

UNIVERZITET CRNE GORE

GRAĐEVINSKI FAKULTET



Katarina Mirković

**PRIMJENA ELEKTROFILTERSKOG
PEPELA U ASFALTNIM MJEŠAVINAMA**

doktorska disertacija

Podgorica, 2019. godine

UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING



Katarina Mirković

FLY ASH APPLICATION IN ASPHALT MIXTURES

Doctoral Dissertation

Podgorica, 2019

Doktorand:

Ime i prezime: Katarina Mirković, dipl. inž. građ.

Datum i mjesto rođenja: 20. 08. 1964. god, Podgorica, Crna Gora

Postdiplomske studije: Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore
Postdiplomske magistarske akademske studije,
Studijski program Građevinarstvo, Saobraćajni smjer, 2010. god.

Mentor:

prof. dr Goran Mladenović, dipl. inž. građ.

Vanredni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Komisija za ocjenu podobnosti doktorske teze i kandidata:

prof. dr Goran Mladenović, dipl. inž. građ.

Vanredni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Milun Krgović, dipl. inž. met.

Redovni profesor Metalurško-tehnološkog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Zvonko Tomanović, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

Komisija za ocjenu doktorske disertacije:

prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Goran Mladenović, dipl. inž. građ.

Vanredni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

prof. dr Zvonko Tomanović, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

Komisija za odbranu doktorske disertacije:

prof. dr Radomir Zejak, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

prof. dr Goran Mladenović, dipl. inž. građ.

Vanredni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

prof. dr Zvonko Tomanović, dipl. inž. građ.

Redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore

Datum odbrane:

27. 12. 2019. godine

Zahvalnost

Istraživački rad i stvaralački proces, po svojoj kompleksnoj prirodi, nose sa sobom nova poznanstva i dragocjene kontakte, podstičući našu kreativnost i čineći naše ciljeve lakše ostvarivim.

Tokom rada na disertaciji bila sam privilegovana podrškom i znalačkim usmjerenjima mog mentora, profesora dr Gorana Mladenovića, čije je vođstvo značajno uticalo na moje spoznaje, kao i na tok i kvalitet rezultata mog rada. Koristim priliku da izrazim poštovanje i veliku zahvalnost svom mentoru na predanosti i angažovanosti tokom cjelokupnog procesa izrade disertacije, čiji su korisni savjeti i instrukcije uvijek dolazili u pravom trenutku i na najbolji način doprinosili formiranju i kvalitetu ove disertacije. Veliko hvala na strpljenju iskazanom kroz odgovore na mnogobrojna pitanja tokom perioda rada na disertaciji, ali i šire, odgovorima na sve moje nedoumice i zapitanosti iz oblasti naučnog i stručnog djelovanja.

Veliku zahvalnost izražavam profesoru dr Radomiru Zejaku i profesoru dr Zvonku Tomanoviću koji su mi tokom izrade disertacije, pružajući podršku, davali korisne savjete.

Zahvaljujem se kolegama sa Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, docentu dr Nikoli Tošiću na uspješnoj saradnji i dragocjenim savjetima prilikom interpretacije rezultata, kao i asistentu mr Marku Oreškoviću na pomoći pri laboratorijskim ispitivanjima, obradi podataka i korisnim komentarima. Hvala mnogo i osoblju Laboratorije za kolovozne konstrukcije Građevinskog fakulteta u Beogradu na angažovanosti tokom pripreme i izvođenja eksperimenta.

Aleksandru Vučeljiću, dipl. inž. geol., direktoru Laboratorije TPA za obezbeđenje kvaliteta i inovacije iz Čačka, izražavam izuzetnu zahvalnost, bez čijeg poticaja i svesrdne pomoći u omogućavanju sprovođenja značajnog dijela eksperimenta, nabavke i transporta komponentnih materijala, nije bilo moguće pokrenuti istraživanja u okviru disertacije. Takođe, zahvaljujem i tehnologu za ispitivanje asfalta i komponentnih

materijala Aleksandru Milojeviću, struk. inž. građ. i rukovodiocu laboratorije za ispitivanje građevinskih materijala Radu Laziću hem. tehn., koji su u okviru TPA laboratorije dali nesebičan doprinos u pripremi materijala i uzorka mješavina koji su ispitani tokom eksperimenta.

Zahvalnost takođe izražavam i direktorki Centra za ekotoksikološka ispitivanja iz Podgorice, Nadi Medenici, dipl. ecc. kao i specijalisti tok. hem. Danijeli Šuković i dr. Dejamu Jančiću iz Sektora za laboratorijsku dijagnostiku i zaštitu od zračenja, na sprovođenju ispitivanja ekološke podobnosti elektrofilterskih pepela upotrijebljenih u eksperimentu.

Zahvaljujem upravi Građevinskog fakulteta Univerziteta Crne Gore i kolegama na podršci i korisnim savjetima tokom rada na disertaciji.

Iskrenu zahvalnost dugujem i svojim prijateljima Borisu Jevriću, dipl. inž. el. i Jovani Kapisodi koji su dali nesebičan doprinos u tehničkoj obradi disertacije.

Na kraju, najtoplije izraze zahvalnosti upućujem svojoj porodici, suprugu Milanu i djeci Luki, Aleksi i Maši, za svakodnevnu podršku i vjeru u uspjeh.

Ovaj rad posvećujem svojoj porodici i prijateljima u znak zahvalnosti za razumijevanje za sve uskraćene trenutke, koje nismo podijelili, zbog moje usmjerenosti na izradu ove disertacije.

PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija:

Doktorske studije Univerziteta Crne Gore

Građevinski fakultet

Studijski program - Građevinarstvo

Naslov doktorske disertacije:

Primjena elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama

Rezime: U svrhu očuvanja prirodnih resursa, istraživanja na polju upotrebe otpadnih i alternativnih materijala u izgradnji i održavanju puteva, postaju globalni trend posljednjih decenija. Elektrofilterski pepeo (EFP) kao nusprodukt sagorijevanja uglja u elektranama, predstavlja otpadni material, čija upotreba u putogradnji sve više privlači pažnju.

Ova disertacija ima cilj da istraži uticaj elektrofilterskog pepela na fizičko-mehaničke karakteristike asfaltnih mješavina i utvrdi mogućnost primjene konkretnih pepela, u asfaltnim mješavinama upoređujući svojstva eksperimentalnih mješavina sa svojstvima kontrolne asfaltne mješavine.

U prvom eksperimentalnom dijelu, izvršena su ispitivanja elektrofilterskih pepela, sa ciljem utvrđivanja njihove podobnosti za upotrebu u asfaltnim mješavinama. Ispitivanja su obuhvatila opsežna ispitivanja mehaničkih, hemijskih i fizičkih svojstava pepela, mineralošku karakterizaciju kao i ekološku podobnost.

Težište ove disertacije je u drugom eksperimentalnom dijelu, gdje su sprovedena glavna istraživanja koja se odnose na utvrđivanje karakteristika eksperimentalnih asfaltnih mješavina spravljenih sa elektrofilterskim pepelom kao djelimičnom ili potpunom zamjenom za mineralni filer, koje su upoređene sa karakteristikama kontrolne mješavine.

U eksperimentu su upotrijebljeni elektrofilterski pepeli iz tri različita izvora lokalnog porijekla, a procenti u kojima je vršena zamjena kamenog brašna su 25%, 50%, 75% i

100%, dok je kontrolna mješavina spravljena sa 100% filera od kamenog brašna krečnjačkog porijekla. Na taj način je dobijeno 13 mješavina, 12 eksperimentalnih i jedna kontrolna mješavina, koje su projektovane kao asfaltne mješavine za habajući sloj kolovozne konstrukcije AB11s surf sa ciljanim sadržajem šupljina ispunjenih vazduhom od 5%.

Eksperimentalni dio istraživanja obuhvatio je ispitivanje zapreminskih karakteristika, stabilnosti i tečenja standardnih Maršalovih uzoraka, otpornost na dejstvo vode, otpornost na trajnu deformaciju i modul krutosti.

Rezultati dobijeni u ovom istraživanju ukazuju da je ispitane pepele moguće primijeniti u asfaltnim mješavinama, kao i da se dodavanjem ovih pepela može postići zadovoljavajuća zapreminska struktura. Rezultati istraživanja pokazuju da zapreminska masa i šupljine u mineralnoj i asfaltnoj mješavini generalno zavise od vrste pepela i njegovog sadržaja u mješavini. U odnosu na kontrolnu mješavinu, stabilnost i tečenje mješavina sa elektrofilterskim pepelom su poboljšani. Otpornost uzoraka na dejstvo vode je uglavnom veća kod mješavina sa pepelom u odnosu na kontrolnu mješavinu, što zavisi od vrste i količine pepela. Sa povećanjem procenta pepela povećava se otpornost asfaltne mješavine na trajnu deformaciju. Modul krutosti na niskim temperaturama, za sve mješavine sa pepelom je manji u odnosu na kontrolnu mješavinu, što je povoljna karakteristika u pogledu otpornosti mješavine na niske temperature. Modul krutosti na visokim temperaturama, većine eksperimentalnih mješavina, je veći od kontrolne mješavine, što ukazuje na otpornost mješavina na trajnu deformaciju. Rezultati modula krutosti su u korelaciji sa rezultatima otpornosti na trajne deformacije.

Dobijeni rezultati eksperimentalnog istraživanja ukazuju da su ostvareni postavljeni ciljevi i da su potvrđene polazne hipoteze disertacije.

Na osnovu zaključnih razmatranja rezultata date su preporuke za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

Ključne riječi: asfaltne mješavine, kameno brašno, elektrofilterski pepeo, zapreminske karakteristike, stabilnost, tečenje, otpornost na dejstvo vode, otpornost na trajnu deformaciju, modul krutosti.

