2.727	3.274
	Gumene niti	2.5	4.741	5.369	7.926
		5	1.239	2.254	5.314

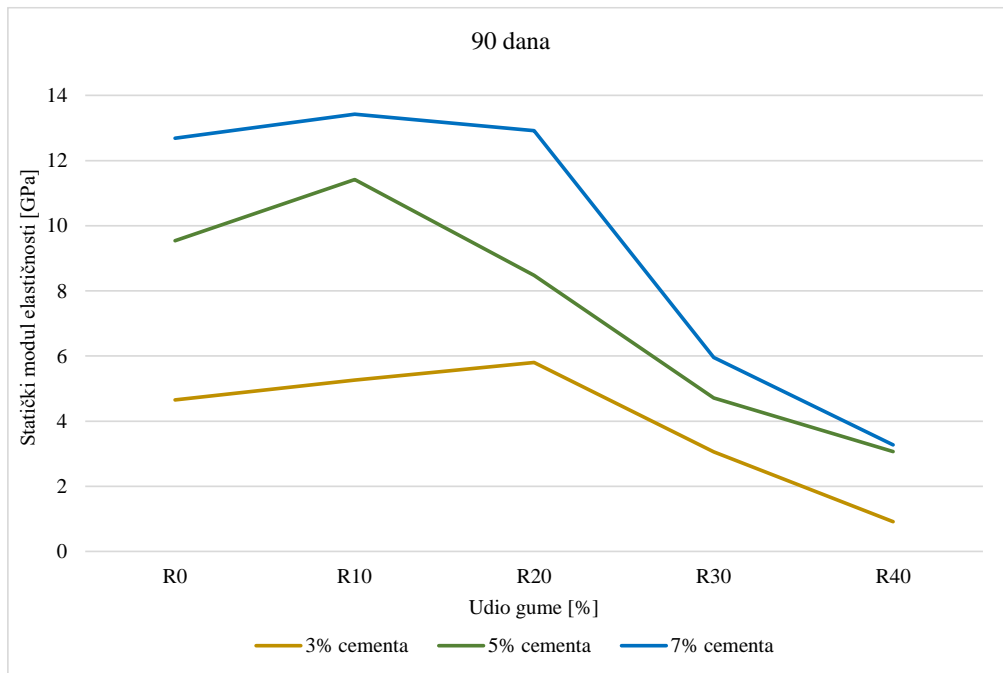
Ovisnost statičkoga modula elastičnosti o količini cementa i gume prikazana je slikama 4.27., 4.28. i 4.29. za mješavine s granuliranom gumom nakon 7, 28 i 90 dana, dok je slikom 4.30. prikazana ovisnost statičkoga modula elastičnosti o količini gumenih niti i vremenu njege uzoraka.



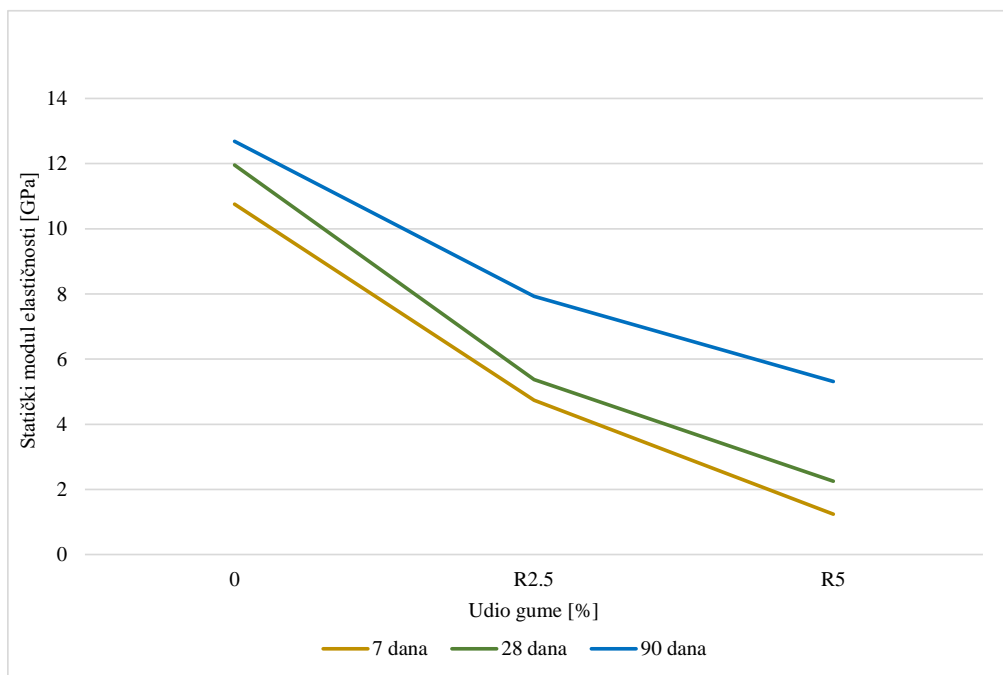
Slika 4.27. Statički modul elastičnosti mješavina s granuliranom gumom nakon 7 dana



Slika 4.28. Statički modul elastičnosti mješavina s granuliranom gumom nakon 28 dana



Slika 4.29. Statički modul elastičnosti mješavina s granuliranom gumom nakon 90 dana



Slika 4.30. Statički modul elastičnosti mješavina s gumenim nitima nakon 7, 28 i 90 dana

Iz grafičkih prikaza rezultata može se zaključiti kako i za razvoj statičkoga modula elastičnosti veliku ulogu ima dulje vrijeme njege. Tako moduli za mješavine s 3% i 7% cementa rastu s dodatkom do 20% gume nakon 90 dana njege. Dok je za mješavinu s 5% cementa nakon povećanja količine gume više od 10% uočen pad modula. Isto kao i kod svih prethodno izmjerenih svojstava, količina od 40% gume pokazuje kako nadjačava utjecaj cementa te

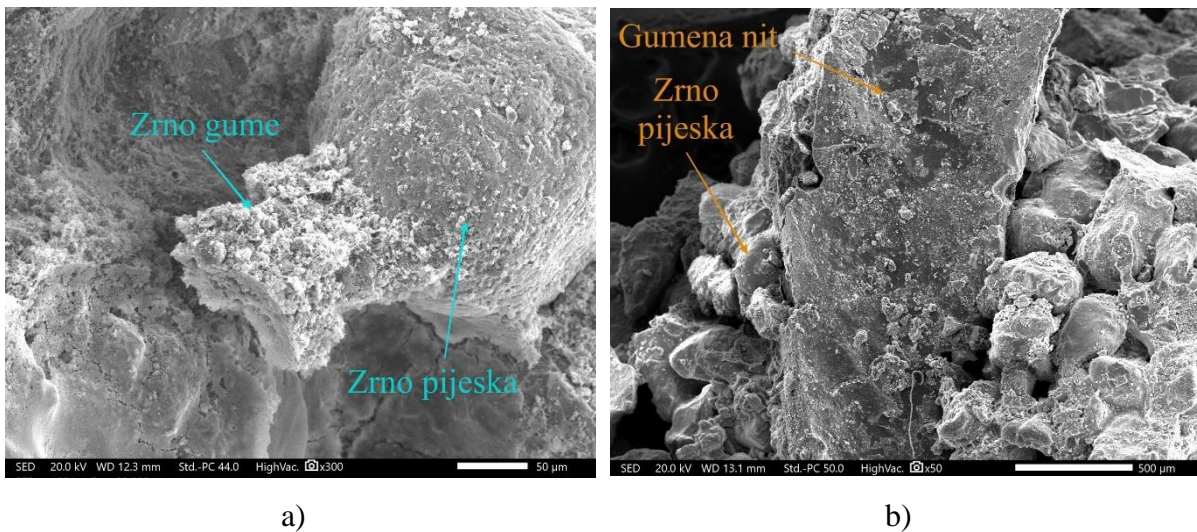
moduli elastičnosti mješavina C5R40 i C7R40 postižu vrlo slične vrijednosti. Općenito se može zaključiti kako i kod statičkoga modula elastičnosti produljeno vrijeme njege od 90 dana utječe na povećanje krutosti mješavine [35].

Gumene niti, kao i kod dinamičkoga modula elastičnosti, imaju velik utjecaj na razvoj krutosti mješavine. Naime, na mješavinama s gumenim nitima izmjereni su znatno manji statički moduli elastičnosti u odnosu na mješavine sa sličnim masenim udjelom gumenih granula.

Kao i kod dinamičkoga modula elastičnosti upotreba male količine gumenih granula izaziva povećanje statičkoga modula elastičnosti nakon produljenoga vremena njege, a povećanjem udjela gume statički modul elastičnosti se smanjuje. Značajan je i utjecaj količine cementa pa mješavine s većim udjelom cementa postižu veće krutosti, a samim time i veće statičke module elastičnosti. S druge strane, gumene niti izazivaju značajno smanjenje statičkoga modula elastičnosti.

4.9 SEM i EDS analiza gumenog granulata

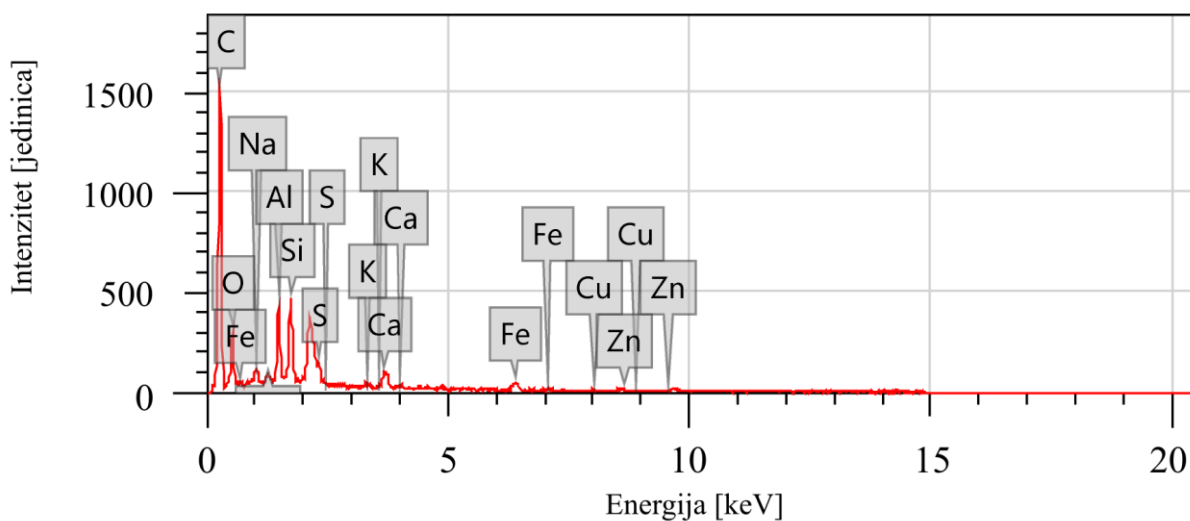
Upotrebom gume u cementom stabiliziranim mješavinama neupitno dolazi do smanjenja tlačne i neizravne vlačne čvrstoće mješavina. Isto tako, guma utječe na smanjenje dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti, što je pozitivan efekt s obzirom na to da se na taj način smanjila krutost mješavine CNS-a, a jedan od ciljeva ovoga istraživanja jest povećanje elastičnosti CNS-a kako bi se smanjila unutarnja naprezanja i nastanak inicijalnih pukotina. Uzrok smanjenja mehaničkih svojstava CNS-a upotrebom gume nalazi se u elastičnoj prirodi gume, drugačijem kemijskom sastavu te nepravilnoj morfologiji čestica gume. No, veliku ulogu igra i veličina čestica gume. Naime, čestice gumenih niti znatno su veće u odnosu na čestice gumenoga granulata, što uzrokuje razaranje unutarnjih veza i oslabljenje veza unutar mješavine. Gumena granula u mješavini uvećana 300 puta pomoću SEM-a prikazana je slikom 4.31. a). Na slici se vidi kako je gumena granula manja od zrna prirodnoga agregata te kako se nalazi zalijepljena za zrno agregata u šupljini između ostalih zrna. Dok je slikom 4.31. b) prikazan položaj gumene niti pod povećanjem od 50 puta. Na slici se jasno vidi kako je gumena nit osjetno veća od ostatka agregata te kako ne postoje jasne veze između te čestice i čestica prirodnoga agregata i cementne paste.



Slika 4.31. Odnos čestice a) gumenog granulata i b) gumene niti s ostatkom agregata u mješavini

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava mješavina pokazuju kako dolazi do značajnoga porasta čvrstoće i modula elastičnosti mješavina s gumom nakon produljenoga vremena njege uzoraka. Ta činjenica nije u skladu s očekivanjima jer se prilikom izrade uzoraka koriste brzovežući cement od kojega se očekuje da postigne veću početnu čvrstoću u prvih 24 sata njege, a postizanje potpune čvrstoće očekuje se unutar prvih 28 dana od izrade uzoraka. Nakon toga nastavlja se proces razvoja čvrstoće, no sa znatno manjim intenzitetom. Zbog razvoja mehaničkih svojstava koja odstupaju od očekivanja, analiziran je kemijski sastav gume i njezin utjecaj na proces hidratacije cementa. U radu [123] se navodi kako guma sadrži oko 1.27% cinka. Također, analiza pirolitičkoga ugljena nastaloga tijekom vulkanizacije gume pokazuje kako taj materijal sadrži oko 3.1% cinka. Pirolitički ugljen čini oko 42% mase novonastaloga materijala temeljem čega autori zaključuju kako je većina cinka zadržana unutar gume tijekom pirolize. Udio cinka u gumi vrlo je važan prilikom analize odgođenoga razvoja čvrstoće stabilizacijske mješavine. Naime, do usporenoga razvoja čvrstoće dolazi zbog prisustva cinka (Zn) u gumenom agregatu koji usporava proces hidratacije cementa [124]. Hidratacija C_3S faze usporena je u prisustvu cinka na način da se oko zrna cementa stvara amorfni sloj $Zn(OH)_2$. Nadalje, do usporavanja hidratacije C_3A faze dolazi u prisustvu cinka ukoliko količina sulfata prelazi 2.5% [115,125,126]. Dokazano je kako prisutnost cinka utječe na smanjenje tlačne čvrstoće cementnoga kompozita [114] te da utjecaj cinka na smanjenje čvrstoće cementnih kompozita slabi s protekom vremena [115]. Stoga je provedena energetska-disperzijska spektrometrijska analiza (EDS analiza) čestice gumenoga granulata kako bi se utvrdila prisutnost cinka u gumenom granulatu. Tom analizom detektirano je $1.84 \pm 0.37\%$ masenoga

udjela cinka u gumi. Energetski disperzijski spektar promatrane čestice gume prikazan je slikom 4.32., a maseni i atomski udio pojedinoga kemijskog elementa tablicom 4.13.



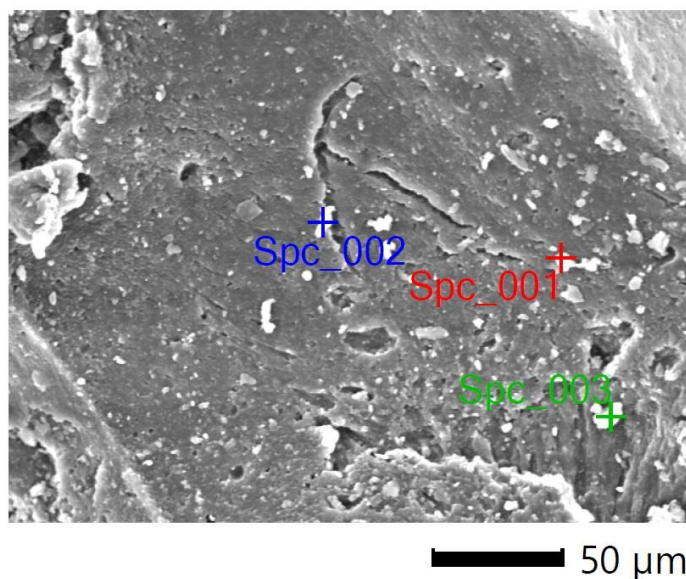
Slika 4.32. Energetski disperzijski spektar čestice gume

4.13. Energetsko-disperzijska spektrometrijska analiza gume

Element	Ljuštura	Maseni udio [%]	Atomski udio [%]
C	K	61.33 ± 0.29	75.72 ± 0.36
O	K	15.80 ± 0.34	14.65 ± 0.32
Na	K	0.78 ± 0.08	0.50 ± 0.05
Mg	K	0.49 ± 0.05	0.30 ± 0.03
Al	K	4.78 ± 0.12	2.63 ± 0.06
Si	K	5.18 ± 0.13	2.73 ± 0.07
S	K	0.61 ± 0.07	0.28 ± 0.03
K	K	0.49 ± 0.06	0.18 ± 0.02
Ca	K	2.96 ± 0.12	1.10 ± 0.05
Fe	K	4.78 ± 0.24	1.27 ± 0.06
Cu	K	0.96 ± 0.24	0.22 ± 0.06
Zn	K	1.84 ± 0.37	0.42 ± 0.08
Ukupno		100	100

Iz prikazane analize može se zaključiti kako je najzastupljeniji kemijski element gume ugljik sa $61.33 \pm 0.29\%$ masenoga udjela, zatim slijedi kisik s $15.80 \pm 0.34\%$ masenog udjela, dok se ostali elementi (natrij, magnezij, aluminijski, silicij, sumpor, kalij, kalcij, željezo, bakar i cink) nalaze u znatno manjim masenim udjelima. Osim EDS analize, provedena je i pregledna X-ray analiza uzorka otpadne gume na prisutnost cinka (Zn) i cinkovog oksida (ZnO) te olova (Pb) i oksida olova (PbO). Tom analizom utvrđeno je kako u analiziranom uzorku otpadne gume ima

1.82% cinka te 2.30% cinkovog oksida, dok udio olova iznosi 0.0018%, a oksida olova 0.0020%. Količina cinka prisutnoga u gumi nešto je veća u odnosu na količinu prikazanu u radu [123], no radi se o sličnim vrijednostima. Dodatno, SEM analizom identificirani su spojevi cinkovog oksida koji se na slici ističu svjetlijom bojom. Cinkovi oksidi prikazani su slikom 4.33. točkama Spc_002 i SPC_003. U tim točkama pronađene su količine cinka u iznosima $5.63 \pm 0.4\%$ i $10.59 \pm 0.05\%$.



Slika 4.33. SEM slika cinkovog oksida

Provedenim analizama dokazano je kako gumeni agregat sadrži dovoljnu količinu olovovog oksida da uspori hidrataciju cementa čime izaziva porast mehaničkih svojstava nakon duljega vremena njege. Nadalje, utvrđena je i dovoljna količinu cinkovog oksida da izazove smanjenje mehaničkih svojstava cementnoga kompozita, što se očituje u lošijim svojstvima mješavina s gumom u odnosu na referentne mješavine.

4.10 Ekološki utjecaj

Ekološki utjecaj korištenja gume u cementom stabiliziranom nosivom sloju kolnika ispitan je metodom izluživanja opisanom u potpoglavlju 3.2.8. Ispitana su četiri eluata, dva za gumeni granulati i dva za stabilizacijsku mješavinu s gumenim granulatom u demineraliziranoj vodi i kišnici. Pri tome ispitan je uzorak mješavine C5R20. U eluatu je određena količina lakohlapljivih aromatskih ugljikovodika (BTX), aluminijska (Al), Bakra (Cu), cinka (Zn), kadmija (Cd), kroma (Cr), mangana (Mn), olova (Pb), željeza (Fe) i žive (Hg). Pri tome lakohlapljivi ugljikovodici predstavljaju ukupnu koncentraciju benzena, toluena, etilbenzena i

ksilena. Dozvoljene vrijednosti tih kemijskih elemenata prema *Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda* (NN 62/20) [127] i rezultati ispitivanja prikazani su tablicom 4.14.

4.14. Rezultati ispitivanja eluata

Elementi	BTX	Al	Cu	Zn	Cd	Cr	Mn	Pb	Fe	Hg
Dozvoljene vrijednosti	0.1	3	0.5	2	0.1	0,5	2	0.5	2	0.01
Demineralizirana voda										
Guma	0.015	0.029	0.009	1.1	0.00015	< 0.001	0.22	<0.002	<0.04	< 0.0001
CNS	0.0014	0.95	0.016	<0.01	<0.00005	0.089	0.075	<0.002	<0.04	< 0.0001
Kišnica										
Guma	0.007	0.047	0.0089	7.3	0.0001	<0.001	0.33	<0.002	<0.04	< 0.0001
CNS	0.0085	1.3	0.02	<0.01	<0.00005	0.085	<0.01	<0.002	<0.04	< 0.0001

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako otpadna guma korištena u ovom istraživanju ne predstavlja opasnost za okoliš u vidu potencijalnoga zagađenja okoliša izluživanjem teških metala. Zabilježena je zanemariva količina teških metala Cd, Pb, Fe i Hg, dok su nešto značajnije količine zabilježene za Zn i Mn. Znatne razlike pokazale su se u količini izluženih teških metala Zn i Al te lakohlapljivih aromatskih ugljikovodika za uzorak s demineraliziranom vodom i kišnicom. Pri tome je uz korištenje kišnice zabilježena veća količina otpuštenih teških metala. S obzirom na to da su korištenjem kišnice simulirani realniji uvjeti, na ove rezultate treba obratiti veću pozornost. Rezultati pokazuju prekoračenje dopuštenih vrijednosti samo za uzorak čiste gume pripremljen s kišnicom, gdje se javljaju prekomjerne količine cinka. No, količina toga kemijskog elementa izlužena iz mješavine CNS-a s gumom iznosi manje od 0.01. Dakle, ekološki utjecaj deponirane gume izložene atmosferilijama znatno je štetniji u odnosu na istu tu gumu ugrađenu u nosivi sloj kolnika stabiliziran hidrauličnim vezivom. Za uzorak cementom stabiliziranoga nosivog sloja s granuliranom gumom zabilježena je povećana koncentracija Cr i Al u odnosu na uzorak gume, što je u skladu s istraživanjem [91], gdje je navedena povećana količina kroma u eluatu iz betonskih kolnika. Dakle, uzrok povećane količine kroma jest cement iz stabilizacijske mješavine.

Dakle, simulirajući realne uvjete koji se mogu očekivati u okolišu, a to je procjeđivanje kišnice kroz mješavinu cementom stabiliziranoga materijala s otpadnom gumom, nema opasnosti od zagađenja okoliša i ugradnja je takve mješavine ekološki prihvatljiva.

4.11 Rezultati mjerenja skupljanja uzoraka

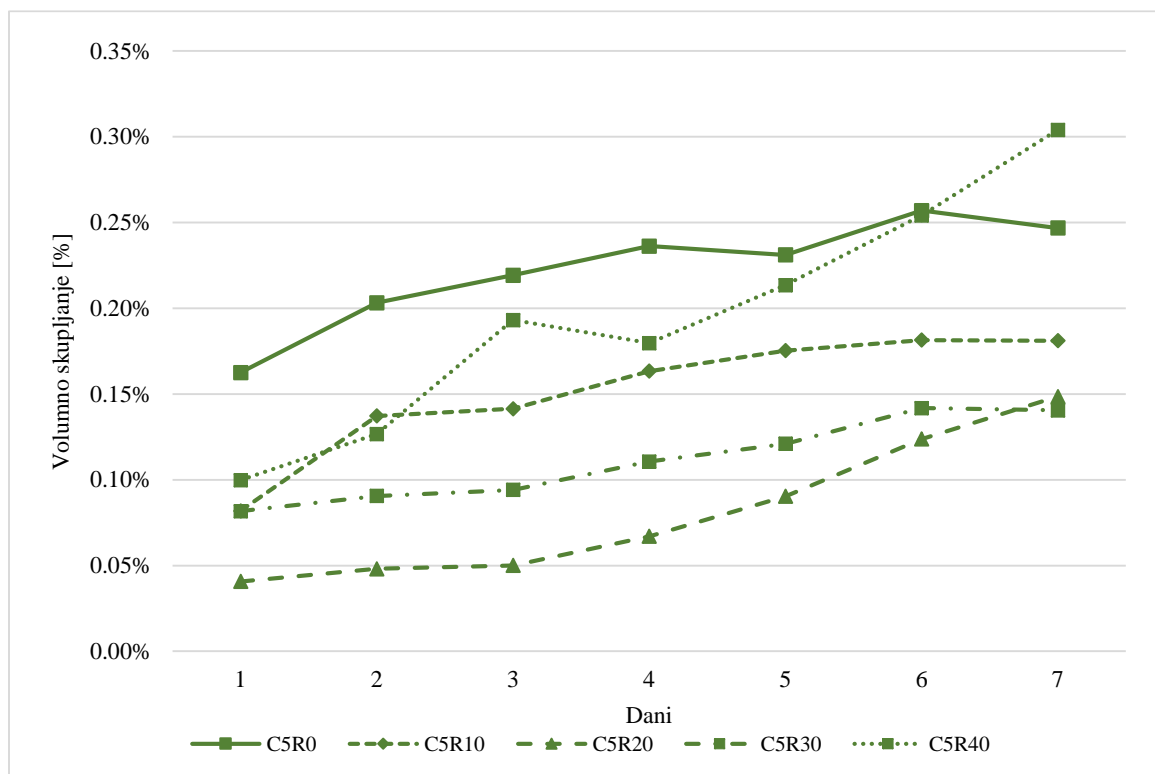
Mjerenje skupljanja mješavina provedeno je samo na mješavinama s 5% cementa i granuliranom gumom (C5R0, C5R10, C5R20, C5R30 i C5R40). Zbog dugotrajnoga ispitivanja i ograničenosti u vidu korištene opreme nije bilo moguće provesti mjerenje skupljanja na svim ispitanim mješavinama. Stoga su odabrane mješavine sa srednjom količinom cementa jer su, temeljem ispitanih mehaničkih svojstava, pokazale potencijal za ugradnju u nosive slojeve kolnika. Ispitivanje je provedeno prema nestandardnoj metodi osmišljenoj za potrebe izrade ovoga doktorskog rada, koja je detaljnije opisana u potpoglavlju 3.2.11. Rezultati ispitivanja bilježeni su svaka 24 sata i prikazani tablicom 4.15.

4.15. Rezultati mjerenja volumnog skupljanja mješavina s 5% cementa

Dani	Volumno skupljanje [%]				
	C5R0	C5R10	C5R20	C5R30	C5R40
1	0.1625	0.0819	0.0407	0.0817	0.0998
2	0.2032	0.1372	0.0481	0.0906	0.1267
3	0.2193	0.1414	0.0501	0.0942	0.1931
4	0.2363	0.1633	0.0671	0.1106	0.1797
5	0.2312	0.1753	0.0904	0.1210	0.2135
6	0.2570	0.1815	0.1238	0.1418	0.2541
7	0.2468	0.1811	0.1485	0.1405	0.3041

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako je volumno skupljanje ispitanih uzoraka vrlo malo i za sve mješavine iznosi manje od 1%. No, zbog jasnijega razumijevanja utjecaja vremena i količine gume na razvoj volumne deformacije rezultati su prikazani i grafički na slici 4.34. Grafički prikaz rezultata pokazuje kako do najvećega razvoja volumne deformacije dolazi u prva 24 sata mjerenja. Takav je rezultat i očekivan s obzirom na to da je korišten brzovežući cement u tim mješavinama. Referentna mješavina razvija najveće inicijalno skupljanje nešto veće od 0.15%, dok sve ostale mješavine s gumom razvijaju inicijalno skupljanje do 0.10%. Doprinos gume smanjenju inicijalnoga skupljanja stabilizacijske mješavine je očit. Smanjenje inicijalnoga skupljanja upućuje i na smanjenje razvoja inicijalnih unutarnjih naprezanja čime izravno utječe na smanjenje razvoja pukotina u ranim stadijima hidratacije cementa. Temeljem grafičkoga prikaza rezultata može se zaključiti kako nema skoka u razvoju skupljanja, već se može reći kako se skupljanje povećava linearno tijekom vremena. Promjenom količine gume u mješavini dolazi do različitih trendova razvoja naprezanja, odnosno povećanje količine gume

nije popraćeno smanjenjem skupljanja. No, uzimajući u obzir apsolutne vrijednosti skupljanja koje nakon sedam dana mjerenja dosežu do 0.30% (C5R40) i područje pogreške mjernoga uređaja, te razlike mogu biti zanemarene. Također se može zaključiti kako je mješavina C5R20 postigla najmanje skupljanje tijekom prva 24 sata njege uzorka u odnosu na sve druge mješavine. Odstupanje rezultata za mješavinu C5R40 na kraju ispitnoga razdoblja može se objasniti nehomogenom raspodjelom velike količine gume ugrađene u tu mješavinu i grupiranjem te gume u klastere kako je prikazano i u radu [73]. Smanjenje volumne deformacije mješavina s upotrebom otpadne gume u skladu je s rezultatima autora Sun i dr. [68]. Autori također naglašavaju kako smanjenje skupljanja ima veliku važnost u smanjenju razvoja unutarnjih naprezanja u mješavini. U radu [77] se navodi kako čestice gume usporavaju brzinu skupljanja mješavina.



Slika 4.34. Rezultati mjerenja volumnog skupljanja mješavina s 5% cementa

4.12 Zaključno

Ispitivanje mehaničkih svojstava CNS-a s otpadnom gumom pokazalo je kako dodatak gumenoga granulata utječe na smanjenje tlačne i neizravne vlačne čvrstoće, kao i na smanjenje dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti. Isti učinak izaziva i korištenje gumenih niti u stabilizacijskim mješavinama. Povećanje navedenih svojstava može se očekivati prilikom korištenja malih količina gume u mješavinama. Razlog za takve pojave nalazi se u maloj specifičnoj težini gume i kemijskom sastavu gume koji utječe na usporavanje razvoja čvrstoće i smanjenje konačne čvrstoće cementnoga kompozita. Utvrđeno je i kako količina cementa ima veći utjecaj na otpornost mješavine na utjecaj smrzavice, a gumene niti pokazale su pozitivniji učinak na to svojstvo u odnosu na gumene granule. Mjerenje skupljanja pokazalo je kako dodatak gume stabilizacijskim mješavinama utječe na smanjenje inicijalnoga skupljanja.

5 Korelacije mehaničkih svojstava mješavina

U prethodnom poglavlju prikazani su rezultati ispitanih mehaničkih svojstava 17 mješavina cementom stabiliziranoga nosivog sloja. Referentne mješavine i mješavine s granuliranom gumom čine opsežnu usporedivu bazu za statističku analizu. Referentnim mješavinama varirana je količina cementa, dok je mješavinama s gumom varirana količina cementa i količina granulirane gume kao volumne zamjene za pijesak. U ovom poglavlju bit će prikazane korelacijske veze između pojedinih mehaničkih svojstava ispitanih mješavina te različitih vremena njege uzoraka. Poznato je kako nisu svi podaci statistički, već su statistički podaci oni koji su promatrani prema planu, koji su varijabilni i kojih ima dovoljno [128]. Stoga, zbog maloga broja mješavina s gumenim nitima i dobivenim rezultatima koji ukazuju na drugačije ponašanje tih mješavina, one neće biti korištene prilikom definiranja korelacije između mehaničkih svojstava mješavina.

U ovom poglavlju bit će analizirani međusobni utjecaji dviju varijabli i to tlačne čvrstoće i duljine vremena njege uzoraka, neizravne vlačne čvrstoće i duljine njege uzoraka, tlačne i neizravne vlačne čvrstoće, dinamičkoga modula elastičnosti i duljine vremena njege uzoraka, statičkoga modula elastičnosti i duljine vremena njege uzoraka te dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti. Dakle, bit će utvrđene veze između navedenih mehaničkih svojstava i razdoblja njege te između mehaničkih svojstava međusobno. Takve veze služe za opis odnosa između ispitanih mehaničkih svojstava i cilj je dobiti što pouzdanije rezultate, što se opisuje pomoću jakosti statističkih veza. Mjerenje stupnja povezanosti između pojava proučava se u sklopu područja korelacijske analize [128]. S obzirom na to da se tu promatra korelacija dviju varijabli, radi se o dvodimenzionalnoj analizi [129]. Za analitički prikaz odnosa između varijabli koristi se regresijski model. Regresijski model u slučaju promatranja linearne veze jest jednadžba pravca. Regresijskim modelom naziva se pravac provučen kroz korespondentne točke prikazane u dijagramu rasipanja koji ima najmanju sumu kvadrata odstupanja pojedinačnih rezultata od toga pravca. Definiranoj funkcionalnoj vezi promatranih vrijednosti potrebno je i odrediti jakost koja se definira koeficijentom determinacije (R^2). Vrijednosti koeficijenta determinacije kreću se od 0 do 1. Pri tome je međusobna zavisnost veća što je koeficijent determinacije bliže 1. Za interpretaciju dobivenih vrijednosti koeficijenata determinacije koristi se Chaddockova ljestvica jakosti veze [130] prikazana tablicom 5.1.

5.1. Chaddokova ljestvica jakosti veze

Koeficijent determinacije R^2	Jakost veze
0.00 – 0.10	Odsutnost veze
0.10 – 0.30	Slaba veza
0.30 – 0.50	Srednje jaka veza
0.50 – 0.70	Izražena veza
0.70 – 0.90	Jaka veza
0.90 – 1.00	Vrlo jaka veza

Nadalje, osim promatranja navedenih svojstava analizirane su i korelacijske veze između izmjerene brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa, tlačne čvrstoće i vremena njege te brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa, statičkoga modula elastičnosti i vremena njege uzoraka. S obzirom na to da se radi o promatranju korelacije tri varijable, govori se o trodimenzionalnoj analizi. Temeljem prikaza dobivenih vrijednosti i pregleda literature [20,131] odnos između tih veličina promatran je nelinearnom funkcijom. Prilikom analize nelinearne veze važan parametar ocjene pouzdanosti razvijenoga modela jest analiza reziduala koji trebaju biti međusobno neovisni i homogeno distribuirani. Svrha je takve analize razvoj predikcijskih modela za estimaciju tlačne čvrstoće i statičkoga modula elastičnosti za čije se određivanje koriste razorne metode. Naime, brzina ultrazvučnoga impulsa mjeri se nerazornom metodom nakon koje ispitni uzorci ostaju na raspolaganju za daljnja ispitivanja. Osim toga, provođenje mjerenja tom metodom vrlo je brzo.

5.1 Korelacija tlačnih čvrstoća nakon 7, 28 i 90 dana njege

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće analizirani su na način da se utvrdila veza između tlačne čvrstoće uzoraka starih 7 i 28 dana i 7 i 90 dana. Bez obzira na to što prema *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] nisu postavljeni zahtjevi za tlačnu čvrstoću nakon 90 dana njege, bit će prikazana i ta korelacija s obzirom na to da su i ti podaci pokazali linearnu korelaciju sa sedmodnevnom tlačnom čvrstoćom i kao takvi predstavljaju korisne rezultate. Ukoliko u koreliranim veličinama postoje jake ili vrlo jake veze, pomoću definiranih odnosa moguće je predvidjeti tlačnu čvrstoću uzoraka veće starosti s velikom pouzdanošću, što smanjuje opseg laboratorijskih ispitivanja i olakšava klasifikaciju ispitane mješavine. Na slici 5.1. prikazana je veza između tlačnih čvrstoće uzoraka njegovanih 7 i 28 dana i 7 i 90 dana.

Veza između 7-dnevne i 28-dnevne tlačne čvrstoće opisana je linearnom funkcijom oblika (5.1):

$$f_{c28} = a + f_{c7} \cdot b \quad (5.1)$$

Gdje su:

f_{c28} – tlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 28 dana [MPa]

f_{c7} – tlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 7 dana [MPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Veza između 7-dnevne i 90-dnevne tlačne čvrstoće opisana je linearnom funkcijom oblika (5.2):

$$f_{c90} = a + f_{c7} \cdot b \quad (5.2)$$

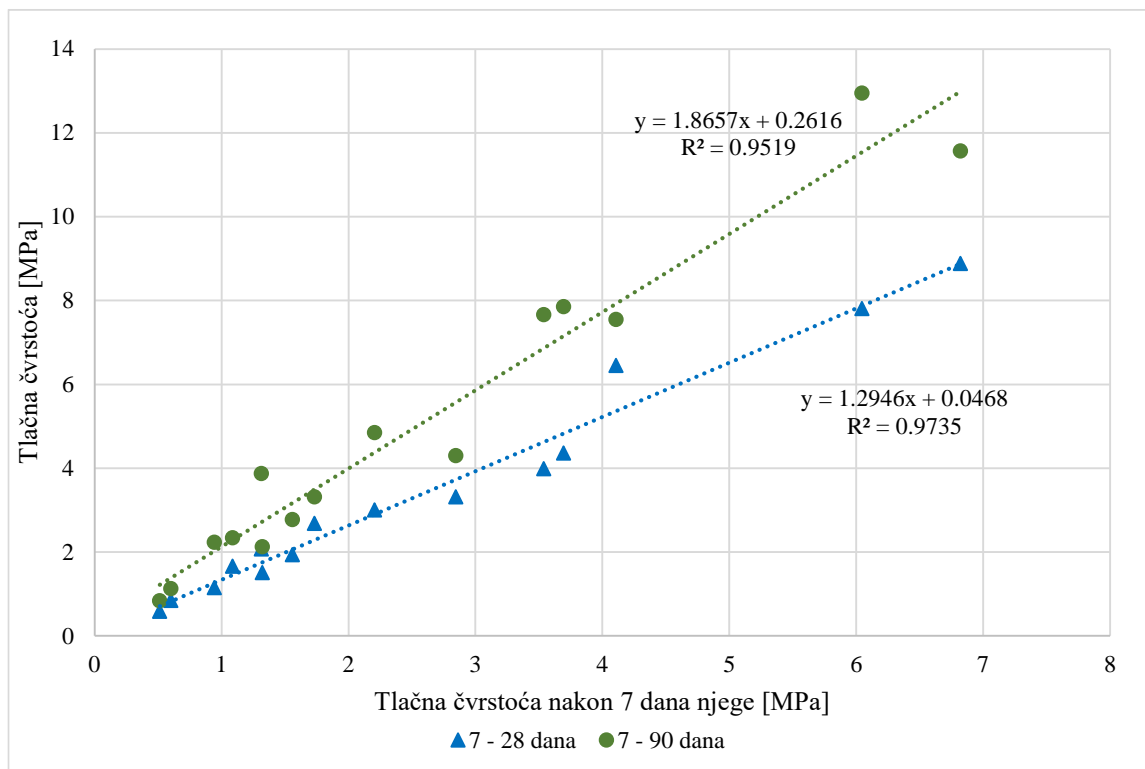
Gdje su:

f_{c90} – tlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 90 dana [MPa]

f_{c7} – tlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 7 dana [MPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca



Slika 5.1. Korelacije tlačnih čvrstoća za različita vremena njege

Promatrane korelacije pokazuju vrlo visoke koeficijente determinacije (R^2). Veza između tlačne čvrstoće uzoraka starih 7 i 28 dana pokazuje koeficijent determinacije 0.9735, dok veza između tlačne čvrstoće uzoraka starih 7 i 90 dana iznosi 0.9519. Navedeni koeficijenti determinacije pokazuju kako su promatrane vrijednosti opisane vrlo jakim linearnom vezom i predviđene vrijednosti temeljem prikazanih veza davat će vrlo pouzdane rezultate s vrlo malom vjerojatnošću pogreške. Rezultati statističke analize, kao što su koeficijenti jednadžbe pravca, standardna greška, p-vrijednosti, intervali pouzdanosti, koeficijent determinacije i korigirani koeficijent determinacije za korelacije tlačnih čvrstoća, prikazani su tablicom 5.2.

5.2. Parametri korelacija tlačnih čvrstoća

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R^2)	Korigirani koeficijent determinacije (R^2)
7 - 28 dana	a	0.0468	0.1877	0.8072	(-0.3587, 0.4522)	0.9735	0.9715
	b	1.2946	0.0592	0.0000	(1.1666, 1.4225)		
7 - 90 dana	a	0.2616	0.3686	0.4905	(-0.5347, 1.0578)	0.9519	0.9482
	b	1.8657	0.1163	0.0000	(1.6144, 2.1169)		

Iz prikazanih rezultata statističke analize može se zaključiti kako koeficijenti korelacije za varijablu a oba modela dokazuju vrlo blagu pozitivnu korelaciju između analiziranih podataka. Pri tome koeficijenti korelacije za varijablu b za oba modela pokazuju jaku pozitivnu korelaciju između analiziranih podataka. P-vrijednost koeficijentata korelacije pokazuje kako koeficijent korelacije a nije statistički značajan, dok p-vrijednosti koeficijenta b dokazuje jaku pozitivnu vezu između ta dva koeficijenta.

5.2 Korelacija neizravnih vlačnih čvrstoća nakon 7, 28 i 90 dana

Rezultati neizravne vlačne čvrstoće promatrani su na način da se utvrdila veza između mješavina njegovanih 7 i 28 dana te 7 i 90 dana. Cilj je pronaći pouzdane veze između navedenih vrijednosti kako bi se temeljem rezultata kraćega vremena njege moglo predvidjeti neizravnu vlačnu čvrstoću nakon duljega vremena njege, a sve u svrhu smanjenja opsega laboratorijskih ispitivanja. Veza između 7-dnevne i 28-dnevne neizravne vlačne čvrstoće opisana je linearnom funkcijom za prva dva promatrana slučaja oblika (5.3):

$$f_{it28} = a + f_{it7} \cdot b \quad (5.3)$$

Gdje su:

f_{it28} – neizravna vlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 28 dana [MPa]

f_{it7} – neizravna vlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 7 dana [MPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca.

Veza između 7-dnevne i 28-dnevne neizravne vlačne čvrstoće opisana je linearnom funkcijom oblika (5.4):

$$f_{it90} = a + f_{it7} \cdot b \quad (5.4)$$

Gdje su:

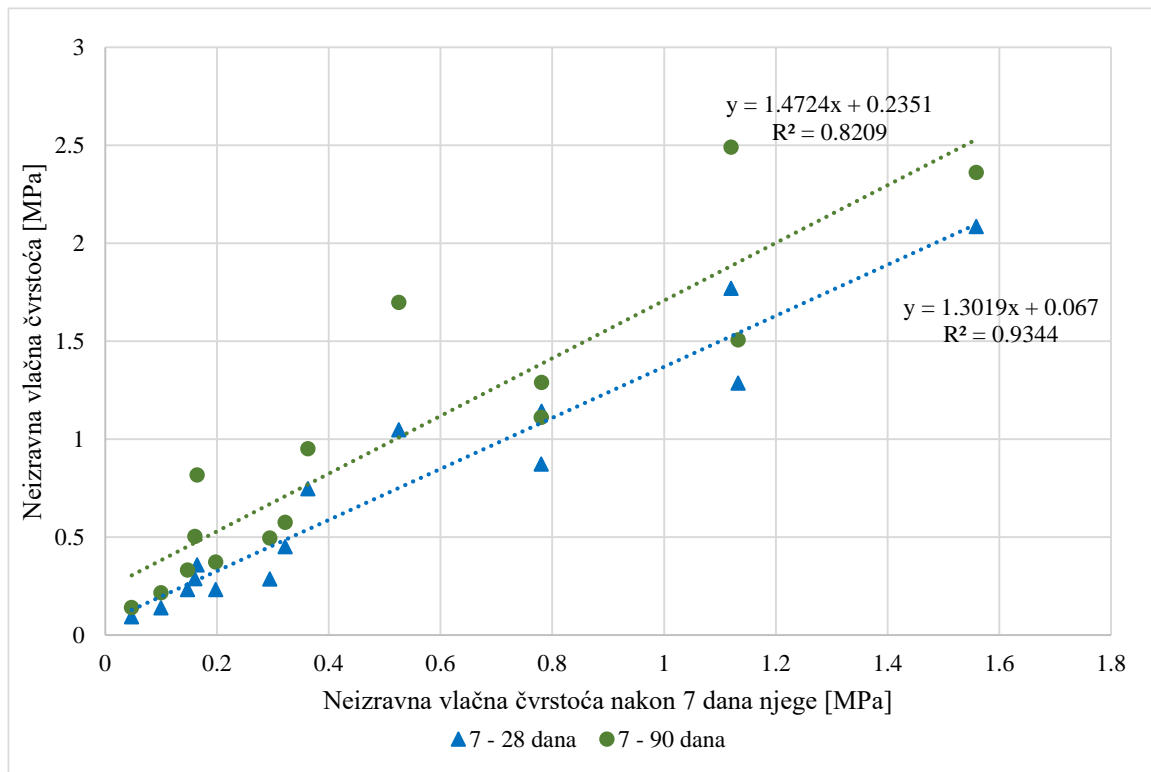
f_{it} – neizravna vlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 90 dana [MPa]

f_{it7} – neizravna vlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 7 dana [MPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Na slici 5.2. prikazane su veze između vrijednosti neizravne tlačne čvrstoće za mješavine njegovane 7 i 28 dana te 7 i 90 dana.



Slika 5.2. Korelacije neizravnih vlačnih čvrstoća za različita vremena njege

Veze između spomenutih svojstava opisane su linearnom funkcijom za oba promatrana para mješavina. Promatrane linearne funkcije okarakterizirane su jakom i vrlo jakom vezom što je prikazano visokim vrijednostima koeficijenta determinacije. Koeficijent determinacije za vezu između neizravne vlačne čvrstoće uzoraka njegovanih 7 i 28 dana iznosi 0.9344, dok koeficijent determinacije za 7 i 90 dana njege iznosi 0.8209. Navedeni koeficijenti determinacije pokazuju kako je linearna veza između promatranih podataka vrlo jaka. Temeljem definiranih funkcija moguće je s vrlo velikom pouzdanošću predvidjeti vrijednosti neizravne vlačne čvrstoće nakon 28 i 90 dana njege temeljem izmjerene neizravne vlačne čvrstoće nakon 7 dana njege uzoraka. Rezultati statističke analize, kao što su koeficijenti jednadžbe pravca, standardna greška, p-vrijednosti, intervali pouzdanosti, koeficijent determinacije i korigirani koeficijent determinacije za korelacije neizravnih vlačnih čvrstoća, prikazani su tablicom 5.3.

5.3. Parametri korelacija neizravnih vlačnih čvrstoća

Korelacija	Koeficijenti	Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)	
7 - 28 dana	a	0.0670	0.0650	0.3211	(-0.0733, 1.0951)	0.9344	0.9293
	b	1.3019	0.0957	0.0000	(1.0951, 1.5086)		
7 - 90 dana	a	0.2351	0.1295	0.0925	(-0.0446, 0.5148)	0.8209	0.8071
	b	1.4724	0.1907	0.0000	(1.0604, 1.8845)		

Iz prikazanih rezultata statističke analize, analogno rezultatima statističke analize tlačne čvrstoće, može se vidjeti kako su koeficijenti korelacije pozitivni, što znači da se radi o pozitivnoj korelaciji. Pri tome koeficijenti *a* prikazuju malu pozitivnu korelaciju, dok koeficijenti *b*, koji postižu vrijednosti veće od 1, pokazuju jaku pozitivnu korelaciju. Koeficijenti *a* oba modela nisu statistički značajni, dok koeficijenti korelacije *b* oba modela pokazuju statističku značajnost veze između promatranih parametra.

5.3 Korelacije tlačne i neizravne vlačne čvrstoće

Osim analize veza između pojedinoga mehaničkog svojstva mješavine koja se temelji na različitoj starosti uzoraka, dobiveni rezultati tlačne i neizravne vlačne čvrstoće analizirani su i međusobno. Korelacijska veza između tlačne i neizravne vlačne čvrstoće prikazana je slikom 5.3., a promatrana je pomoću linearne funkcije oblika (5.5):

$$f_{it} = a + f_c \cdot b \quad (5.5)$$

Gdje su:

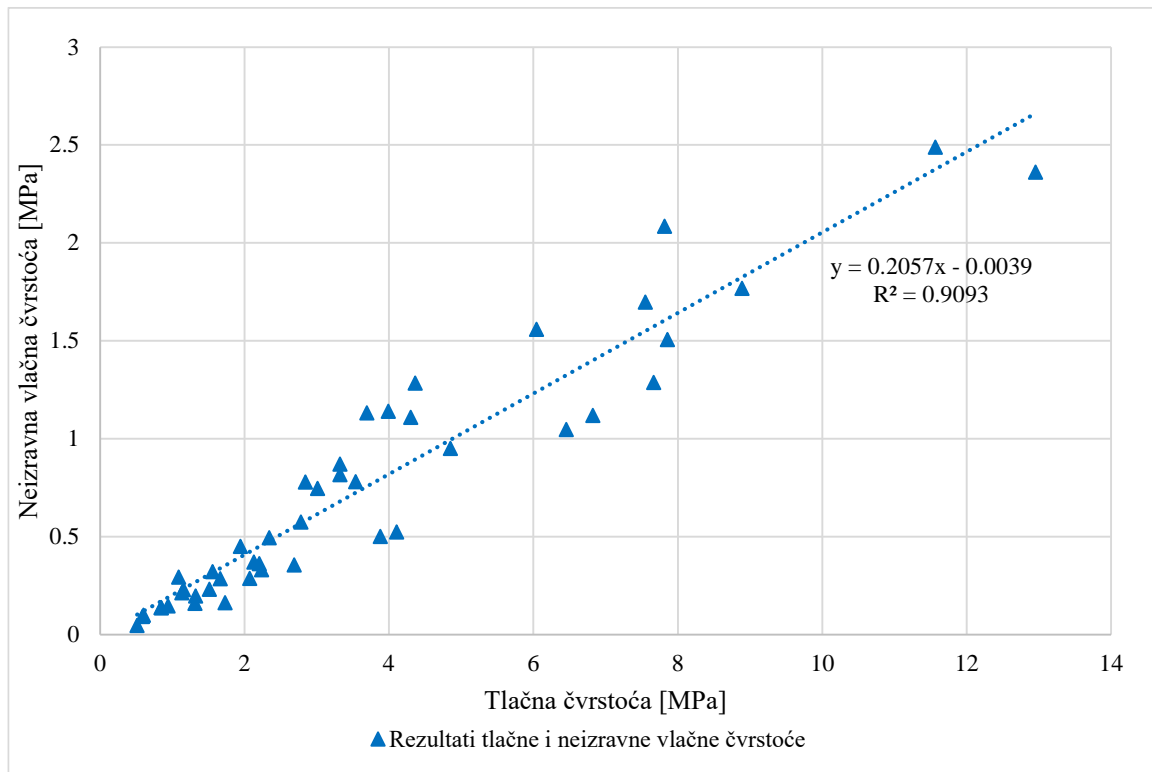
f_c – tlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 7, 28 ili 90 dana [MPa]

f_{it} – neizravna vlačna čvrstoća uzoraka njegovanih 7, 28 ili 90 dana [MPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca.

Linearnu funkciju tih veličina karakterizira vrlo jaka veza s koeficijentom determinacije 0.9093. Definirana jednadžba može biti korištena za predikciju neizravne vlačne čvrstoće temeljem izmjerene tlačne čvrstoće mješavine, bez obzira na starost uzoraka.



Slika 5.3. Korelacija tlačnih i neizravnih vlačnih čvrstoća

Upravo univerzalni karakter ove veze čini ju vrlo korisnom jer je potreban samo jedan ulazni parametar za predikciju neizravne vlačne čvrstoće mješavine za bilo koje vrijeme njege. Nadalje, vrlo visoki koeficijent determinacije jamči pouzdane rezultate dobivene korištenjem definirane veze. Na taj se način opseg laboratorijskih ispitivanja tih materijala može uvelike smanjiti te se u slučaju ispitivanja tlačne čvrstoće mješavina mjerenje neizravne vlačne čvrstoće može izostaviti. Rezultati statističke analize, kao što su koeficijenti jednadžbe pravca, standardna greška, p-vrijednosti, intervali pouzdanosti, koeficijent determinacije i korigirani koeficijent determinacije za korelacije tlačnih čvrstoća, prikazani su tablicom 5.4.

5.4. Parametri korelacija tlačne i neizravne vlačne čvrstoće

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)
tlačna - neizravna vlačna čvrstoća	a	-0.0039	0.0463	0.9336	(-0.0942, 0.0895)	0.9093	0.9072
	b	0.2057	0.0099	0.0000	(0.1857, 0.3368)		

Prikazani rezultati statističke analize prikazuju kako postoji linearna veza između analiziranih podataka, a pri tome p-vrijednost koeficijenata jednadžbe pravca pokazuje da veza nije statistički značajna za koeficijent a , dok je za koeficijent b ona statistički značajna.

5.4 Korelacija dinamičkih modula elastičnosti nakon 7, 28 i 90 dana

Rezultati dobivenih dinamičkih modula elastičnosti promatrani su na način da se utvrdila korelacijska veza između mješavina njegovanih 7 i 28 dana, te 7 i 90 dana. Cilj je pronaći pouzdane veze između spomenutih vrijednosti kako bi se na temelju rezultata kraćega vremena njega mogao predvidjeti dinamički modul elastičnosti nakon duljega vremena njega, a sve u svrhu smanjenja opsega laboratorijskih ispitivanja. Veza između 7-dnevnog i 28-dnevnog dinamičkoga modula elastičnosti opisana je linearnom funkcijom oblika (5.6):

$$E_{din28} = a + E_{din7} \cdot b \quad (5.6)$$

Gdje su:

E_{din28} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 28 [GPa]

E_{din7} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7 dana [GPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca.

Veza za drugi promatrani slučaj opisana je linearnom funkcijom oblika (5.7):

$$E_{din90} = a + E_{din7} \cdot b \quad (5.7)$$

Gdje su:

E_{din90} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 90 dana [GPa]

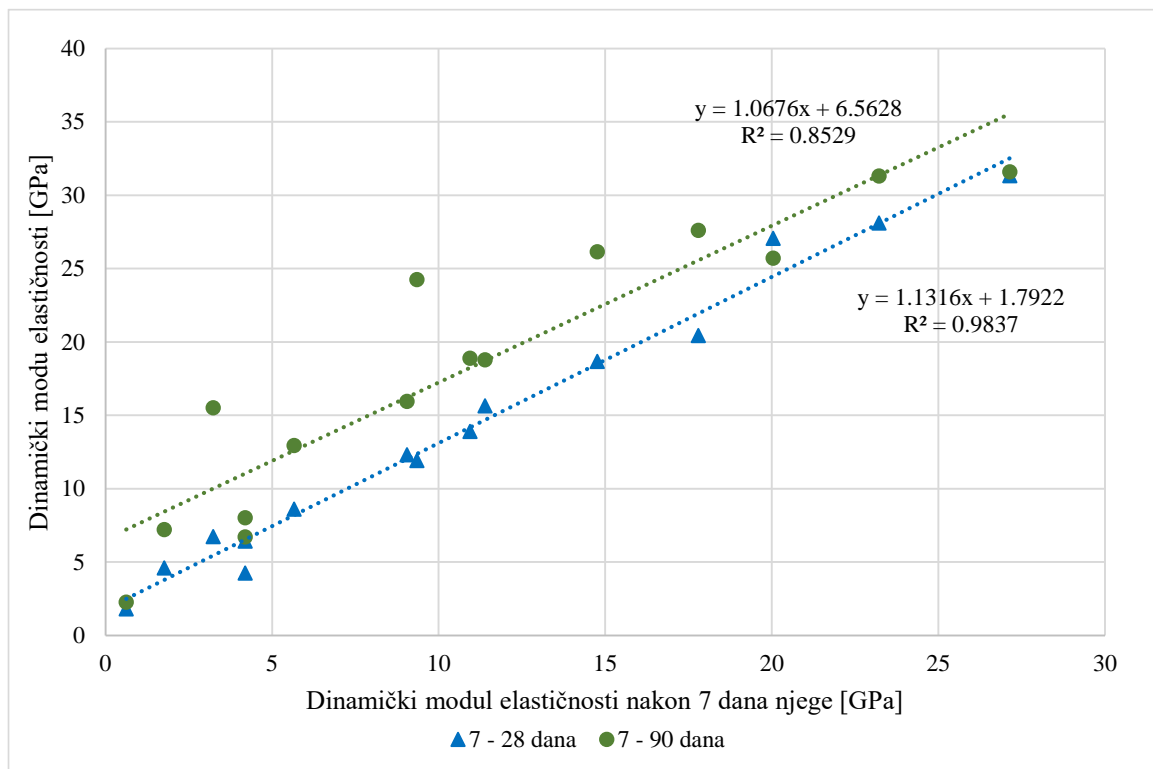
E_{din7} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7 dana [GPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Utvrđene korelacijske veze između promatranih parova rezultata prikazane su slikom 5.4. Promatrane korelacijske veze okarakterizirane su jakim ili vrlo jakim vezom. Odnos između rezultata izmjerenih na uzorcima starosti 7 i 28 dana pokazuje vrlo jaku vezu s koeficijentom determinacije 0.9837, dok su rezultati drugoga promatranog slučaja povezani jakim vezom s koeficijentima determinacije 0.8529. Koristeći se definiranim korelacijskim vezama, moguće

je temeljem izmjerenoga dinamičkog modula elastičnosti nakon 7 dana njege s velikom pouzdanošću predvidjeti dinamički modul elastičnosti nakon duljega vremena njege mješavine. Iz nešto nižih koeficijenata determinacije u odnosu na razvijene veze tlačne i neizravne vlačne čvrstoće, može se reći da su rezultati dinamičkoga modula elastičnosti nešto nepouzdaniji. Razlog za manje pouzdane rezultate vjerojatno su utjecajni činitelji prilikom provođenja mjerenja. Naime, prilikom mjerenja dinamičkoga modula elastičnosti veliku ulogu predstavlja kontakt između predajnika ultrazvučnoga impulsa i površine uzorka. Nije moguće na svim slučajevima osigurati potpuni kontakt, a to ovisi o ravnosti površine uzorka.



Slika 5.4. Korelacije dinamičkih modula elastičnosti za različita vremena njege

Rezultati statističke analize, kao što su koeficijenti jednadžbe pravca, standardna greška, p-vrijednosti, intervali pouzdanosti, koeficijent determinacije i korigirani koeficijent determinacije za korelacije tlačnih čvrstoća, prikazani su tablicom 5.5.

5.5. Parametri korelacija dinamičkih modula elastičnosti za različita vremena njege

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)
7 - 28 dana	a	1.7922	0.5431	0.0057	(0.6190, 2.9654)	0.9837	0.9825
	b	1.1316	0.0404	0.0000	(1.0443, 1.2188)		

7 - 90 dana	a	6.5628	1.6529	0.0016	(2.9920, 10.1336)	0.8529	0.8416
	b	1.0676	0.1229	0.0000	(0.8020, 1.3332)		

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako su analizirani podaci povezani jakim ili vrlo jakim vezama. Regresijski pravci vrlo dobro objašnjavaju varijabilnost dinamičkih modula elastičnosti nakon duljega vremena njege temeljem dinamičkoga modula elastičnosti kraćega vremena njege. Nadalje, svi izračunati koeficijenti korelacije statistički su značajni na razini slučajnosti 0.05 i radi se o jakoj pozitivnoj korelaciji svih koeficijenata.

5.5 Korelacija statičkoga modula elastičnosti nakon 7, 28 i 90 dana

Rezultati dobivenih statičkih modula elastičnosti analizirani su na način da se utvrdila korelacijska veza između mješavina njegovanih 7 i 28 dana te 7 i 90 dana. Cilj ove analize jest definirati korelacijske veze između spomenutih parova rezultata kako bi se temeljem kraćega vremena njege mogao predvidjeti rezultat duljega vremena njege. Veza između 7-dnevnog i 28-dnevnog statičkoga modula elastičnosti opisana je linearnom funkcijom oblika (5.8):

$$E_{st28} = a + E_{st7} \cdot b \quad (5.8)$$

Gdje je:

E_{st28} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 28 dana [GPa]

E_{st7} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7 dana [GPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Veza za drugi promatrani slučaj opisana je linearnom funkcijom oblika (5.9):

$$E_{st90} = a + E_{st7} \cdot b \quad (5.9)$$

Gdje je:

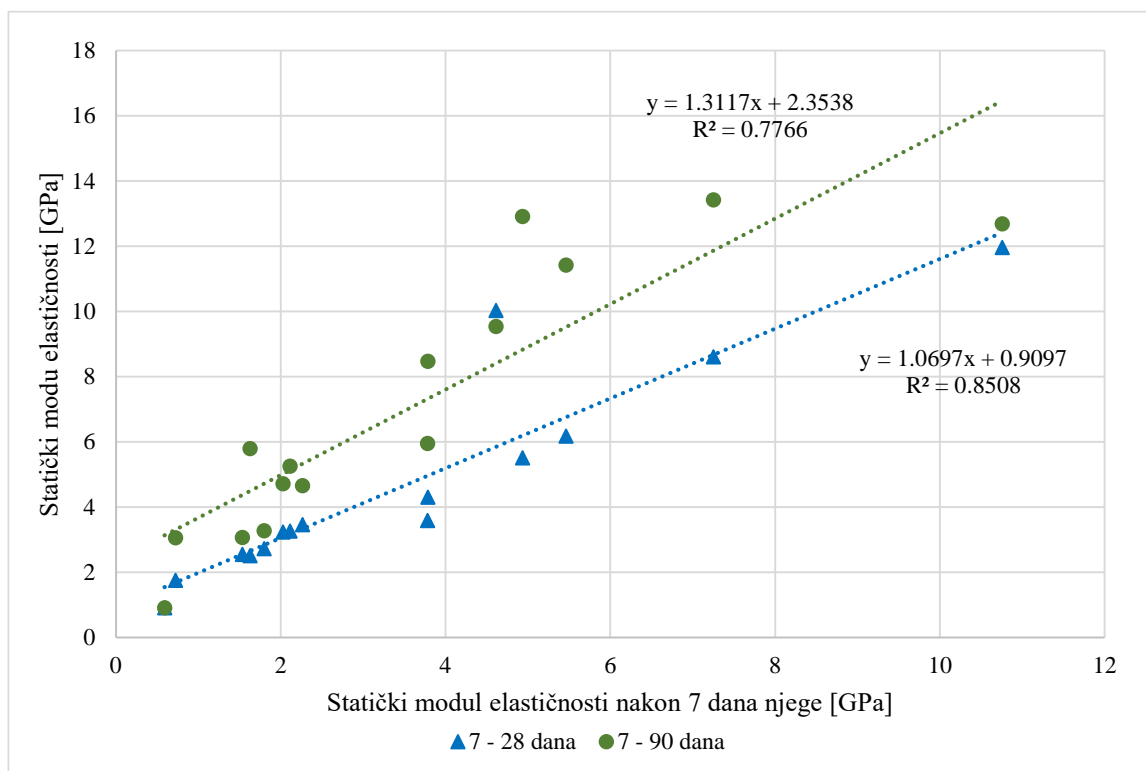
E_{st90} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 90 dana [GPa]

E_{st7} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7 dana [GPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Utvrđene korelacijske veze prikazane su slikom 5.5. Promatrane korelacije okarakterizirane su jakim vezom s koeficijentima determinacije u iznosu 0.8507 za vezu koja opisuje odnos uzoraka starih 7 i 28 dana i 0.7766 za vezu koja opisuje odnos uzoraka starih 7 i 90 dana. Korelacije statičkoga modula elastičnosti pokazuju slabiju povezanost u odnosu na druga mehanička svojstva, a razlog za to vrlo je teško precizno određivanje te mehaničke karakteristike materijala. Rezultati statističke analize, kao što su koeficijenti jednadžbe pravca, standardna greška, p-vrijednosti, intervali pouzdanosti, koeficijent determinacije i korigirani koeficijent determinacije za korelacije tlačnih čvrstoća, prikazani su tablicom 5.6.



Slika 5.5. Korelacije statičkih modula elastičnosti za različita vremena njege

5.6. Parametri korelacije statičkih modula elastičnosti za različita vremena njege

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)
7 - 28 dana	a	0.9097	0.5511	0.1228	(-0.2810, 2.1003)	0.8508	0.8393
	b	1.0697	0.1242	0.0000	(0.8013, 1.3381)		
7 - 90 dana	a	2.3538	0.8655	0.0175	(0.4840, 4.2235)	0.7766	0.7594
	b	1.3117	0.1951	0.0000	(0.8902, 1.7332)		

Koeficijenti linearne veze prikazani u tablici 5.6. pokazuju pozitivnu linearnu korelaciju između promatranih varijabli. Koeficijent korelacije a pokazao se statistički značajnim samo za vezu između uzoraka starih 7 i 90 dana, dok za vezu između uzoraka starih 7 i 28 dana nije statistički značajan. Nadalje, koeficijent korelacije b za promatrane veze se u oba slučaja pokazao statistički značajnim. Pouzdana korelacija za drugi promatrani model ima i najveći doprinos s obzirom na to da se pomoću nje na temelju rezultata ispitivanja nakon 7 dana njege uzoraka može s velikom pouzdanošću predvidjeti vrijednost nakon 90 dana njege. Ispitivanje nakon 28 dana svakako se mora provesti jer se treba dokazati čvrstoća uzoraka nakon 28 dana njege prema *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3].

5.6 Korelacija dinamičkog i statičkog modula elastičnosti

Osim analize dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti u ovisnosti o starosti uzoraka ta dva mehanička svojstva kojim se opisuje krutost mješavina analizirana su i međusobno i to bez obzira na starost uzoraka. Na taj način uzeta je u analizu velika baza podataka. Parovi podataka promatrani su linearnom vezom oblika (5.10):

$$E_{st} = a + E_{din} \cdot b \quad (5.10)$$

Gdje su:

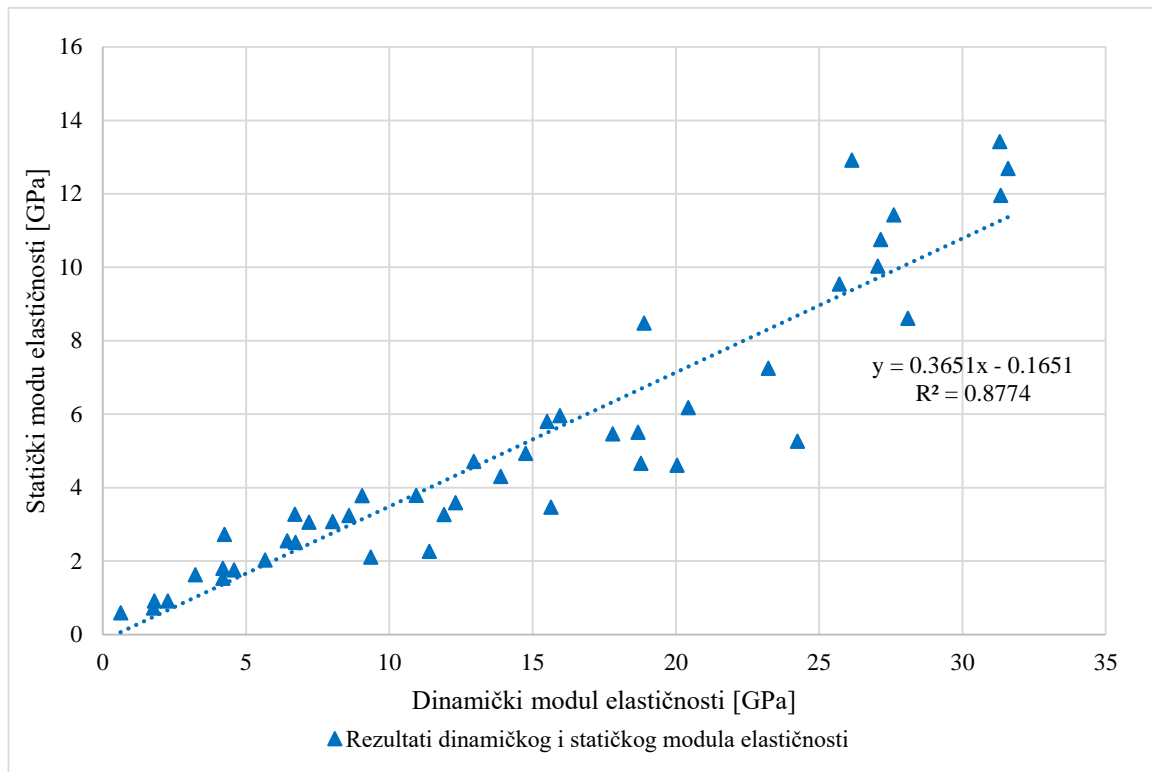
E_{st} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7, 28 ili 90 dana [GPa]

E_{din} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7, 28 ili 90 dana [GPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Grafički prikaz rezultata s definiranim pravcem korelacije prikazan je slikom 5.6.



Slika 5.6. Korelacija dinamičkog i statičkog modula elastičnosti

Definirana linearna korelacija između prikazanih rezultata okarakterizirana je vrlo jakim vezom s koeficijentom determinacije u iznosu 0.8774. Ostali parametri statističke analize, kao koeficijenti korelacije, standardna greška, p-vrijednost, koeficijent determinacije i korigirani koeficijent determinacije, navedeni su u tablici 5.7.

5.7. Parametri korelacije dinamičkog i statičkog modula elastičnosti

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)
tlačna - neizravna vlačna čvrstoća	a	-0.1651	0.3553	0.6446	(-0.8816, 0.5515)	0.8774	0.8746
	b	0.3651	0.0208	0.0000	(0.3231, 0.4070)		

Prikazani parametri korelacije pokazuju kako se radi o pozitivnoj linearnoj korelaciji između promatranih parametara. Pri tome koeficijent korelacije *a* nije statistički značajan, dok je koeficijent *b* statistički značajan. Navedeni parametri ukazuju na postojanje korelacije između promatranih varijabli, no p-vrijednost koeficijenta *a* ukazuje na postojanje još nekoga vanjskog činitelja koji utječe na korelaciju. No, visok koeficijent determinacije, statistički značajan koeficijent *b* i uski intervali pouzdanosti dokaz su postojanja linearne veze tih podataka.

Kako je već utvrđeno, najsnažniji utjecaj na razvoj krutosti materijala koja se karakterizira modulima elastičnosti ima količina cementa. Stoga je analiziran i odnos dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti s obzirom na količinu cementa, a ne uzimajući u obzir količinu gume i starost uzoraka. Veza između dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti nakon 7 dana njege uzoraka opisana je linearnom funkcijom oblika (5.11):

$$E_{st7} = a + E_{din7} \cdot b \quad (5.11)$$

Gdje je:

E_{st7} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7 dana [GPa]

E_{din7} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 7 dana [GPa]

Veza za drugi promatrani slučaj, uzorke starosti 28 dana, opisana je linearnom funkcijom oblika (5.12):

$$E_{st28} = a + E_{din28} \cdot b \quad (5.12)$$

Gdje je:

E_{st28} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 28 dana [GPa]

E_{din28} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 28 dana [GPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Veza za treći promatrani slučaj, uzorke starosti 90 dana, opisana je linearnom funkcijom oblika (5.13):

$$E_{st90} = a + E_{din90} \cdot b \quad (5.13)$$

Gdje je:

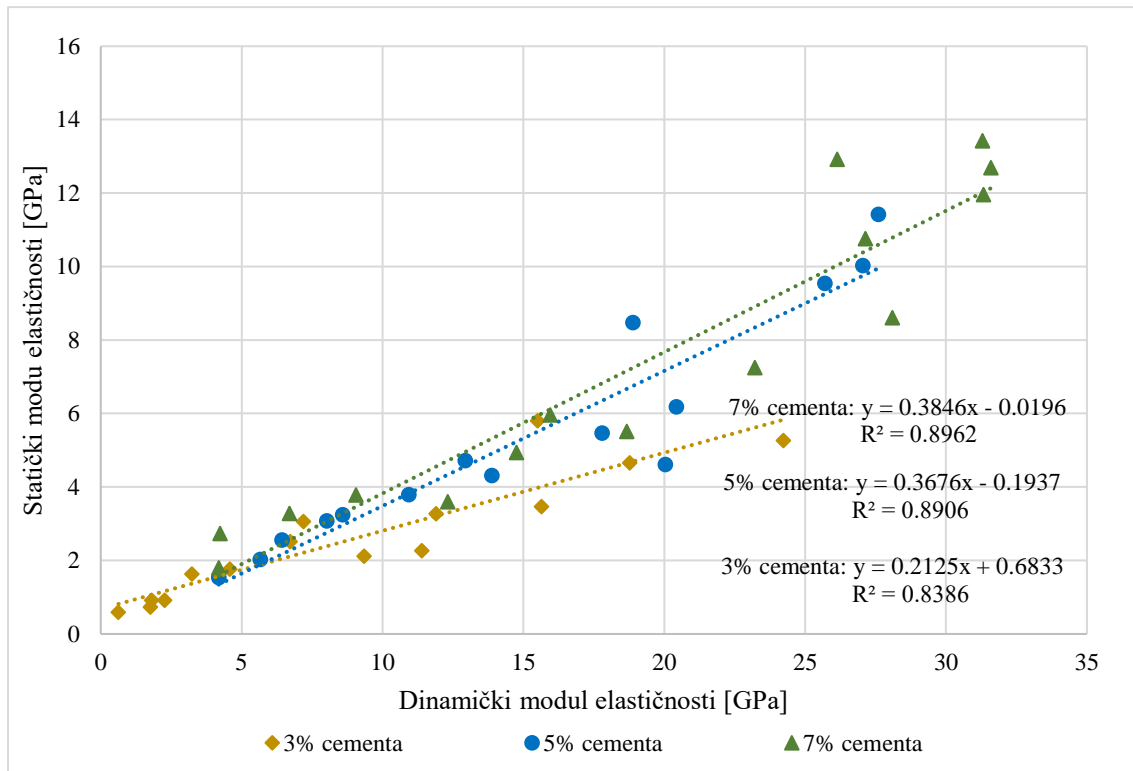
E_{st90} – statički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 90 dana [GPa]

E_{din90} – dinamički modul elastičnosti uzoraka njegovanih 90 dana [GPa]

a – udaljenost pravca od ordinate

b – nagib pravca

Grafički prikaz rezultata s definiranim pravcem korelacije prikazan je slikom 5.7.



Slika 5.7. Korelacija dinamičkog i statičkog modula elastičnosti s obzirom na udio cementa

Rezultati statističke analize, kao što su koeficijenti jednadžbe pravca, standardna greška, p-vrijednosti, intervali pouzdanosti, koeficijent determinacije i korigirani koeficijent determinacije za korelacije tlačnih čvrstoća, prikazani su tablicom 5.8.

5.8. Parametri korelacije dinamičkog i statičkog modula elastičnosti s obzirom na količinu cementa

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)
3 % cementa	a	0.6833	0.2928	0.0363	(0.0508, 1.3157)	0.8386	0.8262
	b	0.2125	0.0259	0.0000	(0.1566, 0.2683)		
5% cementa	a	-0.1938	0.6088	0.7554	(-1.5090, 1.1215)	0.8906	0.8822
	b	0.3686	0.0357	0.0000	(0.2904, 0.4447)		
7% cementa	a	-0.0196	0.7752	0.9802	(-1.6944, 1.6551)	0.8962	0.8882
	b	0.3846	0.0363	0.0000	(0.3061, 0.4630)		

Svi su odnosi opisani jakim linearnim vezama s koeficijentima determinacije 0.8386 za 3% cementa, 0.8906 za 5% cementa i 0.8962 za 7% cementa. Pri tome su koeficijenti koji opisuju

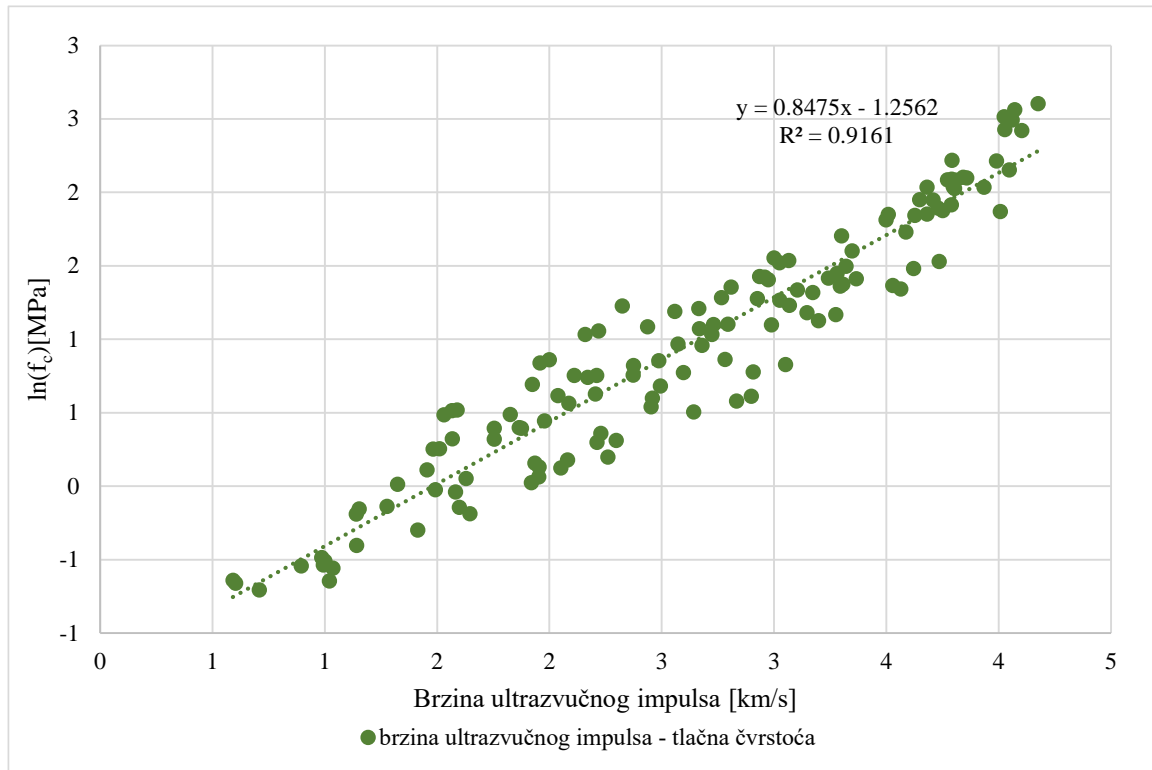
nagib pravca svi statistički značajni, dok je koeficijent a značajan samo za korelaciju koja opisuje rezultate mješavina s 3% cementa.

Iz prikazanih linearnih veza jasno se vidi kako se nagib pravca znatno razlikuje za mješavine s 5% i 7% cementa u odnosu na 3% cementa. I to povećanjem količine cementa smanjuje se razlika između dva promatrana modula, odnosno za određeni dinamički modul elastičnosti kod veće količine cementa može se očekivati veći statički modul elastičnosti. Nagibi pravaca mješavina s 5% i 7% cementa u vrlo slični, dok je nagib pravca za mješavine s 3% cementa znatno blaži. S obzirom na to da je kod korelacijske veze za mješavine s 3% cementa visok koeficijent determinacije, a i korelacijski su koeficijenti statistički značajni, radi se o pouzdanim podacima, no očito je kako 3% cementa nije dovoljna količina cementa u tim mješavinama kako bi se osiguralo povoljno ponašanje materijala. Nadalje, moguće je da u tim mješavinama cementna pasta i agregat omogućavaju brzi prolazak ultrazvučnoga impulsa, što rezultira većim dinamičkim modulom elastičnosti, dok količina cementne paste u mješavini ne osigurava razvoj krutosti u tolikoj mjeri, što rezultira manjim statičkim modulom elastičnosti.

5.7 Korelacija brzine ultrazvučnog impulsa i tlačne čvrstoće mješavine

U ovom potpoglavlju bit će prikazane korelacije između brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa i tlačne čvrstoće uzoraka. Naime, za razliku od prethodnih korelacija, koje su definirane na temelju srednjih vrijednosti rezultata mjerenja mehaničkih svojstava za svaku pojedinu mješavinu, ovi će rezultati biti promatrani na temelju rezultata mjerenja svakoga pojedinog uzorka. Tu bazu čini znatno više podataka, što doprinosi razvoju pouzdanijega predikcijskog modela. Bazu podataka čine parovi vrijednosti brzine prolaska ultrazvuka i tlačne čvrstoće izmjerene na istom uzorku. Promatrani podaci korelirani su linearnom funkcijom, a s ciljem dobivanja što pouzdanijega modela provedena je transformacija zavisne varijable (tlačne čvrstoće) prirodnim logaritmom (\ln). Transformacijom zavisne varijable postiže se linearizacija rezultata i homogenizacija varijance reziduala. Podaci obrađeni na taj način daju vrlo pouzdan predikcijski model čijim korištenjem se na temelju izmjerene brzine prolaska ultrazvuka može predvidjeti tlačna čvrstoća uzoraka bez obzira na starost. Kao rezultat korištenja tog modela dobiva se prirodni logaritam tlačne čvrstoće te je tu vrijednost potrebno antilogarimirati kako bi se dobila tlačna čvrstoća ispitanoga uzorka. Analizirani podaci te razvijeni linearni regresijski model s transformiranom zavisnom varijablom prikazani su slikom 5.8. Prikazani podaci pokazuju pozitivnu linearnu korelaciju s vrlo jakim vezom koju karakterizira koeficijent

determinacije u iznosu 0.9161. Ostali parametri linearnoga korelacijskog modela prikazani su tablicom 5.9.



Slika 5.8. Korelacija brzine ultrazvučnog impulsa i tlačne čvrstoće transformirane prirodnim logaritmom

5.9. Parametri korelacije brzine ultrazvučnog impulsa i transformirane tlačne čvrstoće

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)
Brzina ultrazvučnog impulsa – transformirana tlačna čvrstoća	a	-1.2562	0.0617	0.0000	(-1.3784, -1.1341)	0.9161	0.9154
	b	0.8475	0.0222	0.0000	(0.8035, 0.8915)		

Prema prikazanim modelima oba su koeficijenta korelacije statistički značajna. Temeljem ovoga modela moguće je pomoću vrijednosti izmjerene brzine ultrazvučnoga impulsa procijeniti prirodni logaritam tlačne čvrstoće bez obzira na starost uzorka. No, kao rezultat potrebno je dobiti vrijednosti tlačne čvrstoće pa je dobivenu vrijednost potrebno antilogaritmirati.