Naučna oblast: Građevinarstvo

Uža naučna oblast: Saobraćajno-urbanistička

UDK broj: 691.16:620.1(043.3)

THE DATA OF DOCTORAL DISSERTATION

Name of doctoral studies: Doctoral studies at the University of Montenegro

Faculty of Civil Engineering

Study program – Civil Engineering

Title of doctoral dissertation: Fly Ash Application in Asphalt Mixtures

Abstract: In order to preserve natural resources, research into the use of waste and alternative materials in road construction and maintenance has become a global trend in recent decades. Fly ash (FA), as a by-product of coal combustion in power plants, is a waste material that is increasingly being used in road construction.

This dissertation aims to investigate the influence of fly ash on the physical-mechanical properties of asphalt mixtures and to determine the possibility of applying specific ashes in asphalt mixtures by comparing the properties of experimental mixtures with the properties of control asphalt mixtures.

In the first experimental section, in order to determine their suitability for use in asphalt mixtures tests were carried out on fly ashes. The tests included extensive testing of the mechanical, chemical and physical properties of the ashes, mineralogical characterization and ecological suitability.

The focus of this dissertation is in the second experimental section, where the main investigations were carried out to determine the properties of experimental asphalt mixtures prepared with fly ash as partial or complete replacement for the mineral filler, which were compared with the properties of the control mixture.

The experimental research was performed on asphalt samples containing fly ash from three different sources of local origin, with 25%, 50%, 75% and 100% of mineral filler substitution, while the control mixture was made with 100% mineral filler of limestone origin. In this way, 13 mixtures were obtained, 12 experimental ones and one control mixture, which were designed as asphalt concrete mixtures for the wearing course, AB11s surf with a target air voids content of 5%.

The experimental part of the study included testing the volumetric composition of asphalt mixtures, stability and flow of standard Marshall's samples, water sensitivity, resistance to permanent deformation and modulus of stiffness of asphalt mixtures.

The results obtained in this study indicate that it is possible to apply the tested ashes in asphalt mixtures, as well as that by adding these ashes, a satisfactory volumetric composition can be achieved. The results of the study show that the bulk density and voids of mineral and asphalt mixture generally depend on the type of ash and its content in the mixture. Compared to the control mixture, the stability and flow of the fly ash mixtures were improved. The water sensitivity is generally lower in the mixtures with fly ash compared with the control mixture, and depends on the type and percentage of fly ash. With increase of fly ash percentage, the asphalt mixture's resistance to permanent deformation also is increased.

The modulus of stiffness at low temperatures is lower for all ash mixtures than for the control mixture, which is a favourable characteristic in terms of the resistance of the mixture to low temperatures. For most experimental mixtures, the modulus of stiffness at high temperatures is higher than for the control mixture, indicating the resistance of the mixtures to permanent deformation. Therefore, the results of the stiffness modulus are in correlation with the results of the resistance to permanent deformation.

The obtained results of the experimental research indicate that the set goals were achieved and the initial hypotheses of the dissertation were confirmed.

Based on the concluding considerations of the results, recommendations for further research in this area have been brought.

Key words: asphalt mixtyre, mineral filler, fly ash, volume structure, stability, flow, water sensitivity, resistance to permanent deformation, stiffnes modulus

Scientific area: Civil Engineering

Narrow scientific area: Traffic-urban

UDK number: 691.16:620.1(043.3)

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1. Predmet istraživanja.....	1
1.2. Cilj istraživanja.....	6
1.3. Polazne hipoteze	7
1.4. Struktura rada.....	8
2. Pregled literature	10
2.1. Uvod	10
2.2. Karakteristike elektrofilterskog pepela.....	10
2.3. Karakteristike asfalt betonskih mješavina spravljenih sa elektrofilterskim pepelom.....	21
2.3.1. Uvod	21
2.3.2. Optimalan sadržaj bitumena	25
2.3.3. Analiza zapreminske strukture i zapreminske mase	27
2.3.4. Stabilnost i tečenje po Maršalu	33
2.3.5. Otpornost na dejstvo vode	37
2.3.6. Otpornost na trajnu deformaciju	44
2.3.7. Krutost	51
2.3.8. Svojstva asfalt betonskih mješavina sa elektrofilterskim pepelom	62
2.4. Rezime	67
3. Metodologija, materijali i program eksperimenta.....	70
3.1. Uvod	70
3.2. Metodologija.....	70
3.3. Komponentni materijali	73
3.3.1. Agregat	74
3.3.2. Bitumen.....	74
3.3.3. Filer.....	75
3.3.3.1. Kameno brašno	75

3.3.3.2. Elektrofilterski pepeo	75
3.4. Projektovanje asfaltnih mješavina	78
3.4.1. Mineralna mješavina	79
3.4.2. Projektovanje asfaltnih mješavine metodom Maršala	80
3.5. Priprema uzoraka asfaltne mješavine	81
3.5.1. Maršalovi uzorci	81
3.5.2. Ploče za kolotrage	82
3.6. Rezime	84
4. Rezultati i diskusija ispitivanja komponentnih materijala	85
4.1. Uvod	85
4.2. Agregat	85
4.3. Bitumen	87
4.4. Filer	88
4.4.1. Kameno brašno	88
4.4.2. Elektrofilterski pepeo	88
4.5. Rezime	105
5. Rezultati i diskusija ispitivanja asfaltnih mješavina	107
5.1. Uvod	107
5.2. Zapreminske karakteristike	107
5.3. Otpornost na dejstvo vode	115
5.4. Otpornost na trajnu deformaciju	119
5.5. Modul krutosti	127
5.6. Rezime	138
6. Zaključci i preporuke za dalja istraživanja	142
6.1. Zaključci	142
6.1.1. Zaključci u vezi sa rezultatima ispitivanja elektrofilterskog pepela	143
6.1.2. Zaključci u vezi sa rezultatima ispitivanja asfaltnih mješavina	144
6.2. Preporuke za dalja istraživanja	148
Literatura	149
Prilog A	167
Rezultati ispitivanja uzoraka na indirektno zatezanje	167

Prilog B	170
Rezultati ispitivanja otpornosti na trajnu deformaciju	170
Prilog C	175
Rezultati ispitivanja modularne krutosti	175
Prilog D	204
Spisak slika	204
Prilog E	209
Spisak tabela	209
Biografija autora	212
Izjava o autorstvu	214
Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada.....	215
Izjava o korišćenju	216

1. UVOD

1.1. Predmet istraživanja

Od sredine XX vijeka svjetska populacija bilježi ubrzan prirast koji neminovno utiče na povećanje obima i unapređenje svjetske privrede. Kako bi se zadovoljile mnogostruke potrebe stanovništva prvenstveno se uvećavaju aktivnosti građevinske industrije, pri čemu prednjače saobraćajna i energetska infrastruktura, kao i stambeni i industrijski objekti. Postojeći objekti i infrastruktura, takođe zahtijevaju održavanje i inoviranje. Sve ovo utiče na značajno uvećane potrebe za građevinskim materijalom, što znači i svakodnevno iscrpljivanje rezervi neobnovljivih prirodnih resursa. Konstantnim smanjivanjem tih rezervi nameće se potreba za traženjem alternativnih rješenja, i ne čudi činjenica što istraživanja na ovom polju postaju globalni trend poslednjih decenija (Peploe i Dawson 2006.).

Sa druge strane, svjetska privreda produkuje značajne količine otpadnih materijala, tako da se javlja problem njihovog odlaganja, što ima za posledicu zauzetost velikih površina koje bi mogle imati mnogo bolju i humaniju svrhu korištenja. Tako deponovani materijali zahtijevaju i poseban tretman u smislu načina odlaganja i zaštite životne sredine, jer u suprotnom predstavljaju ekološki problem, kako na lokalnom, tako i na globalnom nivou.

Zbog svega navedenog, jedna od primarnih oblasti istraživanja u građevinarstvu u poslednjih nekoliko decenija odnosi se na održivo građevinarstvo i primjenu otpadnih materijala putem recikliranja ili stvaranja novih alternativnih materijala ili mješavina primjenljivih u građevinarstvu. Osnovna ideja je da se na ovaj način sačuvaju prirodni resursi ugradnjom otpadnih materijala u vidu zamjene za prirodne ili stvaranjem novih materijala i mješavina na bazi otpadnih. Sve ovo uz uslov da se ne naruši kvalitet i trajnost objekata.

Generalno, skoro u svim zemljama Evrope postoji tendencija da se u izgradnji građevinskih objekata poveća upotreba alternativnih materijala, kakvim se mogu smatrati neki od otpadnih materijala. Tako su neke države uvođenjem taksi za odlaganje

otpada pokrenule odgovorne institucije na preuzimanje neophodnih koraka za upotrebu otpadnih materijala u građevinarstvu (Reid i ost. 2001.). Kako realizaciju ovih mogućnosti ne bi sputavale administrativne prepreke, potrebno je, na državnom nivou preduzeti određene mjere, kao što su izmjene u zakonodavstvu, izrada akcionih planova i direktiva.

Putogradnja pruža veliku mogućnost ugradnje otpadnih materijala u svim segmentima: od temeljnog tla i slojeva nasipa, preko posteljice i svih slojeva kolovozne konstrukcije. Kada su kolovozne konstrukcije u pitanju, u svrhu očuvanja prirodnih resursa, izvedene su brojne studije koje dokazuju mogućnost upotrebljivosti raznih vrsta otpadnih materijala kao alternativnih rješenja za upotrebu u betonskim i asfaltnim kolovoznim konstrukcijama, kao što su šljaka, otpadna guma, otpadni polietilen, reciklirani beton ili asfalt kao agregat, kao i građevinski otpad. (Prezzi i sar. 2011.; Souliman i Eifert 2016.; Yang and Cheng 2016.; Pourtahmasb i Karim 2014.; Mohammadafzali i sar. 2017.; Li i sar. 2017.; Radević 2017.).