Stoga konačni predikcijski model glasi (5.14):

$$f_c = e^{-1.25623 + 0.84754 * UPV + \varepsilon} = e^{\varepsilon} * e^{-1.25623 + 0.84754 * UPV} \quad (5.14)$$

Gdje su:

f_c – tlačna čvrstoća uzorka [MPa]

UPV – brzina prolaska ultrazvučnog impulsa (eng. *ultrasonic pulse velocity*) [km/s]

ε – multiplikativna greška relacije

Korištenjem prikazanoga modela i izmjerene brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa moguće je izračunati tlačnu čvrstoću uzorka. No, zbog transformacije varijable prisutna je i multiplikativna greška relacije ε .

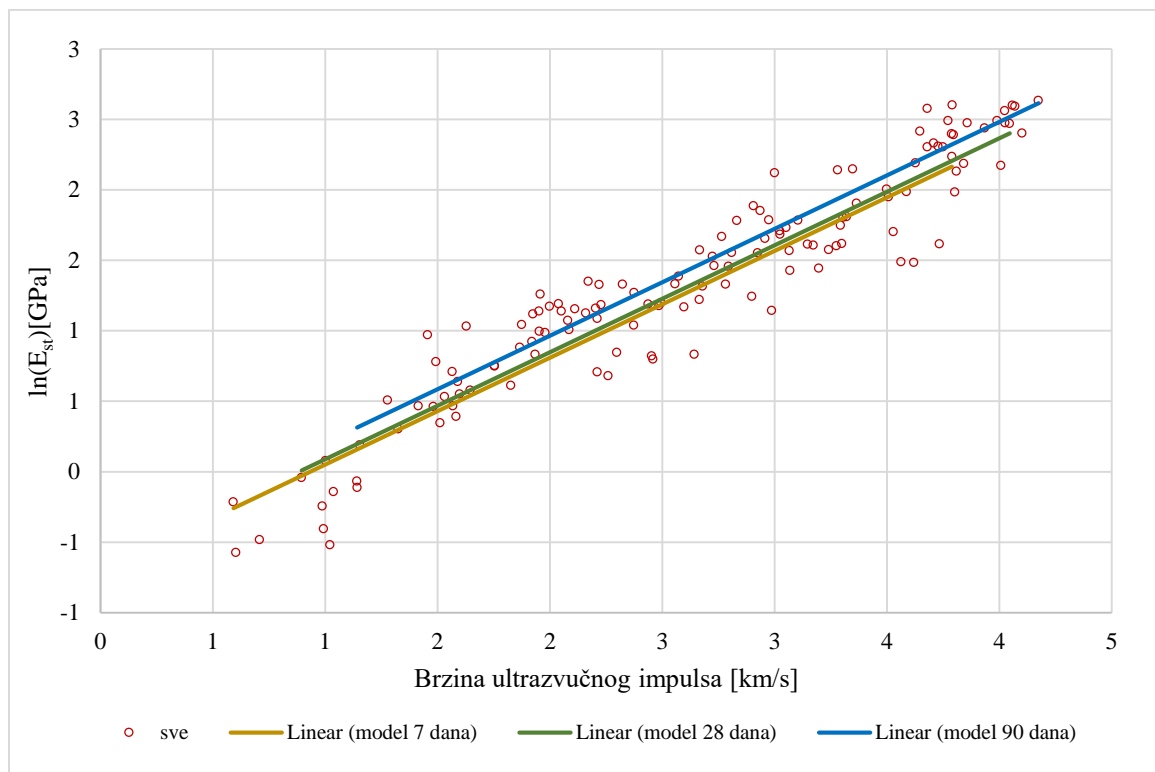
Razvijeni model ima veliki doprinos u području testiranja materijala jer dokazuje prikladnost korištenja nerazorne metode mjerenja brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa sa svrhom procjene tlačne čvrstoće uzoraka. Korištenjem toga modela ispitani uzorak ostaje na raspolaganju za daljnja laboratorijska ispitivanja i samim time moguće je smanjiti opseg laboratorijskih ispitivanja cementom stabiliziranoga nosivog sloja s otpadnom granuliranom gumom. Dodatno, taj model ne ovisi o duljini njege uzoraka pa taj podatak nije potreban prilikom procjene tlačne čvrstoće.

5.8 Korelacija brzine ultrazvučnog impulsa i statičkog modula elastičnosti

Brzina prolaska ultrazvučnoga impulsa u ovom potpoglavlju bit će korištena za razvoj predikcijskoga modela za određivanje vrijednosti statičkoga modula elastičnosti. Osim što se mjerenje statičkoga modula elastičnosti vrši tijekom razornoga testa, njegovo je precizno određivanje vrlo teško. Stoga, razvoj toga modela ima velik značaj za buduća ispitivanja sličnih materijala. Bazu podataka za razvoj toga modela čine rezultat brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa i statičkoga modula elastičnosti izmjerenih na istom uzorku, a cilj je temeljem izmjerene brzine ultrazvučnoga impulsa predvidjeti vrijednost statičkoga modula elastičnosti. Obje promatrane vrijednosti usko su vezane uz kvalitetu mješavine te će matrica veće krutosti rezultirati većom brzinom ultrazvučnoga impulsa i većim statičkim modulom elastičnosti. Svaka pukotina, zračna pora i slična nepravilnost unutar matrice uzorka rezultirat će smanjenjem promatranih vrijednosti.

Rezultati promatrani u ovom potpoglavlju pokazali su se nešto složenijima. Brzina ultrazvučnoga impulsa i duljina njege pokazale su se kao međusobno statistički značajne, što

znači da vrijednost statičkoga modula elastičnosti ovisi, osim o brzini prolaska ultrazvučnoga impulsa, i o duljini njege. Stoga je model razvijen s dva prediktora. Isto kao i u prethodno promatranom slučaju, zbog linearizacije modela provedena je transformacija zavisne varijable prirodnim logaritmom. S obzirom na to da značajnu ulogu ima duljina njege, razvijena su tri paralelna modela za sva tri vremena njege i prikazani su slikom 5.9.



Slika 5.9. Korelacija brzine ultrazvučnog impulsa i statičkoga modula elastičnosti transformiranog prirodnim logaritmom

Razvijen je model linearni model s dva prediktora oblika (5.15):

$$\ln(E_{st}) = a + b \cdot UPV + c \cdot dani + \varepsilon \quad (5.15)$$

Gdje su:

$\ln(E_{st})$ – logaritam statičkoga modula elastičnosti [GPa]

UPV – brzina prolaska ultrazvučnoga impulsa [km/s]

$dani$ – starost uzorka [dani]

ε – greška modela

Parametri razvijene korelacijske veze prikazani su tablicom 5.10.

5.10. Parametri korelacije brzine ultrazvučnog impulsa i prirodnog logaritma statičkog modula elastičnosti

Korelacija	Koeficijenti		Standardna greška	p - vrijednost	Interval pouzdanosti	Koeficijent determinacije (R ²)	Korigirani koeficijent determinacije (R ²)
Brzina ultrazvučnoga impulsa – transformiran statički modul elastičnosti	a	-0.7216	0.0602	0.0000	(-0.8406, -0.6025)	0.9091	0.9077
	b	0.7585	0.0229	0.0000	(0.7131, 0.8039)		
	c	0.0019	0.0006	0.0026	(0.0007, 0.0031)		

No, kako je cilj dobiti vrijednosti statičkoga modula elastičnosti, analogno prethodnom modelu, taj je model potrebno antilogaritmirati te je razvijen model (5.16):

$$E_{st} = e^{\varepsilon} + e^{-0.7216+0.7585 \cdot UPV+0.0019 \cdot dani} \quad (5.16)$$

Gdje su:

E_{st} – statički modul elastičnosti [GPa]

ε – multiplikativna greška modela

UPV – brzina prolaska ultrazvučnoga impulsa [km/s]

$dani$ – starost uzorka [dani]

Doprinos takvoga modela području testiranja materijala vrlo je velik. Korištenjem modela moguće je temeljem izmjerene brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa i podatka o starosti uzoraka predvidjeti vrijednost statičkoga modula elastičnosti. Iako se određivanje statičkoga modula elastičnosti ne vrši za ocjenu prikladnosti ugradnje materijala u kolničku konstrukciju, njegova vrijednost vrlo je važan parametar krutosti materijala. Velika je korist razvoja znanja o statičkom modulu elastičnosti prilikom upotrebe otpadnih materijala u stabilizacijskim mješavinama. Naime, osim smanjenja količine otpada deponirane na odlagalište otpada, primjena otpadnih materijala često ima dodatnu ulogu, a to je poboljšanje mehaničkih svojstava mješavine u koju se ugrađuje. U ovom istraživanju guma ima ulogu smanjenja krutosti, odnosno povećanja elastičnosti mješavine s ciljem smanjenja nastanka pukotina uslijed razvoja vlačnih naprezanja. Taj se model s velikom pouzdanošću može koristiti za karakterizaciju materijala te predviđanje životnoga vijeka konstrukcije u koju je ugrađen materijal s otpadnom gumom.

5.9 Zaključno

Svi prikazani modeli razvijeni su na ograničenom broju podataka dobivenih laboratorijskim ispitivanjima i vrijede samo za ispitane materijale, odnosno mješavine šljunka, pijeska i otpadne granulirane gume stabilizirane cementom. Za definiranje općenitih modela i zaključaka potrebno je provesti verifikaciju ovdje definiranih modela na većem broju uzoraka te na ostalim materijalima koji se ugrađuju u cementom stabilizirane nosive slojeve kolnika. Nadalje, prilikom antilogaritmiranja rezultata dobivenih korištenjem modela razvijenih u potpoglavljima 5.7. i 5.8. dolazi do pojave multiplikativne greške relacije, što treba imati na umu prilikom tumačenja rezultata dobivenih korištenjem razvijenih modela.

6 Rezultati ispitivanja na razini konstrukcije

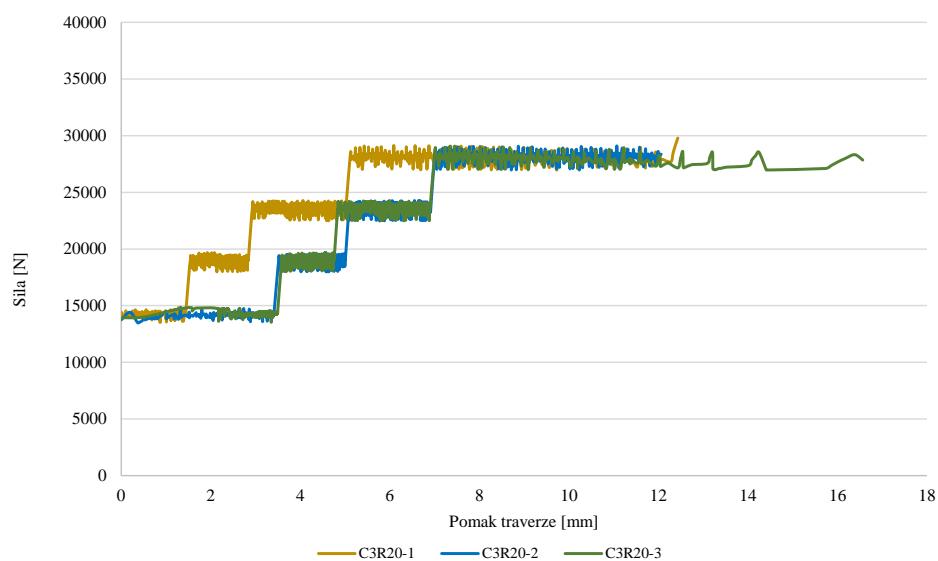
Kolnička konstrukcija višeslojni je sustav sastavljen od materijala različitih mehaničkih karakteristika. Materijali se ponajviše razlikuju po svojoj krutosti, što utječe na različito ponašanje materijala unutar konstrukcije tijekom preuzimanja opterećenja. Vrlo je važan i kontakt između slojeva kolničke konstrukcije kako bi se osigurao ravnomjeran prijenos opterećenja. Predmet ovog istraživanja kolničke su konstrukcije velikih prometnih opterećenja koje su obično izgrađene od nevezanoga nosivog sloja, cementom stabiliziranoga nosivog sloja te dva asfaltna sloja, nosivoga i habajućega. Karakteristike cementom stabiliziranoga materijala s različitim količinama cementa i gume te različitim oblicima gume analizirane su u prethodnim poglavljima. No, ne može se očekivati da se ovaj materijal ugrađen u kolničku konstrukciju između nevezanoga nosivog sloja i nosivoga asfaltnog sloja ponaša kao u izoliranim uvjetima. Stoga je uspostavljen sustav kolničke konstrukcije opisan u potpoglavlju 3.3. kako bi se analizirao utjecaj ostalih slojeva kolničke konstrukcije na ponašanje stabiliziranoga sloja. Jedini varirani parametar u kolničkoj konstrukciji jest cementom stabilizirani nosivi sloj različitih udjela gume i cementa. Različite mješavine cementom stabiliziranoga nosivog sloja postavljene su na nevezani nosivi sloj kalifornijskoga indeksa nosivosti (CBR) 101%, a za sva tri uzorka pojedine mješavine korišten je samo jedan uzorak nevezanoga nosivog sloja kako bi se analizirao utjecaj ovoga, deformacijama podložnog, sloja na razvoj deformacija pod utjecajem prometnoga opterećenja. Za svaku mješavinu cementom stabiliziranoga nosivog sloja mjerene su deformacije na tri istovjetna sustava kolničke konstrukcije kako bi se osigurala točnost i pouzdanost mjerenih podataka. Pripremljeni sustav kolničke konstrukcije izložen je ponavljajućem opterećenju pri čemu su mjerene deformacije asfaltnoga sloja suvremenom metodom digitalne stereo fotogrametrije. Ta se metoda pokazala vrlo korisnom u karakterizaciji cestograđevnih materijala, osobito u monitoringu deformacija prilikom otkazivanja materijala izloženih različitim tipovima opterećenja. Korisnost rezultata dobivenih tom metodom prilikom testiranja asfaltnoga materijala istaknuta je u radu [132]. Digitalna stereo fotogrametrija korištena je za mjerenje pomaka cilindričnih asfaltnih uzoraka izloženih tlačnom opterećenju [133]. Zatim, analizirane su pukotine nastale kao posljedica zamora asfaltnoga materijala izloženoga ciklusima smrzavanja i odmrzavanja [134]. Također je korištena i za praćenje razvoja pukotina uslijed provođenja neizravnoga vlačnog testa na uzorcima od recikliranoga asfaltnog materijala [135]. Kao rezultat analize pukotina tom metodom autor Wu i suradnici [136] identificirali su tri faze razvoja pukotina tijekom analize otpornosti na lom cilindričnih

asfaltnih uzoraka. S druge strane, autori Yang i suradnici [137] korištenjem su te metode definirali razinu opterećenja pri kojoj se može očekivati puzanje i lom niskotemperaturnih asfaltnih mješavina. Osim analize nastalih pukotina pomoću metode digitalne stereo fotogrametrije analizirana je i mogućnost upotrebe otpadnih materijala u asfaltnim mješavinama [138,139]. Istaknuta je i prednost te metode u odnosu na primjenu linearnih varijabilnih diferencijalnih transformatora [140]. No, osim na standardnim asfaltnim uzorcima ta je metoda korištena i za analizu asfaltnih ploča, što uvelike povećava njezino područje primjene [141–143]. Analiza ploča pruža stvarnije uvjete u odnosu na analizu cilindričnih uzoraka, osobito jer na promatrano područje ploče utječu rubni uvjeti kako je slučaj i prilikom opterećenja asfaltnoga kolnika preko kotača vozila. Dakle, korištenje metode digitalne stereo fotogrametrije pruža velike mogućnosti prilikom analize pomaka, lomova, razvoja pukotina i sličnih procesa za koje ne postoje normirana ispitivanja, a daju detaljan uvid u ponašanje materijala prilikom ispitivanja. Osobito je korisna takva analiza prilikom procjene mogućnosti upotrebe otpadnih ili nekih novih materijala u konstrukciji koji za cilj nemaju samo povećanje čvrstoće materijala, već je njihova namjena modificirati neki od procesa unutar materijala tijekom njihovoga životnog vijeka. Analiza rezultata toga ispitivanja bit će obrađena kroz dva potpoglavlja. Prvo će biti analizirani rezultati pomaka traverze ispitnoga uređaja tijekom ispitivanja, koji predstavljaju ukupni pomak koji se unosi u uzorak preko čelične ploče i koji je izravno povezan uz naprezanje koje se unosi u sustav u lokalnom području ispod čelične ploče. U drugom će dijelu biti analizirane deformacije habajućega sloja asfalta izmjerene pomoću digitalne stereo fotogrametrije, gdje će se, osim analitičkim, i vizualnim pristupom dati ocjena ponašanja kolničke konstrukcije izložene ponavljajućem opterećenju. Dakle, prvi dio daje uvid u globalne pomake cijele konstrukcije isključivo u dijelu koji je neposredno ispod čelične ploče, dok drugi dio daje uvid u pomake cijeloga gornjeg sloja i kontekst utjecaja lokalnoga područja na ukupni sustav preko gornjega sloja.

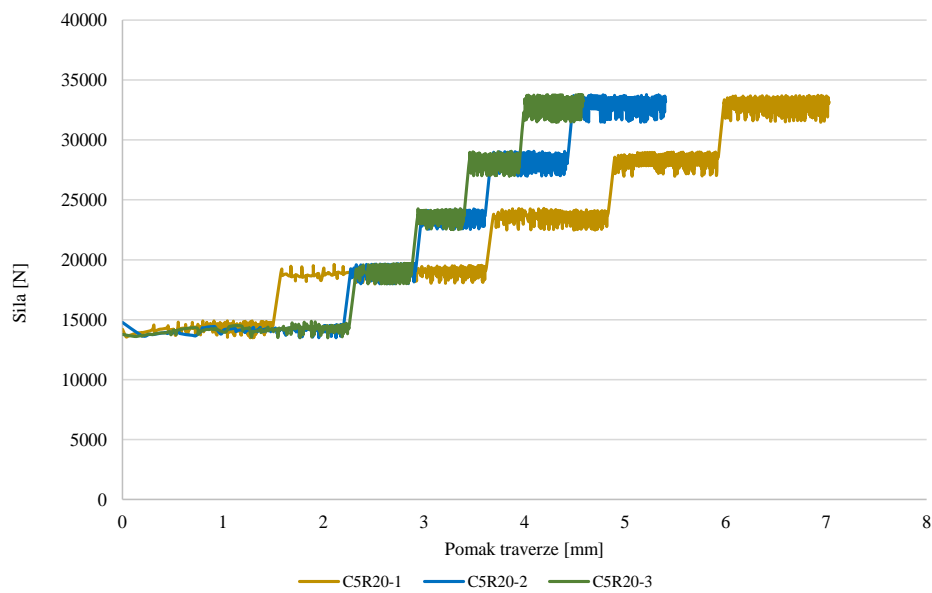
6.1 Analiza ponašanja sustava kolničke konstrukcije bez upotrebe digitalne stereo fotogrametrije

Kolničke konstrukcije izložene su opterećenjima znatno manjim od njihove nosivosti, no prilikom eksploatacije tih konstrukcija dolazi do velikoga broja ponavljanja opterećenja zbog čega dolazi do smanjenja mogućnosti preuzimanja daljnjih opterećenja i posljedično loma konstrukcije. U tom nestandardnom ispitivanju to ponavljajuće opterećenje simulirano je kroz četiri ciklusa kako je prethodno opisano u potpoglavlju 3.3.4. S obzirom na velik broj ispitanih

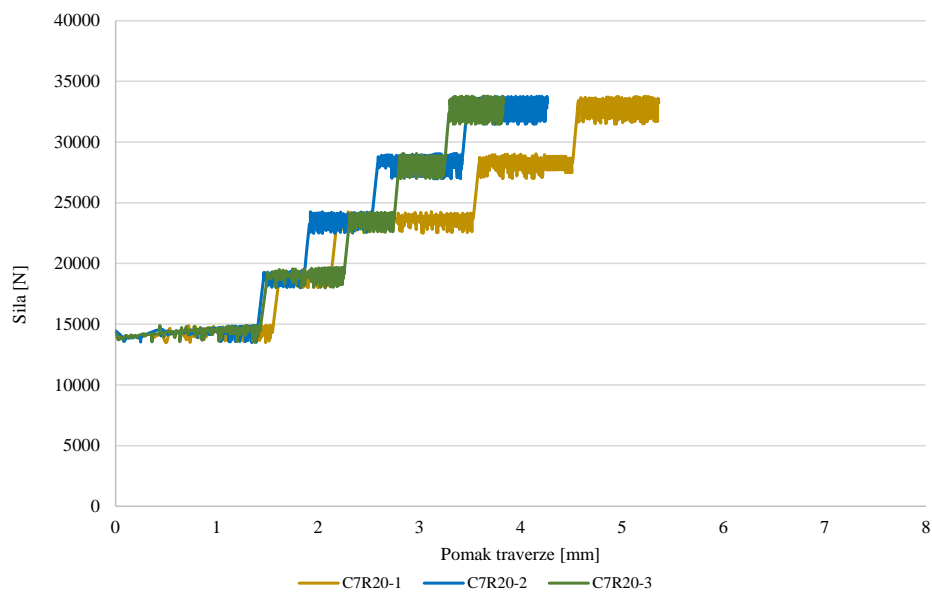
uzoraka, na slikama 6.1., 6.2. i 6.3. prikazan je karakterističan ispis unosa sile i ostvarenoga pomaka traverze za mješavine C3R20, C5R20 i C7R20. Na samom početku ispitivanja ostvaren je znatan pomak traverze uređaja do trenutka kada se sustav kolničke konstrukcije nije namjestio te počeo pružati čvrstu podlogu za unos sile. Nakon što je to stanje postignuto, vidljiv je skok sile u grafičkim prikazima. Potom je ista sila unesena na ispitno tijelo 50 puta za sva četiri ciklusa opterećenja, što se može vidjeti u područjima povećanja pomaka traverze bez povećanja vrijednosti sile na grafičkim prikazima. Na slici 6.1. vidljive su samo tri razine unosa opterećenja jer je tijekom trećega ciklusa opterećenja i rasterećenja došlo do loma ispitnoga tijela te je ispitivanje prekinuto. Analizom grafičkih prikaza može se zaključiti kako su za sve tri prikazane mješavine odnos sile i pomaka traverze za druga dva ispitana uzorka međusobno blizu, dok rezultati prvoga uzorka odstupaju od preostala dva uzorka. Pri tome treba naglasiti kako su nazivi uzorcima dodijeljeni kronološkim redom ispitivanja. Stoga se može zaključiti kako je prvi ciklus opterećenja poslužio kao faza *namještanja* ispitnoga sustava, odnosno nevezanoga nosivog sloja unutar sustava kolničke konstrukcije koji je podložan deformacijama. Nadalje, promatrajući ostvarene pomake traverze, može se zaključiti kako mješavine manje krutosti, one s manjim udjelom cementa, ostvaruju znatno veće pomake. Također, veći pomaci na kraju ispitivanja zabilježeni su za prve uzorke u mješavinama C5R20 i C7R20, što također dokazuje kako je tijekom ispitivanja prvoga uzorka došlo do deformacija u nevezanom nosivom sloju. Kod mješavine C3R20 ne može se utvrditi pomak na kraju unosa opterećenja s obzirom na to da je nastupio lom konstrukcije u trećem ciklusu opterećenja i rasterećenja.



Slika 6.1. Odnos unosa sile i pomaka traverze za mješavinu C3R20

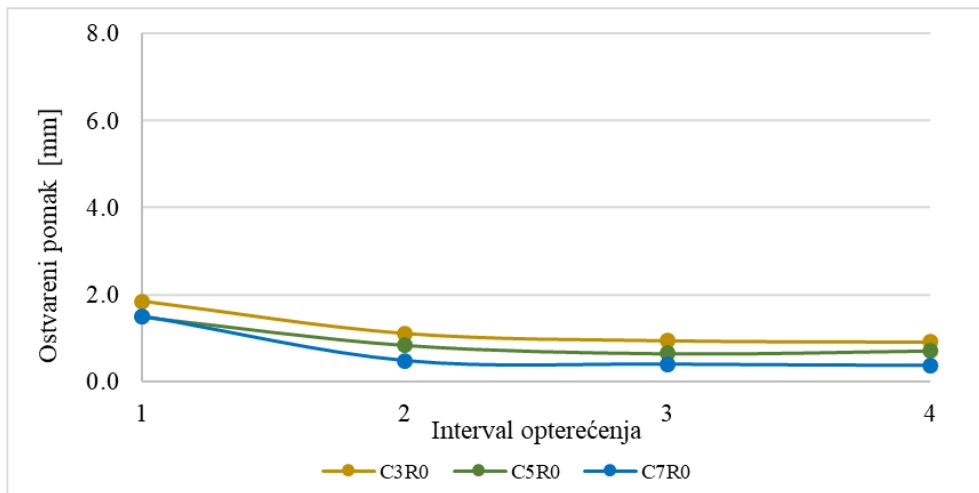


Slika 6.2. Odnos unosa sile i pomaka traverze za mješavinu C5R20

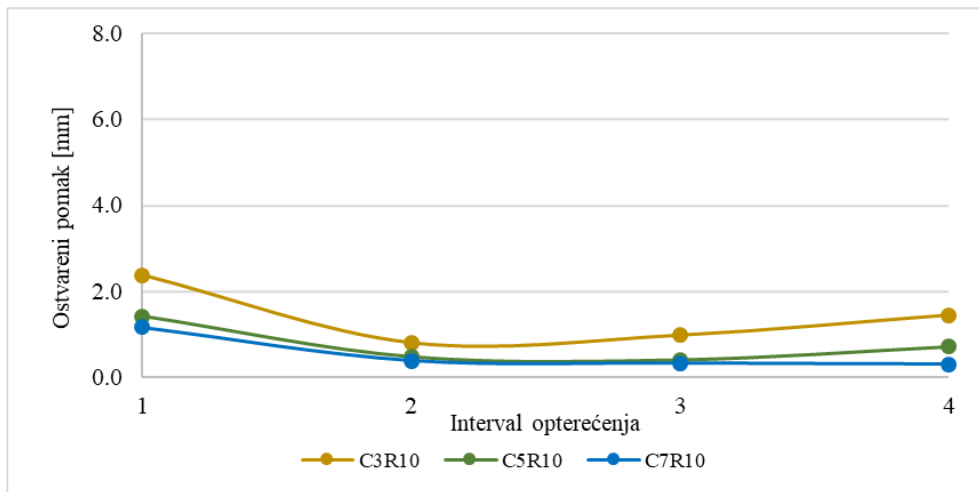


Slika 6.3. Odnos unosa sile i pomaka traverze za mješavinu C7R20

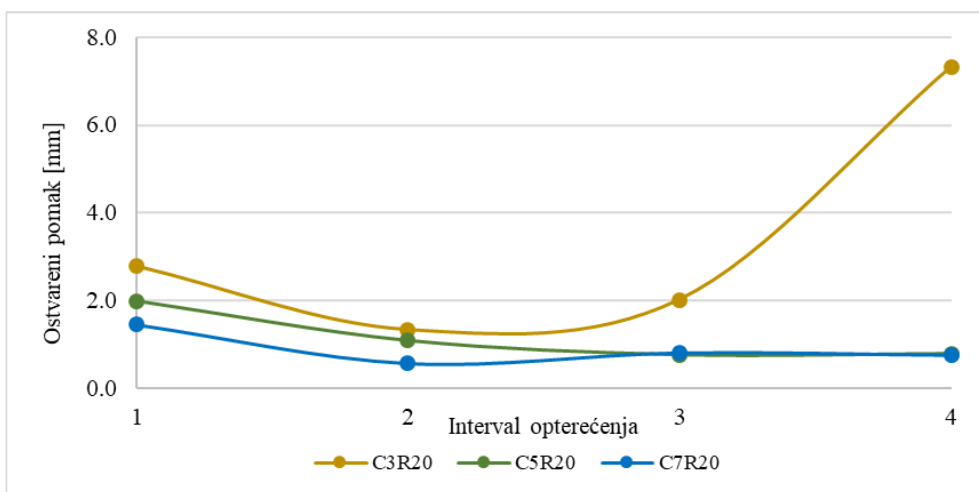
U nastavku će biti prikazana analiza ostvarenih pomaka traverze ispitnoga uređaja na kraju svakoga ciklusa opterećenja i rasterećenja sustava kolničke konstrukcije za svaku količinu gume posebno. Za svaki od uzoraka prilikom ispitivanja bilježen je odgovor u vidu sile i pomaka (vertikalni pomak). Dijagrami koji pokazuju odnos ostvarenoga pomaka za svaki ciklus opterećenja pojedine mješavine prikazani su slikom 6.4. za referentne mješavine, slikama 6.5., 6.6., 6.7. i 6.8. za mješavine s 10%, 20%, 30% i 40% granulirane gume i slikom 6.6. za mješavine s gumenim nitima.



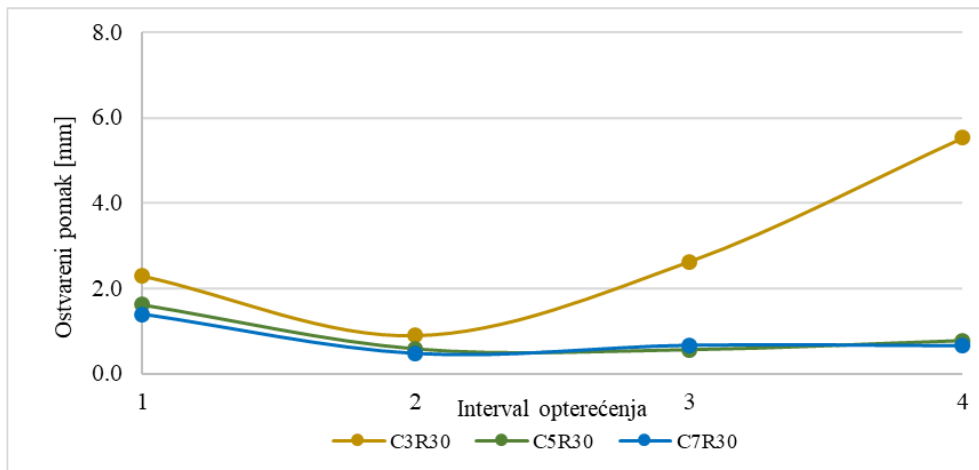
Slika 6.4. Ostvareni pomak za svaki interval opterećenja za referentne mješavine



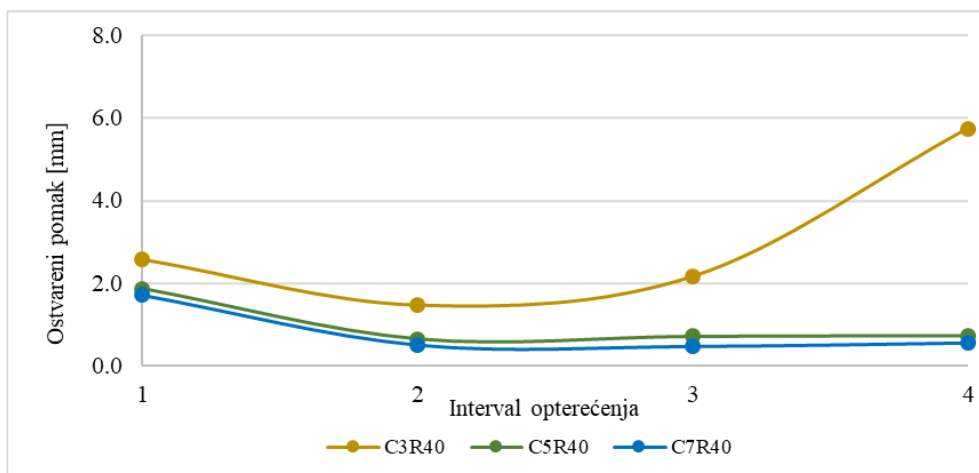
Slika 6.5. Ostvareni pomak za svaki interval opterećenja za mješavine s 10% granulirane gume



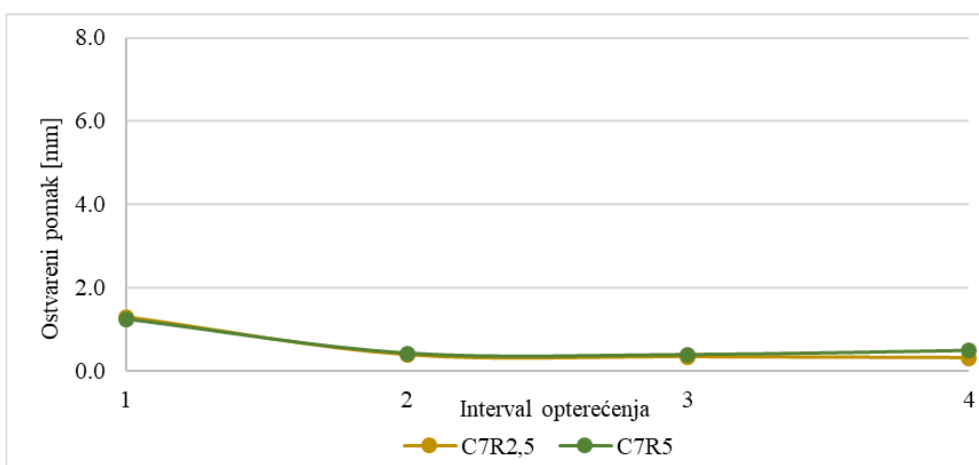
Slika 6.6. Ostvareni pomak za svaki interval opterećenja za mješavine s 20% granulirane gume



Slika 6.7. Ostvareni pomak za svaki interval opterećenja za mješavine s 30% granulirane gume



Slika 6.8. Ostvareni pomak za svaki interval opterećenja za mješavine s 40% granulirane gume



Slika 6.9. Ostvareni pomak za svaki interval opterećenja za mješavine s gumenim nitima

Iz rezultata prikazanih na slikama 6.4. – 6.9. vidi se kako su na kraju prvoga ciklusa opterećenja pomaci najveći, što je rezultat *namještanja* cijeloga ispitivanog sustava, prvenstveno

nevezanoga nosivog sloja. Pod *namještanjem* se misli na zatvaranje prostora između neravnina u slojevima, kao i ostvarenje inicijalnih slijeganja nevezanoga sloja, čime se oblikuje slojeviti sustav sličniji realnim uvjetima u kojima su pomaci izravno vezani uz deformacije pojedinih slojeva. U drugom su i trećem ciklusu pomaci gotovo jednaki, dok se u zadnjem ciklusu bilježe također približni pomaci kao u drugom i trećem ciklusu ili lom sustava s izrazito velikim pomacima (mješavine s 3% cementa i većim udjelima gume). Nadalje, može se zaključiti kako povećanje količine cementa rezultira krućim sustavom uz manje ukupne vertikalne pomake (pomaci traverze). S porastom udjela gume u CNS-u općenito dolazi i do većih pomaka, što obilježava manje krut sustav. Pri tome je važno uzeti u obzir činjenicu da zadržavanje pomaka (iako većih) može biti povoljno svojstvo u kontekstu dostatne duktilnosti sustava i sprečavanja otvaranja pukotina unatoč manjoj krutosti. To je posebno važno u smislu prodora vode i širenja nastalih pukotina u zimskim uvjetima. Opet se uočava trend većega utjecaja udjela gume na ponašanje mješavina s manjim udjelima cementa. Iako se kod referentnih mješavina (slika 6.1.) primjećuje znatna razlika u krutostima sustava (manji pomaci s povećanjem udjela cementa), dodavanjem gume te se razlike smanjuju te se sustavi kolničke konstrukcije s CNS-om s 5% i 7% cementa ponašaju vrlo slično. Moduli elastičnosti, kao što je prikazano u potpoglavlju 4.7., znatno se razlikuju ovisno o količini cementa. Isto vrijedi i za mješavine s gumenim nitima koje pokazuju gotovo identične vrijednosti pomaka traverze iako su im karakteristike (čvrstoće i moduli elastičnosti) međusobno znatno drugačije. Konstrukcije s 5% i 7% cementa imaju dostatne čvrstoće pa ne predstavljaju slabu *kariku* u sustavu, odnosno povećana čvrstoća primjenom 7% cementa tu ne dolazi do izražaja jer se ona svakako ne uspijeva u potpunosti iskoristiti u uvjetima primjene (razinama naprezanja koje su zadane). To znači da povećanje udjela cementa u tom slučaju ne pruža očite koristi kao što su one uočljive kada se materijal samostalno ispituje do sloma.

Iz svega prikazanog proizlazi kako se dio razlika u krutosti samoga materijala CNS-a *izgubio* u cijelom sustavu kolničke konstrukcije, a slično se može ustvrditi za čvrstoću. Naime, u *lanču* sastavnica koje tvore kolničku konstrukciju mješavine su različitih čvrstoća, krutosti, duktilnosti, Poissonovih omjera, koje na sebe preuzimaju nelinearne pondere u definiranju odziva sustava. To svakako znači da će se pojedini značajni trendovi na razini samostalne sastavnice ublažiti, nestati ili naglasiti kada se ona smjesti u sustav, ovisno o omjerima različitih svojstava. Stoga se može zaključiti kako je taj pristup promatranja sustava kolničke konstrukcije prikladniji i daje realnije podatke za predviđanje ponašanja kolničke konstrukcije u stvarnim uvjetima umjesto pojedinačnoga analiziranja slojeva kolnika. U budućnosti bi

trebalo istražiti potencijal definiranja koeficijenata kojima bi se taj efekt trebao uzeti u obzir pri definiranju karakteristika slojeva kolničke konstrukcije (posebice CNS-a) kojima se proračunavaju naprezanja i deformacije u sustavu te predviđa ponašanje i vijek trajanja same kolničke konstrukcije. Radi se o složenim međusobnim odnosima koji nisu linearno povezani pa bi takvi koeficijenti zahtijevali proučavanje izvan opsega provedenih istraživanja, ali svakako se može uočiti potencijal definiranja takvih odnosa unutar varijabli koje se proučavaju. Dodatno je potrebno naglasiti potrebu definiranja veličine inicijalnoga opterećenja u svojstvu predopterećenja konstrukcije. Kako je već navedeno, prvi ciklus opterećenja rezultirao je najvećim pomacima traverze, što je rezultat *namještanja* sustava. U ovoj analizi taj ciklus opterećenja može se promatrati kao inicijalno opterećenje konstrukcije, umjesto ponavljajuće opterećenje uzrokovano prometom. Za ispitivanje utjecaja ponavljajućega opterećenja na različite materijale propisani su različiti postupci, no sličnost svih postupaka propisani je unos inicijalnoga opterećenja. Postupak testiranja otpornosti cilindričnih asfaltnih uzoraka na zamor opisan normom *HRN EN 12697 – 24* [144] propisuje sinusoidno opterećenje uzorka uz izazivanje inicijalnoga naprezanja u središtu uzorka. To inicijalno naprezanje ovisi o dimenzijama uzorka. Nadalje, ispitivanje troosnoga naprezanja u nevezanim nosivim slojevima, propisanog normom *HRN EN 13286 – 7* [145], provodi se na način da se cilindrični uzorak nevezanoga nosivog sloja optereti cikličkim naprezanjima koja odgovaraju realnim naprezanjima u ovom sloju te u mjerenju radijalnih i osnih deformacija izazvanih tim opterećenjem. Također, ta metoda propisuje dva različita pristupa testiranju toga materijala, a to su cikličko osno naprezanje i varijabilni bočni tlak, dok drugi, jednostavniji, postupak propisuje cikličko osno devijatorsko naprezanje praćeno konstantnim bočnim tlakom. S obzirom na navedene postupke može se zaključiti kako je prvi ciklus opterećenja poslužio kao inicijalno opterećenje potrebno za namještanje sustava. Sukladno tome, pri analizi se treba obratiti pozornost na pomake nastale nakon drugoga, trećeg i četvrtog ciklusa opterećenja i rasterećenja. Dodatna ispitivanja s inicijalnim opterećenjima manjih iznosa pokazala bi koje je minimalno opterećenje potrebno za namještanje ispitnoga sustava što se navodi kao preporuka za daljnja istraživanja.

6.2 Analiza ponašanja sustava kolničke konstrukcije korištenjem digitalne stereo fotogrametrije

U ovom potpoglavlju bit će analizirani rezultati dobiveni korištenjem digitalne stereo fotogrametrije u monitoringu pomaka ploče. Prilikom mjerenja stalno je bilježen pomak, no

radi kompleksnosti zapisa (na ploči je dostupno nekoliko stotina mjernih točaka za svaku od nekoliko tisuća fotografija ispitivanja) izdvojen je zabilježen pomak na početku i kraju svakoga ciklusa opterećenja, a kao mjerodavna veličina koja opisuje ponašanje materijala korišten je raspon pomaka na površini unutar pojedinoga ciklusa opterećenja. Opterećenje u četiri ciklusa sve većega intenziteta simulira ponašanje konstrukcije tijekom životnoga vijeka. Naime, konstrukcija na početku svoga životnog vijeka ima sposobnost preuzimanja opterećenja i vraćanja u prvobitno stanje, no ta se elastičnost smanjuje tijekom vremena uslijed pojave pukotina i puzanja materijala. Samim time, preneseno opterećenje nakon određenoga vremena ima štetniji utjecaj na konstrukciju, što je u ovom ispitivanju simulirano većim intenzitetom opterećenja. Prilikom analize deformacija uočeni su ispitni uzorci na kojima su razvijene radijalne deformacije od područja kontaktne plohe. Takvi uzorci predstavljaju reprezentativne uzorke. No, neki od uzorka nisu razvili kružne konture vertikalnih pomaka, ali su te konture zrcalno raspoređene na obje strane ispitnoga uzorka. Samo uzorci kojima svi slojevi naliježu jedan na drugi u potpunosti, odnosno samo uzorci u kojima postoji kontakt po cijeloj površini slojeva, razvijaju ravnomjerno raspoređene deformacije. Kod uzoraka kod kojih nije uočen ravnomjeran raspored deformacija došlo je do manifestacije nekih od brojnih nesavršenosti sustava, kao npr. nenalijeganje slojeva cijelom površinom ili postojanje lokalnih odstupanja u nižim slojevima prilikom čega ne dolazi do pravilne preraspodjele naprezanja i posljedično deformacija. Povećanjem krutosti mješavine CNS-a uočeno je povećanje broja uzoraka kod kojih nije došlo do ravnomjerno raspoređenih deformacija, što je rezultat razvoja nedovoljno velikih deformacija zbog velike krutosti sustava te zadržavanja stanja deformacija izazvanoga inicijalnim opterećenjem ispitnoga sustava. No, prilikom izvođenja kolničkih konstrukcija dolazi do neravnosti slojeva, nastanka pukotina i sl. pa se svi ispitani uzorci smatraju reprezentativnima. S obzirom na to da očitane deformacije asfaltne ploče prvoga uzorka odstupaju od deformacija druga dva uzorka, prilikom analize uzeta su u obzir druga dva uzorka za svaku mješavinu. Naime, u prethodnom potpoglavlju prikazano je kako je prvi ciklus opterećenja karakteriziran znatnim pomacima, što je posljedica *namještanja* sustava kolničke konstrukcije. No, precizniji rezultati deformacija asfaltnih ploča pokazuju kako je na jednom uzorku potrebno provesti slijed naprezanja koji se očekuje kako bi se nevezani nosivi sloj doveo u stanje koje je jednako za sve sljedeće uzorke i kako stoga ne bi bio promjenjiva varijabla između prvoga i ostalih uzoraka. Stoga je potrebno u to ispitivanje uvesti jedan uzorak koji bi služio za postizanje konačnoga stanja nevezanoga nosivog sloja, a dodatno bi se trebala ispitati tri uzorka za analizu deformacija asfaltne ploče. Do trajne deformacije nevezanoga nosivog

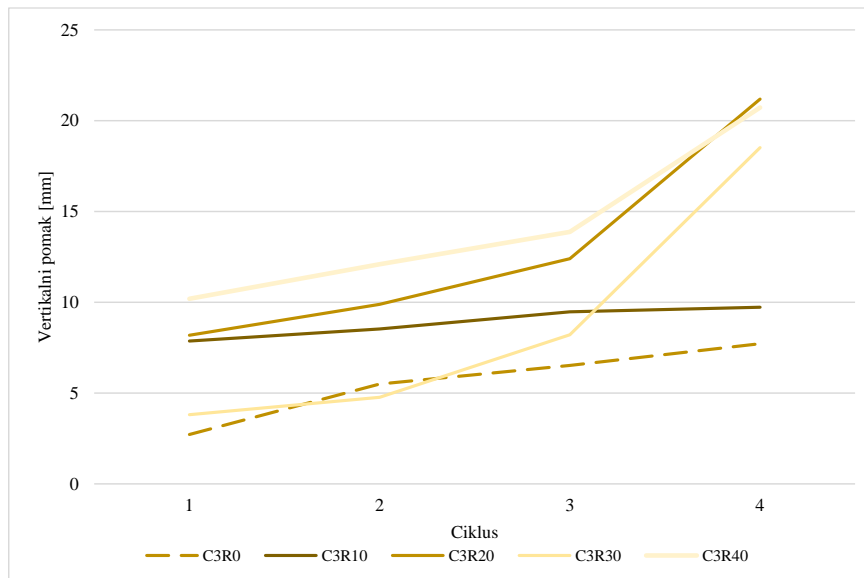
sloja dolazi uslijed uklještenja i migracije zrna agregata [146], što ovisi o trenju i koheziji između zrnja, koji pak najviše ovise o obliku zrna agregata. Pri tome šljunčani materijali zbog svoga oblog oblika ostvaruju slabije trenje, koje se povećava u kombinaciji s finim česticama agregata (npr. pijeskom) [147]. Kuttah [148] navodi kako se prilikom mjerenja deformacija kolnika izgrađenoga od nevezanoga šljunčanog materijala pokazalo da se najveće deformacije javljaju u prvom ciklusu opterećenja. Kao objašnjenje navodi se kako je ponavljajuće opterećenje uzrokovalo povećanje krutosti nevezanoga nosivog sloja. Rezultati deformacija asfaltne ploče izmjerene pomoću sustava ARAMIS prikazani su u tablici 6.1., a predstavljaju prosječnu vrijednost raspona pomaka dva uzorka u svakom ciklusu.

6.1. Prosječni vertikalni pomaci asfaltne ploče na kraju svakog ciklusa opterećenja i rasterećenja

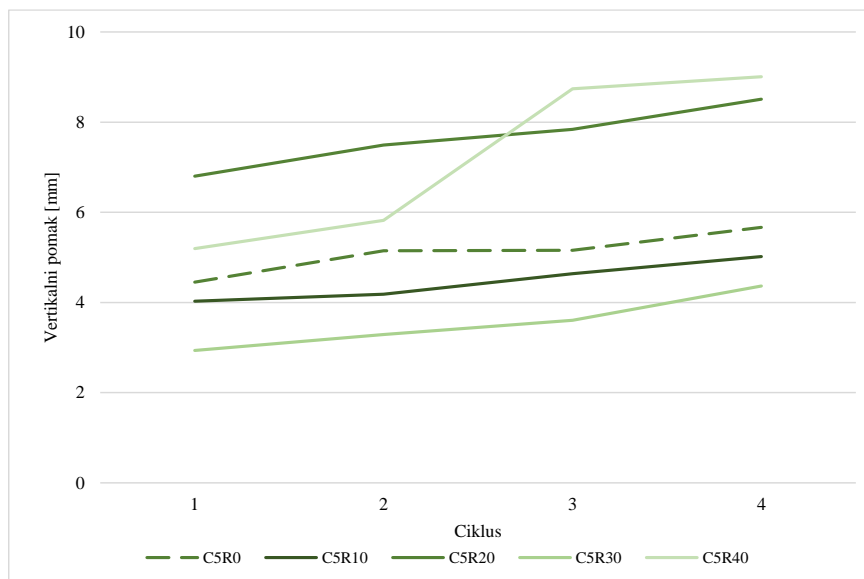
Mješavina/ciklus	Raspon pomaka [mm]			
	1	2	3	4
C3R0	2.7235	5.4910	6.5165	7.7140
C3R10	7.8615	8.5275	9.4805	9.7305
C3R20	8.1780	9.8865	12.3975	21.1950
C3R30	3.8020	4.7605	8.2080	18.5260
C3R40	10.188	12.0895	13.8735	20.7275
C5R0	4.4535	5.1475	5.1565	5.6655
C5R10	4.0310	4.1865	4.6375	5.0205
C5R20	6.8035	7.4915	7.8425	8.5120
C5R30	2.9350	3.2880	3.6040	4.3635
C5R40	5.1935	5.8210	8.7380	9.0050
C7R0	2.8665	2.9690	3.1015	3.1225
C7R10	3.4845	3.8620	4.0090	3.4450
C7R20	4.5760	4.7905	5.2525	5.7625
C7R30	4.2245	4.5870	5.4395	5.8865
C7R40	4.3075	5.4850	5.5010	5.9045
C7R2.5	2.9680	3.1325	3.2725	3.3840
C7R5	1.1545	1.270	1.3990	2.0645

Ovi rezultati prikazani su i grafički slikama 6.10., 6.11. i 6.12. za mješavine s 3%, 5%, i 7% cementa i gumenim granulatom. Rezultati ispitivanja za mješavine s gumenim nitima prikazani

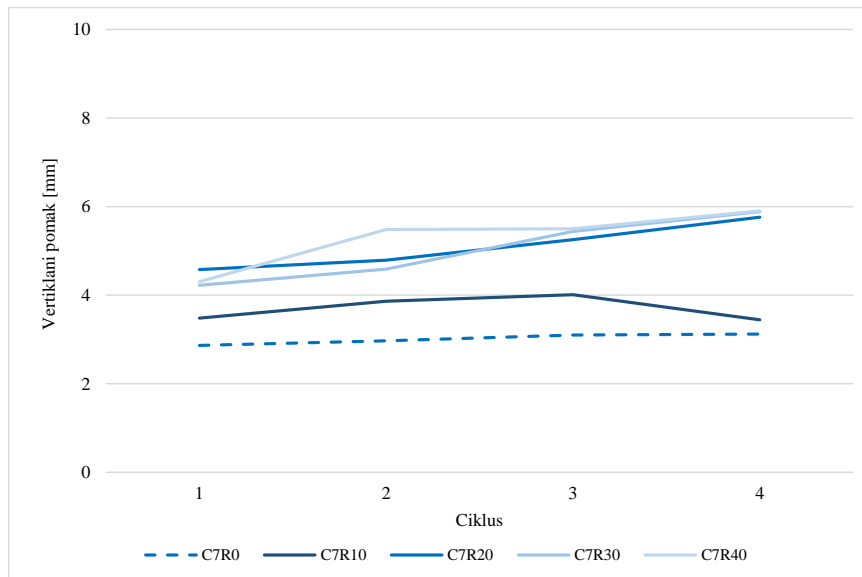
su slikom 6.13. Prikazani rezultati predstavljaju srednju vrijednost deformacija na kraju svakoga ciklusa opterećenja.



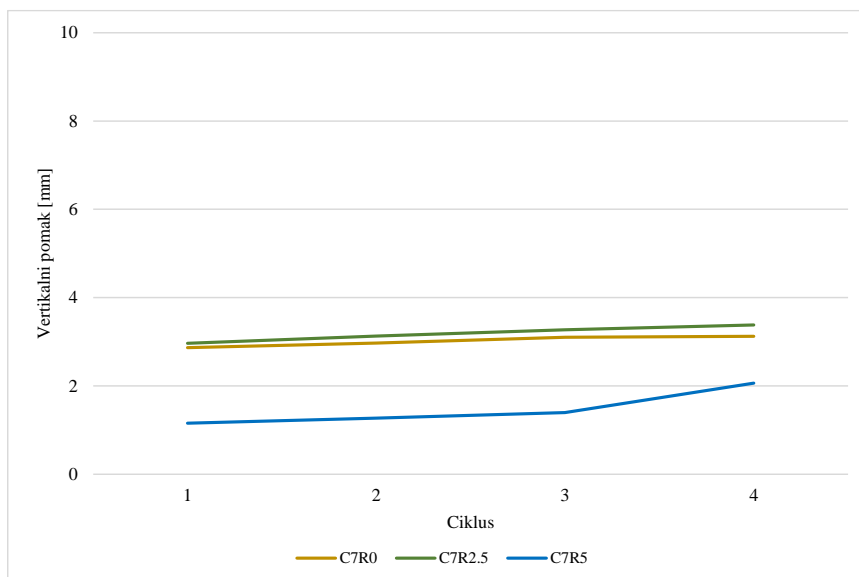
Slika 6.10. Raspon deformacija mješavina s 3% cementa i gumenim granulatom



Slika 6.11. Raspon deformacija mješavina s 5% cementa i gumenim granulatom



Slika 6.12. Raspon deformacija mješavina sa 7% cementa i gumenim granulatom



Slika 6.13. Raspon deformacija mješavina sa 7% cementa i gumenim nitima

Kao i u prethodnom potpoglavlju, iz prikazanih rezultata koji ne obuhvaćaju vertikalne pomake prvoga uzorka svake mješavine može se zaključiti kako je prvi ciklus opterećenja izazvao najveće vertikalne pomake asfaltne ploče. Ti su rezultati u skladu sa zaključcima rada [149] u kojemu se navodi kako početno prometno opterećenje može uzrokovati smanjenje krutosti cementom stabiliziranoga nosivog sloja, osobito pod utjecajem teških teretnih vozila. Prilikom opterećenja ispitnih uzoraka upravo je i simulirano naprezanje uzrokovano teškim teretnim vozilima koja su i mjerodavna prilikom dimenzioniranja kolničke konstrukcije [8].

Analiza rezultata pokazuje kako deformacije asfaltne ploče položene na referentnu stabilizacijsku mješavinu s 3% cementa razvijaju manje deformacije u odnosu na mješavine s 3% cementa i različitim udjelima gume. Nagibi trendova razvoja deformacija na kraju svakoga ciklusa mješavina s 3% cementa (slika 6.10.) relativno su strmi, što znači da povećanje broja ponavljanja opterećenja kod tih mješavina izaziva veće deformacije. Također je uočljiva i promjena nagiba trendova s promjenom količine gume u mješavini. Suprotno tome, kod sustava s mješavinama sa 7% cementa (slika 6.12.) nagibi trendova znatno su blaži. Također i vrijednosti vertikalnih deformacija znatno su manje. Te mješavine pokazuju i mali utjecaj gume na razvoj deformacija. Naime, trendovi koji opisuju razvoj deformacija za različite količine gume vrlo su usko raspoređeni. Pri tome se primjetan skok deformacija uočava za mješavine s 20% gume i više, no i trendovi tih mješavina međusobno su vrlo blizu. Može se zaključiti kako u mješavinama sa 7% cementa prisutna količina cementne paste nadvladava utjecaj gume i osigurava tim mješavinama dovoljnu krutost da pruže otpor ponavljajućem opterećenju i spriječe deformacije vozne površine kolnika. Analizirajući ponašanje sustava sa stabilizacijskim mješavinama s 5% cementa (slika 6.11.), može se zaključiti kako su trendovi razvoja deformacija relativno blagi, a trendovi su međusobno paralelni s iznimkom mješavine C5R40, kod koje je očito došlo do loma cementom stabiliziranoga nosivog sloja u trećem ciklusu opterećenja i rasterećenja i *propadanja* traverze ispitnoga tijela u uzorak. Ta činjenica upućuje na zaključak kako količina gume, a samim time i krutost mješavine, u mješavinama s 5% i 7% cementa ne utječe na nagib trenda razvoja deformacija, već samo na iznos. Preciznije, pri tim količinama cementa krutost mješavine određuje iznos deformacije, no povećanjem prometnoga opterećenja linearno se povećavaju i deformacije bez obzira na količinu gume u mješavini. U mješavinama manje krutosti, onima s 3% cementa, mješavine s 0% i 10% gume imale su relativno male nagibe, dok su se kod većih količina gume ti nagibi povećali. Takva se pojava može objasniti malom čvrstoćom i krutošću tih mješavina. Nedostatak čvrstoće očituje se u brzom izlasku iz elastičnoga područja i pojave pada krutosti u odnosu na početnu krutost. Nije nužno da dođe do naprezanja koja dosežu razinu čvrstoće mješavine, no ranijim izlaskom iz elastičnoga područja dolazi do snažnijega povećanja deformacija s povećanjem naprezanja. Materijal manje krutosti razvija veće lokalne deformacije neposredno ispod unosa opterećenja, što snažnije utječe na slojeve ispod, odnosno naprezanje se ne uspijeva raširiti na veću površinu slojeva ispod pa oni moraju preuzeti veći iznos naprezanja u odnosu na sustave s krućim CNS-om. Nadalje, dodatkom gumenih niti u mješavinu CNS-a povećale su se deformacije asfaltne ploče, no razvoj tih deformacija s povećanjem opterećenja ili povećanjem količine gume

neznatan je (slika 6.13.). Dakle, te mješavine, unatoč znatnom smanjenju dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti, pokazuju karakteristike vrlo krute mješavine u sustavu kolničke konstrukcije i sprečavaju razvoj deformacija asfaltnoga sloja. Ovaj zaključak ponovno upućuje na potrebu za analizom cijeloga sustava kolničke konstrukcije, dok je uobičajeno provoditi analizu pojedinoga sloja. Mješavina s 5% gumenih niti pokazala je vrlo loše karakteristike prilikom karakterizacije na razini materijala, no pri analizi sustava kolničke konstrukcije pokazuje rezultate vrlo bliske mješavini s 2.5% gumenih niti.

Dodatno, grafički prikazi rezultata na slikama 6.10. – 6.12. prikazuju kako je nakon prvoga ciklusa opterećenja veća raspršenost rezultata prosječnih vertikalnih deformacija ploča, dok se s povećanjem ponavljajućega opterećenja vrijednosti deformacija homogeniziraju. Dakle, prometno opterećenje u početnom razdoblju eksploatacije ceste izaziva veće deformacije u odnosu na opterećenja tijekom kasnijega životnog vijeka ceste. Kod svih se mješavina može vidjeti ista pojava, dakle ovaj zaključak vrijedi općenito za sve ispitane sustave kolničkih konstrukcija.

Analizom deformacija asfaltne ploče sustava kolničke konstrukcije tijekom ponavljajućega opterećenja digitalnom stereo fotogrametrijom pokazalo se kako veće deformacije razvijaju sustavi s mješavinama CNS-a koji ranije izađu iz elastičnoga područja ponašanja materijala. Nadalje, pokazalo se kako se ispitani sustavi kolničkih konstrukcija s različitim mješavinama CNS-a ne ponašaju u potpunosti u skladu s rezultatima na razini materijala. Stoga se navodi preporuka za provođenje ispitivanja na razini konstrukcije u daljnjim istraživanjima.

6.3 Vizualna analiza deformacija sustava kolničke konstrukcije

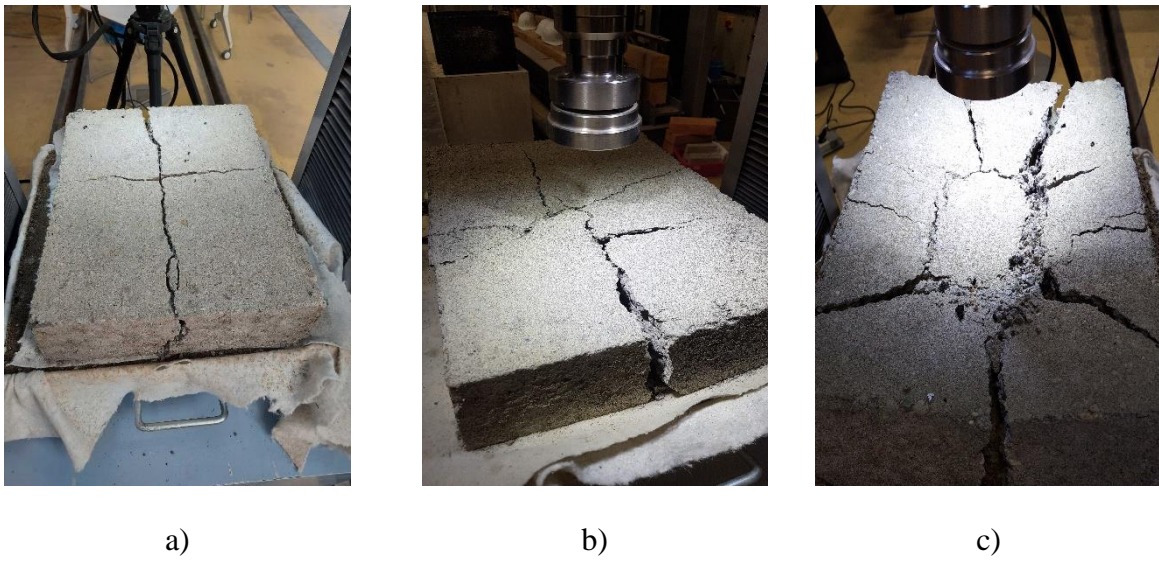
Dobiveni rezultati prikazuju kako su deformacije unutar pojedinoga ciklusa opterećenja najveće za mješavine s najmanjim udjelom cementa, odnosno za mješavine s 3% cementa. Pri tome porast raspona deformacija povećava se približno linearnim prirastom do kraja trećega ciklusa, no nakon četvrtoga ciklusa opterećenja dolazi do znatnoga skoka raspona deformacija (slika 6.10.). Deformacije u najvećim rasponima javile su se kod mješavina s 40% gume. Općenito su se kod tih mješavina deformacije povećale za količine 20% gume i više, dok su deformacije mješavina s 0% i 10% gume znatno manje. U svim je mješavinama s 3% cementa na kraju četvrtoga ciklusa došlo do loma cementom stabiliziranoga sloja, što je vidljivo iz rezultata pomaka traverze ispitnoga uređaja (slike 6.4. – 6.8.), dok se iz rezultata deformacije asfaltnih

ploča ne može sa sigurnošću izvesti takav zaključak. Pri tome je kod nekih mješavina došlo do potpunog *izvijanja* asfaltne ploče, što se može vidjeti na slici 6.14.



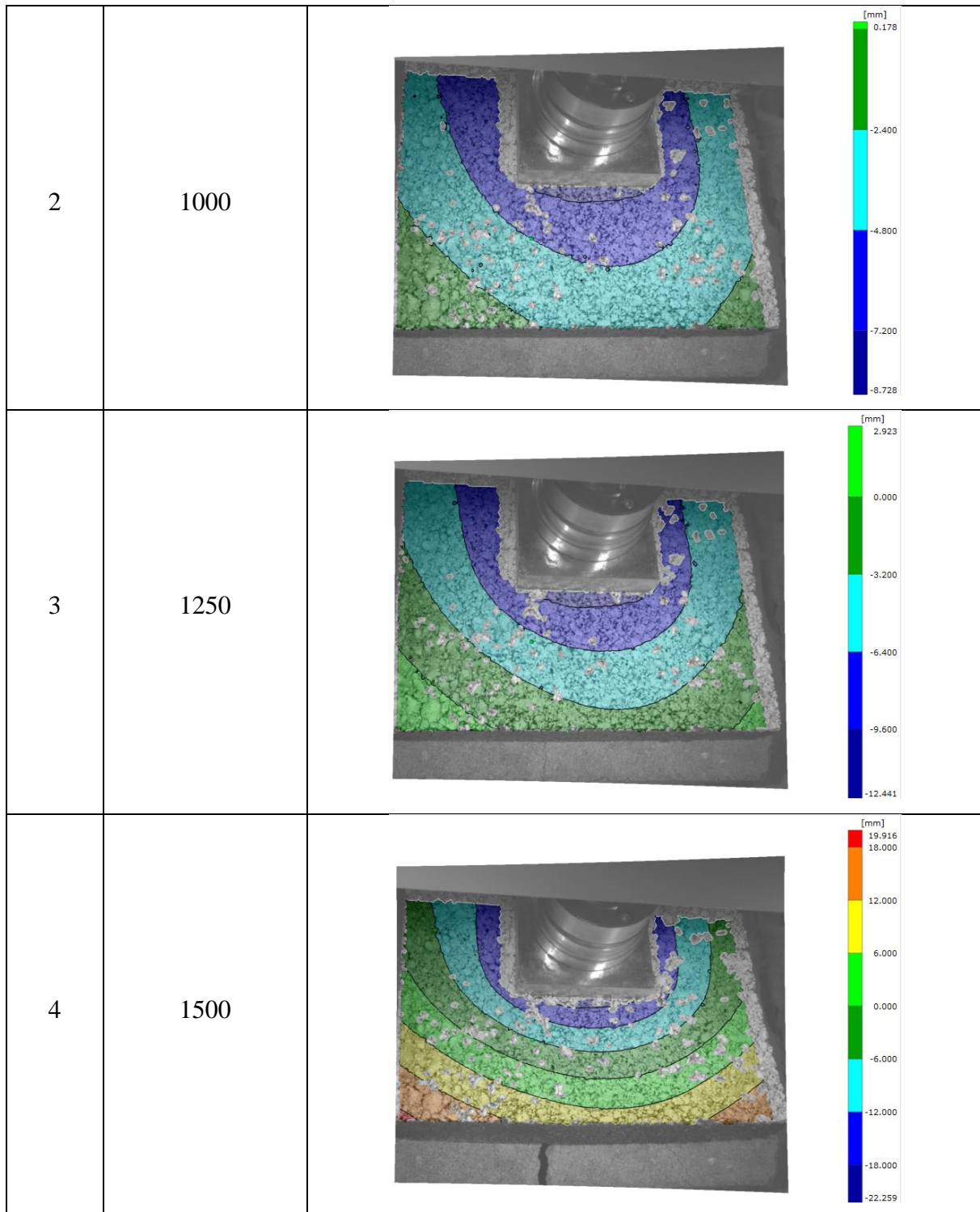
Slika 6.14. Lom konstrukcije uslijed ponavljajućeg opterećenja

Tijekom toga ispitivanja uočeno je kako su ploče s 3% cementa stvorile četiri radijalne pravilne pukotine koje dijele ploču na približno jednake dijelove, dok su se s povećanjem količine gume ploče razlomile u nepravilnijem obliku. Lom ploča s 0%, 20% i 40% gume prikazan je slikom 6.15. a), b) i c). Takvo ponašanje konstrukcije dokaz je velikoga gubitka nosivosti stabiliziranoga sloja koji je povećanjem količine gume pokazao nepostojanost prilikom velikoga ponavljajućeg opterećenja i kao takav nije prikladan za upotrebu u kolniku. Reprezentativni prikaz opterećenja sustava kolničke konstrukcije s razvijenim deformacijama na kraju svakoga ciklusa prikazan je slikom 6.16. za uzorak sa slike 6.14. kod kojega je došlo do potpunoga loma konstrukcije i razvoja najvećih deformacija asfaltne ploče. Za prikaz odabran je sustav s najvećim ostvarenim deformacijama.



Slika 6.15. Lom CNS-a s 3% cementa i: a) 0% gume; b) 20% gume i c) 40% gumenog granulata
 Na slici 6.15. može se vidjeti kako su se deformacije razvile radijalno sa središtem u točki unosa opterećenja u konstrukciju. Nadalje, vrijednosti deformacija na kraju drugoga, trećeg i četvrtog ciklusa kreću se od pozitivne do negativne vrijednosti, što znači da je došlo do izvijanja asfaltne ploče već na kraju drugoga ciklusa i izdizanja njezinih rubova iznad referentne ravnine definirane na početku ispitivanja. Iz takvoga prikaza može se zaključiti u kojoj fazi ispitivanja je došlo do popuštanja podloge, odnosno loma ploče CNS-a, što je u tom slučaju u četvrtom ciklusu opterećenja.

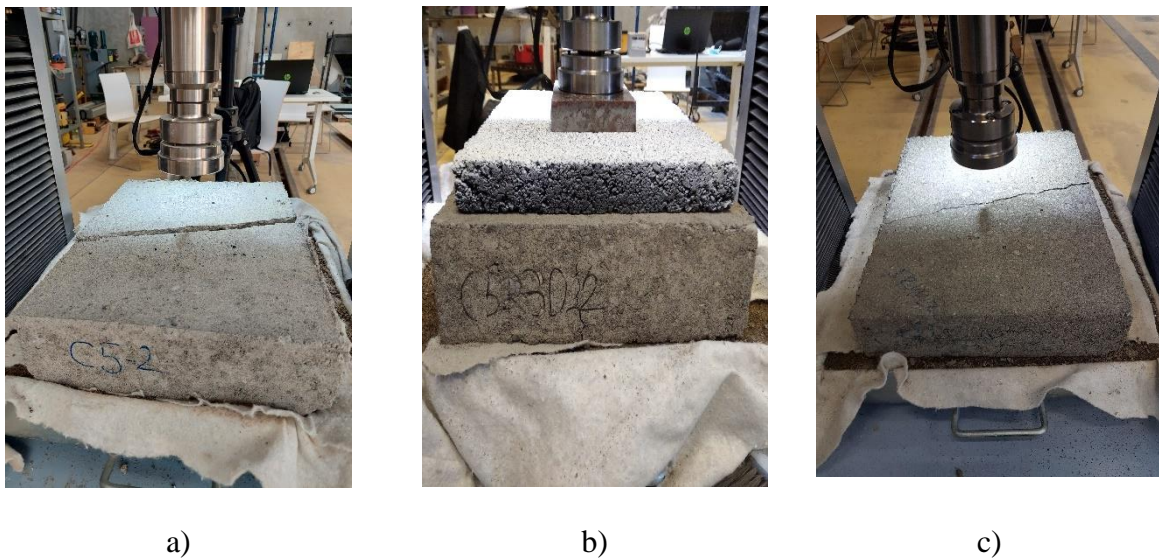
Ciklus	Naprezanje [kPa]	Deformacija površine
1	750	



Slika 6.16. Izmjerene deformacije sustava kolničke konstrukcije s CNS-om s 40% gumenog granulata i 3% cementa

Mješavine s 5% cementa razvijaju deformacije u manjim rasponima (slika 6.11.). Također, kod tih mješavina nije vidljiv skok deformacija po završetku četvrtoga ciklusa (slike 6.4. – 6.8.), što ukazuje na to kako je konstrukcija izdržala opterećenje, odnosno nije došlo do *izvijanja* asfaltne ploče. Umjerene deformacije ploče rezultat su krute podloge koja je osigurala ravnomjernu

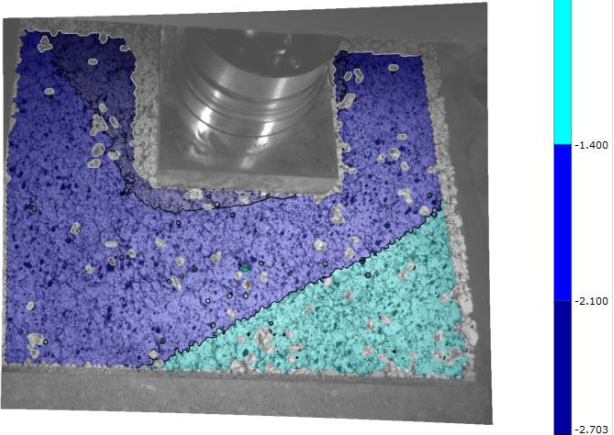
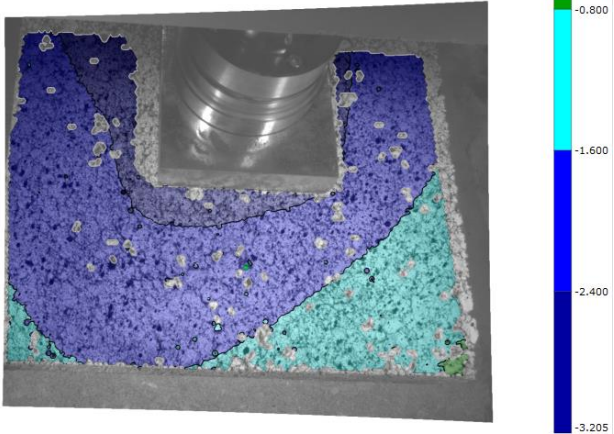
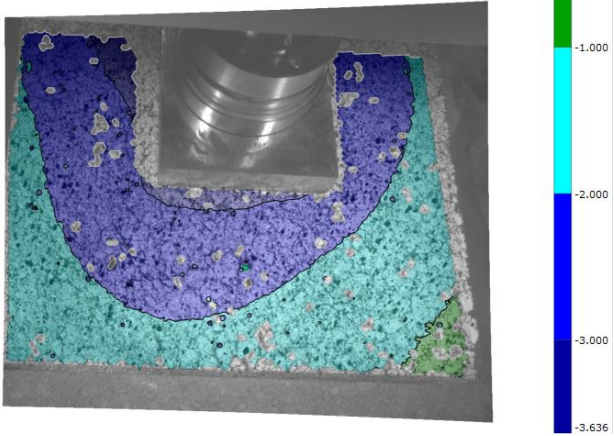
raspodjelu preuzetoga opterećenja. Na slikama 6.4. – 6.8., koje prikazuju pomak traverze ispitnoga uređaja ne može se uočiti skok pomaka na kraju četvrtoga ciklusa, no do loma konstrukcije došlo je kod svih mješavina. Reprezentativni uzorci mješavina s 5% cementa i 0%, 30% i 40% gume prikazani su slikom 6.17. a), b) i c). Na slici 6.11. može se vidjeti kako su se najmanje deformacije razvile kod mješavina s 30% gume. Najmanje deformacije habajućega sloja karakteriziraju konstrukciju koja osigurava dobru raspodjelu naprezanja i dobar kontakt između slojeva. Deformacije kod tih mješavina nalaze se u rasponu do 10 mm, što je znatno manje u usporedbi s mješavinama s 3% cementa.

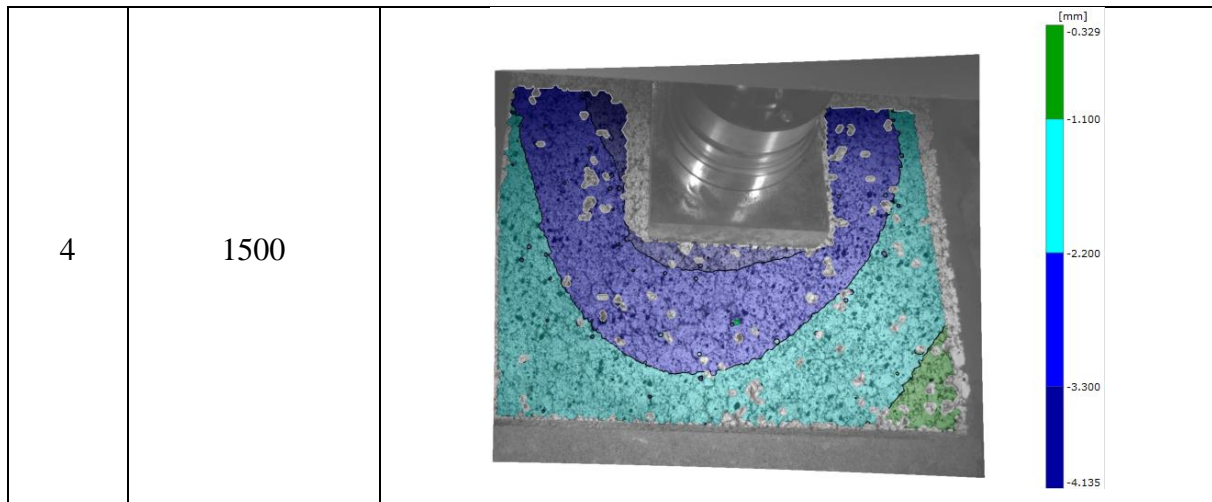


Slika 6.17. Lom CNS-a s 5% cementa i: a) 0% gume; b) 30% gume i c) 40% gumenog granulata

Za razliku od mješavina s 3% cementa kod mješavina s 5% cementa ne dolazi do raspadanja stabilizacijskih ploča. Vrlo velika krutost mješavine s 0% gume karakterizirana je krtim lomom ploče koji se može vidjeti na slici 6.17. a). No u tom je slučaju nastala samo jedna pukotina i ploča se razdvojila na dva dijela. Kod mješavine s 30% gume nije došlo do potpunoga pucanja ploče, već se pukotina proširila s donjega, vlačnog, dijela ploče prema asfaltnom sloju. No, pukotina nije uznapredovala do kontakta s asfaltnom pločom, što je rezultat djelovanja gumenoga granulata koji je inhibirao razvijena unutarnja naprezanja. Slika 6.17. c) prikazuje stanje stabilizacijske ploče s 40% gume nakon opterećenja. Lom te ploče vrlo je sličan lomu ploče referentne mješavine. Takvo ponašanje može se pripisati prekoračenju vlačne čvrstoće. Naime, kod mješavina s 5% cementa vlačna čvrstoća ima veći udio u tlačnoj čvrstoći u odnosu na mješavine s 3% cementa, kako je prikazano na slici 4.19. Stoga je došlo do loma preko slabije strane uzorka. Kao karakteristična raspodjela deformacija asfaltna ploče mješavina s 5%

cementa izdvojena je mješavina s 30% cementa kod koje nije došlo do loma konstrukcije i prikazana je slikom 6.18.

Ciklus	Naprezanje [kPa]	Deformacija površine
1	750	
2	1000	
3	1250	



Slika 6.18. Izmjerene deformacije sustava kolničke konstrukcije s CNS - om s 30% gumenog granulata i 5% cementa

Iz prikazanih faza ispitivanja može se zaključiti kako na kraju prvoga ciklusa opterećenja deformacije još nisu razvijene radijalno oko izvora opterećenja, no nakon drugoga ciklusa konstrukcija se namjestila i razvila radijalne deformacije. Taj zaključak upućuje na potrebu za unošenjem inicijalnoga opterećenja koje bi osiguralo namještanje konstrukcije i interakciju svih slojeva. Za razliku od mješavina s 3% gume vidljivo je kako su konture vertikalnih pomaka kod ove mješavine raspoređene na većem međusobnom razmaku, što upućuje na manju razliku vertikalne deformacije ruba ploče i područja unošenja opterećenja. Dakle, te su se ploče manje deformirale, a defleksija je ravnomjernije raspoređena. Također je vidljivo kako su deformacije te ploče raspodijeljene u manji broj raspona u usporedbi s pločama s 3% cementa. Manje deformacije ploče i manje razlike u vertikalnoj deformaciji na rubu i u središtu ploče rezultat su čvrste podloge i sinergije deformacija stabilizacijske ploče i asfaltne ploče koja se ogleda u vrlo malim deformacijama kod sustava s mješavinom C5R30, gdje je vidljiv doprinos gume. Upravo tako male deformacije razvijene nakon četiri ciklusa opterećenja koje odgovara stvarnom prometnom opterećenju naglašavaju važnost promatranja cijele konstrukcije, a ne samo materijala. Mješavina C5R30 nije zadovoljila zahtjeve tlačne čvrstoće za ugradnju u autoceste i ceste vrlo teškoga prometnog opterećenja, ali je u sustavu kolničke konstrukcije izdržala preuzeto opterećenje bez potpunoga loma konstrukcije.