Uprkos ovome, stoji činjenica da je obim primjene otpadnih materijala u kolovoznim konstrukcijama generalno mali, što je dijelom posledica nedovoljne istraženosti fizičko-mehaničkih i hemijskih karakteristika, kao i upitnost njihove ekološke podobnosti, a dijelom iz razloga ekonomske neisplativosti.

Putevi su građevinski objekti u čiju je strukturu moguće ugraditi značajne količine ovih materijala. Prema podacima Evropske asocijacije za asfaltne kolovoze (2018.) Evropska putna mreža se sastoji od preko 5 miliona kilometara puteva, od čega je 66.700 km klasifikovano kao putevi za motorna vozila, od kojih je preko 90% sa fleksibilnom kolovoznom konstrukcijom. Isti izvor navodi da u Evropi postoji oko 4700 asfaltnih baza, koje proizvode oko 275 miliona tona asfalta godišnje. Asfaltna mješavina se uglavnom sastoji od oko 95% agregata, pijeska, filera i oko 5% bitumena, pa je lako doći do podatka da je učešće mineralnog filera u godišnjoj produkciji asfalta u Evropi (u procentima 4% do 7% od ukupne mase agregata) u rasponu od 10 do 18 miliona tona godišnje, što predstavlja velike količine najkvalitetnijeg prirodnog materijala. Sa aspekta cirkularne ekonomije, koja u Evropi dobija sve veći zamajac, mnogo je povoljnije rješenje da se pogodnim proizvodnim procesima, otpadni materijali ugrade u

građevinske objekte i da im se na taj način omogući novi životni ciklus, posmatrajući ih resursom, a ne otpadnim materijalom.

Elektrofilterski pepeo (EFP) je otpadni materijal koji se generiše u velikim količinama i u svijetu se čine napor da se u što većim količinama ugradi u građevinske objekte.

Betonske konstrukcije, kao i proizvodi od betona, drže primat kada je riječ o upotrebi EFP u svrhu mineralnog dodatka. Za ovu svrhu kvalitet elektrofilterskog pepela se strogo prati. Granulometrijski sastav, sadržaj vlage, gubitak pri žarenju i hemijski sastav su najbitnije karakteristike ovog materijala koje utiču na primjenu pepela u betonu. Takođe, pepeo koji se koristi u betonu mora, mora da bude postojanog kvaliteta i da posjeduje dovoljno pucolanske reaktivnosti.

Kada je riječ o putogradnji, EFP se najčešće koristi kao materijal za nasipe, dopuna vezivu za stabilizaciju slojeva kolovozne konstrukcije i u asfalt betonima kao djelimična ili potpuna zamjena za filer. Međutim upotreba EFP u putogradnji još uvijek je prilično malog obima, manje od 2% (ACAA 2007.). U godišnjem izvještaju Evropske asocijacije za agregat (2017/2018.) nalazi se podatak da je godišnja primjena šljake i EFP zajedno, manja od 2.3%.

U Sjedinjenim američkim državama već više od 40 godina postoji praksa ugradnje elektrofilterskog pepela u građevinske objekte. Od davne 1974. godine kada je proizvedeno 44.1 milion tona pepela (ACAA 2007.) produkcija EFP je uglavnom u stalnom porastu, tako je tokom 2006. godine proizvedeno 72.4 miliona tona, 2013. godine 60.2 miliona tona i 2017. oko 120 miliona tona. Takođe je i procenat ugrađenog pepela u građevinske objekte u odnosu na proizvedeni pepeo u stalnom porastu, pa je 2006. godine ugrađeno 29.4 %, 2013. godine 25.7 % i 2017. godine 64% u odnosu na proizvedeni pepeo (ACAA 2015.). Upoređujući procenat proizvedenog i recikliranog pepela u Sjedinjenim Američkim državama vidi se značajan napredak u korištenju EFP kao građevinskog materijala.

U Evropskoj uniji, u prosjeku, reciklira se preko 90% čvrstog otpada nastalog sagorijevanjem uglja uključujući i elektrofilterski pepeo, zbog čega se EFP s pravom tretira kao građevinski materijal (Uputstvo za korisnike nusproizvoda, 2010.). Tako je u

2008. godini 15 zemalja članica EU utrošilo 18 miliona tona pepela u industriji građevinskog materijala i putogradnji (<http://www.zelenazemlja.com/vest.php?id=19&str=2>).

U regionu je situacija nešto drugačija kada je riječ o ugradnji EFP u građevinske objekte. U Republici Srbiji Uredbom od 2015. godine EFP je dobio status građevinskog materijala. U Srbiji, i pored administrativne olakšice u vidu ove Uredbe, od oko šest miliona tona produkcije pepela godišnje, građevinska industrija iskoristi svega 2.7% (<http://www.zelenazemlja.com/vest.php?id=19&str=2>), i to primarno u cementoj industriji kao dodatak cementu.

U Republici Srpskoj, jedna od najvećih termoelektrana TE „Gacko“ godišnje proizvodi oko 350.000 – 400.000 tona pepela (Građevinski proizvodi na bazi EFP iz TE „Gacko“), dok se u Republici Kosovu proizvodi oko 2 miliona t/god. Ni u jednoj od ovih država nije zabilježena značajnija upotreba EFP u građevinarstvu.

U Crnoj Gori još uvijek ne postoji zakonska regulativa kojom se EFP tretira kao građevinski materijal i oko pola miliona tona pepela, koliko godišnje proizvodi jedina termoelektrana u Crnoj Gori TE „Pljevlja“, u potpunosti se deponuje na odlagalištu. U TE „Pljevlja“ u toku je izrada projekta ekološke rekonstrukcije elektrane, u okviru koje treba da se izgradi postrojenje za zahvatanje i silosiranje pepela, što predstavlja preduslov za njegovu upotrebu u građevinarstvu.

Velika mobilnost koja otpada na transport putnom infrastrukturom ima i svoju cijenu. Sa napretkom tehnološkog razvoja i automobilske industrije, pred kolovozne konstrukcije se postavljaju sve veći zahtjevi sa aspekta održavanja i produžetka vijeka trajanja, nivoa uslužnosti, kao i sa ekonomskog i ekološkog aspekta. Fleksibilne kolovozne konstrukcije, kao najzastupljeniji tip konstrukcija na putevima širom svijeta, sadrže asfaltne slojeve koji imaju značajnu ulogu, kako u pogledu nosivosti i trajnosti, tako i u pogledu cijene kolovoznih konstrukcija. U asfaltnim slojevima, mješavina bitumena i mineralnog filera, ima izuzetno važan uticaj na reološke karakteristike i ponašanje asfaltnog sloja u fazi eksploatacije (Bedaković 1964.). Sa druge strane, bitumen i mineralni filer su dvije najskuplje komponente u asfaltnoj mješavini. Primjenom elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama kao djelimične ili potpune zamjene za mineralni filer ili bitumen omogućila bi se zamjena određenog dijela

najskupljih komponenti asfaltne mješavine, što može smanjiti troškove izgradnje fleksibilnih kolovoznih konstrukcija.

Posljednjih decenija se intenziviraju istraživanja u pravcu primjene EFP u putogradnji koja ukazuju na to da se ovaj materijal sa posebnim uspjehom može primijeniti u putogradnji, npr. kao materijal za nasipe, ili kao dio veziva u mješavini sa cementom za izradu betona i stabilizacija tla i kamenog agregata (Uputstvo 2010.).

U poređenju sa tim, dosadašnja istraživanja mogućnosti primjene elektofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama su znatno manjeg obima. Razlog ovome su posledice nepotpunog razumijevanja mehanizma kojim EFP utiče na svojstva asfaltne mješavine. Osim toga, većina objavljenih istraživanja se bavila direktnim uticajem EFP na karakteristike asfaltnih mješavina, ne posmatrajući asfaltni sloj u toku eksploatacije i njegove karakteristike tokom životnog vijeka kolovoza. Rijetki izuzetak od ovog pristupa je istraživanje Sobolev i sar. (2013.) u okviru kojeg je izvedena kolovozna konstrukcija probne dionice, koja je poslije četiri mjeseca eksploatacije služila za utvrđivanje svojstava asfaltnog sloja izvedenog sa EFP, kao i Ali i sar (2013.) koji su pratili ponašanje kolovoza nakon ugradnje, jednu, pet i deset godina, pri čemu su zaključili da, generalno, prisustvo EFP ima pozitivan uticaj na karakteristike asfaltnih mješavina i poslije dužeg perioda eksploatacije. Utvrđeno je takođe, da količina, fizičko-mehaničke i hemijske karakteristike pepela značajno utiču na karakteristike asfaltne mješavine.

Generalno, istraživanja potvrđuju mogućnost primjene EFP u asfaltnim slojevima, bilo kao djelimična ili potpuna zamjena za mineralni filer (Kar i sar. 2014.; Rongali i sar. 2013.) ili kao djelimična zamjena za bitumen (Sharma i sar. 2010.; Sobolev 2014.; Đureković i Mladenović 2015.), pri čemu su osnovna svojstva mješavina zadržana ili poboljšana.

Ova istraživanja, ipak nisu bila dovoljno sveobuhvatna kako bi u okviru njih mogli da se daju precizni inputi za primjenu u široj praksi. Razlog ovome može biti i značajna razlika u karakteristikama pepela različitog porijekla, što otežava tipizaciju u upotrebi.