Mješavine sa 7% cementa razvijaju prosječne deformacije do 6 mm, što je znatno manje od mješavina s 5% cementa. Tako male deformacije površine asfaltne ploče rezultat su vrlo velike krutosti tih mješavina koje pružaju otpor *izvijanju* asfaltne ploče. Kod tih mješavina raspon deformacija blago se povećava s porastom udjela granulirane gume, no prirast deformacija nakon pojedinoga ciklusa opterećenja vrlo je blag. Kod tih se mješavina može primijetiti kako

deformacije nakon prvoga ciklusa iznose više od pola ukupne vrijednosti deformacije, što znači da veće naprezanje uneseno preko kontaktne plohe nije izazvalo znatan rast deformacija. Dakle, deformacije su izazvane namještanjem ispitnoga sustava, dok je takva kruta podloga onemogućila *izvijanje* asfaltne ploče. Prilikom ispitivanja sustava kolničke konstrukcije s CNS-om sa 7% cementa nije došlo do loma ploča CNS-a tijekom ispitivanja. Kod mješavina s većim udjelom granulirane gume razvile su se pukotine od donje plohe CNS-a prema asfaltnom sloju, no niti u jednom ispitnom sustavu nije došlo do potpunoga loma. Lom je nastupio tek po rastavljanju ispitnoga sustava kao posljedica vrlo duboke pukotine nastale u sloju CNS-a. U usporedbi s mješavinama s 5% cementa ove mješavine pokazale su nešto veći kapacitet za preuzimanje prometnoga opterećenja, no može se reći kako povećanje količine cementa s 5% na 7% nije znatno doprinijelo trajnosti konstrukcije izložene ponavljajućem opterećenju. Ploče CNS-a sa 7% cementa i 0%, 30% i 40% granulirane gume nakon ispitivanja prikazane su slikom 6.19. a), b) i c).



a)



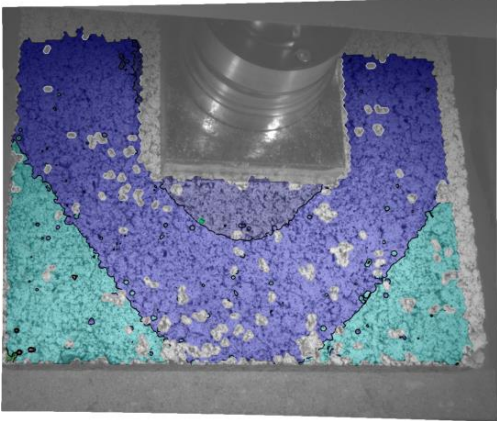
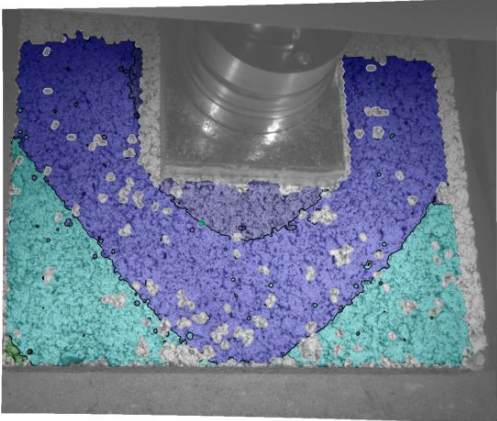
b)

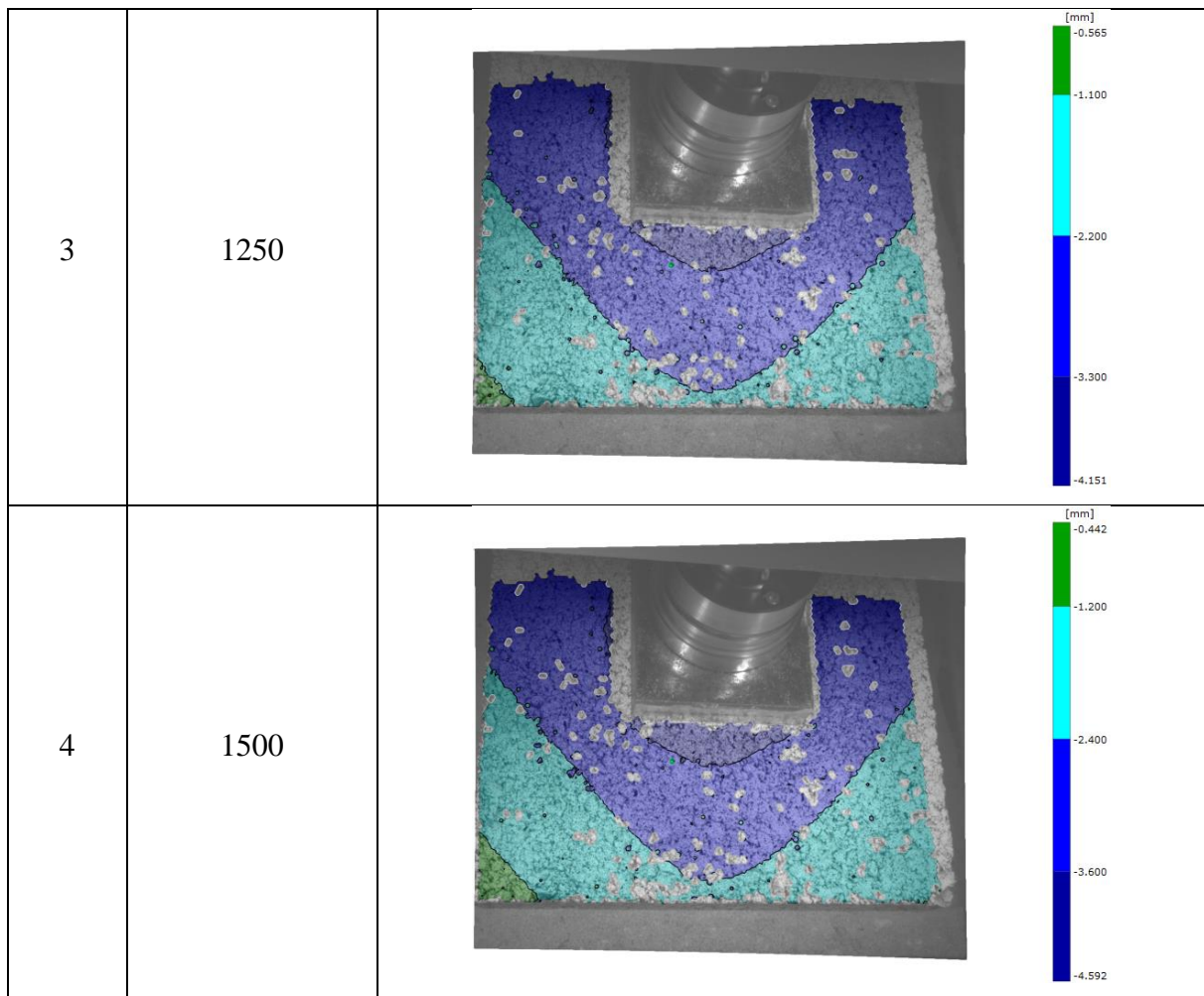


c)

Slika 6.19. Lom CNS – a sa 7% cementa i: a) 0% gume; b) 30% gume i c) 40% gumenog granulata

Razvoj deformacija na kraju sva četiri ciklusa opterećenja na sustavu kolničke konstrukcije s mješavinom CNS-a C7R30 prikazan je slikom 6.20. Na prikazanim stanjima deformacija može se zaključiti kako je oblik polja deformacija nešto drugačiji nego kod prethodno analiziranih mješavina koje su razvile polja deformacija kružnoga oblika. Polja deformacija kod tih mješavina poprimaju eliptičan oblik, što je pravilnije s obzirom na pravokutan oblik čelične ploče. Također, konture vertikalne deformacije raspoređene su na većem razmaku, odnosno polja deformacija šira su, što karakterizira blažu defleksiju površine asfaltne ploče.

Ciklus	Naprezanje [kPa]	Deformacija površine
1	750	
2	1000	



Slika 6.20. Izmjerene deformacije sustava kolničke konstrukcije s CNS-om s 30% gumenog granulata i 7% cementa

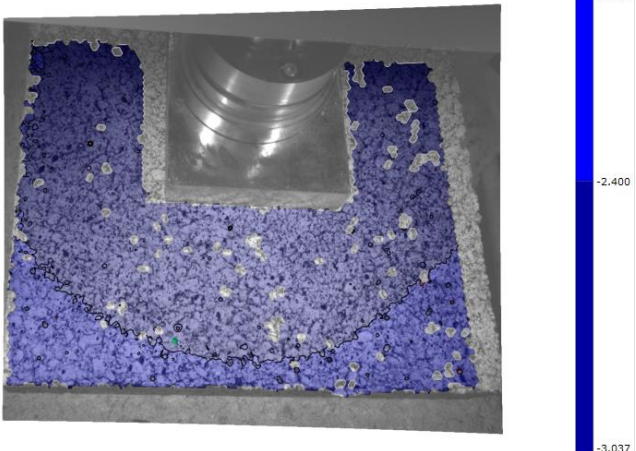
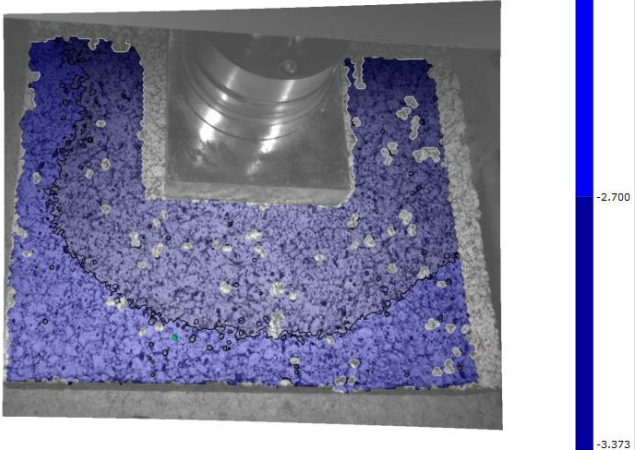
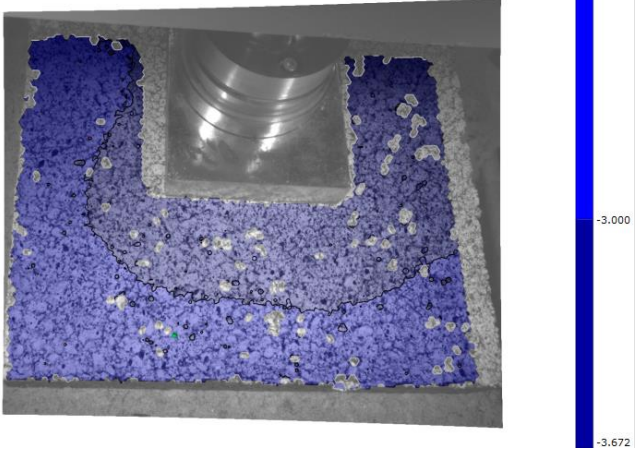
Nadalje, veće deformacije razvile su se po kutovima asfaltnih ploča gdje nema bočnoga pridržanja koje bi zadržalo ploču u ravnini. Može se uočiti i vrlo mali porast deformacija nakon svakoga ciklusa. Tako su se nakon prvoga ciklusa deformacije razvile u rasponu manjem od 3 mm, nakon drugoga i trećega ciklusa deformacije su se razvile u rasponu između 3 mm i 4 mm, dok su deformacije nakon četvrtoga ciklusa razvijene u rasponu nešto većem od 4 mm za prikazanu reprezentativnu ploču. Vrlo mala razlika u razvoju deformacija s povećanjem gume govori o znatno snažnijem utjecaju količine cementa na krutost materijala u odnosu na utjecaj gumenoga granulata. Mješavine sa 7% cementa ne pokazuju dovoljan potencijal za smanjenje krutosti upotrebom otpadne gume zbog velike količine cementne paste u mješavini koja nadvladava utjecaj gume.

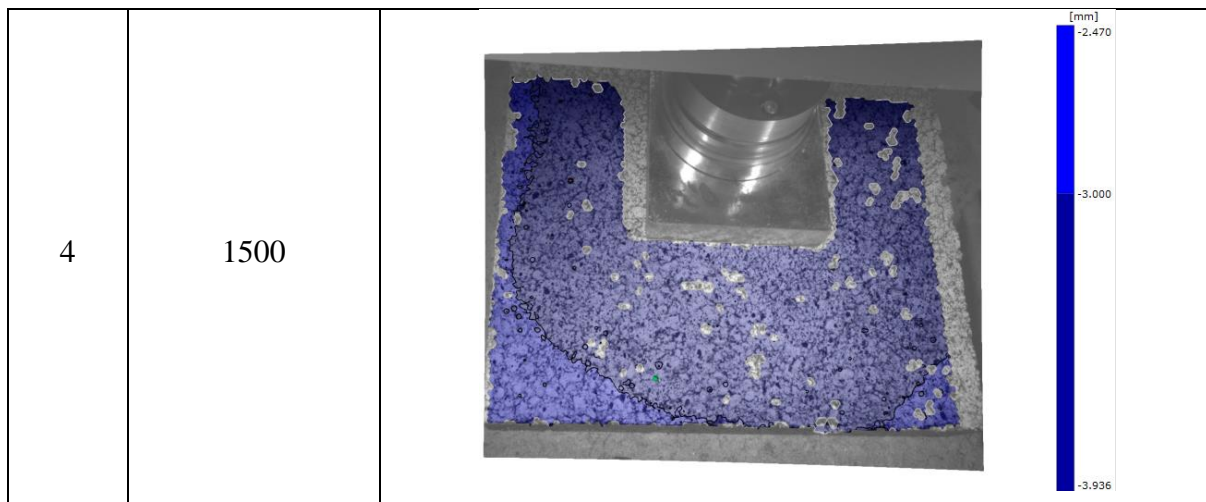
Osim mješavina s granuliranom gumom na taj su način ispitane i mješavine s gumenim nitima. Raspon deformacija razvijenih na tim mješavinama prikazan je slikom 6.13. Sustavi kolničke konstrukcije koji u stabilizacijskom sloju imaju dodatak gumenih niti razvili su veće

deformacije u odnosu na referentnu mješavinu sa 7% cementa. Dodatak gumenih niti u volumenu od 2.5% uzrokovao je gotovo isti porast deformacija kao i dodatak niti u iznosu od 5%. Također, prilikom ispitivanja tih mješavina nije došlo do pojave pukotina u cementom stabiliziranom nosivom sloju niti nakon četvrtoga ciklusa opterećenja kako je prikazano slikom 6.21. Dobiveni rezultati sugeriraju kako dodatak gumenih niti čini CNS postojanijim, što rezultira vrlo malim defleksijama kolnika. S obzirom na nezadovoljavajuću tlačnu čvrstoću mješavine C7R5, a vrlo mali razvoj deformacija, može se potvrditi zaključak kako je vrlo važno promatrati ponašanje cijele konstrukcije, a ne samo materijala. Razvoj deformacija na kraju svakoga ciklusa opterećenja prikazan je slikom 6.22. Na tom prikazu može se vidjeti kako je zapravo cijela ploča, osim njezinih kutova, označena kao isto područje deformacije. Pri tome najveći prirast deformacije zabilježen je na kraju prvoga ciklusa opterećenja, a nakon ostalih ciklusa deformacije su vrlo malo porasle.



Slika 6.21. Ploča CNS-a sa 7% cementa i 5% gumenih niti nakon 4 ciklusa opterećenja

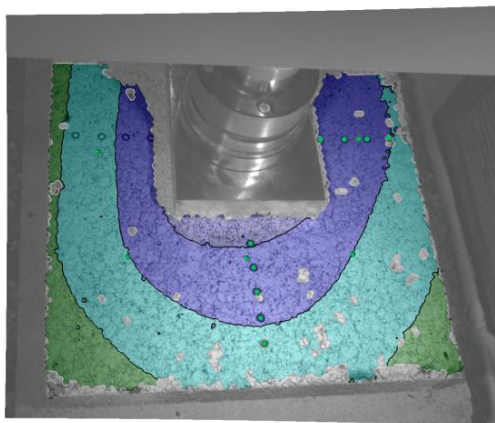
Ciklus	Naprezanje [kPa]	Deformacija površine
1	750	
2	1000	
3	1250	



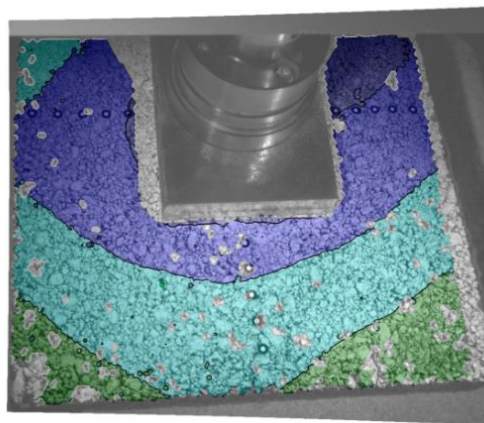
Slika 6.22. Izmjerene deformacije sustava kolničke konstrukcije s CNS-om s 5% gumenih niti i 7% cementa

Nakon analize provedenih ispitivanja može se zaključiti kako je od svih mješavina koje su zadovoljile uvjete tlačne čvrstoće, mješavina C5R20 ostvarila najveće deformacije, a pri tome nije došlo do loma konstrukcije. Dakle, ta se mješavina pokazala vrlo elastičnom bez znatnoga oštećenja. Osim na razini materijala ta je mješavina ostvarila dobre rezultate i prilikom ispitivanja na razini konstrukcije.

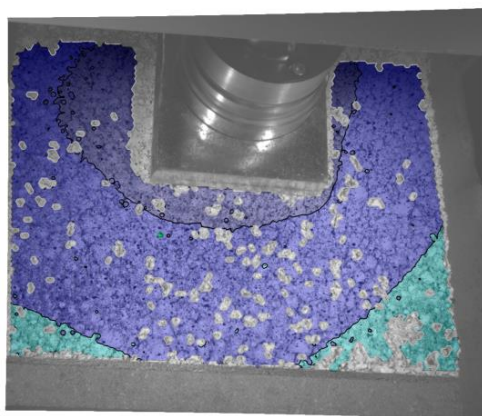
Prethodno je zaključeno kako je povećanjem krutosti mješavine došlo do razvoja strmijih deformacija asfaltne ploče koje se ogledaju u usko raspoređenim konturama vertikalnih deformacija. No, ako se pogleda razvoj deformacija najkručijih mješavina, onih sa 7% cementa, i različitih udjela granulirane gume, može se vidjeti vrlo velik doprinos gume u razvoju deformacija. Upravo su te mješavine odabrane zbog najvećega udjela cementa koji najsnažnije utječe na razvoj krutosti materijala. Naime, povećanje udjela gume bitno je utjecalo na raspored deformacija. Na slici 6.23. a), b) i c) može se vidjeti raspodjela vertikalnih pomaka nakon četvrtoga ciklusa opterećenja za mješavine C7R0, C7R20 i C7R40. Raspodjela pomaka jasno pokazuju kako se povećanjem udjela gume smanjuje gustoća kontura vertikalnih deformacija, odnosno veće područje asfaltne ploče nalazi se u istom rasponu deformacija, što ukazuje na to kako se povećanjem gume povećava i deformabilnost površine CNS-a koja je popraćena deformacijom asfaltnog sloja. Dakle, došlo je do defleksije površine ploče CNS-a, što dokazuje široko područje deformacije istoga raspona napreznja, a elastičnost gume omogućava deformaciju CNS-a. Takve mješavine ravnomjernije raspoređuju preuzeto napreznje.



a)



b)



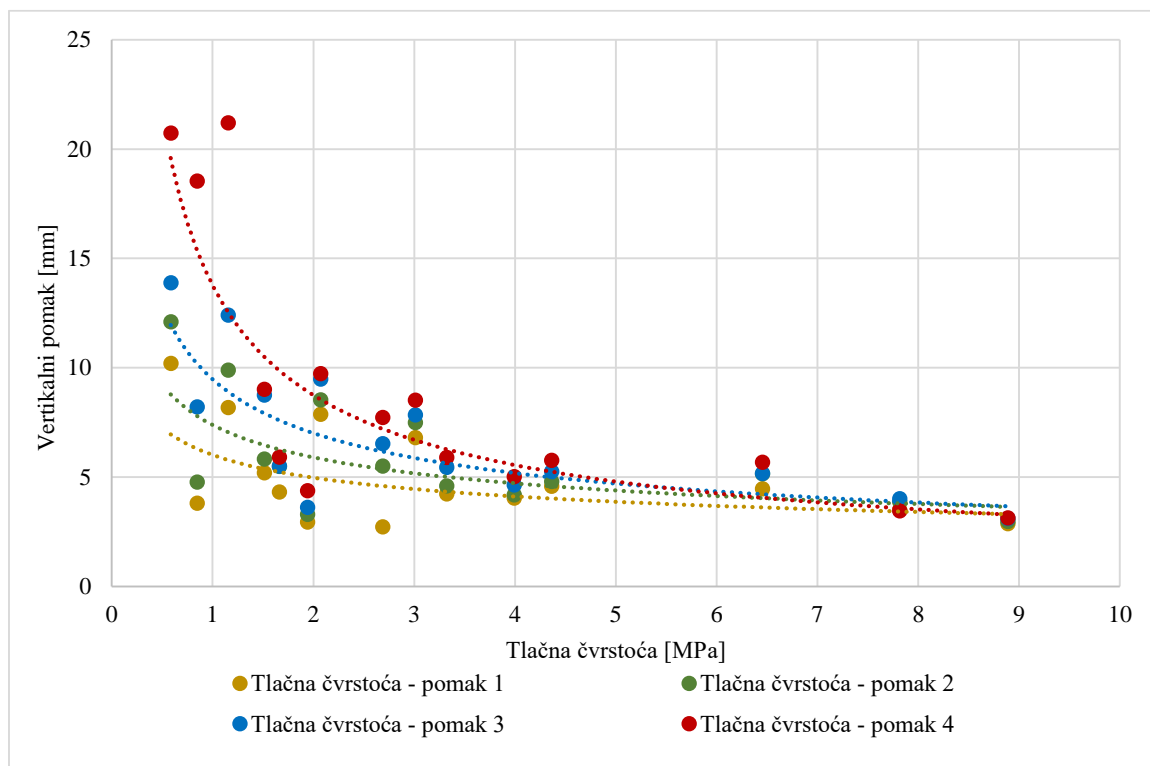
c)

Slika 6.23. Raspodjela vertikalnih pomaka na kraju 4. ciklusa za mješavine: a) C7R0; B) C7R20 i c) C7R40

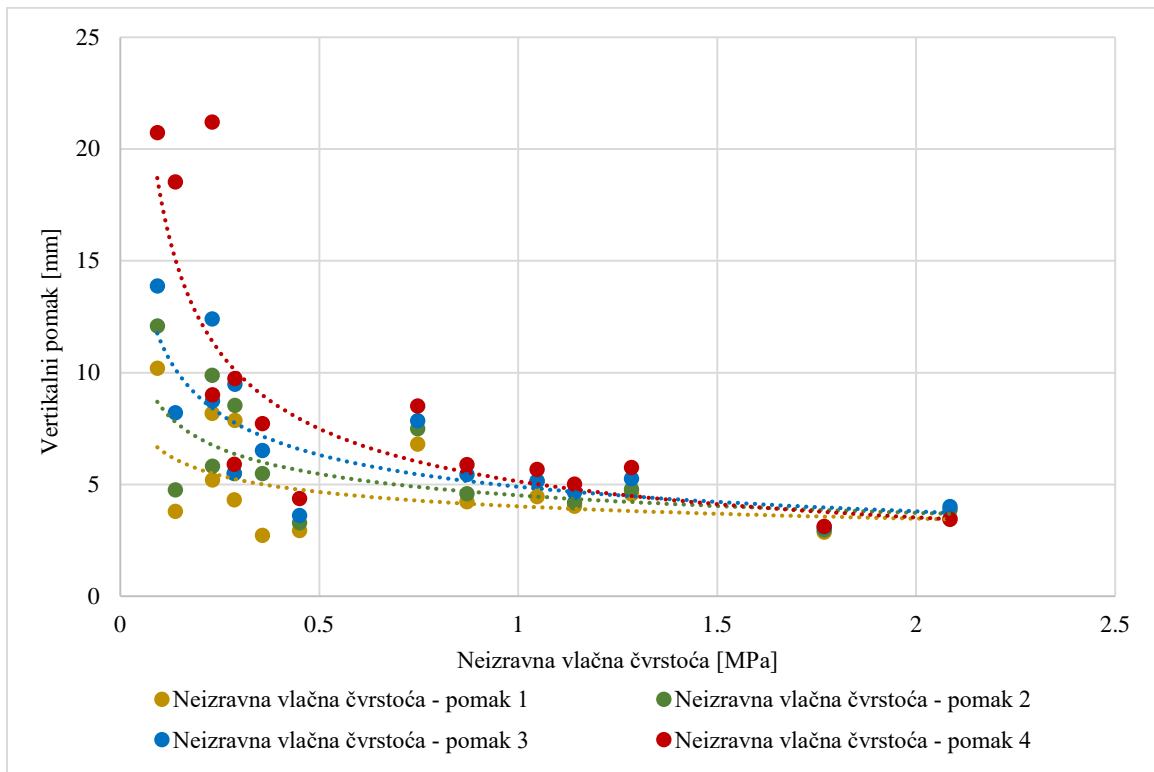
S druge strane, takav trend nije moguće primijetiti kod mješavine male krutosti, onih s 3% cementa, zbog nastupanja loma konstrukcije i potpune deformacije asfaltne ploče. Nadalje, te mješavine svojom malom krutošću niti ne pružaju velik otpor i deformiraju se zajedno s asfaltnom pločom tijekom početnih faza opterećenja uzoraka. Pri tome dolazi do suprotnoga trenda u odnosu na krute mješavine, odnosno do pojave gušćih kontura vertikalnih deformacija asfaltne ploče.

6.4 Veza vertikalnih deformacija i mehaničkih svojstava cementom stabiliziranog nosivog sloja

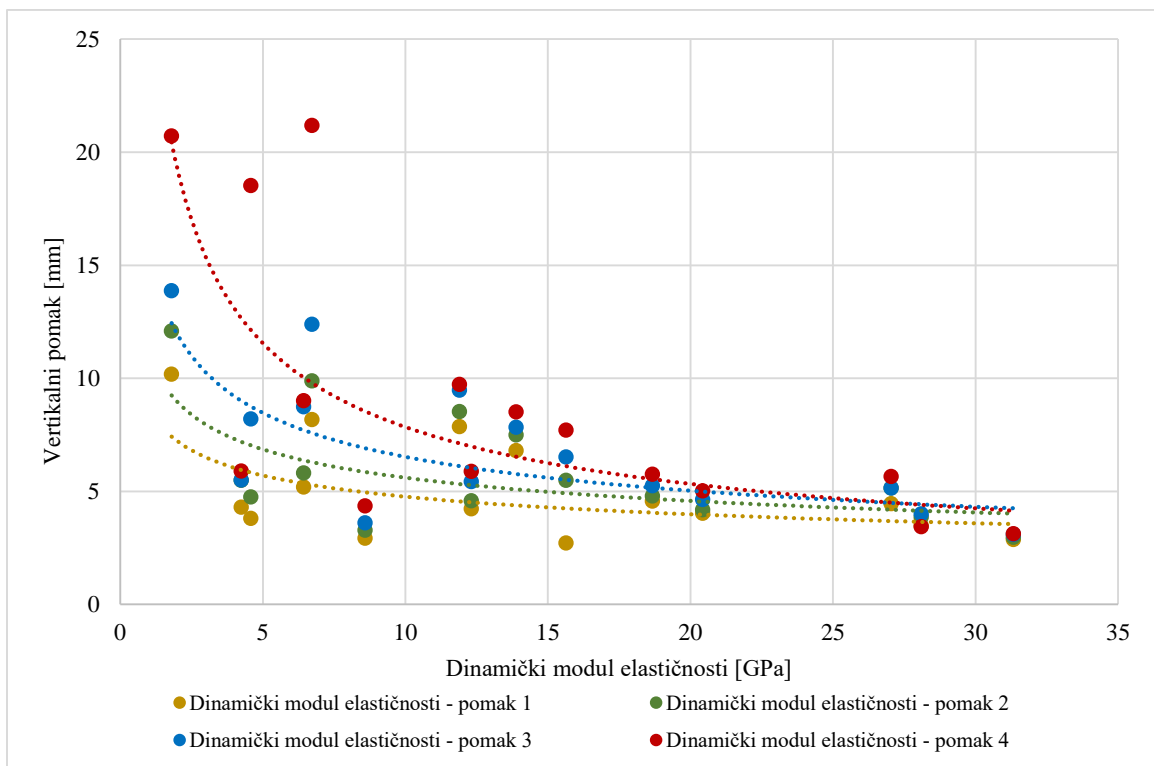
U prethodnim analizama utvrđeno je kako svojstva cementom stabiliziranoga nosivog sloja utječu na razvoj deformacija asfaltne ploče ispitanoga sustava kolničke konstrukcije. Pokazalo se kako sustavi kolničke konstrukcije s mješavinama CNS-a manje čvrstoće i krutosti razvijaju veće deformacije asfaltne ploče i obrnuto. No, nije utvrđeno koje svojstvo ima veći utjecaj na razvoj deformacija te na koji način se mijenja utjecaj pojedinoga mehaničkog svojstva tijekom ponavljanja opterećenja. Stoga su u ovom potpoglavlju grafički prikazane veze između tlačne čvrstoće, neizravne vlačne čvrstoće, dinamičkog modula elastičnosti te statičkoga modula elastičnosti i vertikalnih pomaka na kraju svakoga ciklusa opterećenja i rasterećenja. Mješavine s gumenim nitima nisu uzete u obzir prilikom te analize s obzirom da su pokazale drugačije ponašanje u prethodnim analizama. Odnos tlačne čvrstoće te neizravne vlačne čvrstoće i pomaka prikazan je slikama 6.24. i 6.25., dok je odnos dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti prema pomacima prikazan slikama 6.26. i 6.27. Pri tome pomaci su stavljani u odnos s mehaničkim svojstvima materijala nakon 28 dana njege s obzirom na to da su ploče za sustav kolničke konstrukcije ispitane nakon 28 dana njege.



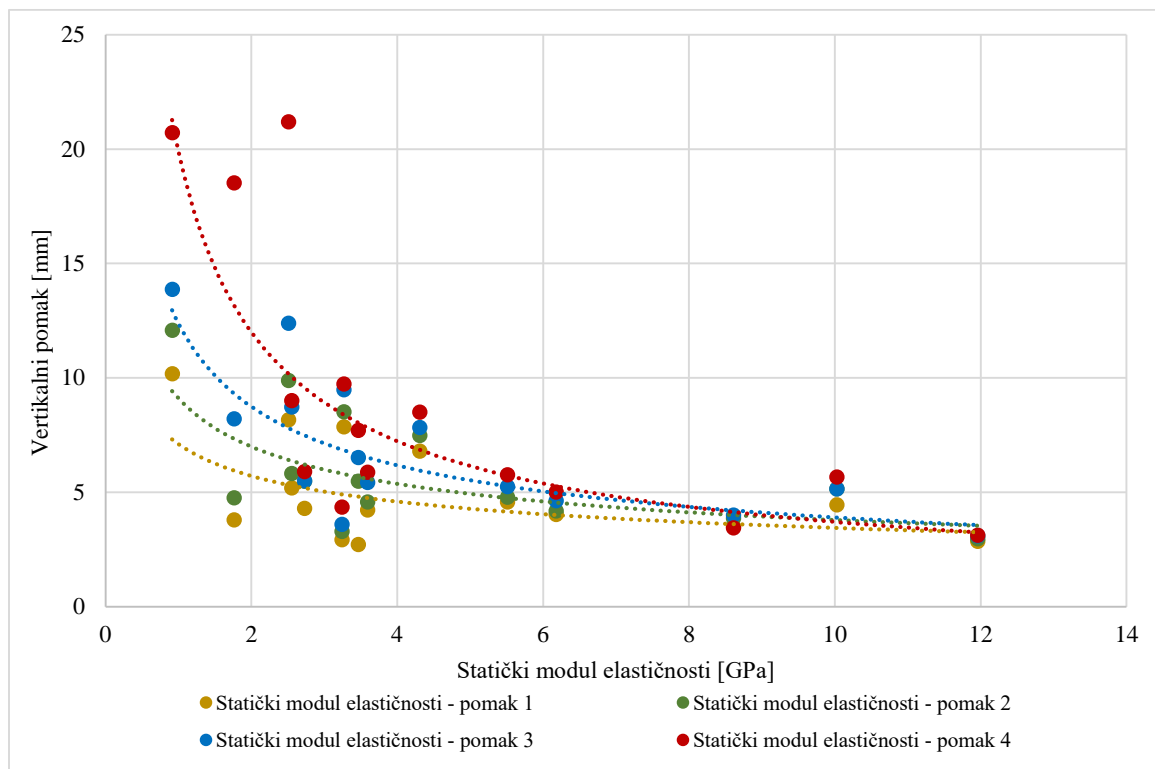
Slika 6.24. Odnos tlačne čvrstoće i pomaka nakon sva 4 ciklusa opterećenja i rasterećenja



Slika 6.25. Odnos neizravne vlačne čvrstoće i pomaka nakon sva 4 ciklusa opterećenja i rasterećenja



Slika 6.26. Odnos dinamičkog modula elastičnosti i pomaka nakon sva 4 ciklusa opterećenja i rasterećenja



Slika 6.27. Odnos statičkog modula elastičnosti i pomaka nakon sva 4 ciklusa opterećenja i rasterećenja

Razvijene veze između prikazanih podataka pokazuju kako se utjecaj različitih mehaničkih svojstava CNS-a na pomake asfaltne ploče ne razlikuje. Veze pokazuju da što je veća tlačna i neizravna vlačna čvrstoća, pomaci su manji i homogenije raspoređeni tijekom različitih ciklusa opterećenja. Preciznije, kod mješavine veće čvrstoće povećanjem prometnoga opterećenja ne dolazi do znatnoga povećanja vertikalnih pomaka. Isti zaključak vrijedi i za krutost mješavine CNS-a. Sustavi kolničke konstrukcije s CNS-om većega dinamičkog i statičkoga modula elastičnosti razvijaju podjednake vertikalne pomake asfaltne ploče pri različitim intenzitetima opterećenja. Tako je kod mješavina manje čvrstoće i krutosti vidljivo da povećanje prometnoga opterećenja dovodi do povećanja vertikalnih pomaka u znatnoj mjeri. Također, može se vidjeti kako je trend koji opisuje pomake na kraju četvrtoga ciklusa položen na nešto većoj udaljenosti od ostalih trendova. Takav je položaj posljedica velikih vertikalnih pomaka uslijed loma konstrukcije sa slabije nosivim mješavinama CNS-a. Općenito, mješavine većih mehaničkih svojstava pokazuju veću otpornost na deformacije uslijed ponavljajućega opterećenja u odnosu na slabije mješavine. Nadalje, pokazalo se kako sva četiri ispitana mehanička svojstva podjednako djeluju na razvoj deformacija, odnosno veza između mehaničkih svojstava i pomaka opisna je vrlo sličnim trendovima za sva svojstva. Takav odnos ne iznenađuje s

obzirom da su prethodno, u poglavlju 5., definirani linearni odnosi između tih mehaničkih svojstava materijala. Dakle, time se mogu potvrditi ranije utvrđene linearne povezanosti.

Promatrajući razvijene veze, može se zaključiti kako najveći pomaci nastaju nakon prvoga ciklusa opterećenja (žute oznake u grafovima 6.24. – 6.27.), dok su vrijednosti pomaka nakon ostalih ciklusa opterećenja i rasterećenja porasli za vrlo male iznose. Pri tome trebalo bi zanemariti pomake mješavina slabijih mehaničkih svojstava na kraju četvrtoga ciklusa zbog nastanka loma konstrukcije. I ovom je analizom pokazano da početno prometno opterećenje izaziva najveća naprezanja, a posljedično i deformacije kolničke konstrukcije. Drugačije rečeno, kolnička konstrukcija najosjetljivija je na početku eksploatacijskoga razdoblja.

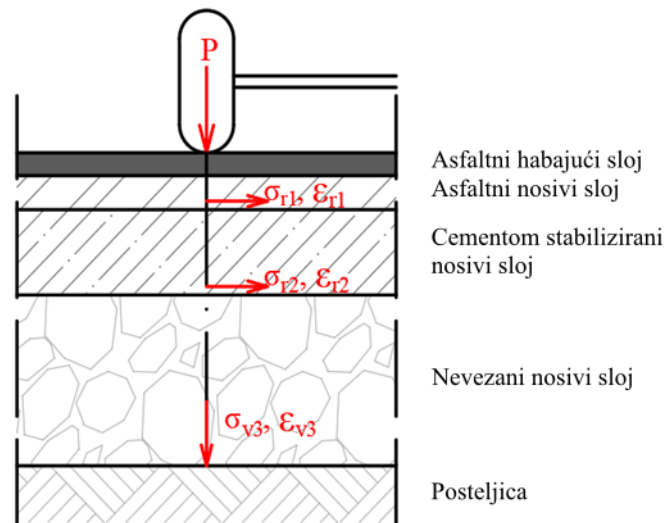
6.5 Zaključno

Provedenim ispitivanjima na razini konstrukcije pokazalo se kako je ovakva analiza prikladnija prilikom predviđanja ponašanja konstrukcije u odnosu na ispitivanja na razini materijala jer daje stvarniji uvid u ponašanje konstrukcije. Nadalje, zaključeno je kako je vrlo važno da prilikom eksploatacije kolničke konstrukcije CNS ostane što duže u elastičnom području kako ne bi došlo do nastanka pukotina. Otpadna guma u kombinaciji s optimalnom količinom cementa doprinosi povećanju elastičnoga ponašanja sloja. Utvrđeno je i kako sva četiri ispitana mehanička svojstva CNS-a (tlačna čvrstoća, neizravna vlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti i statički modul elastičnosti), podjednako djeluju na razvoj deformacija kolničke konstrukcije.

7 Analiza naprezanja i deformacija kolničke konstrukcije računalnim alatima

Analiza naprezanja i deformacija karakterističnoga presjeka kolničke konstrukcije za svaki pojedini sloj konstrukcije provodi se u okviru područja teorijskoga dimenzioniranja. Ono se temelji na usporedbi izračunatih naprezanja i deformacija s dopuštenim vrijednostima definiranim prema mjerodavnim kriterijima. No, kompleksnost te analize nalazi se u slojevitosti kolničkih konstrukcija. Slojevi tih konstrukcija izvode se od materijala vrlo različitih mehaničkih svojstava, a nije moguće niti precizno odrediti kontakt između slojeva. Asfaltni slojevi kolničke konstrukcije najelastičniji su materijal u tom sustavu te su najosjetljiviji na atmosferske utjecaje. Najkrući je sloj kolničke konstrukcije cementom stabilizirani nosivi sloj koji najteže podnosi deformacije, ali daje najveći doprinos u povećanju nosivosti konstrukcije. Nevezani nosivi sloj lako podnosi deformacije posteljice, a u njemu se ne razvijaju značajna unutarnja naprezanja. Osim navedenih materijala značajan utjecaj ima i deformacija posteljice, čiju deformaciju prati i nevezani nosivi sloj te stvara područja koncentracije naprezanja u cementom stabiliziranom nosivom sloju zbog krutosti toga materijala i znatno manjih elastičnih svojstava [8]. No, osim mehaničkih svojstava materijala na ponašanje kolničke konstrukcije utjecaj imaju i atmosferski uvjeti, intenzitet i struktura prometa, temeljno tlo i sl. [150].

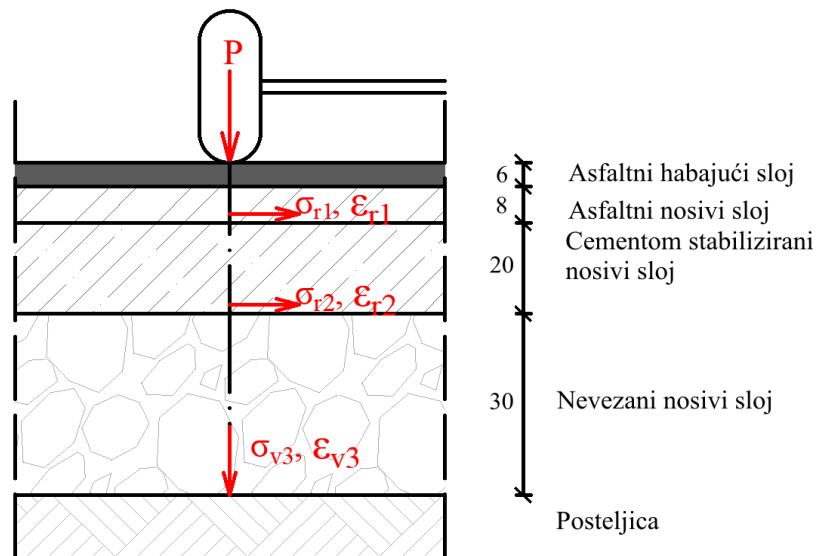
Prilikom analize ponašanja kolničke konstrukcije promatraju se dijelovi konstrukcije u kojima se očekuje nastanak oštećenja. Kao kritična mjesta na kojima dolazi do najveće akumulacije radijalnih vlačnih naprezanja pa samim time i najranijega otkazivanja konstrukcije navode se donja zona asfaltnih slojeva te donja zona cementom stabiliziranoga nosivog sloja. Treća vrijednost koju treba kontrolirati vertikalna je sila i vertikalno naprezanje na posteljici. Prema tome, predmet su analize radijalna vlačna naprezanja na donjoj površini asfaltnih slojeva, radijalna vlačna naprezanja na donjoj površini cementom stabiliziranoga nosivoga sloja i vertikalno tlačno naprezanje na posteljici. Uz naprezanja, analiziraju se i pripadajuće deformacije. Mjerodavni parametri takve analize radijalno su vlačno naprezanje na donjoj površini asfaltnih slojeva i cementom stabiliziranoga nosivog sloja te vertikalna deformacija posteljice. Karakterističan sustav kolničke konstrukcije s označenim parametrima analize prikazan je na slici 7.1.



Slika 7.1. Karakterističan presjek kolničke konstrukcije s parametrima analize ponašanja konstrukcije

Prikazane veličine moraju biti manje ili jednake dopuštenim veličinama kako ne bi došlo do otkazivanja nosivosti kolničke konstrukcije. Pri tome treba imati na umu kako do otkazivanja nosivosti konstrukcije dolazi prilikom otkazivanja nosivosti najslabijega sloja pa stoga naprezanja i deformacije svih slojeva trebaju biti manje ili jednake dopuštenima kako bi se konstrukcija smatrala zadovoljavajućom. Naprezanja i deformacije unutar kolničke konstrukcije mogu se izračunati raznim analitičkim metodama, ali pri tome postoji ograničenje u broju slojeva kolničke konstrukcije. Takvoga ograničenja nema prilikom korištenja specijaliziranih računalnih programa. Analitičke metode pružaju dijagrame koji su kreirani isključivo za jednu vrijednost Poissonova omjera materijala, dok on može varirati prilikom računalne analize. No, zbog potrebe poznavanja karakteristika svakoga pojedinog sloja nije jednostavno odrediti kritične vrijednosti naprezanja i deformacija. Za izračun koriste se općeprihvaćeni izrazi i empirijski dobivene vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti materijala, čvrstoće materijala te CBR posteljice.

S obzirom na to da se cementom stabilizirani nosivi sloj obično ugrađuje u ceste srednjega i teškoga te ceste vrlo teškoga prometnog opterećenja i autoceste, kao mjerodavno prometno opterećenje za dimenzioniranje kolničke konstrukcije, usvojeno je opterećenje na granici između teškoga i vrlo teškoga prometnog opterećenja koje iznosi 7×10^6 standardnih osovina. Za posteljicu usvojena je vrijednost kalifornijskoga indeksa nosivosti 6%, što odgovara uvjetima kontinentalne Hrvatske. Dimenzioniranje kolničke konstrukcije provedeno je prema normi *HRN U.C4.012*. [151], a usvojena kolnička konstrukcija prikazana je slikom 7.2.