Može se zaključiti da ima puno razloga zbog kojih vrijedi dalje razmatrati upotrebu EFP u asfaltnim mješavinama i nastaviti sa daljim istraživanjem na ovom polju.

Za potrebe ove disertacije analizirani su pepeli iz tri različita izvora kao i njihova podobnost za primjenu u eksperimentu. Ispitane su i analizirane njihove karakteristike, kao i karakteristike asfaltnih mješavina spravljenih sa elektrofilterskim pepelom kao djelimičnom ili potpunom zamjenom za mineralni filer.

1.2. Cilj istraživanja

Osnovni cilj doktorske disertacije je da se istraži uticaj elektrofilterskog pepela na fizičko-mehaničke karakteristike asfaltnih mješavina i utvrdi mogućnost primjene konkretnih pepela, u asfaltnim mješavinama upoređujući svojstva eksperimentalnih mješavina sa svojstvima kontrolne asfaltne mješavine spravljene sa filerom od kamenog brašna krečnjačkog porijekla.

Na osnovu postojećih i sprovedenih sopstvenih eksperimentalnih istraživanja, planirano je ostvarenje sledećih ciljeva:

- da se utvrdi mogućnost zamjene kamenog brašna elektrofilterskim pepelom,
- da se odredi optimalni procenat zamjene za sva tri pepela upotrijebljena u eksperimentu,
- da se utvrdi efekat primjene EFP na karakteristike asfaltnih mješavina,
- da se, na osnovu prethodne analize i izvedenih zaključaka, predlože smjernice za dalja istraživanja.

Da bi se postogli ovi ciljevi, istraživanjem su obuhvaćeni sledeći zadaci:

1. Izvršena je analiza dosadašnjih istraživanja primjene elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama.
2. Izvršeno je opsežno ispitivanje i analiza uzoraka elektrofilterskog pepela iz termoelektrana „Pljevlja“, „Gacko“ i „Kosovo B“.
3. Eksperimentalno je utvrđen uticaj različitih proporcija elektrofilterskog pepela i kamenog brašna na fizičko-mehaničke karakteristike asfaltnih mješavina i

upoređen sa karakteristikama asfaltne mješavine spravljene sa standardnim mineralnim filerom.

4. Na osnovu analize postignutih rezultata data je preporuka za dalja istraživanja.

1.3. Polazne hipoteze

Polazne hipoteze u izradi disertacije su:

1. Elektrofilterski pepeli korišteni u eksperimentu su ekološki bezbjedni i pogodni su materijali za upotrebu u putogradnji.
2. Elektrofilterski pepeo se može primjeniti kao djelimična ili potpuna zamjena za kameno brašno u asfaltnim mješavinama, pri čemu se zadržavaju ili poboljšavaju fizičko-mehaničke karakteristike asfaltne mješavine.
3. Procentualno učešće EFP u asfaltnoj mješavini utiče na karakteristike asfaltne mješavine.
4. Pepeli različitih fizičko-mehaničkih i hemijskih karakteristika imaju različit uticaj na svojstva asfaltnih mješavina.

Osnovna metoda je eksperimentalna metoda sa precizno definisanim ciljem i programom. U radu su primjenjene opšte i posebne naučne metode i postupci primjereni području i cilju rada.

Navedena tema rada realizovana je uporednom analizom teorijskog pristupa podatka dobijenih iz literature i praktičnog pristupa zasnovanog na sopstvenim eksperimentalnim rezultatima.

Obrada rezultata izvršena je metodama klasifikacije, analize i sinteze, kao i korelacione i regresione analize. Formiranje zaključaka i preporuka izvršeno je metodom sinteze i indukcije.

1.4. Struktura rada

Cjelokupni sadržaj disertacije čine: uvod, pregled literature, metodologija, materijali i program eksperimenta, rezultati i diskusija rezultata ispitivanja komponentnih materijala, rezultati i diskusija rezultata ispitivanja asfaltnih mješavina, kao i zaključci i preporuke za dalja istraživanja.

U uvodnom poglavlju je ukazano na značaj upotrebe elektrofilterskog pepela sa aspekta cirkularne ekonomije. Definisani su predmet i ciljevi istraživanja, a dat je i prikaz strukture disertacije.

Prvi dio pregleda literature razmatra karakteristike i različite klasifikacije pepela. U dugom dijelu pregleda literature su prikazani glavni zaključci u vezi sa fizičko-mehaničkim karakteristikama asfaltnih mješavina sa EFP. Izvršena je komparativna analiza karakteristika mješavina spravljenih sa EFP i kamenim brašnom. Takođe, dat je i detaljan pregled stanja u oblasti ispitivanja asfaltnih mješavina kod kojih je kameno brašno zamijenjen elektrofilterskim pepelom. Pregled literature pružio je mogućnost analiziranja zapreminske strukture asfaltnih mješavina, stabilnosti i tečenja po metodi Maršala, otpornosti na dejstvo vode i otpornost na trajnu deformaciju, kao i modula krutosti.

U trećem poglavlju je dat program ispitivanja, predstavljena primijenjena metodologija i materijali primijenjeni u eksperimentu, kao i opis sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja. Predstavljen je način pripremanja asfaltnih uzoraka na kojima su izvršena eksperimentalna ispitivanja. Analiza zapreminskih karakteristika, tako dobijenih uzoraka, omogućila je bolje razumijevanje ponašanja eksperimentalnih asfaltnih mješavina u različitim opitima.

U četvrtom poglavlju predstavljeni su rezultati prvog eksperimentalnog dijela istraživanja koje se odnosi na ispitivanje karakteristika komponentnih materijala. Akcenat diskusije rezultata stavljen je na karakteristike pepela primijenjenih u eksperimentu.

U petom poglavlju predstavljeni su i diskutovani rezultati drugog eksperimentalnog dijela istraživanja, koje se odnosi na ispitivanje asfaltnih mješavina. Na 12 različitih asfaltnih mješavina, u kojima je variran procenat primjene elektrofilterskog pepela, određene su zapreminske karakteristike, stabilnost i tečenje. Takođe, sprovedeni su opiti određivanja otpornosti na dejstvo vode, određivanja otpornosti na trajnu deformaciju i određivanja modula krutosti. Dobijeni rezultati su upoređeni i diskutovani u odnosu na rezultate ispitivanja standardne kontrolne mješavine, kao i u odnosu na važeće tehničke specifikacije.

Šesto poglavlje sadrži opšte zaključke istraživanja, kao i preporuke za buduća istraživanja.

Na kraju rada nalazi se spisak literature, kao i prilozi sa rezultatima ispitivanja asfaltnih mješavina.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Uvod

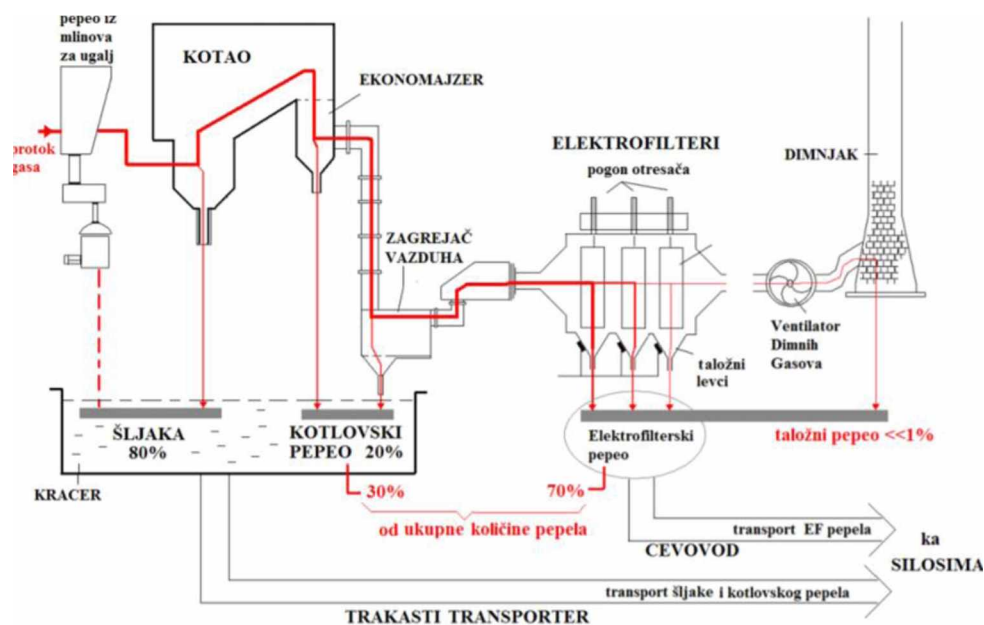
Glavni dio pregleda objavljenih istraživanja u svijetu čine objavljeni radovi koji se odnose na ispitivanje karakteristika asfaltnih mješavina u kojima je izvršena djelimična ili potpuna zamjena kamenog brašna elektrofilterskim pepelom. Takođe, razmatrana su i istraživanja koja se bave ispitivanjem svojstava komponentnih materijala. Razlike u ponašanju asfaltnih mješavina sa i bez elektrofilterskog pepela posledica su različitih karakteristika pepela i kamenog brašna, kao i različitih karakteristika elektrofilterskih pepela uzrokovanih različitim porijeklom. U svrhu što boljeg objašnjenja tih razlika razlika, u prvom dijelu, pregledom literature su obuhvaćene osnovne karakteristike elektrofilterskih pepela, kao i njihova klasifikacija prema različitim parametrima. U drugom dijelu pregleda literature sagledani su rezultati dosadašnjeg proučavanja uticaja EFP na fizičko-mehaničke karakteristike i zapreminsku strukturu asfaltnih mješavina.

2.2. Karakteristike elektrofilterskog pepela

Više od 50% električne energije u svijetu dobija se iz termo-energetskih postrojenja, i kada se uzme u obzir da se u tom procesu proizvodnje oslobađa velika količina štetnih i otpadnih materijala (Despotović, 2016.), ne čudi sve veći porast ekološke svijesti usmjerene na rješavanje problema iz ove oblasti. Osim štetnih gasova (SO_x , NO_x , CO_2) i otpadne vode, u ovom procesu nastaju velike količine čvrstog otpada koji predstavlja nesagorivi ostatak koji nastaje nakon žarenja uglja i koji se prema krupnoći zrna, dijeli na šljaku, kotlovski pepeo i elektrofilterski pepeo (EFP) ili kako se još naziva lebdeći, odnosno leteći pepeo (LP).

Šljaka (eng. bottom ash) je najkrupniji nesagorivi ostatak sagorijevanja koji se slobodnim padom taloži na dnu ložišta kotla. Kotlovski pepeo (eng. boiler ash) čine čestice krupnije klase, koje se iz kotla izdvajaju zajedno sa dimnim gasovima, ali se na putu do elektrostatičkog filtera gravitaciono talože i izdvajaju ispod kanala dimnog

gasa. Elektrofilterski pepeo (eng. fly ash) čine najsitnije čestice koje lebde zajedno sa dimnim gasom. One se sastoje, uglavnom od neorganskih nesagorivih materija, od kojih se dio, tokom sagorijevanja transformiše u amorfnu fazu. Veći dio EFP iz dimnog gasa, se „hvata“ za elektrostatičke filtere, sa kojih se, putem otresanja uvodi u sustem za kolektovanje. Na slici 2.1 prikazan je tehnološki proces uobičajene distribucije šljake i pepela u tipičnom termo-energetskom postrojenju.



*Slika 2.1 Distribucija šljake i pepela u tipičnom termo-energetskom postrojenju
(Despotović, 2016.)*

Hemijske i fizičko-mehaničke osobine, kao i mineraloški i granulometrijski sastav razlikuju se za različite pepele, što je uzrokovano karakteristikama uglja koji se sagorijeva. U zavisnosti od geološkog porijekla, toplotne vrijednosti, hemijskog sastava i sadržaja pepela razlikuju se četiri tipa ili kategorije uglja: lignit, bitumenizirani uglj, djelimično bitumenizirani uglj i antracit. (Uputstvo, 2010.)

Lignit, poznat i kao smeđi uglj, je uglj najniže klase i nema jasno definisan sastav. Zbog visokog sadržaja vode i nemogućnosti potpunog sagorijevanja, sagorijevanjem lignita se stvaraju velike količine pepela. Djelimično bitumenizirani uglj ima svojstva i lignita i bitumeniziranog uglja. Pepeo bitumeniziranog uglja se odlikuje sadržajem silicijum dioksida, aluminijum oksida, fero oksida i kalcijuma, sa promjenljivim prisustvom ugljenika izraženo gubitkom pri žarenju (loss on ignition - LOI). Za pepeo

nastao sagorijevanjem djelimično bitumeniziranog uglja i lignita, u poređenju sa onim od bitumeniziranog uglja, karakteristične su više koncentracije kalcijuma i magnezijum oksida i niži procenat silicijum oksida i fero oksida, kao i niži sadržaj ugljenika. Antracit, koji sadrži male koncentracije nečistoća, nije značajno zastupljen u energetici. Samim tim su i količine pepela, nastale kao produkt sagorijevanja ovog uglja, zanemarljive.

Elektrofilterski pepeo je otpadni material koji najviše obećava kada je riječ o širini primjene u građevinarstvu. Globalno, skoro milijardu tona elektrofilterskog pepela se generiše na godišnjem nivou (Scrivener i sar. 2018.). Njegovo odlaganje i konzerviranje predstavlja značajan ekološki zahvat. Pepeli sa svojstvom pucolanske aktivnosti, imaju široku primjenu u betonu, poboljšanju temeljnog tla, nasipa, kao i vezanih i nevezanih slojeva kolovozne konstrukcije puta (Mashifana i sar. 2018., Matsumoto i sar. 2016., Sahu i sar. 2017., Mahvash i sar. 2017., Rashad 2015.)

Iako se EFP uspješno koristi kao zamjena za portland cement u betonu (Collins & Ciesielski, 1994., Dockter & Jagiella, 2005.), njegova upotreba u asfaltnim mješavinama još uvijek nije postala opšte prihvaćena (Ramme i sar., 2016.) i pored činjenice da brojna istraživanja potvrđuju mogućnost primjene EFP u asfaltnim mješavinama.

Kao dio napora da se doprinese unapređenju statusa EFP u putogradnji u smislu održivog inženjstva, sredinom prošlog vijeka počela su istraživanja na mogućnostima primjene elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama. Cilj ovih istraživanja je prvenstveno dobijanje mješavina propisanih svojstava i sa druge strane, smanjivanje štetnog učinka odlaganja EFP i očuvanje prirodnih resursa.

U posljednje dvije dekade dolazi do intenziviranja istraživanja na ovom polju, koja se mogu grupisati u istraživanja sa dva pristupa.

Jedan je pristup usmjeren na upotrebu pepela u bitumenskom malteru kao zamjenu za određenu količinu bitumena kako bi se poboljšala njegova svojstva, uglavnom otpornost na trajnu deformaciju, krutost, viskoznost pri visokim temperaturama i osjetljivost na

temperaturu (Sobolev i sar. 2014., Sharma i sar., 2010., Đureković & Mladenović, 2015.).

Oblast istraživanja ove disertacije pripada drugom pristupu koji razmatra primjenu pepela u asfaltnim mješavinama, tačnije u asfalt betonu kao djelimične ili potpune zamjene za standardni mineralni filer, posmatrajući uticaj pepela na zapremnske karakteristike mješavine, stabilnost i tečenje, krutost mješavine, otpornost na trajnu deformaciju i uticaj vlage (Sobolev i sar. 2014., Sharma i sar. 2010., Kar i sar. 2014., Likitlersuang & Chompoorat 2016., Sobolev i sar. 2013., Mistry & Ray 2016.).

Filer se sastoji od čestica, koje su manje od 0.075 mm (sito br. 200 prema ASTM-u) i funkcija mu je da ispunjava šupljine u gotovoj mješavini, kao i da poboljšava reološka svojstva bitumena. Filer umiješan sa bitumenom čini bitumenski mastiks koji se odlikuje povećanim kohezionim silama, što rezultira većom prionljivošću bitumena za zrno agregata što pozitivno utiče na stabilnost asfaltna mješavine (AASHTO M 17-07, 2007).

Većina vrsta elektrofilterskog pepela zadovoljava granulometrijske karakteristike (frakcije zrna ispod 0.075 mm) i druge relevantne fizičke i hemijske zahtjeve specifikacija za kameno brašno. (FHWA 2003).

Kada se koristi kao vještački filer, elektrofilterski pepeo mora biti u suvom obliku. Pepeo koji se sakuplja u suvom obliku i skladišti u silosima ne zahtijeva dodatnu obradu. Neki izvori ovog materijala koji imaju visok sadržaj kreča (CaO), mogu se iskoristiti kao dodatak za poboljšanje adhezije agregata i bitumenskog veziva u mješavinama za izradu asfaltnog kolovoznog zastora. (FHWA 2003.).

Varijacije u karakteristikama elektrofilterskih pepela uzrokovane su sastavom uglja različitog porijekla, kao i razlikama u modelima kotlova za sagorijevanje uglja. Razlike u sastavu i karakteristikama pepela mogu biti uzrokovane i osobinama različitih energetskih postrojenja, ali i značajnim razlikama u sastavu uglja kao posljedica sagorijevanja uglja pomiješanog sa drugim gorivima (poput prirodnog gasa ili drveta) ili sa nekim zapaljivim materijalima poput čvrstog komunalnog otpada. Pri konstantnim parametrima rada u termoelektrani, kao i pri konstantnom parametrima izvorišta uglja,

elektrofilterski pepeo bi trebalo da bude postojan proizvod kontrolisanog kvaliteta. Svaka izmjena u tehnološkom procesu ili karakteristikama uglja je razlog za novo ispitivanje i kategorizaciju pepela.

S obzirom na naprijed izložene uzroke varijacija u sastavu i karakteristikama elektrofilterskog pepela, u različitim podnebljima nastale su različite podjele i klasifikacije elektrofilterskih pepela. Podjele su raznovrsne i u nastavku je dat pregled najčešće primjenjivanih.

Međunarodni sistem klasifikacije EFP posmatra sadržaj i odnose silicijumovog, aluminijumovog, kalcijumovog i sumporovog oksida i definiše pepele kao alumosilikatni, silikatno-aluminatski, sulfat-alkalni i krečni, kako je prikazano u tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Podjela EFP prema međunarodnom sistemu klasifikacije (Knežević 2015)

Grupa	Pepeo	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)
I	alumosilikatni	> 2	< 15	nedefinisan
II	silikatno-aluminatski	< 2	<15	<3
II	sulfat-alkalni	nedefinisan	>15	>3
IV	drugi (krečni)	nedefinisan	>15	<3

Ph klasifikacija (Brzaković i Stamenković, 1971., Milosavljević, 1974.), koja pepele dijeli na “kisele” i “bazne”, daje najizrazitiju podjelu. “Kiseli” pepeli nastaju sagorijevanjem kamenog uglja i u njima preovladavaju SiO₂ (30-50%) i Al₂O₃ (15-35%), dok “bazni” pepeli nastaju sagorijevanjem mrkog uglja i lignita kod kojih je dominantna komponenta CaO (20-50%). Razlikuju se četiri tipa pepela u zavisnosti od sadržaja SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO i SO₃ i to:

- tip 1 - kiseli pepeli sa velikom pucolanskom aktivnošću (SiO₂ > 50%)
- tip 2 - alumosilikatni pepeli sa nižim učešćem SiO₂ (40-50%), Al₂O₃ (17-25%), Fe₂O₃ (18-12%) i CaO (9-22%) koji su pucolanski aktivni
- tip 3 - bazni pepeli sa visokim učešćem CaO (40-46%), Al₂O₃+Fe₂O₃ (6-8%), SiO₂ (2-5%)

- tip 4 - visoko sulfatni i visoko bazni pepeli sa učešćem SO_3 (>26%) i CaO (>33%) koji nemaju pucolanska svojstva.