Slika 7.2. Usvojena kolnička konstrukcija [cm]

Drugi ulazni parametar za analizu kontaktna je ploha između pneumatika vozila i kolnika. Oblik i površina kontaktne plohe ovise o inflacijskom tlaku i opterećenju kotača. Tu se uvodi pojednostavljenje i kao kontaktna ploha usvaja se kružna ploha radijusa (7.1):

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi \times p}} \quad (7.1)$$

Gdje su:

r – polumjer kontaktne plohe [m]

P – opterećenje od kotača [20,5 kN]

p – specifično opterećenje na kontaktnoj plohi [700 kN/m²]

Iz čega r iznosi 0,0966 m. Dakle, kružna površina izračunatoga radijusa korišten je kao kontaktna ploha pneumatika i asfaltnoga kolnika. Kao standardna osovina korištena je osovina s opterećenjem od 82 kN raspodijeljena na četiri kotača u jednakim iznosima. Opterećenje je podijeljeno na način da se na svakom kraju osovine nalazi par kotača međusobno udaljenih 35 cm. Osim prometnoga opterećenja i kontaktne plohe potrebno je definirati i karakteristike materijala kolničke konstrukcije. Iste karakteristike materijala korištene su u obje analize. S obzirom na to da vremenske prilike imaju velik utjecaj na asfaltna mješavine, definirana su mehanička svojstva materijala za 3 razdoblja u godini, zimu, proljeće/jesen i ljeto. Karakteristike materijala za različita razdoblja prikazane su u tablici 7.1. Za različita razdoblja u godini varirane su karakteristike samo asfaltnih materijala, dok ostali materijali nisu u

značajnoj mjeri podložni utjecajima vremenskih prilika. Dinamički modul elastičnosti cementom stabiliziranoga nosivog sloja variran je za svaku mješavinu prema rezultatima laboratorijskih ispitivanja prikazanim u potpoglavlju 4.7., dok su moduli ostalih materijala usvojeni temeljem inženjerskoga iskustva. Tijekom godine prometno opterećenje nije raspodijeljeno jednoliko te je sukladno tome prilikom proračuna prometno opterećenje raspodijeljeno u tri razdoblja: zimu, proljeće/jesen i ljeto - u iznosima 15%, 50% i 35%, kako je prikazano tablicom 7.2.

7.1. Mehaničke karakteristike materijala za različita razdoblja

Sloj	Debljina sloja [cm]	E_{din} [Mpa]			Poissonov omjer		
		Zima	Proljeće/jesen	Ljeto	Zima	Proljeće/jesen	Ljeto
AC Surf	6	6000	4000	2000	0.35	0.39	0.48
AC Base	8	5000	4000	3000	0.35	0.39	0.48
CNS	20	Varira			0.25	0.25	0.25
NNS	30	300	300	300	0.35	0.35	0.35
Posteljica	∞	60	60	60	0.40	0.40	0.40

7.2. Raspodjela prometnog opterećenja za različita razdoblja

Ukupno prometno opterećenje = $7 \cdot 10^6$		
Zima	Proljeće/jesen	Ljeto
15%	50%	35%
$1,05 \cdot 10^6$	$3,50 \cdot 10^6$	$2,45 \cdot 10^6$

U ovom će poglavlju ponašanje kolničke konstrukcije biti analizirano pomoću dva računalna alata. Jedan od alata - Circlly 6.0 - specijaliziran je za analizu ponašanja kolničkih konstrukcija, dok je drugi korišten alat – ANSYS - općenite namjene sa slobodnijim unosom podataka. No, za obje analize ulazni su parametri jednaki. Računalni program Circlly 6.0. proračun temelji na matematičkim modelima razvijenim empirijskim istraživanjem, a pomoću empirijskih transfer funkcija. Takve transfer funkcije definirane su za konvencionalne materijale, dok ne postoje za nekonvencionalne materijale kao što je cementom stabilizirani nosivi sloj s otpadnom gumom. Stoga te funkcije nisu korištene u ovoj analizi, već su pomoću računalnoga programa izračunati samo naprezanja i deformacije u kritičnim točkama kolničke konstrukcije nakon prijelaza jedne standardne osovine, a za daljnju analizu životnoga vijeka konstrukcije korišteni su izrazi

dostupni u literaturi za pojedine materijale. Životni vijek konstrukcije izražava se pomoću kumulativnoga faktora oštećenja (eng. *cumulative damage factor* – CDF) koji se pak računa pomoću Minerova pravila [106]. Pomoću toga pravila moguće je izračunati kumulativnu štetu uzrokovanu ponovljenim opterećenjem [152]. Kako prometno opterećenje nije jednoliko raspodijeljeno tijekom godine, potrebno je izračunati faktor oštećenja za svako razdoblje uzimajući u obzir predviđenu raspodjelu prometnoga opterećenja prema tablici 7.2. Ukoliko je $CDF < 1$, smatra se kako će konstrukcija izdržati predviđeno prometno opterećenje. Ako je $CDF = 1$, konstrukcija je doživjela slom na samom kraju predviđenoga projektnog razdoblja, no ukoliko je $CDF > 1$, projektirana konstrukcija neće doživjeti projektno razdoblje i doći će do otkazivanja kolničke konstrukcije prije prelaska predviđenoga broja vozila. Kumulativni faktor oštećenja računa se kao zbroj faktora oštećenja za sva razdoblja prema formuli (7.2):

$$CDF = \frac{n_{zima}}{N_{zima}} + \frac{n_{proljeće/jesen}}{N_{proljeće/jesen}} + \frac{n_{ljetno}}{N_{ljetno}} \quad (7.2)$$

Gdje su:

n_{zima} , $n_{proljeće/jesen}$, n_{ljetno} – predviđeni broj ponavljanja opterećenja u svakom razdoblju

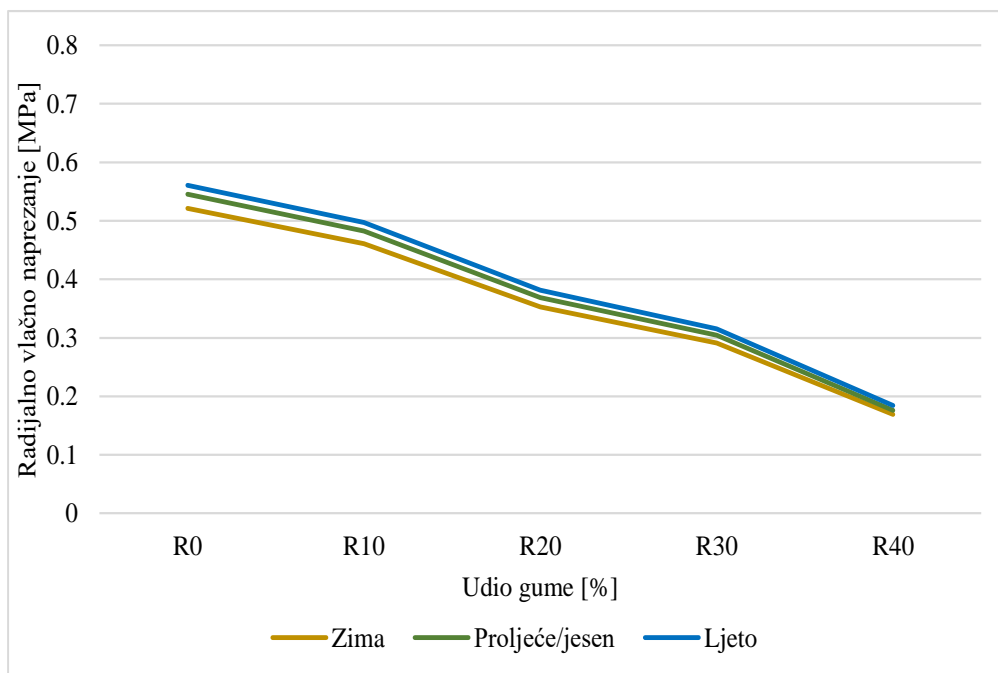
N_{zima} , $N_{proljeće/jesen}$, N_{ljetno} – dopušteni broj ponavljanja opterećenja

Naprezanja i deformacije dobivene računalnim programom potrebno je usporediti s dopuštenim vrijednostima. Pri tome će se, zbog kompleksnosti analize i velikoga broja pretpostavki, analizirati samo rezultati naprezanja razvijenih u cementom stabiliziranom nosivom sloju. Temeljem rezultata analize nakon opterećenja jednom standardnom osovinom, potrebno je koristiti empirijski dobivene matematičke modele za izračun kritičnoga broja prelaska osovina pri kojemu dolazi do otkazivanja pojedinoga materijala. Takvi modeli razvijaju se na studijama slučaja za specifična svojstva materijala. No, u ovom istraživanju poznata su samo mehanička svojstva CNS-a pa bi se izračun životnoga vijeka ostalih slojeva temeljio na velikom broju pretpostavljenih podataka. Nadalje, upravo su se u sloju CNS-a javila najveća naprezanja kao posljedica krutosti toga materijala. Dopuštena radijalna vlačna naprezanja na dnu cementom stabiliziranoga nosivog sloja prema [8] iznosi 0.5 vrijednosti vlačne čvrstoće materijala. ta se vrijednost odnosi na velik broj prijelaza standardnih osovina kakav je slučaj u ovom istraživanju. Za manje vrijednosti prometnoga opterećenja vlačna naprezanja određuju se iz odnosa dopustivoga naprezanja i statičke vlačne čvrstoće te prometnoga opterećenja, kako je prikazano dijagramom u knjizi [8]. Iznos od 50% vlačne čvrstoće predstavlja takozvanu trajnu čvrstoću materijala te ako su vrijednosti vlačnih naprezanja u sloju manji od polovice njegove

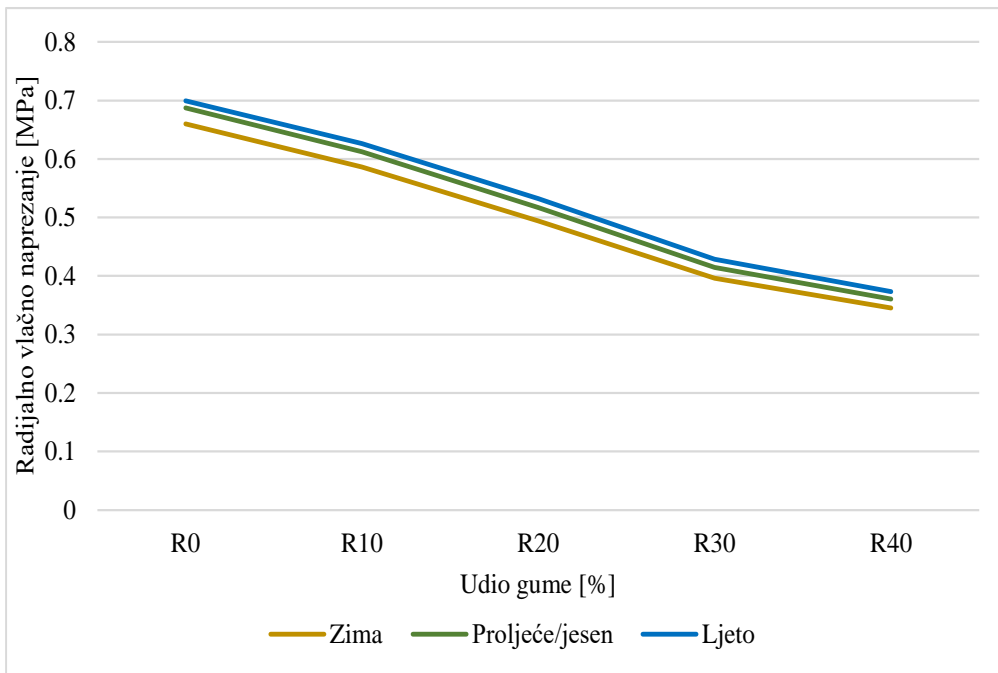
vlačne čvrstoće, smatra se kako prilikom ponavljajućega opterećenja neće doći do zamora materijala prije prelaska predviđenoga broja standardnih osovina preko karakterističnoga presjeka kolničke konstrukcije.

7.1 Analiza u računalnom programu Circly 6.0.

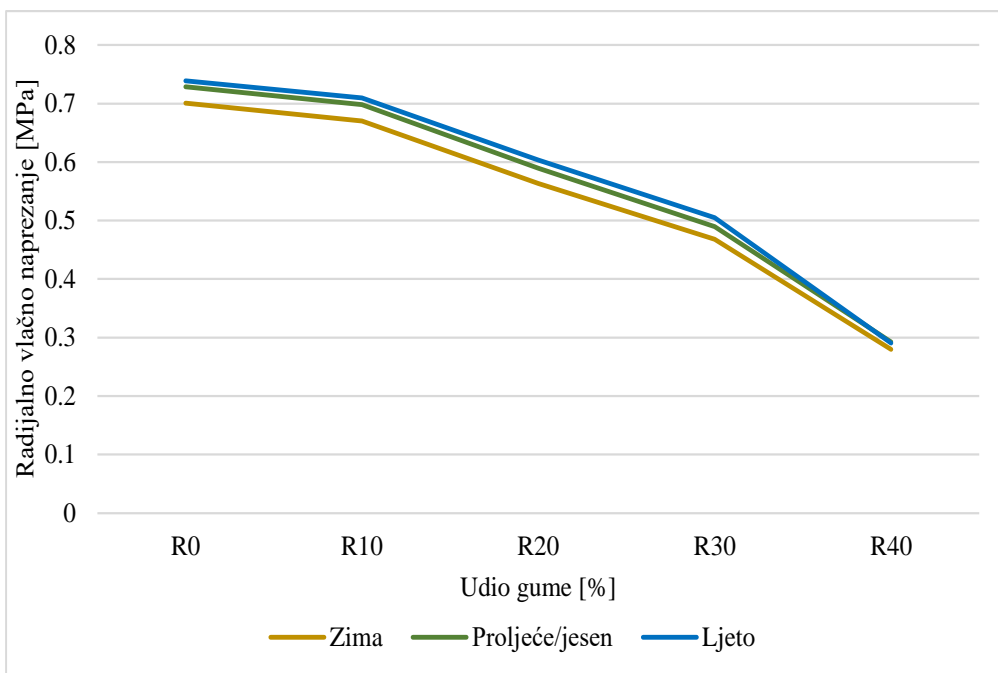
Računalni program Circly 6.0. specijaliziran je za analizu stanja naprezanja i deformacija kolničkih konstrukcija. Pri tome sadrži empirijske transfer funkcije za ugrađene materijale, no razvijen je za australsko tržište i njegove transfer funkcije razvijene su temeljem istraživanja u australskim uvjetima. No, s obzirom na to da je analizirano stanje naprezanja i deformacija samo nakon statičkoga opterećenja jednom standardnom osovinom, empirijske transfer funkcije nisu niti korištene. Inicijalna naprezanja za cementom stabilizirani nosivi sloj nakon prelaska jedne standardne osovine prikazane su slikom 7.3. za mješavine s 3% cementa, 7.4 za mješavine s 5% cementa, 7.5. za mješavine sa 7% cementa te 7.6. za mješavine s gumenim nitima.



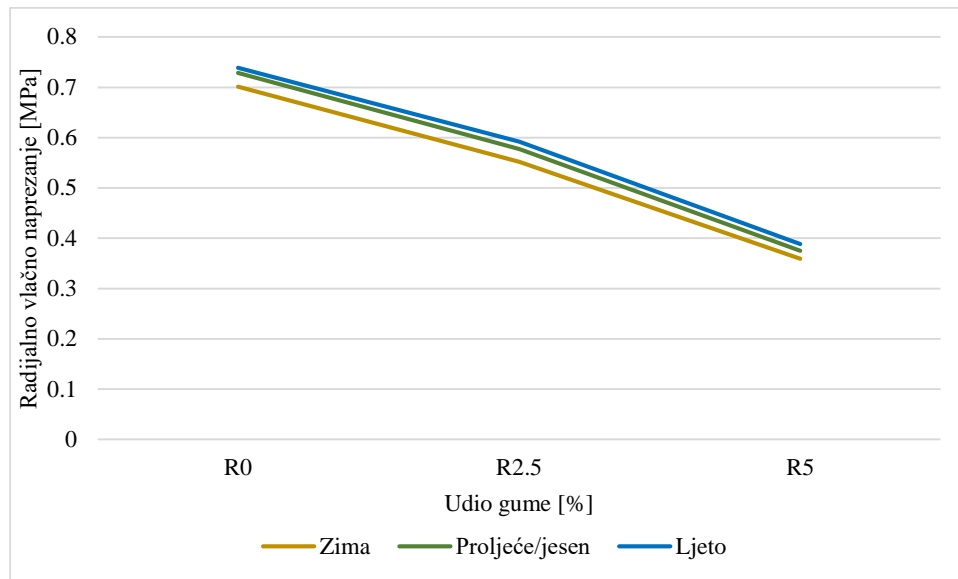
Slika 7.3. Inicijalna naprezanja u mješavinama s 3% cementa (CIRCLY 6.0)



Slika 7.4. Inicijalna naprezanja u mješavinama s 5% cementa (CIRCLY 6.0)



Slika 7.5. Inicijalna naprezanja u mješavinama sa 7% cementa (CIRCLY 6.0)



Slika 7.6. Inicijalna naprezanja u mješavinama s gumenim nitima (CIRCLY 6.0)

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti kako se najmanja inicijalna naprezanja razvijaju u mješavinama najmanje krutosti, onima s 3% cementa, a porast vrijednosti inicijalnih naprezanja raste s povećanjem krutosti mješavine. Isto tako, povećanje količine gume u mješavini uzrokuje smanjenje krutosti pa se s povećanjem gume u mješavini razvijaju manja inicijalna naprezanja. Mješavine su razvile najveća unutarnja naprezanja za ljetno razdoblje u kojemu je modul elastičnosti asfaltnih slojeva vrlo nizak te samim time preuzeta opterećenja u većoj mjeri prenosi na donje nosive slojeve. Prema prikazanim rezultatima može se zaključiti kako na ponašanje kolničke konstrukcije ponajviše utječe modul elastičnosti materijala. Trendovi kretanja inicijalnih naprezanja u CNS-u imaju isti oblik kao i trendovi kretanja dinamičkoga modula elastičnosti prikazani u potpoglavlju 4.7.

Za izračun životnoga vijeka cementom stabiliziranoga nosivog sloja korišten je sljedeći matematički model [153]:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_0} = 1,20 - 0,132 \times \log N_f \quad (7.3)$$

Gdje su:

σ_N – naprezanje pri maksimalnom broju opterećenja

σ_0 – naprezanje pri inicijalnom opterećenju

N_f – maksimalan broj opterećenja

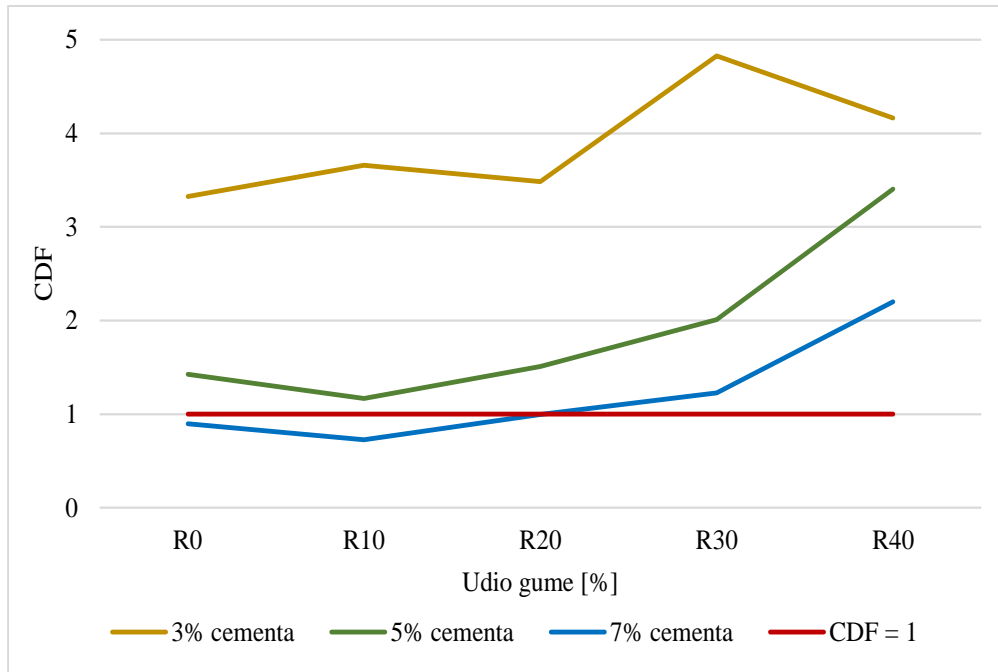
Rezultati radijalnih vlačnih naprezanja na donjoj površini cementom stabiliziranoga nosivog sloja uvršteni su kao inicijalno naprezanje u dani model, dok je kao maksimalan broj naprezanja uvrštena vrijednost predviđenoga prometnog opterećenja posebno za svako razdoblje prema tablici 7.2. Dobivene vrijednosti stavljene su u omjer s dopuštenim vlačnim naprezanjem za svako razdoblje te je kumulativni faktor oštećenja CNS-a izračunat kao zbroj tih omjera za sva tri razdoblja. Rezultati CDF-a za sve mješavine CNS-a prikazani su tablicom 7.3.

7.3. Kumulativni faktor oštećenja CNS – a (CIRCLY 6.0)

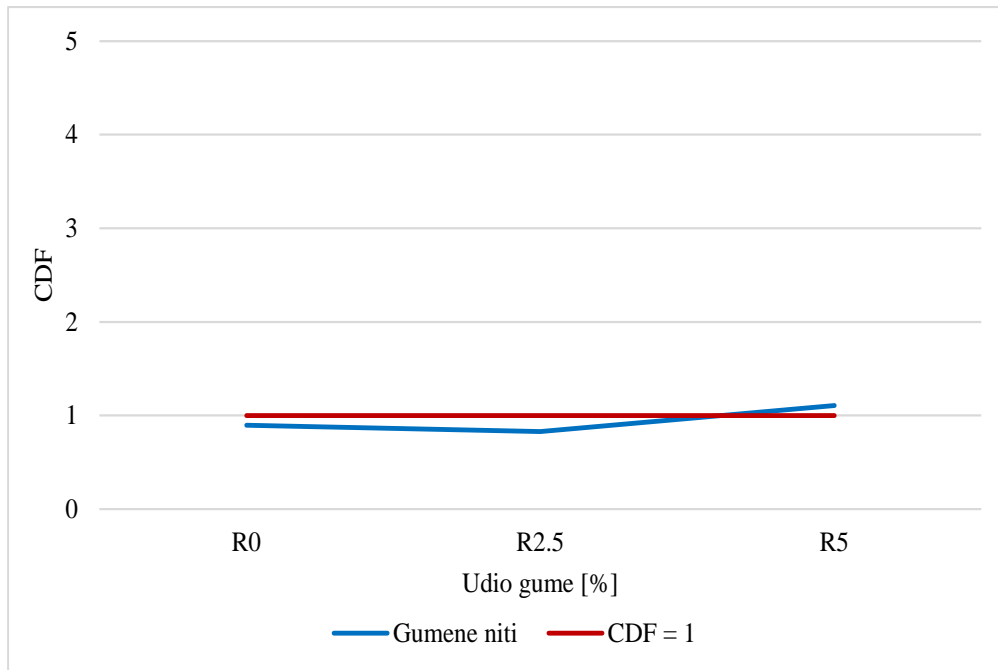
Mješavina	n/N			CDF
	Zima	Proljeće/jesen	Ljeto	
C3R0	1.18	1.03	1.12	3.33
C3R10	1.30	1.13	1.23	3.66
CR320	1.24	1.07	1.18	3.49
C3R30	1.71	1.48	1.63	4.83
C3R40	1.47	1.28	1.42	4.16
C5R0	0.51	0.44	0.48	1.43
C5R10	0.42	0.36	0.39	1.17
C5R20	0.54	0.47	0.51	1.51
C5R30	0.71	0.62	0.68	2.01
C5R40	1.21	1.05	1.15	3.40
C7R0	0.32	0.28	0.30	0.90
C7R10	0.26	0.23	0.24	0.73
C7R20	0.36	0.31	0.34	1.00
C7R30	0.44	0.38	0.41	1.23
C7R40	0.79	0.69	0.72	2.20
C7R2.5	0.29	0.26	0.28	0.83
C7R5	0.39	0.34	0.37	1.11

Prikazani kumulativni faktori oštećenja dobiveni analizom u računalnom programu Circlly 6.0. pokazuju kako će mješavine C7R0, C7R10 i C7R2.5 (označene crvenom bojom) preuzeti projektno prometno opterećenje bez otkazivanja sloja CNS-a, dok bi mješavina C7R20 (označena plavom bojom) doživjela projektno opterećenje nakon čega bi nastao slom. Ostale mješavine razvijaju kumulativni faktor oštećenja veći od 1, što znači kako bi došlo do otkazivanja sloja CNS-a prije doživljenja projektnoga životnog vijeka konstrukcije. Bez obzira što je tijekom zimskoga razdoblja pretpostavljeno najmanje prometno opterećenje, iz tablice 7.3. može se zaključiti kako su najveće vrijednosti faktora oštećenja razvijene upravo za to razdoblje. Takav je trend rezultat krutih asfaltnih slojeva u hladnom razdoblju koji preuzeta naprezanja u većoj mjeri prenose na nosive slojeve kolnika, dok tijekom toplijega razdoblja

svojim elastičnim svojstvima inhibiraju dio preuzetih naprezanja i prenose ih u manjoj mjeri na ostale slojeve konstrukcije. Postignute vrijednosti CDF-a s istaknutim graničnim CDF-om prikazane su i grafički slikama 7.7. za mješavine s granuliranom gumom i 7.8. za mješavine s gumenim nitima.



Slika 7.7. CDF mješavina s granuliranom gumom (CIRCLY 6.0)



Slika 7.8. CDF mješavina s gumenim nitima (CIRCLY 6.0)

Budući da je kriterij za ocjenu ponašanja cementom stabiliziranoga nosivog sloja njegova vlačna čvrstoća koja je i korištena u usvojenom modelu, rezultati CDF-a izravno su povezani s vlačnom čvrstoćom mješavina. Tako mješavine s najvećom vlačnom čvrstoćom prikazanom u potpoglavlju 4.5. postižu najniže vrijednosti kumulativnoga faktora oštećenja, odnosno razvijaju najbolju izdržljivost materijala izloženoga ponavljajućem opterećenju. Pri tome treba imati na umu kako vlačna čvrstoća nije korištena kao ulazni parametar prilikom izračuna inicijalnih napreznja u sloju, već samo za izračun kumulativnoga faktora oštećenja. Dakle, prilikom izračuna inicijalnih napreznja ulazni parametri za računalni program bili su Poissonov omjer te dinamički modul elastičnosti materijala. Vrijednosti i trend kretanja CDF-a s promjenom količine cementa i gume ne prati trend kretanja neizravne vlačne čvrstoće ili dinamičkoga modula elastičnosti što je rezultat djelovanja cijele konstrukcije i interakcije CNS-a s ostalim slojevima. Neizravna vlačna čvrstoća korištena je kao kriterij ocjene, dok je dinamički modul elastičnosti korišten kao ulazni parametar u ovoj analizi. Time se pokazuje kako je vrlo važno, osim ispitivanja na razini materijala, konstrukciju promatrati u cijelosti. Grafički prikazani rezultati u skladu su s rezultatima deformacija sustava kolničke konstrukcije prikazanim u poglavlju 6. Naime, mješavine s 3% cementa razvile su najveće deformacije, a CDF pokazuje najveće vrijednosti upravo za te mješavine, što ukazuje na to da bi te mješavine najranije doživjele slom, odnosno kritično opterećenje prilikom kojega dolazi do popuštanja materijala. Osim toga, mješavine s 5% i 7% cementa razvijaju manje deformacije prikazane u poglavlju 6. te je razlika između trendova kretanja deformacija mješavina s 5% i 7% cementa manja u odnosu na razliku mješavina s 3% i 5% cementa. Takav trend može se uočiti i kod CDF-a mješavina s 5% i 7% cementa. Linije trendova na manjem su međusobnom razmaku u odnosu na liniju trenda kretanja CDF-a mješavina s 3% cementa.

7.2 Analiza u računalnom programu ANSYS

Ista analiza kao u potpoglavlju 7.1 provedena je i računalnim programom ANSYS. Taj je program općenite namjene te nije specijaliziran i verificiran za područje analize ponašanja kolničkih konstrukcija. Samim time ne sadrži empirijske transfer funkcije za cestograđevne materijale te je, isto kao i Circlly 6.0 u prethodnom potpoglavlju, korišten samo za izračun inicijalnih napreznja i deformacija. Taj se program temelji na metodi konačnih elemenata te istraživaču daje veću slobodu unosa svojstava materijala, oblika opterećenja, kontakta između različitih materijala i rubnih uvjeta. Prilikom karakterizacije materijala korišteni su ulazni parametri navedeni u poglavlju 7., a osnovnu razliku te analize u odnosu na analizu u prikazanu

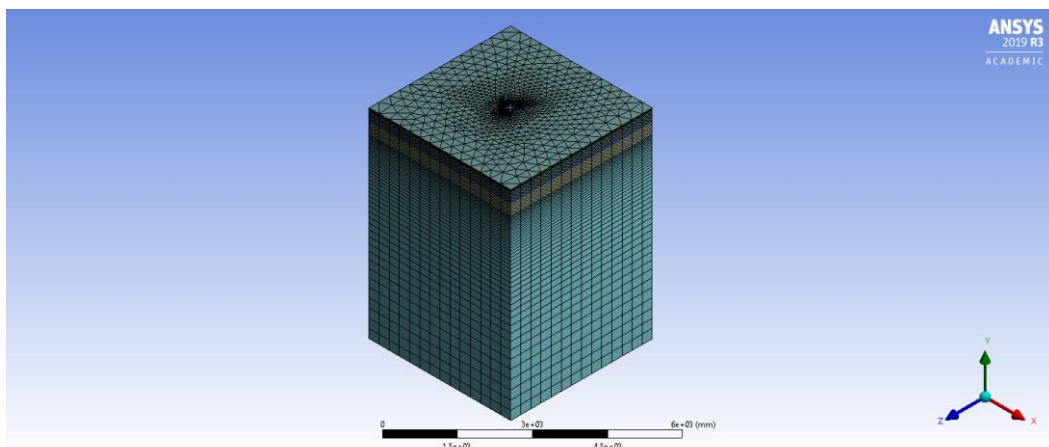
u potpoglavlju 7.1. čini karakterizacija materijala pomoću vlačne čvrstoće. Dakle, osim dinamičkoga modula elastičnosti i Poissonova omjera svakom sloju kolničke konstrukcije pridružena je i vlačna čvrstoća materijala pri čemu je ona varirana za svaku mješavinu cementom stabiliziranoga nosivog sloja. Neizravna vlačna čvrstoća svake mješavine prikazana je u potpoglavlju 4.5. Oblik opterećenja usvojen je kao i kod prethodne analize, dakle kružna ploha radijusa 0,0966 m.

Cijeli model treba biti dovoljno velik kako bi mogao u cijelosti distribuirati naprezanja, a raspodjela gustoće mreže konačnih elemenata treba biti takva da omogući što točnije očitavanje. Ukoliko je mreža konačnih elemenata prerijetka, distribucija naprezanja neće biti dostatno točna, što ne znači da treba težiti da mreža točaka bude što gušća. Kod gušće raspodjele dolazi do velikih zahtjeva za znatnim računalnim resursima koji bi mogli obraditi vrlo veliku količinu podataka te postoji mogućnost pojave takozvane koncentracije naprezanja. Stoga, treba stvoriti model dovoljne točnosti, a s druge strane racionalan u vidu količine podataka. Autori Beskou i drugi [154] stvorili su 3D model oblika kvadra za proračun utjecaja prometnoga opterećenja. Njihov model ograničen je na linearno elastično ponašanje materijala. Autori također naglašavaju kako je potrebno pronaći kompromis između točnosti i efikasnosti modela. Materijale u modelu potrebno je i okarakterizirati na odgovarajući način. Tako su autori Melaku i Hongsheng [155] asfaltne slojeve te sloj cementom stabiliziranoga materijala okarakterizirali kao plastično-kinematičke, dok su temeljno tlo okarakterizirali kao viskoelastičan materijal. Isti autori naglašavaju i kako je pomoću programa ANSYS moguće izračunati posmična naprezanja unutar kolničke konstrukcije. Konačni elementi korišteni u navedena dva rada jesu kvadri s 8 stupnjeva slobode, dok su autori Yanov i Zelepugin [156] koristili trokutaste konačne elemente. Vrlo je važno i definiranje oblika i površine kontaktne plohe između pneumatika i kolnika. Tako su autori Mulungye i drugi [157] izmjerili kontaktnu plohu pri tri različita inflacijska tlaka u gumama te tri različita opterećenja. Kao rezultat dobili su prosječnu kontaktnu plohu sastavljenu od pravokutnika i dvije polukružnice ukupne duljine L i širine $0,6L$, koju su za potrebe proračuna pojednostavili u pravokutnik dimenzija $0,8712L$ i $0,6L$. Pravokutnu kontaktnu plohu u modeliranju koristili su i autori Liu i drugi te Jiang i drugi [158,159]. No, zbog usporedivosti rezultata u toj analizi zadržana je kružna kontaktna ploha kao u analizi računalnim programom Circly 6.0. Autori su u radu [158] koristili tri računalna programa za izračun mehaničke reakcije kolničke konstrukcije, Bisar, EasyFM i ABAQUS. Pri tome ti se programi temelje na različitim numeričkim metodama. Bisar se temelji na teoriji elastičnosti slojeva (eng. *Layer Elastic Theory – LET*), EasyFM na teoriji konačnih slojeva (eng. *Finite*

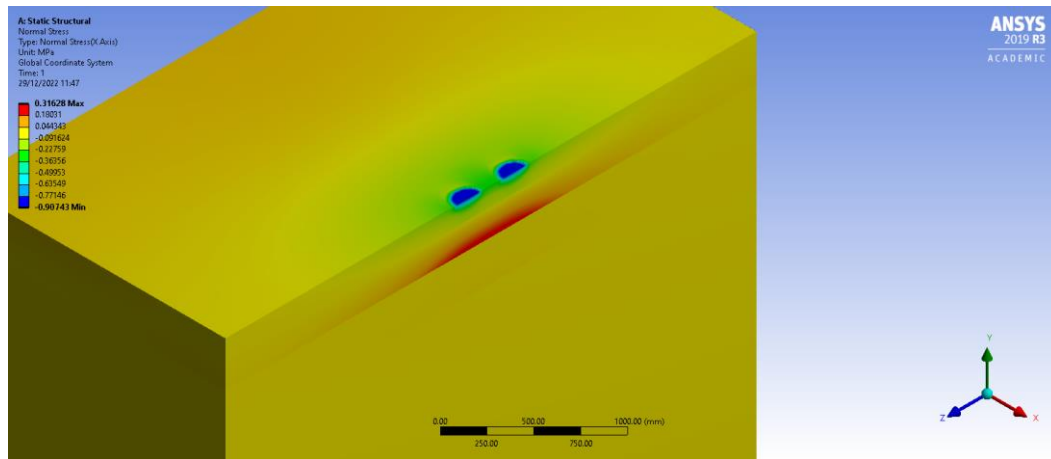
Layer Method – FLM), a ABAQUS na teoriji konačnih elemenata (eng. *Finite Element Method* – FEM). Zaključili su kako su rezultati dobiveni pomoću druga dva navedena programa međusobno sukladni, dok kod rezultata dobivenih programom BISAR dolazi do odstupanja zbog unutarnjih ograničenja kao što je unos kružnoga opterećenja, beskonačna širina i dužina slojeva te beskonačna dubina temeljnoga tla. Takvi zaključci upućuju na nefleksibilnost i ograničenost specijaliziranoga alata. Među korištenim softverima upravo je BISAR namijenjen analizi kolničkih konstrukcija. U toj komparativnoj analizi EasyFM pokazao se najbržim alatom za analizu ponašanja konstrukcije, što naglašava da se prilikom odabira alata treba voditi računa i o računalnim kapacitetima i vremenu potrebnom za provedbu analize. Numeričku analizu običnoga i inverznoga asfaltnog kolnika u programu ABAQUS proveli su autori Jiang i drugi [159], dok su za validaciju koristili specijalizirani program GTPAVE. Prilikom modeliranja koristili su C3D8 vrstu konačnoga elementa. Takav model pokazao se odgovarajućim s razlikama do 15% u usporedbi s modelom napravljenim u softveru GTPAVE. Nadalje, autori Wu i Chew [160] koristili su dva programska paketa unutar programskoga alata ANSYS za modeliranje konstrukcije izložene eksploziji. Za simulaciju širenja valova uzrokovanih eksplozijom koristili su AUTODYN, dok je za simulaciju kolničke konstrukcije korištena LSDYNA. Pri tome su modelirali dvije konstrukcije od koje je jedna vrlo složena, a sastoji se od asfalta, cementnih kompozita, geomreže te temeljnoga tla. Rezultati su pokazali vrlo veliko poklapanje stvarnoga ispitivanja s rezultatima dobivenima numeričkim modelom. Autori Wang i drugi [161] čak su modelirali i automobilsku gumu s nejednolikom površinom te su analizirali mehanički odziv asfaltnoga kolnika pri dinamičkom opterećenju. No, s druge strane, autori Chen i drugi [162] usporedili su rezultate dobivene provođenjem pokusa u kojemu je korišteno prometno opterećenje s 2D modelom pod različitim pokretnim opterećenjima. Pri tome koristili su platformu PFC5.0^{2D} te dobili odgovarajuće preklapanje rezultata. Taj rad dokazuje kako prilikom kreiranja modela treba biti racionalan te kako nije potrebno u prevelikoj mjeri ulaziti u modeliranje svake komponente, već se može poslužiti pojednostavljenjima gdje je to inženjerski racionalno. Takvi modeli trebaju biti i kreirani tako da ih mogu koristiti inženjeri s optimalnim utroškom vremena te ne bi smjeli izlaziti iz okvira inženjerskoga znanja. Potreba za definiranjem transfer funkcija kako bi se u obzir uzele razlike u krutosti laboratorijskih i terenskih uzoraka koje nastaju kao posljedica razlika u metodama zbijanja i prijenosu opterećenja pokazala se u radu [163] prilikom usporedbe numeričkih modela u kojima su varirani rezilijentni moduli materijala. Autori zaključuju kako bi te transfer funkcije trebale biti u funkciji količine vlage u vremenu zbijanja te vremenu provođenja ispitivanja. Autori Lak

i drugi [164] istražili su prikladnost numeričkoga modela za potrebe predviđanja širenja vibracija kroz temeljno tlo prilikom drobljenja betonske ploče krutoga kolnika. Pri tome nelinearni se model pokazao prikladnijim, dok linearni model pokazuje kako zanemarivanjem nelinearnoga ponašanja dolazi do precjenjivanja razine vibracija u tlu. U svojoj analizi 12 različitih numeričkih modela kolničkih konstrukcija, autori Selsal i drugi [165] zaključuju kako se smanjenjem debljine slojeva unutarnja naprežavanja povećavaju te kako se čvrstoća materijala smanjuje s vremenom ovisno o klimatskim utjecajima i ponavljajućem prometnom opterećenju.

U računalnom programu ANSYS za potrebe ovoga istraživanja modelirana je četverslojna kolnička konstrukcija na posteljici od glinovitoga materijala. Karakteristike i debljine slojeva konstrukcije istovjetne su onima u prethodnoj analizi. Kreirani model prikazan je slikom 7.9. Posteljica je modelirana kao sloj debljine 5 metara pod pretpostavkom kako se naprežavanja od opterećenja neće razvijati na većim dubinama. Na slici 7.10. vidljiva je kontaktna ploha između dva kotača osovine na međusobnom razmaku od 350 mm.