U tabeli 2.2 prikazani su tipovi pepela prema Ph klasifikaciji.

Tabela 2.2 Podjela EFP prema Ph klasifikacija pepela

Tip	Hemijski sastav			
1	SiO ₂ (>50%)			
2	SiO ₂ (40-50%)	Al ₂ O ₃ (17-25%)	Fe ₂ O ₃ (8-12%)	CaO (9-22%)
3	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (6-8%)	SiO ₂ (2-5%)		
4	CaO (>33%)			

Klasifikacija EFP prema veličini modula R klasifikuje pepele prema odnosu u koji su stavljeni oksidi silicijuma, aluminijuma, magnezijuma, gvožđa i kalcijuma. Pepeli sa modulom R od 2 do 6 su silikatni, dok se pepeli sa modulom R većim od 6 klasifikuju kao silikatno-aluminijski.

$$R = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Prema veličini modula R pepeli se dijele na:

- Silikatne $R = 2 - 6$
- Silikatno-aluminijske $R > 6$.

Klasifikacija prema Američkom standardu (ASTM C 618-05) pepele nastale sagorijevanjem uglja u termoelektranama, definiše kao pepele klase F i pepele klase C, kao što je prikazano u tabeli 2.3. Za ovu klasifikaciju mjerodavan je zbirni sadržaj silicijumovog, aluminijumovog i gvožđevog oksida ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Pepeli sa zbirnim sadržajem ovih jedinjenja od min 50% spadaju u klasu C i imaju svojstvo samovezivanja, dok pepeli sa min 70% ovog sadržaja spadaju u klasu F i odlikuju se pucolanskim potencijalom koji se mora aktivirati dodatkom nekog aktivatora (portland cementa ili kreča), čime ovi pepeli postaju pucolanski aktivni.

Tabela 2.3 Podjela EFP prema Američkom standardu ASTM C 618-05

Klasa	Pepeo	Hemijski sastav
F	kiseo	Vrlo nizak sadržaj Ca, velika količina Fe ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 70%
C	alkalan	Visok sadržaj CaO ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 50%

Veliki nedostatak ASTM C 618-05 standarda je to što prilikom klasifikacije ne uzima u razmatranje sadržaj CaO koji ima veoma značajnu ulogu u hemizmu pepela, pogotovo u onim pepelima gdje CaO ima dominantan sadržaj. Iz ovog razloga je još 1990. godine McCarthy (1990.) predložio dodatak ovoj klasifikaciji tako što je uvrstio gradaciju sadržaja CaO do 10%, od 10% do 20% i više od 20%. Kao što se vidi iz tabele 2.4 pepeo se može svrstati u klasu C iako ima komponentu ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) < 50%, ako je sadržaj CaO > 20%.

Tabela 2.4 Podjela EFP prema McCarthy

Klasa	Pepeo	Hemijski sastav	McCarthy CaO %
F	kiseo	Vrlo nizak sadržaj Ca, velika količina Fe ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 70%	< 10
			10 - 20
C	alkalni	Visok sadržaj CaO ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 50%	> 20

Aktuelni kanadski propisi (Canadian Standard Association CSA) koriste modifikovane američke standarde (Fox, 2017.) i slično kao i McCarthy, shodno sadržaju CaO, grupišu pepele u tri grupe:

- Klasa F – sadržaj CaO do 15%
- Klasa CI - sadržaj CaO od 15% do 20%
- Klasa C- sadržaj CaO više od 20%.

Klasifikacija UralVTI „F.E.Džeržinski“, koja se koristi u ruskoj literaturi (Panteleev, 1985., Melentjev, 1978., Knežević, 2015.), nastala na bazi hemijskog sastava pepela predstavljenog parametrima Mo, Ms i K i dijeli pepele na aktivan, slaboaktivan i inertan, kako je prikazano u tabeli 2.5.

Tabela 2.5 Klasifikacija pepela prema UralVTI "F.E.Džeržinski"

Hemijska svojstva		Aktivni	Slabo aktivni	Inertni
Pokazatelji kvaliteta uzorka	Mo	0.5 – 2.8	0.1 – 0.5	< 0.1
	Ms	1.5 – 7.8	1.4 – 3.6	1.3 – 3.2
	K	1.0 – 3.6	0.5 – 1.5	0.4 – 0.9

gdje su:

$$M_0 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

$$Ms = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$$

$$K = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO}$$

U *Poljskoj literaturi* se koristi kompleksna klasifikacija (Hucnar, 1985.) prema više parametara: na bazi hemijskog sastava pepeli se dijele na silikatni, glinoviti i krečnjački (Knežević, 2015.), na bazi granulometrijskog sastava na sitan, srednji i krupan i prema gubitku žarenjem na klasu „1“, „2“, i „3“. Podjele su prikazane u tabelama 2.6, 2.7 i 2.8.

Tabela 2.6 Poljska klasifikacija na bazi hemijskog sastava

	Silikatni "k"	Glinoviti "g"	Krečnjački "w"
SiO ₂	> 40	> 40	> 30
Al ₂ O ₃	< 30	> 30	< 30
CaO	< 10	< 10	> 10
SO ₃	< 4	< 3	> 3

Tabela 2.7 Poljska klasifikacija na bazi granulometrijskog sastava

Sitan	Srednji	Krupan
I	II	III
Ostatak na situ 63-71 μm , %mase		
< 30	30-50	>10

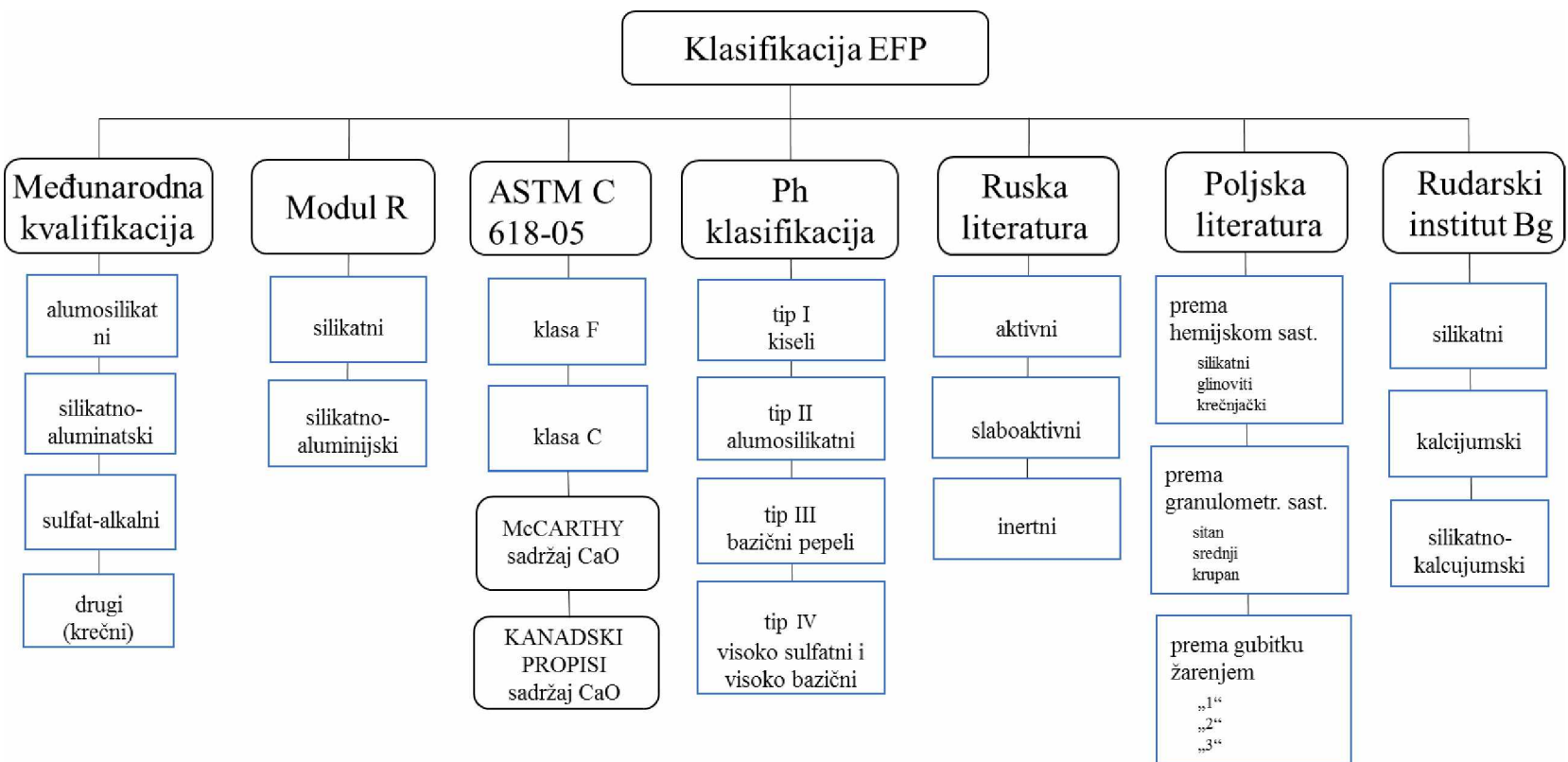
Tabela 2.8 Poljska klasifikacija na bazi gubitka žarenjem

I	II	III
Gubitak žarenjem, %		
<5	5-10	>10

Klasifikacija Rudarskog instituta (Grbović i sar., 1986.), koja je nastala kao rezultat prilagođavanja raznih klasifikacija uslovima regiona, prepoznaje tri tipa elektrofilterskog pepela: silikatni, kalcijumski i silikatno-kalcijumski. Podjela je izvršena na osnovu razlika u hemijskom i mineraloškom sastavu pepela i njegovom različitom ponašanju pri kontaktu sa vodom.