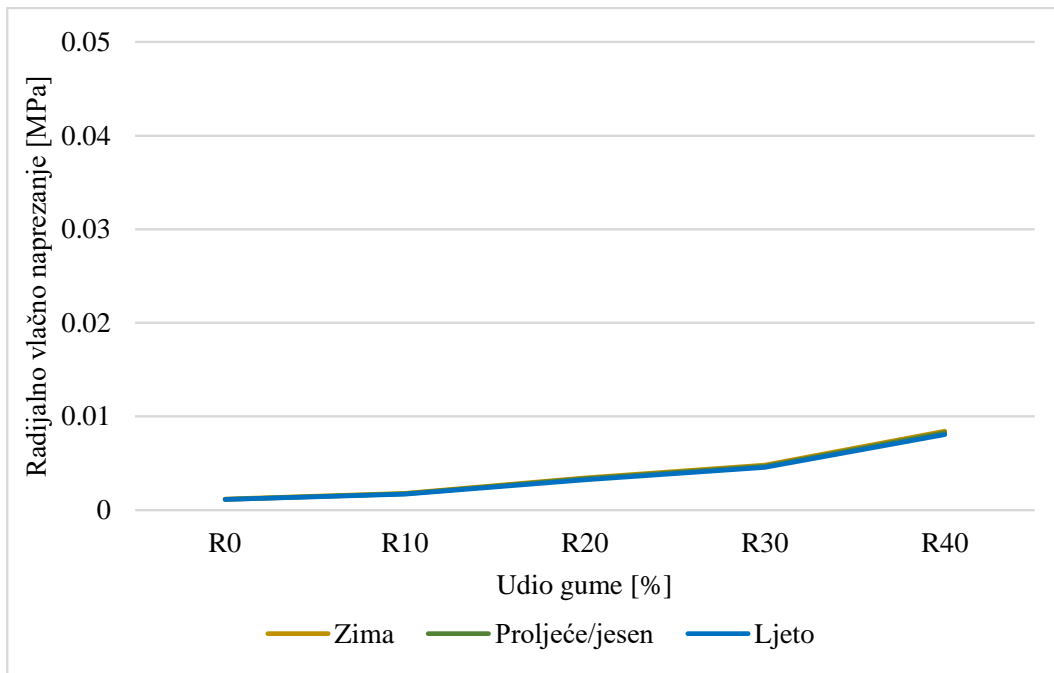
Slika 7.9. Kreirani model kolničke konstrukcije



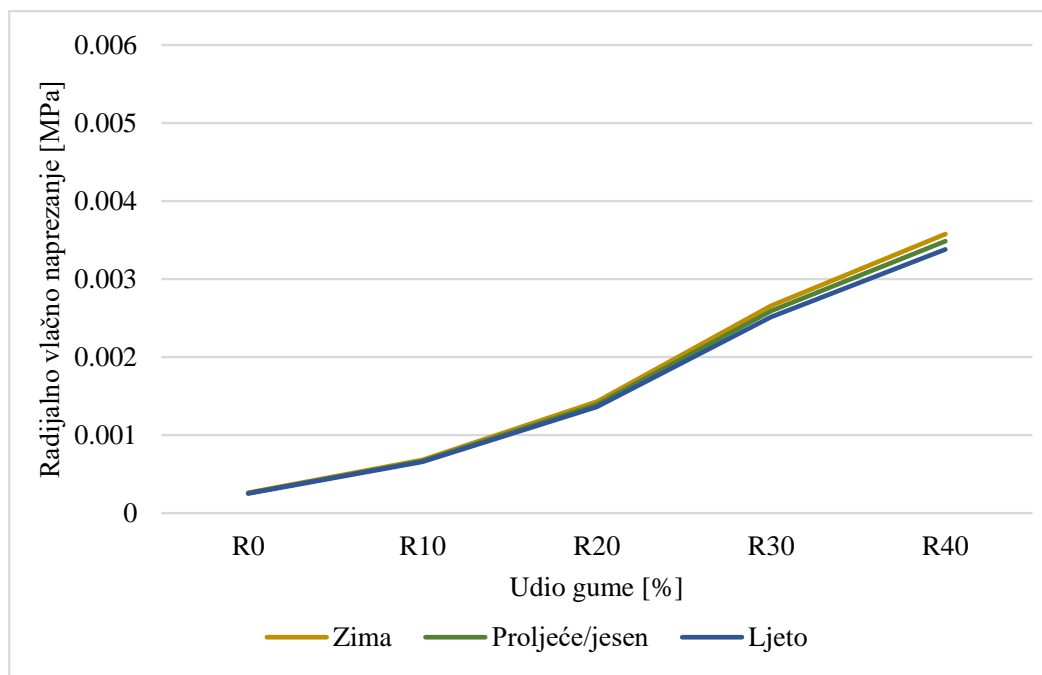
Slika 7.10. Prikaz kontaktne plohe raspodjele naprezanja unutar slojeva

Za modeliranje kolničke konstrukcije korišteni su volumenski konačni elementi SOLID186 definirani s 20 točaka s tri stupnja slobode (translacija u x, y i z smjeru). Ukupan broj konačnih elemenata modela kolničke konstrukcije je 183510, dok je broj točaka 327332. Kod stvaranja mreže korištena je funkcija promjene gustoće na mjestima unosa opterećenja – mreža je ondje gušća od područja u kojima nema velikih skokova u naprezanju, što povećava učinkovitost rješavanja i točnost rješenja. Svi slojevi kolničke konstrukcije modelirani su izotropnim elastičnim modelom ponašanja materijala. Opterećenje osovine zadano je preko kontaktnih ploha kao jednoliki tlak u iznosu od $0,699 \text{ N/mm}^2$. S aspekta rubnih uvjeta – na bočnim stranama modela spriječene su translacije u odgovarajućim smjerovima, dok su na dnu posteljice spriječene translacije u svim smjerovima. Veza između pojedinih slojeva kolničke konstrukcije pretpostavljena je kao idealna bez mogućnosti prodiranja, odvajanja ili klizanja između kontaktnih površina (eng. *bonded contact type*).

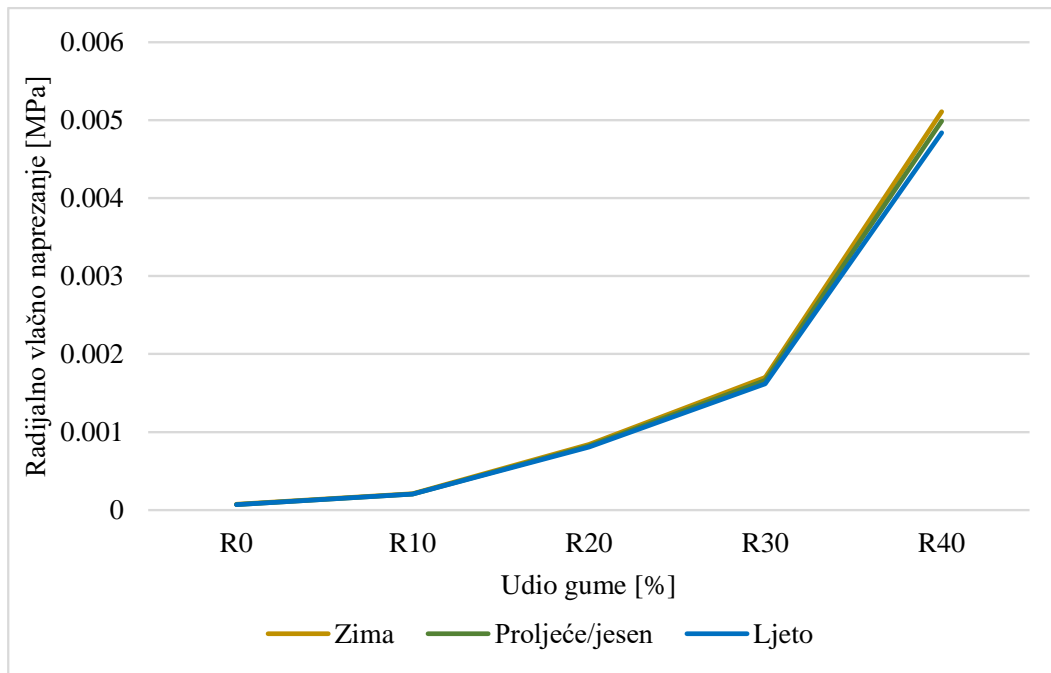
I u ovoj analizi bit će prikazana naprezanja samo u cementom stabiliziranom nosivom sloju s obzirom na veliku količinu podataka i fokus istraživanja. Rezultati inicijalnih naprezanja cementom stabiliziranoga nosivog sloja izračunatih u programu ANSYS prikazani su slikama 7.11., 7.12. i 7.13. za mješavine s 3%, 5% i 7% cementa te 7.14. za mješavine s gumenim nitima.



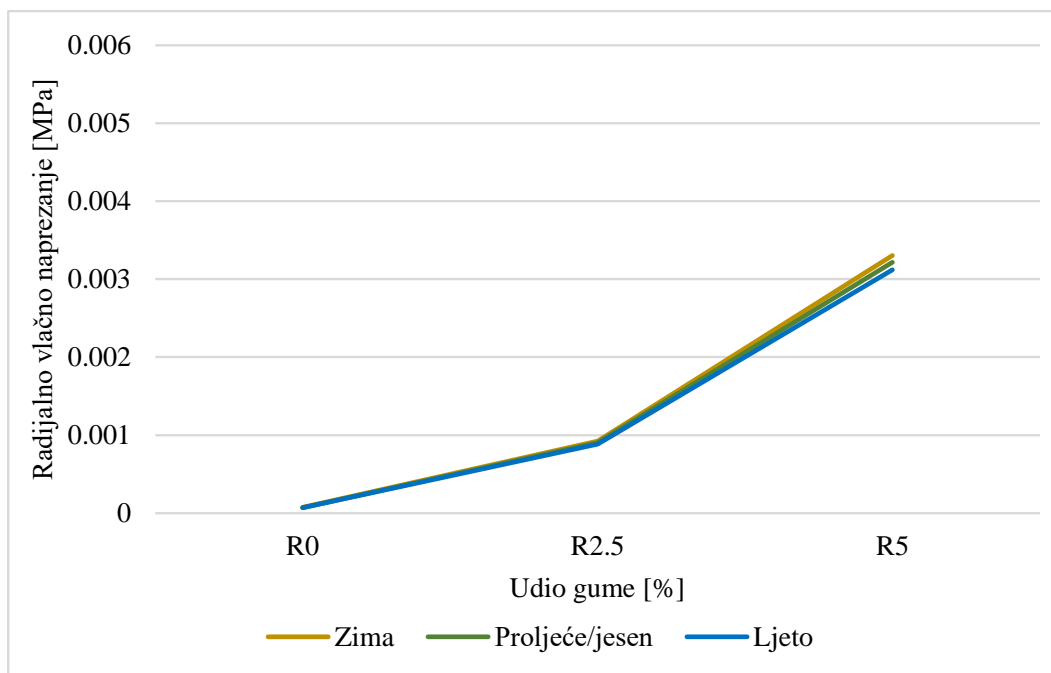
Slika 7.11. Inicijalna vlačna naprezanja mješavina s 3% cementa (ANSYS)



Slika 7.12. Inicijalna vlačna naprezanja mješavina s 5% cementa (ANSYS)



Slika 7.13. Inicijalna vlačna naprezanja mješavina sa 7% cementa (ANSYS)



Slika 7.14. Inicijalna vlačna naprezanja mješavina s gumenim nitima (ANSYS)

Rezultati radialnih vlačnih naprezanja dobiveni tom analizom uvelike se razlikuju od rezultata dobivenih analizom pomoću specijaliziranoga programa Circlly 6.0. Inicijalna vlačna naprezanja u toj analizi znatno su manja, gotovo zanemariva. Tako za mješavine s 3% cementa naprezanja ne prelaze vrijednost 0.01 MPa, a upravo te mješavine razvijaju najveća naprezanja uslijed najmanje krutosti. Povećanjem količine cementa na 5% i 7%, inicijalna naprezanja

dosežu vrlo male vrijednosti do 0.005 MPa. Pri tome, veća se naprezanja javljaju u mješavinama sa 7% cementa, u odnosu na mješavine s 5% cementa. Takav rezultat posljedica je utjecaja dinamičkoga modula elastičnosti i neizravne vlačne čvrstoće. U prethodnoj analizi pokazalo se kako povećanjem krutost mješavine dolazi do smanjenja inicijalnih naprezanja, no u ovoj analizi u obzir je uzeta i vlačna čvrstoća materijala pa dolazi do istovremenoga učinka više parametara. Nadalje, ovom se analizom pokazalo kako razdoblje u godini ne utječe znatno na razvoj naprezanja u stabilizacijskom sloju. Takav je rezultat suprotan očekivanjima temeljenim na inženjerskom znanju. Neznatna osjetljivost materijala na vremenske utjecaje moguća je posljedica karakteriziranja materijala u programu ANSYS na jednak način. Naime, računalni program Circlly 6.0 na različite načine karakterizira različite materijale. Pri analizi taj program karakterizira asfaltne slojeve i stabilizacijski sloj kao izotropne materijale, dok nevezani nosivi sloj i posteljicu karakterizira kao anizotropne materijale. Također, Circlly 6.0 uzima u obzir i raspucavanje cementom stabiliziranoga nosivog sloja čime dolazi do smanjenja modula elastičnosti. U [8] je dana preporuka da se prilikom teorijskoga dimenzioniranja kolničke konstrukcije dinamički modul elastičnosti cementom stabiliziranoga materijala umanjuje za određenu vrijednost upravo zbog simulacije realnih uvjeta. U prethodnom istraživanju dokazano je kako bi prilikom mehaničko-empirijske analize kolničkih konstrukcija trebalo uvesti korekciju statičkoga modula elastičnosti u iznosu 10% – 15% [166].

Rezultati ove analize pokazuju i kako je utjecaj povećanja količine gume na inicijalna naprezanja suprotan onome dobivenom u prethodnoj analizi. Naime, povećanje gume dovodi do povećanja inicijalnih naprezanja unutar stabilizacijskoga sloja, što je u skladu s očekivanjima jer povećanje gume uzrokuje smanjenje čvrstoće i krutosti mješavine. Trendovi kretanja inicijalnih naprezanja gotovo su linearni do količine gume od 40% gdje dolazi do skoka naprezanja. Ta je pojava osobito uočljiva kod najkrućih mješavina, onih sa 7% cementa. Time se može potvrditi ranije izveden zaključak kako je količina od 40% gume prevelika za korištenje u ispitanim mješavinama. Vrlo je velik porast naprezanja i u mješavinama s gumenim nitima s povećanjem količine gume, što je rezultat značajnoga smanjenja vlačne čvrstoće s dodatkom i male količine gumenih niti.

Za izračun kumulativnoga faktora oštećenja temeljem analize provedene u računalnom programu ANSYS korišten je isti model kao i u prethodnoj analizi prikazan formulom (7.3). Rezultati kumulativnoga faktora oštećenja dobiveni tom analizom prikazani su u tablici 7.4.

7.4. Kumulativni faktor oštećenja CNS-a (ANSYS)

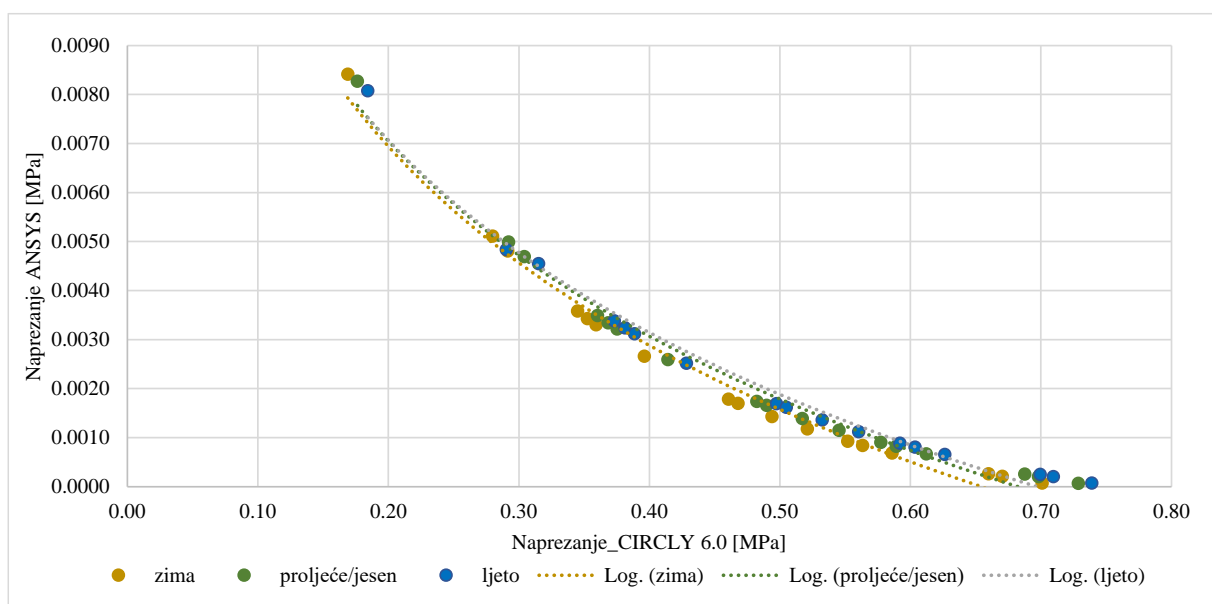
Mješavina	n/N			CDF
	Zima	Proljeće/jesen	Ljeto	
C3R0	0.00	0.00	0.00	0.01
C3R10	0.01	0.00	0.00	0.01
CR320	0.01	0.01	0.01	0.03
C3R30	0.03	0.02	0.02	0.07
C3R40	0.07	0.06	0.06	0.20
C5R0	0.00	0.00	0.00	0.00
C5R10	0.00	0.00	0.00	0.00
C5R20	0.00	0.00	0.00	0.00
C5R30	0.00	0.00	0.00	0.00
C5R40	0.01	0.01	0.01	0.03
C7R0	0.00	0.00	0.00	0.00
C7R10	0.00	0.00	0.00	0.00
C7R20	0.00	0.00	0.00	0.00
C7R30	0.00	0.00	0.00	0.00
C7R40	0.01	0.01	0.01	0.04
C7R2.5	0.00	0.00	0.00	0.00
C7R5	0.00	0.00	0.00	0.01

Kumulativni faktori oštećenja u toj su se analizi pokazali vrlo malima i smatra se da ne odgovaraju stvarnim uvjetima. Iz dobivenih vrijednosti te analize može se zaključiti kako ne bi došlo do sloma konstrukcije nakon projektnoga opterećenja. S obzirom na to da su analizirane i kolničke konstrukcije s mješavinama CNS, koje ne zadovoljavaju zahtjeve tlačne čvrstoće prema *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3], a prema rezultatima preživjele bi projektno prometno opterećenje, može se reći kako stvoren model ne reflektira dobro stvarne uvjete te kako je potrebno dodatno detaljizirati razvijeni model.

7.3 Verifikacija rezultata dobivenih računalnim programima CIRCLY 6.0 i ANSYS

Prethodne analize pokazale su znatne razlike u ponašanju kolničke konstrukcije analizirane pomoću dva različita računalna programa. Kao mogući uzroci različitih rezultata utvrđeni su različito definiranje materijala s obzirom na unutarnji prijenos opterećenja, definiranje kontakta između slojeva, mogućnost specijaliziranoga programa za umanjenje krutosti cementom stabiliziranoga nosivog sloja kao posljedice raspucavanja uslijed hidratacije cementa i ograničenost veličine modela u nespecijaliziranom programu. Naime, računalni program Circly

6.0 djeluje prema *black box* principu prema kojem korisnik ne zna mnogo o tome što se događa između unosa ulaznih parametara i krajnjega rezultata, a tome još više doprinosi upotreba empirijskih transfer funkcija u proračunu i provedenoj kalibraciji proračuna. S druge strane, ANSYS je znatno složeniji programski paket koji simulira ponašanje isključivo na temelju unesenih parametara koji je znatno veći u odnosu na Circly 6.0. Dodatno, analizi u programu ANSYS potrebno je dodati komponentu atmosferskih i vremenskih utjecaja koji mogu biti utvrđeni samo empirijski. No, izračunata radijalna vlačna naprezanja na donjoj površini CNS-a u oba programa međusobno su povezana logaritamskom vezom za sva tri analizirana razdoblja. Slikom 7.15. prikazane su veze između tih veličina.



Slika 7.15. Veza između napreznja u CNS-u izračunatih pomoću dva računalna programa

Kako je već ranije utvrđeno, dvije provedene analize pokazuju suprotne trendove kretanja vrijednosti unutarnjih napreznja s povećanjem količine gume u mješavini. Iz slike 7.15. može se zaključiti kako se za veće napreznje izračunato programom CIRCLY 6.0 može očekivati manje napreznje izračunato programom ANSYS. Također je vidljivo kako odnos napreznja ima isti trend za sva tri analizirana vremenska razdoblja. Kao zaključak može se istaknuti kako analiza napreznja unutar kolničke konstrukcije nespecializiranim alatom zahtijeva znatna znanja i razumijevanje programskog alata te značajnije računale resurse u odnosu na korištenje specializiranoga alata. Također, ovaj postupak zahtijeva više vremena za analizu. No, prilikom korištenja specializiranih računalnih alata treba imati na umu da su oni razvijeni za određene uvjete neke lokacije te su ograničeni na usko područje analize.

7.4 Zaključno

Provedena numerička analiza pokazuje kako na stanje naprezanja i deformacija cementom stabiliziranoga sloja kolničke konstrukcije najviše utječe krutost toga materijala, odnosno vrijednost dinamičkoga modula elastičnosti. Povećanje gume u mješavini uzrokovalo je povećanje inicijalnih naprezanja u stabilizacijskoj mješavini, što je rezultat smanjenja čvrstoće tih mješavina. Provedena analiza u nespecijaliziranom programskom alatu ukazuje na potrebu uključivanja više parametara prilikom analize. Tako bi umjesto mehaničkih karakteristika materijala trebalo u obzir uzeti i atmosfere uvjete, utjecaj puzanja materijala i sl., a do tih podataka moguće je doći samo empirijski. Za kvalitetnu analizu stanja naprezanja i deformacija u slojevima kolničke konstrukcije nespecijaliziranim programskim alatom potrebno je stručno znanje i značajni računalni i vremenski resursi.

8 Vrednovanje cementom stabiliziranog nosivog sloja s otpadnom gumom

U ovom poglavlju bit će kreiran sustav vrednovanja mješavina cementom stabiliziranoga nosivog sloja s otpadnom gumom uzimajući u obzir zahtjeve za te mješavine definirane *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3], ali i druga svojstva ispitana u ovom istraživanju. Prvi korak laboratorijskih istraživanja jest projektiranje granulometrijskoga sastava mješavine. Otpadna guma dostupna na tržištu Republike Hrvatske nalazi u najvećoj mjeri u finim frakcijama čija je nominalna veličina zrna manja od agregata cementom stabiliziranoga nosivog sloja kolnika. Stoga je preporučeno odabir granulometrijskoga sastava mješavine tip 4 definiran normom *HRN EN 14227 – 1* [92] za koji nisu postavljeni zahtjevi, već proizvođač sam definira donju i gornju granicu područja granulometrijskoga sastava mješavine. Otpadna guma nije materijal čija je upotreba u nosivim slojevima kolnika uobičajena i ne treba njezinu primjenu ograničavati okvirima postavljenim za konvencionalne materijale. Projektiranim mješavinama određeni su Proctorovi elementi, preciznije, optimalna vlažnost i maksimalna suha prostorna masa. Rezultati provedenih ispitivanja pokazali su kako je utjecaj gume na optimalnu vlažnost mješavine neznatan te da je glavni utjecajni činitelj na optimalnu vlažnost mješavine količina cementa. Stoga, prilikom dodavanja gume mješavini CNS-a nije potrebno provoditi postupak određivanja optimalne vlažnosti, već se može usvojiti optimalna vlažnost definirana za referentnu mješavinu kojoj je guma dodana.

Prema *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] mješavine CNS-a trebaju zadovoljiti dva zahtjeva: tlačna čvrstoća i otpornost na smrzavicu. Postavljeni su zahtjevi za tlačnu čvrstoću nakon 7 i 28 dana njege, no rezultati ovoga ispitivanja pokazali su kako kemijski sastav gume utječe na proces hidratacije cementa i ispitivanje tlačne čvrstoće nakon produljenoga vremena njege (90 dana) dalo je dodatan uvid na utjecaj otpadne gume na čvrstoću tih mješavina. Opće je poznato da je razvoj čvrstoće vremenski uvjetovan proces, no može se zaključiti kako su postavljeni zahtjevi ograničavajući te kako se kod mješavina s gumom treba postaviti uvjete i za zadovoljenje tlačne čvrstoće nakon 90 dana zbog odgođenoga razvoja čvrstoće uvjetovanoga kemijskim sastavom gume. Zahtjevi za tlačnu čvrstoću mješavina CNS-a nisu postavljeni *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama*, no norma *HRN EN 14227 – 1* [92] predviđa karakterizaciju materijala pomoću izravne ili neizravne tlačne čvrstoće. Zbog jednostavnosti provedbe postupka ispitivanja i korištenja iste opreme kao i za ispitivanje tlačne čvrstoće preporuča se ispitivanje tlačne čvrstoće neizravnom metodom. Rezultati ovoga istraživanja

pokazuju kako se dodatkom gume povećava udio vlačne čvrstoće u tlačnoj čvrstoći, što je pozitivan učinak s obzirom na to da su kritična naprezanja u tom sloju radijalna vlačna naprezanja. Stoga se preporuča ispitivanje i toga svojstva te postavljanje zahtjeva za udio vlačne u tlačnoj čvrstoći. Također, prilikom upotrebe novih materijala treba težiti povećanju toga udjela.

Ocjena mješavina CNS-a pomoću modula elastičnosti nije predviđena normativnim dokumentima, no pokazalo se kako dinamički i statički modul elastičnosti omogućavaju detaljniju analizu ponašanja CNS-a s otpadnom gumom. Pomoću tih veličina karakterizira se krutost materijala, a upravo je cilj korištenja gume u tim mješavinama smanjenje njihove krutosti. Nadalje, provođenje tih ispitivanja ne zahtijeva dodatne vremenske ili materijalne resurse jer se provodi na uzorcima za ispitivanje tlačne čvrstoće. Dinamički modul elastičnosti izračunava se pomoću rezultata nerazorne metode koja se provodi prije ispitivanja tlačne čvrstoće, a statički modul elastičnosti izračunava se iz podataka dobivenih ispitivanjem tlačne čvrstoće materijala. Norma *HRN EN 14227 – 1* [92] predviđa karakterizaciju materijala pomoću dinamičkoga modula elastičnosti izmjenjenoga tijekom izravnoga vlačnog testa, no dinamički modul elastičnosti u korelaciji s tlačnom čvrstoćom i statičkim modulom elastičnosti daje pouzdane rezultate za karakterizaciju materijala. Ta je tvrdnja dokazana statističkom obradom podataka u kojoj su navedena svojstva ostvarila linearne odnose i velike pouzdanosti. Stoga se preporučuje definiranje zahtjeva za dinamički i statički modul elastičnosti materijala povezanih s tlačnom čvrstoćom.

Kao jedno od dva svojstva kojima se treba dokazati kvaliteta mješavine CNS-a jest otpornost na smrzavicu za što su zahtjevi postavljeni *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3]. Proces smrzavanja i odmrzavanja procijeđene vode u CNS-u ima velik utjecaj na postojanost te mješavine, a to je jedino svojstvo koje govori o ponašanju mješavine u zimskim uvjetima. No, postavljeni zahtjevi ne predviđaju provođenje ispitivanja u prisustvu sredstva za sprječavanje poledice na kolniku, što je uobičajena pojava u stvarnim uvjetima. Stoga se preporuča ispitivanje otpornosti na smrzavice u prisustvu sredstva za sprečavanje poledice na kolniku postupkom opisanom tehničkom specifikacijom *HRS CEN/TS 13286 – 54* [102].

Upotreba otpadnih materijala u cestogradnji prije svega treba biti ekološki prihvatljiva, stoga se preporuča provođenje ispitivanja eluata građevnoga proizvoda s otpadnim materijalima kako bi se utvrdila potencijalna opasnost za okoliš. U ovom istraživanju provedeno je ispitivanje izluživanja na materijalima i građevinskim proizvodima pojednostavljenim postupkom prema

tehničkoj specifikaciji *HRS CEN/TS 16637 – 1* [111]. Rezultati su pokazali kako je znatan učinak cementa na izluživanje štetnih kemijskih elemenata te se preporuča provođenje toga ispitivanja i na stabilizacijskim mješavinama bez otpadnih materijala. Pri tome potrebno je definirati referentne vrijednosti s obzirom na tip i okoliš ceste s ugrađenim otpadnim materijalom, primjerice vodozaštitno područje, industrijska područja, poljski putevi i sl. U nedostatku referentnih vrijednosti preporuča se primjena *Pravilnika o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda* (NN 62/20) [127] ili sličnih inozemnih smjernica.

Provođenje ispitivanja promjene volumena cilindričnih uzoraka uslijed hidratacije cementa mješavina s različitim udjelima gume pokazalo je kako su te volumne promjene vrlo male (do 0.3% za mješavine s 5% cementa). S obzirom na kompleksnost ispitnoga postava i mnogo utjecajnih činitelja koji mogu dati nepouzdan rezultate, primjerice temperatura okoline, takvo ispitivanje ne daje dovoljno vrijedne rezultate da bi se preporučila njegova daljnja primjena. Mjerenje skupljanja uzoraka drugih oblika, kakvo je uobičajeno za druge materijale, ne bi dalo stvarne rezultate zbog načina ugradnje uzorka.

Provođenje ispitivanja prolaska brzine ultrazvuka pokazalo se vrlo korisnim postupkom u karakterizaciji CNS-a. Brzina prolaska ultrazvučnoga impulsa se, osim za izračun dinamičkoga modula elastičnosti, pokazala kao dobar alat za brzu procjenu kvalitete materijala. Statističkom obradom podataka razvijena su dva predikcijska modela pomoću kojih je temeljem brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa moguće predvidjeti tlačnu čvrstoću materijala te pomoću brzine prolaska ultrazvučnoga impulsa i duljine vremena njege moguće je predvidjeti statički modul elastičnosti. Prema iskustvima stečenim u provedenim istraživanjima u tablici 8.1. definiran je sustav vrednovanja mješavina CNS-a s otpadnom gumom na razini materijala.

8.1. Sustav vrednovanja mješavina CNS-a s otpadnom gumom

Sustav vrednovanja CNS-a s otpadnom gumom za ugradnju u autoceste i ceste vrlo teškog prometnog opterećenja			
Vrijeme njege [dani]	7	28	90
Tlačna čvrstoća [MPa]	2.0 – 5.5*	3.0 – 6.0*	4.0 – 9.5
Vlačna čvrstoća [MPa]	0.3 – 1.4	0.7 – 1.6	0.9 – 2.0
RTF [%]	min 80*		
E_{din} [GPa]	9.0 – 18.0	12.0 – 20.5	15.0 – 30.0
E_{st} [GPa]	3.0 – 6.0	3.5 – 7.0	5.5 – 13.0
Izluživanje	Zadovoljiti zahtjev prema <i>Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda</i> [127]		
*Definirano prema <i>Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama</i> [3]			

Provedenim istraživanjem dokazano je kako za potpunu ocjenu kvalitete nestandardne mješavine nije dovoljno samo provesti ispitivanja na razini materijala te se preporuča i provedba ispitivanja na razini konstrukcije. Rezultati toga istraživanja pokazali su kako se CNS unutar konstrukcije ne ponaša u potpunosti u skladu s rezultatima dobivenim temeljem ispitivanja samoga materijala. S obzirom na to da je kolnička konstrukcija sastavljena od nekoliko sastavnica vrlo različitih mehaničkih svojstava, potrebno je analizirati i cjelokupno ponašanje konstrukcije. Za karakterizaciju CNS-a za upotrebu u cestama vrlo teškoga prometnog opterećenja i autocestama potrebno je ispitati sustav kolničke konstrukcije sastavljen od nevezanoga nosivog sloja, cementom stabiliziranoga nosivog sloja te asfaltanoga sloja jer se na taj način vjerno prikazuje stvarne kolnička konstrukcija. Pri tome je za ispitivanje više uzoraka CNS-a potrebno koristiti samo jedan uzorak NNS-a na kojemu je potrebno provesti predopterećenje nultim sustavom kolničke konstrukcije kako bi se postiglo konačno stanje toga sloja.

Temeljem provedenih opsežnih ispitivanja CNS-a s otpadnom gumom može se zaključiti kako zahtjevi za dokaz kvalitete toga materijala definirani *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3] nisu dovoljni za potpunu ocjenu kvalitete toga materijala, posebice prilikom primjene nestandardnih prirodnih materijala za koje postoji iskustvo u praksi. Stoga se preporuča proširenje zahtjeva na više mehaničkih karakteristika materijala (vlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti, statički modul elastičnosti i ispitivanje izluživanja) kako bi se dobio potpun uvid u kvalitetu i ponašanje ispitanoga materijala. Cilj proširenja zahtjeva za taj sloj jest osiguranje ugradnje kvalitetne mješavine manje podložne razvoju pukotina i njihovoga reflektiranja na asfaltne slojeve i posljedično postizanje veće kvalitete i udobnosti vožnje te manjih troškova održavanja kolničkih konstrukcija.

8.1 Zaključno

Sukladno važećoj tehničkoj regulativi, *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* iz 2001. godine [3], samo su tri ispitane mješavine zadovoljile uvjete: C5R10, C5R20 i C7R20. Karakteristike tih mješavina prikazane su u tablici 8.2.

8.2. Karakteristike mješavina koje zadovoljavaju uvjete prema OTU [3]

Mješavina	Mehanička svojstva mješavina								
	F_{c7} [MPa]	F_{c28} [MPa]	RTF [%]	F_{t7} [MPa]	F_{t28} [MPa]	E_{din7} [MPa]	E_{din28} [GPa]	E_{st7} [GPa]	E_{st28} [GPa]
C5R10	3.54	3.99	98.61	0.78	1.14	17.795	20.432	5.461	6.179

C5R20	2.20	3.00	90.63	0.36	0.75	10.934	13.883	3.785	4.306
C7R2.5	3.61	5.31	88.04	1.37	1.52	10.654	17.817	4.741	5.369

Općenito se može zaključiti kako je cilj istraživanja postignut za mješavinu C5R20 koja je uz zadovoljenje uvjeta mehaničkih svojstava razvila i manju krutost. Odnosno, proizvedena je elastičnija mješavina koja može podnijeti projektirano prometno opterećenje. Osim zadovoljenja mehaničkih svojstava i povećanja elastičnosti mješavine, ugradnjom te mješavine upotrebljava se 2% otpadne gume od mase agregata što čini znatnu količinu gume uzimajući u obzir dimenzije kolničke konstrukcije autoceste za čiju je izgradnju namijenjena takva mješavina. Za ocjenu primjenjivosti nestandardnih, posebice otpadnih materijala u kolničkim konstrukcijama, potrebno je pored tlačne čvrstoće postaviti uvjete i definirati i druga mehanička svojstva poput vlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Korištenje novoga, osobito otpadnoga, materijala u građevinarstvu mora biti odgovorno i ne smije imati negativan utjecaj na okoliš. Zato je važno, osim ispitivanja mehaničkih svojstava materijala, utvrditi i ekološki utjecaj korištenog materijala.

9 Zaključak i smjernice za daljnja istraživanja

9.1 Zaključak

Pojava reflektivnih pukotina problem je s kojim se susreću stručnjaci u području kolničkih konstrukcija. Iscrpnim pregledom literature utvrđeno je kako reflektivne pukotine nastaju iz nekoliko razloga i šire se pod utjecajem različitih činitelja. No, najsnažniji inicijator reflektivnih pukotina inicijalne su pukotine nastale u cementom stabiliziranom nosivom sloju kolnika uslijed razvoja vlačnih naprezanja kao posljedica hidratacije cementa. Cementom stabilizirani nosivi sloj uglavnom se ugrađuje u kolničke konstrukcije velikoga prometnog opterećenja. Na širenje tih pukotina najveći utjecaj ima prometno opterećenje, a uz prometno opterećenje značajnu ulogu igraju nosivost posteljice te temperaturni utjecaji, osobito utjecaj smrzavice. Kako se ne može utjecati na prirodne sile, a niti na smanjenje prometnoga opterećenja, rješenje za smanjenje pojave reflektivnih pukotina potrebno je potražiti u materijalima kolničke konstrukcije. S obzirom na prethodno navedene činjenice, istraživanje u okviru ovoga doktorskog rada usmjereno je na ispitivanje mogućnosti upotrebe otpadne gume u cementom stabiliziranom nosivom sloju kolnika. Upotreba gume ima dvojaku ulogu – s jedne strane elastična priroda gume pokazuje potencijal za inhibiranje vlačnih naprezanja unutar mješavine, a s druge se strane ostvaruje ekološka korist u vidu zbrinjavanja potencijalno opasnoga otpadnog materijala.

Eksperimentalno ispitivanje obuhvatilo je testiranje 17 mješavina cementom stabiliziranoga nosivog sloja podijeljenih u tri skupine: referentne mješavine, mješavine s granuliranom gumom i mješavine s gumenim nitima. Pri tome varirana je količina cementa i gume u mješavinama. Ispitana su mehanička svojstva mješavina koja treba zadovoljiti prilikom ugradnje tih materijala, a to su tlačna čvrstoća i otpornost na utjecaj smrzavice. Osim toga, ispitani su i neizravna vlačna čvrstoća te dinamički i statički modul elastičnosti kao važni parametri za analizu stabilizacijskih mješavina. Sva su ta svojstva ispitana nakon tri razdoblja njege uzoraka u propisanim uvjetima: 7, 28 i 90 dana. Temeljem ispitivanja mehaničkih svojstava na razini materijala može se zaključiti:

- Povećanje udjela cementa u mješavini utječe na povećanje maksimalne suhe prostorne mase, dok povećanje udjela gume u mješavini utječe na smanjenje maksimalne suhe prostorne mase. Smanjenje maksimalne suhe prostorne mase kao posljedica upotrebe gume pozitivan je učinak koji povećava volumen stabilizacijske mješavine koji se u

jednom prijevozu može prevesti s mjesta proizvodnje na mjesto ugradnje, tj. pokazuje se potencijal smanjenja troškova transporta pri ugradnji tih mješavina.

- Povećanje udjela cementa u mješavini utječe na povećanje optimalne vlažnosti mješavine zbog veće količine cementa za čiju je hidrataciju potrebna veća količina vode. Utjecaj promjene količine gume na optimalnu vlažnost nije moguće precizno utvrditi, jer ovisi o morfologiji površine gume koja je znatno nepravilnija od morfologije prirodnoga agregata. Rezultati pokazuju kako su razlike u optimalnoj vlažnosti mješavina vrlo male te se prilikom korištenja gume u ispitanim mješavinama može koristiti optimalna vlažnost referentne mješavine i time smanjiti opseg laboratorijskih ispitivanja.
- Povećanje količine cementa utječe na povećanje tlačne čvrstoće, dok upotreba gume u stabilizacijskim mješavinama uzrokuje smanjenje tlačne čvrstoće. Pri tome se pokazalo kako gumene niti imaju izraženiji utjecaj na smanjenje tlačne čvrstoće u odnosu na gumeni granulati. Rezultati tlačne čvrstoće pokazuju kako količina gumenog granulata od približno 1% ukupne mase agregata uzrokuje povećanje tlačne čvrstoće pri duljem vremenu njege. Do te pojave dolazi vjerojatno zbog sposobnosti gume da inhibira unutarnja naprezanja pri čemu zbog male količine gume ne dolazi do narušavanja dominantnoga utjecaja cementne paste na tlačnu čvrstoću. Pokazalo se kako je najveća primjenjiva količina gume oko 3% ukupne mase agregata prema kriteriju tlačne čvrstoće propisanom *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3].
- Povećanje količine cementa utječe na povećanje neizravne vlačne čvrstoće mješavine. S druge strane, povećanje količine gume utječe na smanjenje neizravne vlačne čvrstoće. Rezultati pokazuju kako upotreba gume u iznosu od približno 1% mase agregata utječe na povećanje neizravne vlačne čvrstoće kraćega vremena njege mješavina s većim udjelom cementa. Nakon duljega vremena njege, kada mješavine razviju znatne krutosti, utjecaj elastičnih svojstava gume gubi se u usporedbi s velikom krutošću pa se samim time pojavljuje i negativan utjecaj gume na neizravnu vlačnu čvrstoću nakon duljega vremena njege.
- Odnos između tlačne i vlačne čvrstoće je linearan.
- Povećanjem udjela cementa u mješavini povećava se udio neizravne vlačne čvrstoće u tlačnoj čvrstoći.
- Zadovoljavajući faktor otpornosti na smrzavicu, zadovoljile su sve mješavine s 5% cementa. Kod ostalih mješavina pokazalo se kako povećanje količine gume utječe na

smanjenje otpornosti na utjecaj smrzavice. Pri tome mješavine s manjim udjelom cementa pokazuju bolje rezultate, što naglasak za postizanje zadovoljavajuće otpornosti na utjecaj smrzavice stavlja na optimalnu količinu cementa. Gumene niti pokazuju pozitivniji učinak na to svojstvo u odnosu na gumeni granulat jer zbog svoje veličine imaju mogućnost inhibicije povećanih unutarnjih naprezanja uzrokovanih povećanjem volumena vode tijekom smrzavanja.

- Uzimajući u obzir dva zahtjeva koja trebaju ispuniti stabilizacijske mješavine za ugradnju u ceste najviše kategorije prometnoga opterećenja prema važećim *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3], a to su tlačna čvrstoća i faktor otpornosti na smrzavanje, samo su tri ispitane mješavine prikladne za tu namjenu. Pri tome, najveća količina gume koja se može upotrijebiti iznosi oko 2% ukupne mase agregata. Povećanjem količine cementa dolazi do porasta dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti, dok povećanjem udjela gume dolazi do smanjenja tih svojstava mješavine. Guma zbog svoje elastičnosti i manje gustoće smanjuje krutost mješavine, a samim time i module elastičnosti. Kod mješavina s najvećim udjelima gume dolazi do odstupanja od trenda u rezultatima modula elastičnosti kao posljedica grupiranja čestica i stvaranja klastera, a samim time i oslabljenja takvih mješavina.
- Odnos dinamičkoga i statičkoga modula elastičnosti je linearan.
- Osim prirode gumenoga granulata na smanjenje mehaničkih svojstava mješavine utječe i prisutnost cinkovog oksida u gumi, dok prisutnost olovovog oksida utječe na usporenje hidratacije cementa. Usporenje hidratacije rezultira znatnim porastom mehaničkih svojstava nakon produljenoga vremena njege.
- Analiza eluata cementom stabiliziranoga nosivog materijala s otpadnom gumom pokazuje dozvoljene količine izluženih lakohlapljivih ugljikovodika i teških metala, što čini upotrebu otpadne gume u cementom stabiliziranim nosivim slojevima ekološki prihvatljivom i opravdanom.
- Mjerenje skupljanja uzoraka pokazuje kako se do najvećega prirasta smanjenja volumena uzorka dolazi tijekom prva 24 sata od izrade uzoraka. Dodatkom gume u mješavinu skupljanje se smanjuje, no trend povećanja količine gume nije popraćen istim trendom smanjenja skupljanja. Izmjereni iznosi skupljanja mješavina vrlo su mali i iznose do 0.3% nakon 7 dana njege.
- Korištenjem izmjerenih mehaničkih svojstava razvijeni su pouzdani modeli predikcije rezultata razornih ispitnih metoda temeljem rezultata nerazornih ispitnih metoda.