Silikatni pepeli su potpuno inertni, učešće kalcijuma je zanemarljivo, a osnovna komponenta je SiO_2 . U mineralnom sastavu, uz amorfnu masu, javljaju se mulit, kalcit, kvarc, hematit i dr. Kalcijumski pepeli su uzrazito reaktivni u kontaktu sa vodom, što je posledica visokog učešća kalcijuma u hemijskoj građi. U mineraloškom pogledu, pored slobodnog CaO , u građi učestvuju anhidrit, gehlenit, kvarc i dr. Silikatno-kalcijumski tip pepela ima u svojoj građi i SiO_2 i CaO u približnom odnosu 1:1 (Knežević, 1996.). U mineralnom pogledu, uz slobodni CaO javlja se anhidrit, gehlenit, portlandit, ali i kvarc, kalcit i mulit.

U kontaktu sa vodom silikatni pepeli talože se relativno brzo uz izdvajanje površinskog sloja bistre vode. Kalcijumski pepeli veoma burno reaguju sa vodom, aktivne komponente reaguju sa vodom mijenjajući mineralni sastav okvašenog pepela vezujući značajne količine vode. Silikatno-kalcijumski pepeo takođe reaguje sa vodom mijenjajući mineralni sastav, ali je reakcija značajno sporija, a dobijeni proizvod postojaniji. Na slici 2.2 je dat zbirni prikaz svih opisanih klasifikacija.



Slika 2.2 Različite klasifikacije elektrofilterškog pepela

Iako se u različitim zemljama primjenjuju različite klasifikacije pepela, skoro sve vrste pepela mogu naći primjenu u građevinarstvu i u svijetu se čine naponi i sprovode aktivnosti kako bi se iskoristile prednosti upotrebe EFP. Sagledavajući zaključke razmatrane literature i na principima održivog razvoja, može se zaključiti sledeće:

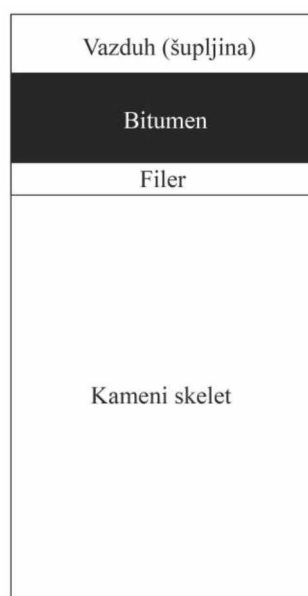
- **Upotreba u građevinarstvu:** Elektrofilterski pepeo predstavlja pogodan i bezbjedan materijal koji se može ugrađivati u građevinske objekte kao ravnopravan građevinski materijal.
- **Očuvanje prirodnih resursa:** Kameno brašno se dobija mljevenjem krečnjačkog kamena visoke kategorije čiji su resursi ograničeni, a u pojedinim zemljama su iscrpljene zalihe ovog prirodnog materijala. Upotreba EFP umjesto kamenog brašna značajno doprinosi uštedi ovog prirodnog resursa.
- **Smanjenje otpada i površine deponovanja:** Ugradnjom EFP u građevinske objekte smanjuje se količina otpada, kao i površine za njegovu deponiju. Visoke naknade za odlaganje otpada su jedna od mjera koje primjenjuju pojedine zemlje u borbi za smanjenjem deponija.
- **Ekonomski aspekt:** EFP kao otpadni materijal, ne samo da zahtijeva velike površine za odlaganje i izgradnju deponija, već zahtijeva i dodatna ulaganja u zaštitu, konzerviranje i održavanje deponija, tj. upravljanje otpadom.

U Crnoj Gori EFP nema status građevinskog materijala, pa je samim tim njegova primjena za sada samo na eksperimentalnom nivou. Da bi EFP dobio zvaničan status pogodne zamjene za prirodne materijale, država mora uložiti napor u smislu donošenja administrativnih odluka o njegovoj upotrebi, čemu moraju prethoditi detaljna i opsežna ispitivanja pepela. Takođe, da bi bio spreman za upotrebu, EFP se mora, neposredno poslije nastajanja kolektovati i lagerovati na adekvatan način. Naizgled velika, sva ova ulaganja su zanemarljiva u odnosu na dugoročnu korist koja se ostvaruje kroz ekološki aspekt.

2.3. Karakteristike asfalt betonskih mješavina spravljenih sa elektrofilterskim pepelom

2.3.1. Uvod

Asfaltna mješavina asfalt betonske strukture je kompozitni materijal koji se koristi za završni sloj kolovoznih konstrukcija. Sastoji se od bitumena i mineralne mješavine – agregata, čiji se najsitnija frakcija naziva filer. Čvrsta veza između zrna agregata obavijenih bitumenom definiše asfaltnu mješavinu kao kohezivnu masu. Na slici 2.3 prikazan je opšti model asfaltnog uzorka.

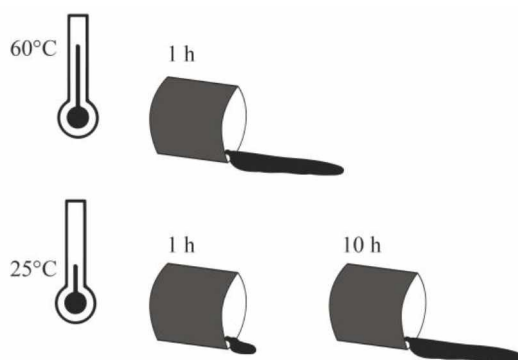


Slika 2.3 Model zapreminske strukture asfaltnog uzorka

Karakteristike asfalt betona zavise od karakteristika:

- bitumena (konzistencija, temperaturna osjetljivost, stabilnost, prionljivost, čistoća, itd.);
- agregata (oblik zrna, površinska tekstura, čvrstoća, granulometrijski sastav, skeletna struktura mineralne mešavine, itd.);
- filera (granulacija, indeks plastičnosti, indeks otvrdnjavanja bitumena, oblik zrna, tekstura itd.); i
- interakcije bitumena i agregata (adhezija, apsorpcija, fizičko-hemijska interakcija, itd.).

Ispitivanja asfaltnih mješavina sprovode se u jasno definisanim uslovima okoline, tj. na tačno definisanim temperaturama, jer karakteristike bitumena direktno zavise od temperature. Ova karakteristika bitumena se naziva temperaturna osjetljivost. Osim temperature, na ponašanje bitumena utiče i trajanje opterećenja. Nanošenje opterećenja istog intenziteta sa različitim trajanjem ima za posledicu različito ponašanje bitumena. Kako ponašanja bitumena zavisi i od dužine nanošenja opterećenja i od temperature, ova dva faktora moguće je koristiti naizmjenično. Sporo nanošenje opterećenja može da se simulira visokim temperaturama, dok brzo nanošenje opterećenja može da simulira niskim temperaturama. U literaturi se ovaj fenomen opisuje pojmom "time-temperature superposition". Na slici 2.4 je ilustrovana vremensko-temperaturna zavisnost bitumena.

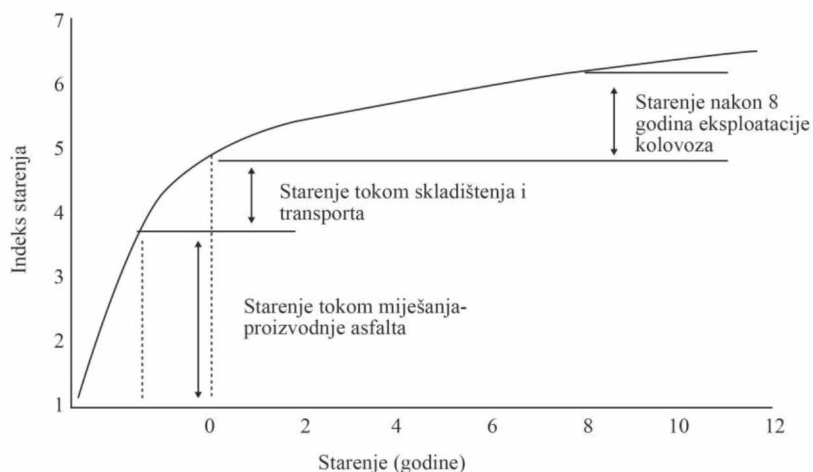


Slika 2.4 Vremensko-temperaturna zavisnost bitumena

Zbog ovog svojstva bitumena, bitumen se karakteriše kao visko-elastičan materijal, pa se tako na visokim temperaturama ($T > 100^{\circ}\text{C}$) ponaša kao viskozni fluid, a niskim temperaturama ($T < 0^{\circ}\text{C}$), kao elastično čvrsto tijelo.