- Prilikom numeričke analize u nespecializiranom računalnom alatu potrebna su veća znanja, vještine i računalni resursi za modeliranje kolničke konstrukcije i generiranje parametara potrebnih za analizu ponašanja konstrukcija.

Temeljem ispitivanja provedenih na razini konstrukcije može se zaključiti sljedeće:

- Rezultati ispitivanja pokazuju potrebu za provođenje ispitivanja na razini konstrukcije uz provođenje ispitivanja na razini materijala. Ovaj je pristup promatranja sustava kolničke konstrukcije prikladniji i daje stvarnije podatke za predviđanje ponašanja kolničke konstrukcije u stvarnim uvjetima umjesto pojedinačnoga analiziranja materijala slojeva kolnika. Pri tome treba voditi računa o tome da je kolnička konstrukcija lanac različitih sastavnica koje se različito ponašaju prilikom preuzimanja opterećenja.
- Osmišljeno ispitivanje pokazuje kako je na uzorku sustava kolničke konstrukcije potrebno provesti ispitivanje nultoga uzorka koje bi omogućilo *namještanje* sustava, ponajviše nevezanoga nosivog sloja. Osim toga, prilikom ispitivanja potrebno je primijeniti i inicijalno opterećenje konstrukcije.
- Ponavljajuće opterećenje tijekom početnoga životnog vijeka konstrukcije izaziva najveće deformacije asfaltne ploče što upućuje na zaključak kako je kolnička konstrukcija najosjetljivija tijekom početnoga razdoblja eksploatacije.
- Sva četiri ispitana mehanička svojstva mješavina (tlačna čvrstoća, neizravna vlačna čvrstoća, dinamički modul elastičnosti i statički modul elastičnosti) imaju podjednak utjecaj na razvoj deformacija asfaltnih ploča sustava kolničke konstrukcije.

U okviru ispitivanja provedenih za izradu ovoga doktorskog rada potvrđene su obje hipoteze istraživanja.

1. Temeljem prikazanih rezultata mehaničkih svojstava na razini materijala i konstrukcije u poglavljima 4. i 5. dokazano je da je otpadnu gumu moguće koristiti u mješavinama cementom stabiliziranoga nosivog sloja uz zadovoljenje postavljenih zahtjeva sukladno važećoj tehničkoj regulativi propisanoj u *Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama* [3]. Na osnovu svih prikazanih rezultata može se reći kako mješavina s 5% cementa i 20% gume pokazuje najbolja svojstva za ugradnju u nosive slojeve kolnika. Osim zadovoljenja zahtjeva tlačne čvrstoće i otpornosti na utjecaj smrzavice ta

mješavina postiže najmanje skupljanje uslijed hidratacije cementa. Ugradnjom te mješavine osigurava se upotreba značajne količine gume.

2. Druga hipoteza potvrđena je analizom eluata kojom je u potpoglavlju 4.10. pokazano kako upotreba gume u cementom stabiliziranom nosivom sloju nije štetna za okoliš.

Provedenim istraživanjem ostvaren je očekivani znanstveni doprinos definiran kroz četiri točke:

1. Utvrđen je utjecaj dodataka različitih frakcija i udjela otpadne gume na mehanička svojstva cementom stabiliziranoga materijala te na ponašanje kolničke konstrukcije kao složenoga slojevitog sustava različitih materijala u laboratorijskim uvjetima.
2. Temeljem rezultata provedenih istraživanja mješavina CNS-a s 5% cementa i 20% otpadne gume kao zamjene za sitnu frakciju agregata pokazala se kao optimalna mješavina koja zadovoljava tražena mehanička svojstva te doprinosi smanjenju krutosti mješavine. Za upotrebu te mješavine koristi se prihvatljiva količina cementa te značajna količina gume (oko 2% ukupne mase agregata), što ima primjetan učinak na zbrinjavanje otpadnih guma. Također, primjena CNS-a toga sastava ne bi utjecala na sam proces proizvodnje i ugradnje nosivoga sloja od standardnih materijala.
3. Definirana je metodologija ispitivanja i analize rezultata primjenom stereo fotogrametrije s korelacijom digitalne slike za izračun statičkoga modula elastičnosti cementom stabiliziranih zrnatih materijala za čije se određivanje konvencionalna metoda pokazala nedovoljno preciznom. Nadalje, definirana je i metodologija ispitivanja i analiza rezultata sustava kolničke konstrukcije primjenom stereo fotogrametrije s korelacijom digitalne slike. Ovim je istraživanjem pokazano kako je metoda stereo fotogrametrije s korelacijom digitalne slike lako primjenjiva u karakterizaciji CNS-a te pruža precizne rezultate kakve nije moguće ostvariti korištenjem konvencionalnih metoda ispitivanja.
4. Razvijeni su modeli funkcijskoga odnosa između rezultata nerazornih (brzina prolaska ultrazvučnoga impulsa) i razornih (ispitivanje tlačne čvrstoće i izračun statičkoga modula elastičnosti) metoda ispitivanja mješavina cementom stabiliziranoga zrnatog materijala s otpadnom gumom.

9.2 Smjernice za daljnja istraživanja

U ovom istraživanju provedena su opsežna ispitivanja utjecaja otpadne gume na mehanička svojstva cementom stabiliziranoga nosivog sloja kolničkih konstrukcija. Temeljem rezultata provedenih ispitivanja donesen je zaključak o količini gume koja bi se mogla ugraditi u te slojeve, pri čemu ne bi znatno bila narušena nosivost konstrukcije, a ostvarili bi se pozitivni učinci na razvoj pukotina u cementom stabiliziranom nosivom sloju. Također, temeljem dobivenih rezultata razvijeni su predikcijski modeli pomoću kojih se, na temelju mjerenja jednoga mehaničkog svojstva, mogu predvidjeti rezultati drugih mehaničkih svojstava. Kao preporuka za daljnja ispitivanja na razini materijala navodi se izrada i ispitivanje još jednoga seta uzoraka kojima bi se verificirali razvijeni modeli. Nadalje, može se provesti i slično ispitivanje koristeći neki drugi oblik ili veličinu gumenoga granulata dostupnoga na tržištu s ciljem zbrinjavanja otpada.

Drugi dio istraživanja odnosio se na provedbu ispitivanja na razini konstrukcije postupkom osmišljenim za izradu ovoga doktorskog rada. Ispitani sustav kolničke konstrukcije pokazao je bolji uvid u način preuzimanja i raspodjele naprezanja u kolničkoj konstrukciji u odnosu na ispitivanja provedena na razini materijala. Kao preporuka za daljnja istraživanja u ovom području navodi se uvođenje nultoga uzorka koji bi osigurao *namještanje* sustava te osigurao ujednačenije rezultate. Uz to, preporuča se provedba dodatnih ispitivanja s ciljem razvoja veće baze podataka koja bi u kombinaciji s mjerenjima u stvarnim uvjetima mogla pružiti podlogu za razvoj korekcijskih koeficijenata za kalibraciju rezultata laboratorijskih ispitivanja. Ispitivanja provedena u stvarnim uvjetima mogla bi rezultirati uvidom u atmosferske i okolišne utjecaje na ponašanje kolničke konstrukcije, što bi bili korisni podaci prilikom razvoja modela kolničke konstrukcije programskim paketima i predviđanje njezinoga ponašanja. Također se preporuča prilikom analize novoga materijala za primjenu u kolničkoj konstrukciji, osim provođenja ispitivanja na razini materijala, i provođenje ispitivanja na razini konstrukcije.

Bibliografija

- [1] Trans-European Transport Network (TEN-T) [Online], dostupno na: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_hr (pristupljeno: 01.02.2023.)
- [2] L. Liu, C. Wang, Q. Liang, F. Chen, X. Zhou, A state-of-the-art review of rubber modified cement-based materials: Cement stabilized base, *Journal of Cleaner Production*, vol. 392, 2023.
- [3] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, knjiga III: Kolnička konstrukcija, Institut građevinarstva Hrvatske, Hrvatske ceste, 2001.
- [4] Zakon o gospodarenju otpadom, Narodne Novine (NN 84/21).
- [5] Pravilnik o gospodarenju otpadom, Narodne Novine (NN 106/2022).
- [6] Pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2016.
- [7] V. Bulat, Izvješće o gospodarenju otpadnim vozilima i otpadnim gumama za 2021. godinu, Zagreb, 2022.
- [8] B. Babić, Projektiranje kolničkih konstrukcija, Zagreb: Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, 1997.
- [9] Ž. Korlaet, V. Dragčević, Projektiranje i građenje cesta, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu - Građevinski fakultet, 2018.
- [10] S. Garber, R.O. Rasmussen, D. Harrington, *Guide to Cement-Based Integrated Pavement Solutions*, Skoike: Portland Cement Association; 2011.
- [11] Characterization of cementitiously stabilized layers for use in pavement design and analysis, NCHRP, Report 789, 2013.
- [12] P. G. L. von Blerk, S. B. Costello, T. F. P. Henning, Design and construction of a new Mechanised Cement Bound Macadam (MCBM), *Construction and Building Materials*, vol 336, 2022..
- [13] G. E. Halsted, D. R. Luhr, W. A. Adaska, *Guide to Cement-Treated Base (CTB)*, Skoike, Illinois: Portland Cement Association, 2006.

- [14] J. Kennedy, *Hydraulically-bound Mixtures for Pavements*, Trowbridge, UK, CCIP; 2006.
- [15] *Development of New Bituminous Pavement Design Method*. Brussels: 1999.
- [16] HRN EN 13286 - 41. dio: Ispitna metoda za određivanje tlačne čvrstoće hidrauličnim vezivom vezanih mješavina, 2021.
- [17] HRN EN 13286 - 42. dio: Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 42. dio: Ispitna metoda za određivanje vlačne čvrstoće neizravnim postupkom hidrauličnim vezivom vezanih mješavina, 2003.
- [18] S. Lv, Y. Guo, C. Xia, X. Wang, L. You, M.B. Cabrera, J. Li, Unified approach to characterize the strength of cement stabilized macadam subjected to different loading modes, *Construction and Building Materials*, vol. 265, 2020.
- [19] I. Barišić, T. Dokšanović, H. Draganić, Characterization of hydraulically bound base materials through digital image correlation, *Construction and Building Materials*, vol. 83, 2015.
- [20] I. Barišić, S. Dimter, T. Rukavina, Characterization of cement stabilized pavement layers with ultrasound testing, *Technical Gazette*, vol. 23, no. 2, pp. 447 - 453, 2016.
- [21] X. Lan, X. Zhang, Z. Hao, Y. Wang, Strength and shrinkage properties of cement stabilized macadam bases incorporating 0-2,36 milimetre recycled fine aggregate, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, 2022.
- [22] S. Lv, C. Xia, H. Liu, L. You, F. Qu, W. Zhong, Y. Yang, Strength and fatigue performance for cement - treated aggregate base materials, *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 22, no. 6, pp. 690 - 699.
- [23] J. Li, J. Qian, C. He, Experimental analysis of cement-treated red sandstone coarse - grained soil and its microstructural evolution, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, 2022.
- [24] M. Iwański, P. Buczyński, G. Mazurek, Optimization of the road binder used in the base layer in the road construction, *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 1044 - 1054, 2016.
- [25] A. I. Marques, J. Morais, P. Morais, M. do Rosaria Veiga, C. Santos, P. Candeias, J. Gomes Ferreira, Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses,

Construction and Building Materials, vol. 232, 2020.

- [26] S. Lv, J. Yuan, C. Liu, J. Wang, J. Li, L. Zheng, Investigation of the fatigue modulus decay in cement stabilized base material by considering the difference between compressive and tensile modulus, Construction and Building Materials, vol. 223, pp. 491 - 502, 2019.
- [27] P. Kumar Mehta, P. J. M. Monteiro, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th edition. McGraw-Hill Education, 2013.
- [28] S. Lv, J. Yuan, X. Peng, N. Zhang, H. Liu, X. Luo, A structural design for semi-rigid base asphalt pavement based on modulus optimization, Construction and Building Materials, vol. 302, 2021.
- [29] E. Ovad, I. Barišić, M. Zagvozda, Comparison of Croatian and European standards for Determining the Frost Susceptibility of Hydraulically Bound Mixtures, e-GFOS vol. 5, no. 9, 2014.
- [30] Državni hidrometeorološki zavod, Karte 1971. - 2000., dostupno na: https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_7 (pristupljeno: 20.08.2023.)
- [31] S. Jie, Z. Yue, Z. Sun, H. Zhang, T. Hu, T. Sun, L. Yuan, P. Xie, S. Mao, Frost resistance and mechanical degradation characteristics of cement-stabilized macadam under the long-term freezing-thawing cycles, Construction and Building Materials, vol. 347, 2022.
- [32] T. Wan, H. Son, Z. Yu, T. Hu, T. Su, H. Zhang, Freeze-thaw durability of cement - stabilized macadam subgrade and its compaction quality indeks, Cold Regions Science and Technology, vol. 160, pp. 13 - 20, 2019.
- [33] B. Xu, Z. Yang, L. Zhao, D. Cao, H. Zhang, X. Shi, Study on the antifreeze performance of porous cement stabilized macadam, Construction and Building Materials, vol. 208, pp. 13 - 22, 2019.
- [34] M. Zvonarić, S. Dimter, Prevention and remediation measures for reflective cracks in flexible pavements, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, vol. 74, pp. 189 - 197, 2022.
- [35] W. S. Adaska, D. R. Luhr, Control of reflective cracking in cement-stabilized pavements, Limoges, France, 2004.

- [36] M. J. Abdolhosseini Quomi, L. Brochard, T. Honorio, I. Maruyama, M. Vandamme, Advances in atomistic modeling and understanding of drying shrinkage in cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, vol. 148, 2021.
- [37] N. P. Tran, C. Gunasekar, D. W. Law, S. Houshya, S. Setunge, A. Cwirzen, A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials, *Journal of Building Engineering*, vol. 38, no. 17, 2021.
- [38] C. Di Bella, M. Wyrzykowski, P. Lura, Evaluation of the ultimate drying shrinkage of cement-based mortars with poroelastic models, *Materials and Structures*, vol. 50, 2017.
- [39] K. Kovler, S. Zhutovsky, Overview and future trends of shrinkage research, *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 827 - 847, 2006.
- [40] F. H. Wittmann, Heresies on creep and shrinkage mechanisms, *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Shima, Japan, Taylor and Francis Group, 2008.
- [41] S. Rahimi-Aghdam, E. Masoero, M. Rassolinejad, Z. P. Bažant, Century-long expansion of hydrating cement counteracting concrete shrinkage due to humidity drop from selfdesiccation or external drying, *Materials and Structures*, vol. 52, no. 11, 2019.
- [42] H. M. Jennings, A. Kumar, G. San, Quantitative discrimination of the nano-pore-structure of cement paste during drying: New insights from water sorption isotherms, *Cement and Concrete Research*, vol. 76, pp. 27 - 36, 2015.
- [43] J. McElvaney, M. S. Snaith, Analytical design of flexible pavements, ur: C. A. O'Flaherty, A. Boyle, M. J. Brennan, J. Knapton, H. M. Khalid, J. McElvaney, *Highways*, vol. 4, pp. 396 - 423, 2002.
- [44] X. Wang, Y. Zhong, Reflective crack in semi-rigid base asphalt pavement under temperature - traffic coupled dynamics using XFEM, *Construction and Building Materials*, vol. 214, pp. 280 - 289, 2019.
- [45] H. Wnag, Y. Wu, J. Yang, H. Wang, Numerical Simulation on Reflective Cracking Behaviour of Asphalt Pavement, *Applied Sciences*, vol. 11, 2021.
- [46] S. Lv, C. Xia, L. You, X. Wan, J. Li, J. Zheng, Unified fatigue characteristics model for cement-stabilized macadam, *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 775 - 783, 2019.

- [47] S. Lv, P. Wang, X. Fan, M. Borges Cabrera, L. Hu, X. Peng, C. Liu, J. Yuan, Normalized comparative study on fatigue characteristics of different pavement materials, *Construction and Building Materials*, vol. 271, 2021.
- [48] X. Wang, K. Li, Y. Zhong, Q. Xu, S. Li, XFEM simulation of reflective crack in asphalt pavement structure under cyclic temperature, *Construction and Building Materials*, vol. 189, pp. 1035 - 1044, 2018.
- [49] R. Yeo, Fatigue performance of cemented materials under accelerated loading-influence of vertical loading on the performance of unbound and cemented materials, Sydney, Austroads, 2008.
- [50] SiB.hr [Online], dostupno na: <https://sib.net.hr/vijesti/osijek/4367997/pozar-zahvatio-15-hektara-gorjelo-i-15-tona-guma/?galerija=2793049&slika=5764441> (pristupljeno: 10.07.2023.).
- [51] K. Reschner, Scrap Tire Recycling. A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods, Berlin, Germany, 2008.
- [52] Europe - 94% of all used tyres collected and treated in 2016, (ETRMA) European tyre & rubber manufacturers' association. [Online], dostupno na: <https://pr.euractiv.com/sites/default/files/pr/PRESS RELEASE - 94%25 of all used tyres collected and treated in 2016.pdf.>, (pristupljeno: 20.07.2023.).
- [53] Managing End-of-Life Tires. World Business Council for Sustainable Development, 2008.
- [54] End-of-life Tyre. REPORT 2015, (ETRMA) European tyre and rubber manufacturer's association [Online], dostupno na: <https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/09/elt-report-v9a-final.pdf>, (pristupljeno: 20.07.2023.).
- [55] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19th November 2008 on Waste and repealing Certain Directives, European Commission, 2008.
- [56] Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost [Online], dostupno na: <https://www.fzoeu.hr/hr/otpadne-gume/7749> (pristupljeno (25.07.2023.).
- [57] S. Lakušić, D. Bjegović, M. Serdar, Primjena reciklirane gume na prometnicama, ur: S. Lakušić, Prometnice. Nove tehnologije i materijali, Zagreb. Republika Hrvatska, Građevinski fakultet Sveučilišta uz Zagrebu, 2010.

- [58] F. Valentini, A. Pegoretti, End-of-life options of tyres. A review, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 5, pp. 203 - 213, 2022.
- [59] M. Battist, A. Goberri, S. Agnelli, G. Ramorino, Post-consumer tires as a valuable resource: review of different types of material recovery, *Environmental Technology Reviews*, vol. 10, pp. 1 - 25, 2021.
- [60] P. J. J. van Beukering, M. A. Janssen, Trade and recycling of used tyres in Western and Eastern Europe, *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 33, pp. 235 - 265, 2001.
- [61] H. Chittella, L. W. Yoon, S. Ramarad, Z. - W. Lai, Rubber waste management: A review on methods, mechanism, and prospects, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 194, 2021.
- [62] Z. Xiao, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, S. Shankar, Material recovery and recycling of waste tyres - A review, *Cleaner Materials*, vol. 5 2022.
- [63] V. L. Shulman, *Tire Waste and Recycling*, ur: T. M. Letcher, V. L. Shulman, S. Amirkhanian, *Tyre Waste and Recycling*, 2021.
- [64] S. Hoyer, L. Kroll, D. Sykutera, Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres, *Procedia Manufacturing*, vol. 43, pp. 193 - 200, 2020.
- [65] M. Zvonarić, I. Barišić, I. Netinger Grubeša, Effect of rubber size and shape on Proctor elements of CBC mixtures, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, 2022.
- [66] M. Zvonarić, Influence of recycled rubber on compressive strength of cement stabilized mixtures, ur: H. Krstić, F. Anić, M. Jeleč, *Common foundations 2022*, Osijek, Croatia.
- [67] Tehnički propis za asfaltne kolnike, *Narodne Novine (NN 48/2021)*.
- [68] X. Sun, S. Wu, J. Yang, R. Yang, Mechanical properties and crack resistance of crumb rubber modified cement-stabilized macadam, *Construction and Building Materials*, vol. 259, 2020.
- [69] Z. Li, T. Guo, Y. Chen, Y. Wang, Y. Chen, Q. He, X. Yang, J. Wang, Study on Performance of Retarded Composite Semi-Rigid Base Mixed with Rubber Powder, *Materials*, vol. 15, 2022;15.
- [70] A. H. Farhan, A. R. Dawson, N. H. Thom, Effect of cementation level on performance

- of rubberized cement-stabilized aggregate mixtures, *Materials and Design*, vol. 97, pp. 98 - 107, 2016.
- [71] A. H. Farhan, A. R. Dawson, N. H. Thom, S. Adam, M. J. Smith. Flexural characteristics of rubberized cement-stabilized crushed aggregate for pavement structure, *Materials and Design*, vol. 88, pp. 897 - 905, 2015.
- [72] A. H. Farhan, A. R. Dawson, N. H. Thom, Damage propagation rate and mechanical properties of recycled steel fiber-reinforced and cement-bound granular materials used in pavement structure, *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 112 - 124, 2018.
- [73] A. H. Farhan, A. R. Dawson, N. H. Thom, Compressive behaviour of rubberized cement - stabilized aggregate mixtures, *Construction and Building Materials*, vol. 262, 2020.
- [74] A. H. Farhan, A. R. Dawson, N. H. Thom, Characterization of rubberized cement bound aggregate mixtures using indirect tensile testing and fractal analysis, *Construction and Building Materials*, vol. 105, pp. 94 - 102, 2016.
- [75] A. H. Farha, A. Dawson, N. Thom, Behaviour of rubberised cement-bound aggregate mixtures containing different stabilisation levels under static and cyclic flexural loading, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, 2020.
- [76] R. Yang, K. Li, J. Zhu, T. Zhu, Z. Dong, D. Wu, Effect of Rubber Particles on Cement Stabilized Gravel System, *Journal of Wuhan University of Technology*, vol. 29, pp. 990 - 995, 2014.
- [77] Y. Chen, Z. Li, J. Wang, C. Wang, J. Guan, L. Zhang, X. Wang, X. Hu, Y. Zhang, H. Chen, Y. Li, Study on Road Performance of Cement-Stabilized Recycled Aggregate Base with Fiber and Rubber, *Advances in Civil Engineering*, 2022.
- [78] A. Mohajerani, L. Burnett, J. V. Smith, S. Markovski, G. Rodwell, M. T. Rahman, H. Kurmus, M. Mirzababaei, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk, F. Maghool, Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review, *Resources, Conservation & Recycling*, vol- 155, 2020.
- [79] J. O. Akinyele, R. W. Salim, W. Kehinde, Production of lightweight concrete from waste tire rubber crumb, *Engineering Structures and Technologies*, vol. 8, pp. 108 - 116, 2016.
- [80] S. F. Brown, *Design of Pavements with Lean-Concrete Bases*, Nottingham, England,

University of Nottingham, 1979.

- [81] H. - Y. Wang, B. - T. Chen, Y. - W. Wu, A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC), *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 526 - 531, 2013.
- [82] L. - J. Huang, H. - Y. Wang, Y. - W. Wu, Properties of the mechanical in controlled low - strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC), *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 1054 - 1058, 2016.
- [83] M. Akbari, M. H. Nezhad Tahamtan, S. Fallah-Valukolae, M. R. Zadeh Herozi, M. Asghari Shirvani, Investigating fracture characteristics and ductility of lightweight concrete containing crumb rubber by means of WFM and SEM methods, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 117, 2022.
- [84] M. M. Ul Islam, J. Li, Y. - W. Wu, R. Roychand, M. Saberian, Design and strength optimization method for the production of structural lightweight concrete: An experimental investigation for the complete replacement of conventional coarse aggregates by waste rubber particles, *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 184, 2022.
- [85] M. M. Ul Islam, J. Li, R. Roychand, M. Saberian, Investigation of durability properties for structural lightweight concrete with discarded vehicle tire rubbers: A study for the complete replacement of conventional coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, vol. 369, 2023.
- [86] A. Wik, Toxic Components Leaching from Tire Rubber. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 79, pp. 114 - 119, 2007.
- [87] K. Formela, Analysis of volatile organic compounds emission in the rubber recycling products quality assessment, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 5, pp. 255 - 269, 2022.
- [88] X. Liu, J. Wang, A. Ghenni, M. A. El Gawady, Reduced zinc leaching from scrap tire during pavement applications, *Waste Management*, vol. 81, pp. 53 - 60, 2018.
- [89] C. Halsband, L. Sørensen, A. M. Booth, D. Herzke, Car Tire Crumb Rubber: Does Leaching Produce a Toxic Chemical Cocktail in Coastal Marine Systems?, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 8, 2020.

- [90] A. Fathollahi, C. Makoundou, S. J. Coupe, C. Sangiorgi, Leaching of PAHs from rubber modified asphalt pavements, *Science of The Total Environment*, vol. 826, 2022.
- [91] A. J. Kriech, L. V. Osborn, Review of the impact of stormwater and leaching from pavements on the environment, *Journal of Environmental Management*, vol. 319, 2022.
- [92] HRN EN 14227 - 1 Mješavine vezane hidrauličnim vezivom – Specifikacije – 1. dio: Zrnat mješavine vezane cementom, 2013.
- [93] HRN EN 9331 - 1 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata - 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava - Metoda sijanja, 2012.
- [94] HRN EN 197 - 1 Cement - 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene, 2012.
- [95] HRN EN 1097-6 Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode, 2022.
- [96] HRN EN 196-6:2019 Metode ispitivanja cementa - 6. dio: Određivanje finoće, 2019.
- [97] E. Nonveiller, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Zagreb, Republika Hrvatska, Školska knjiga, 1979.
- [98] M. Mulabdić, *Ispitivanje tla u geotehničkom laboratoriju*, 1. izdanje, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, 2018.
- [99] HRN EN 13286 - 4 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 4. dio: Ispitne metode za određivanje laboratorijske referencijske gustoće i udjela vode - Vibrirajući čekić, 2021.
- [100] M. Zvonarić, I. Barišić, M. Galić, K. Minažek, Influence of Laboratory Compaction Method on Compaction and Strength Characteristics of Unbound and Cement - Bound Mixtures, *Applied Sciences*, vol. 11, 2021.
- [101] HRN EN 13286-51 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 51. dio: Metoda za izradu ispitnih uzoraka hidrauličnim vezivom vezanih mješavina zbijanjem vibracijskim čekićem, 2004.
- [102] HRS CEN/TS 13286-54 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 54. dio: Metoda ispitivanja za određivanje osjetljivosti na zamrzavanje - Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje hidrauličnim vezivom vezanih mješavina, 2016.

- [103] HRN EN 12504-4 Ispitivanje betona u konstrukcijama - 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa, 2021.
- [104] I. Barišić, S. Dimter, T. Rukavina, Cement stabilizations - characterization of materials and design criteria, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, vol 63, no. 8, 2011.
- [105] L. C. Spencer, J. W. Shattock, The Ultrasonic Testing of Road Materials, Australian Road Research Board (ARRB) Conference, Canberra: 1962, pp. 970 - 981.
- [106] M. Zagvozda, Nosivi sloj kolničkih konstrukcija nerazvrstanih cesta s biopepelom kao vezivom, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2018.
- [107] HRN EN 13286-43 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 43. dio: Ispitna metoda za određivanje modula elastičnosti hidrauličnim vezivom vezanih mješavina, 2003.
- [108] V. Šimić, Otpornost materijala 1. 2. izdanje, Zagreb, Republika Hrvatska, Školska knjiga, 2002.
- [109] Mechanisms of Cracking and Debonding in Asphalt and Composite Pavements, State - of - the - Art of the RILEM TC 241 - MCD, 1. izdanje, ur: W. G. Buttlar, A. Chabot, E. V. Dave, C. Petit, G. Tebaldi, Springer Cham, 2018.
- [110] I. Barišić, T. Dokšanović, Z. Zvonarić, Pavement Structure Characteristics and Behaviour Analysis with Digital Image Correlation, Applied Sciences, vol. 13, 2023.
- [111] HRS CEN/TS 16637-1 Građevni proizvodi - procjena otpuštanja opasnih tvari - 1. dio: Upute za utvrđivanje ispitivanja izluživanja i dodatnih koraka ispitivanja, 2021.
- [112] HRN EN 12457-2 Karakterizacija otpada - Izluživanje - Provjera izluživanja zrnatog otpadnog materijala i muljeva - 2- dio: Jednostupanjski postupak kod omjera tekuće-čvrsto 10 l/kg za materijale s veličinom čestica manjom od 4 mm (sa smanjenjem veličine čestica ili bez smanjenja), 2005.
- [113] Y. - J. Du, M. - L. Wei, K. R. Reddy, Z. - P. Liu, F. Jin, Effect of acid rain pH on leaching behaviour of cement stabilized lead - contaminated soil, Journal of Hazardous Materials, vol. 271, pp. 131 - 140, 2014.
- [114] M. Murat, F. Sorrentino, Effect of large additions of Cd, Pb, Cr, Zn, to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement, Cement and

Concrete Research, vol. 26, pp. 377 - 385, 1996.

- [115] I. Fernandez Olmo, E. Chacon, A. Irabien, Influence of lead, zinc, iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement, Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 1213 - 1219, 2001.
- [116] ISO 9277:2016 Određivanje specifične površine krutine plinskom adsorpcijom - BET metoda. 2016.
- [117] HRN EN 13286-47:2021 Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 47. dio: Metoda ispitivanja za određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti, neposrednog indeksa nosivost i linearnog bubrenja, 2021.
- [118] HRN EN 12697-33:2019 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja - 33. dio: Priprema asfatnog uzorka valjkastim zbijanjem, 2019.
- [119] Y. H. Huang, Pavement Analysis and Design, 2. izdanje, Pearson Prentice Hall, 2004.
- [120] I. Barišić, M. Zvonarić, I. Netinger Grubeša, S. Šurdonja, Recycling waste rubber tyres in road construction, Archives of Civil Engineering, vol. 67, pp. 499 - 512, 2021.
- [121] N. - P. Pham, A. Toumi, A. Turatsin, Evaluating damage of rubberized cement - based composites under aggressive environments, Construction and Building Materials, vol. 217, pp. 234 - 241, 2019.
- [122] N. F. Medina, R. Garcia, I. Hajirasouliha, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, S: Raffoul, Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction, Construction and Building Materials, vol. 188, pp. 884 - 897, 2018.
- [123] G. San Miguel, G. D. Fowler, S. J. Sollars, The leaching of inorganic species from activated carbons produced from waste tyre rubber, Water Research, vol. 36, pp. 1936 - 1946, 2002.
- [124] S. L. Rodríguez R., O. Domínguez, J. H. Díaz A., C. García, F. Tapia, Synergistic effects of rubber-tire-powder and fluorogypsum in cement-based composite, Case Studies in Construction Materials, vol. 14, 2021.
- [125] C. Tashiro, J. Oba, K. Akama, The effects of several heavy metal oxides on the formation of ettringite and the microstructure of hardened ettringite, Cement and Concrete Research, vol. 9, pp. 303 - 308, 1979.

- [126] M. Gawlicki, D. Czamarska, Effect of ZnO on the hydration of Portland cement, *Journal of Thermal Analysis*, vol. 38, pp. 2157 - 2161, 1992.
- [127] Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, *Narodne Novine*, (NN26/2020).
- [128] I. Šošić, V. Serdar, *Uvod u statistiku*, Zagreb, Školska knjiga, 2002.
- [129] Ž. Pauše, *Uvod u matematičku statistiku*, Zagareb, Hrvatska tiskara, 1993.
- [130] R. E. Chaddock, *Principles and methods of statistics*, Houghton Mifflin Company, 1925.
- [131] S. Dimter, T. Rukavina, I. Barišić, Application of the ultrasonic method in evaluation of properties of stabilized mixes, *The Baltic Journal of Road and Brigde Engineering*, vol. 6, pp. 117 - 184, 2011.
- [132] T. Yi - qiu T, Z. Lei, G. Meng, S. Li-yan, Investigation of the deformation properties of asphalt mixtures with DIC technique, *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 581 - 590, 2012.
- [133] R. Behnke, G. Canon Falla, S. Leischner, T. Händel, F. Wellner, M. Kaliske, A continuum mechanical model for asphalt based on the particle size distribution: Numerical formulation for large deformations and experimental validation, *Mechanics of Materials*, vol. 153, 2021.
- [134] H. Jiang-san, W. Lan, L. Xin, Anti - fatigue performance of warm-mixed rubber powder modified asphalt mixture based on the DIC technique, *Construction and Building Materials*, vol. 335, 2022.
- [135] G. Hu, Q. Yang, X. Qiu, D. Zhang, W. Zhang, S. Xiao, J. Xu, Use of DIC and AE for investigating fracture behaviors of cold recycled asphalt emulsion mixtures with 100% RAP, *Construction and Building Materials*, vol. 344, 2022.
- [136] B. Wu, Z. Pei, P. Xiao, K. Lou, X. Wu, Influence of fiber - asphalt interface property on crack resistance of asphalt mixture, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, 2022.
- [137] S. Yang, J. Jiang, Z. Leng, F. Ni, Feasibility and performance of the Semi-circular Bending test in evaluating the low-temperature performance of asphalt mortar, *Construction and Building Materials*, vol. 269, 2021.

- [138] H. Yang, J. Ouyang, Z. Jiang, J. Ou, Effect of fiber reinforcement on self - healing ability of asphalt mixture induced by microwave heating, *Construction and Building Materials*, vol. 362, 2023.
- [139] H. Radhi Radeef, N. Abdul Hassan, M. Z. Hanif Mahmud, A. R. Zainal Abidin, C. Ros Ismail, H. Fadhil Abbas, Z. H. Al - Saffar, Characterisation of cracking resistance in modified hot mix asphalt under repeated loading using digital image analysis, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 116, 2021.
- [140] Z. Du, J. Yuan, Q. Zhou, C. Hettiarachchi, F. Xiao, Laboratory application of imaging technology on pavement material analysis in multiple scales: A review, *Construction and Building Materials*, vol. 304, 2021.
- [141] E. Romeo, A. Montepara, Characterization of reinforced asphalt pavement cracking behavior using flexural analysis, *SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures*, Elsevier Ltd.; pp. 356 - 65, 2012.
- [142] R. A. Freire, H. Di Benedetto, C. Sauzeat, S. Pouget, D. Lesueur, Crack propagation analysis in bituminous mixtures reinforced by different types of geogrids using digital image correlation, *Construction and Building Materials*, vol. 303, 2021.
- [143] V. Vinay Kumar, S. Saride, Evaluation of cracking resistance potential of geosynthetic reinforced asphalt overlays using direct tensile strength test, *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 37 - 47, 2018.
- [144] HRN EN 12697 - 24 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja - 24. dio: Otpornost na zamor, 2018.
- [145] HRN EN 13286 - 7 Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mješavine - 7. dio: Troaksijalno ispitivanje cikličkim opterećenjem za nevezane mješavine, 2004.
- [146] J. R. Barber, M. Ciavarella, Contact mechanics, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, pp. 29 - 43, 2000.
- [147] H. Soliman, A. Shalaby, Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content, *Transportation Geotechnics*, vol. 4, pp. 1 - 12, 2015.
- [148] D. Kuttah, The performance of a trial gravel road under accelerated pavement testing, *Transportation Geotechnics*, vol. 9, pp. 161 - 174, 2016.

- [149] N. Su, F. Xiao, J. Wang, S. Amirkhanian, Characterizations of base and subbase layers for Mechanistic - Empirical Pavement Design, *Construction and Building Materials*, vol. 1552, pp. 731 - 745, 2017.
- [150] Chakupat, Lalitpur, Guidelines for the Design of Flexible Pavements-2014, 2. izdanje, Ministry of Physical Infrastructure and Transport, 2021.
- [151] HRN U.C4.012./81 Projektiranje i građenje cesta. Dimenzioniranje novih asfaltnih kolovoznih konstrukcija, 1981.
- [152] N. Sudarsanan, Y. R. Kim, A critical review of the fatigue life prediction of asphalt mixtures and pavements, *Journal of traffic and transportation engineering*, vol. 9, pp. 808 - 835, 2022.
- [153] P. Autret, B. de Boissudry, J. P. Marchand, ALIZE III, Proceedings of the fifth International conference on the structural design of asphalt pavements, Delft, Netherlands, 1982.
- [154] N. Beskou, S. V. Tsinopoulos, D. D. Theodorakopoulos, Dynamic elastic analysis of 3-D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM treatment, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 82, pp. 63 - 72, 2016.
- [155] S. Melaku, Q. Hongsheng, Finite Element Analysis of Pavement Design Using ANSYS Finite Element Code, The Second International Conference on Civil Engineering, Energy and Environment, 2016.
- [156] D. V. Yanov, S. A. Zelepugin, Road pavement design using the finite element method, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1214, IOP Publishing, 2019.
- [157] R. M. Mulungye, P. M. O. Owende, K. Mello, Finite element modelling of flexible pavements on soft soil subgrades, *Materials and Design*, vol. 28, pp. 739 - 756, 2007.
- [158] P. Liu, Q. Xing, Y. Dong, D. Wang, M. Oeser, S. Yuan, Application of Finite Layer Method in Pavement Structural Analysis, *Applied Sciences*, vol. 7, 2017.
- [159] X. Jiang, M. Zhang, R. Xiao, P. Polaczyk, Y. Bai, B. Huang, An investigation of structural responses of inverted pavements by numerical approaches considering nonlinear stress-dependent properties of unbound aggregate layer, *Construction and Building Materials*, vol. 303, 2021.
- [160] J. Wu, S. H. Chew, Field performance and numerical modeling of multi - layer pavement

- system subject to blast load, *Construction and Building Materials*, vol. 52, pp. 177 - 188, 2014.
- [161] T. Wang, Z. Dong, K. Xu, S. Ullah, D. Wang, Y. Li, Numerical simulation of mechanical response analysis of asphalt pavement under dynamic loads with non-uniform tire - pavement contact stresses, *Construction and Building Materials*, vol. 361, 2022.
- [162] Y. Chen, L. Zhang, L. Xu, S. Zhou, Y. Li, N. Su, Z. Lu, In-situ and numerical investigation on dynamic response of asphalt pavement - low slag embankment system under traffic loading, *Transportation Geotechnics*, vol. 37, 2022.
- [163] M. Mazari, E. Navarro, I. Abdallah, S. Nazarian, Comparison of numerical and experimental responses of pavement systems using various resilient modulus models, *Soils and Foundations*, vol. 54, pp. 36 - 44, 2014.
- [164] M. A. Lak, S. François, G. Degrande, G. Lombaer, Development and experimental validation of a numerical model for the prediction of ground vibration generated by pavement breaking, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 79, pp. 199 - 210, 2015.
- [165] Z. Selsal, A. S. Karakas, B. Sayin, Effect of pavement thickness on stress distribution in asphalt pavements under traffic loads, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, 2022.
- [166] I. Barišić, J. Kaluđer, M. Zagvozda, M. Zvonarić, Influence of confining pressure on rubberised cement bound aggregate behaviour during static triaxial test, *Road Materials and Pavement Design*, 2023.

Curriculum vitae

Matija Zvonarić, mag. ing. aedif. rođen je 01. studenog 1995. godine u Osijeku. Srednju školu, opću gimnaziju, završava 2014. godine u Donjem Miholjcu. Iste godine upisao je preddiplomski sveučilišni studij građevinarstvo na Građevinskom fakultetu Osijek. Diplomom sveučilišnog prvostupnika građevinarstva stječe 2017. godine. Iste godine upisuje diplomski sveučilišni studij građevinarstvo – smjer Prometnice na istom fakultetu. Tijekom diplomskog studija bio je demonstrator iz predmeta Ceste, a stručnu praksu odradio je u građevinskom poduzeću Karašica – Vučica d.d. Diplomirao je 2019. godine pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Ivane Barišić, dipl. ing. građ. s temom „Turbo rotor – karakteristike i mogućnosti primjene“.

Od 04. studenog 2019. do 29. veljače 2020. godine radio je kao projektant suradnik u projektnom uredu Expert d.o.o. Od 01. ožujka 2020. godine zaposlen je kao doktorand na Uspostavnom istraživačkom projektu Hrvatske zaklade za znanost pod nazivom „Cementom stabilizirani nosivi slojevi s otpadnom gumom za održive kolnike“ na Zavodu za geotehniku, prometnice i geodeziju Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek. Nastavne aktivnosti na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek uključuju izvođenje nastave iz predmeta Cestovna čvorišta na diplomskom sveučilišnom studiju – smjer Prometnice, te Građenje i održavanje cesta na preddiplomskom stručnom studiju.

Od 2020. godine student je poslijediplomskog sveučilišnog studija građevinarstvo – modul prometnice i geotehnika na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek. Tijekom poslijediplomskog studija, u sklopu programa usavršavanja, boravio je na Građevinskom fakultetu u Rijeci, te na Fakultetu za gradbeništvo in geodeziju u Ljubljani. Do danas je sudjelovao na devet međunarodnih i domaćih znanstvenih skupova, a u koautorstvu je objavio sedam znanstvenih radova u WoSCC bazi.