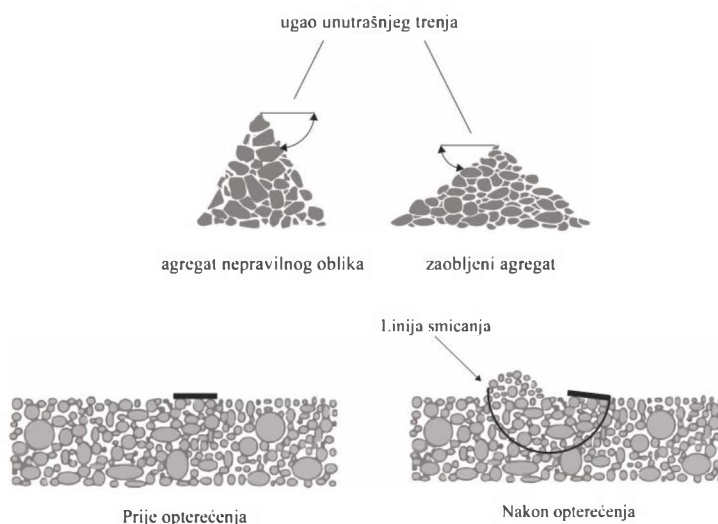
Još jedno bitno svojstvo bitumena je da hemijski reaguje sa kiseonikom iz vazduha, što je uzrokovano prisustvom organskih molekula u bitumenu koje hemijski reaguju sa kiseonikom iz vazduha. Ovo svojstvo se naziva oksidacija bitumena. Sa porastom temperature povećava se i brzina oksidacije bitumena. Oksidacija bitumena utiče na promjenu strukture i molekulskog sastava bitumena, kao i na smanje duktilnosti, zbog čega se ova pojava u literaturi još naziva i „starenje bitumena“. Ova pojava se javlja u tri ključna perioda u životnom vijeku bitumena, tj. asfaltne mješavine. Prvi period je vrijeme tokom kojeg se bitumen zagrijava u postrojenju za umješavanje. Tokom

zagrijavanja nestabilne komponente bitumena isparavaju, što kasnije bitumen čini krućim i predstavlja kratkotrajno starenje bitumena (Kliwer i ost. 1996., Asphalt Institute SP-1 2001.). Drugi period je starenje tokom transporta ili skladištenja gotove asfaltne mješavine. Tokom vremena eksploatacije kolovozne konstrukcije bitumen postaje sve krtiji, što predstavlja treći period starenja bitumena koje iscrpljuje njegovu elastičnost. Na slici 2.5 su prikazana tri perioda starenja bitumena u sistemu godine/indeks starenja (AI - engl. ageing index), gdje IS predstavlja mjeru starenja bitumena - odnos nekog svojstva (penetracija, tačka razmekšanja, viskoznost, G^* , krutost itd.) prije i nakon starenja, pri čemu veći AI znači jači stepen starenja bitumena.



Slika 2.5 Tri perioda starenja bitumena (Barić, 2015.)

Uloga agregata u asfaltnoj mješavini je da svojom skeletnom strukturom obezbijedi čvrstoću asfaltnom betonu. Zrna agregata mogu biti zaobljena i sa glatkom površinom ili nepravilnog (kubičastog) oblika, sa oštrim ivicama i hrapavom površinom (slika 2.6). Iako zrna različitog oblika mogu imati isti kvalitet materijala, primjena zrna nepravilnog oblika obezbjeđuje bolju uklještenost, pri čemu se ostvaruje veće trenje na kontaktnim površinama. Na ovaj način dobijaju se mješavine sa većom otpornošću na deformacije usled saobraćajnog opterećenja.



Slika 2.6 Ponašanje agregata nepravilnog oblika i agregata zaobljenog oblika

Veliki uticaj na karakteristike asfaltne mješavine ima vrsta i količina kamenog brašna. Filerom se naziva najsitnija frakcija mineralne mješavine veličine čestice manje od 0,071 mm koji ima funkciju ispunjavanja šupljina u mineralnoj mješavini i poboljšanja reoloških karakteristika bitumena kao i ukupne asfaltne mješavine, jer sa bitumenom čini vezivno sredstvo između zrna agregata. Filer se uglavnom dobija finim mljevenjem karbonatnih stijena (krečnjak i dolomit) ili u uređajima za otprašivanje separacija i asfaltnih postrojenja. U svrhu filera mogu se koristiti i industrijski produkti: elektrofilterski pepeo, cement i kreč. Filer ima višestruku ulogu u asfaltnim mješavinama. U prvom redu ispunjava šupljine u mineralnoj mješavini i tako utiče na povećanje zapreminske mase i stabilnosti mješavine. Sa druge strane, fine čestice filera umiješane sa bitumenom na propisanim temperaturama, daju mješavinu koja se naziva bitumenski malter koji obavija zrna agregata i na taj način doprinosi boljoj stabilnosti mješavine. Granulometrijski sastav i finoća zrna filera utiču na prionljivost bitumenskog maltera za zrna agregata. Oblik i tekstura površine zrna filera utiču na način i efekat obavijenosti zrna, a preko toga i na svojstva cijele asfaltne mješavine (Bedaković, 1964.).

Hemijski sastav filera ima takođe značajnu ulogu u njegovoj interakciji sa bitumenom. Silikatni fileri (kvarc, granit i sl.) mogu imati štetan uticaj na asfaltnu mješavinu usled svoje visoke hidrofilnosti i samim tim, slabog afiniteta prema bitumenu što ima za posledicu slabu vezu zrna i bitumena. Takođe se smatra štetnim i mekani i porozni

krečnjački hidrofobni filer koji ima jak afinitet ka uljnim sastojcima bitumena, čijim upijanjem značajno mijenja svojstva bitumena u pogledu prijevremenog otvrdnjavanja. Nepoželjnim se smatra i prisustvo glinovitih materijala u fileru. (Bedaković, 1964.)

Sve gore navedeno, ukazuje na složeno ponašanje asfaltne mješavine koje je teško predvidjeti u potpunosti. Sa namjerom sa se bolje razumije uticaj elektrofilterskog pepela na karakteristike asfalta, izvršen je detaljan pregled dostupne literature. Pregledom literature je obuhvaćeno: optimalni sadržaj bitumena, zapreminska struktura, stabilnost i tečenje po Maršalu, otpornost na dejstvo vode i krutost.

2.3.2. Optimalan sadržaj bitumena

Količina upotrijebljenog bitumena utiče na karakteristike asfalt betona kao što su čvrstoća, trajnost, krutost, otpornost na trajne deformacije i kolotrage i osjetljivost na dejstvo vode. Zbog toga je za projektovanje kvalitetne asfalt betonske mješavine potrebno odrediti optimalnu količinu bitumena u mješavini (OBC – engl. Optimum Binder Content).

Uobičajena količina bitumena u asfalt betonskim mješavinama kreće se u granicama od 3% do 5% kod bitumeniziranih nosećih slojeva i od 5% do 8% kod zastora (vezni i habajući slojevi). Procenti su izraženi u odnosu na ukupnu masu mješavine. Kao što je ranije pomenuto, od karakteristika filera, tj. veličine njegovih čestica, teksture zrna, hemijskog sastava itd. zavisi obavijenost zrna filera bitumenom, a samim tim i obavijenost zrna agregata, kao i ostale karakteristike mješavine koje proizilaze iz toga.

Količina bitumena u mješavini, pored toga što direktno utiče na karakteristike asfaltnog betona, utiče i na njegovu cijenu. Udio od oko 30% u cijeni ugrađenog asfaltnog sloja, ukazuje na činjenicu da je bitumen daleko najskuplja komponenta u asfaltnoj mješavini i na taj način dodatno daje na značaju definisanju OBC.

U analiziranoj literaturi količina bitumena je tretirana kao varijabla za različite mješavine (Sharma i sar. 2010., Mistry & Roy 2016., Kar i sar. 2014.) ili kao konstanta određena za kontrolnu mješavinu i primijenjena na eksperimentalnim mješavinama (Likitlersuang & Chompoorat 2016.).

Sharma i sar. (2010.) su u svom istraživanju bitumen tretirali kao promjenljivu veličinu, zaključivši da OBC u asfaltnoj mješavini sa EFP klase C zavisi od sadržaja EFP, kao i od količine šupljina po Rigdeni. Oni su u svom radu zaključili da povećanje količine EFP uzrokuje smanjenje OBC. Slične zaključke su izveli Mistry i Roy (2016.) koristeći pepeo klase F u svojim istraživanjima gdje su upoređivali mješavine sa 2% hidratisanog kreča kao standardnog filera i mješavine sa 2%, 4%, 6% i 8% EFP u odnosu na ukupnu masu agregata. Za sve mješavine OBC je određen za 4% šupljina u asfaltnoj mješavini. Autori su zaključili da se OBC smanjuje sa porastom procenta zamjene sve do 6% zamjene, pri čemu se ostvaruje najmanja vrijednost OBC od 4.8%, dok se sa povećanjem procenta zamjene na 8%, OBC značajno povećava, čak i u odnosu na kontrolnu mješavinu. Za minimalnu vrijednost OBC u ovom eksperimentu dobijena je najveća vrijednost stabilnosti mješavine od 19.48 kN, ali je to uzrokovalo vrijednost MQ od 5.23 kN/mm što je više od 5 kN/mm kako propisuju MORTH specifikacije.

Kar i sar. (2014.) upoređujući karakteristike asfaltnih mješavina spravljenih sa tri različita filera - mineralnim filerom, cementom i elektrofilterskim pepelom, uočili su da vrsta filera ne utiče na OBC u pogledu ostvarivanja maksimalne zapreminske mase. Upoređujući sadržaj šupljina u asfaltnim mješavinama spravljenim sa ova tri filera, autori su primijetili da se procenat šupljina u asfaltnoj mješavini smanjuje sa povećanjem procenta OBC, pri čemu EFP uzrokuje značajno manje AV u poređenju sa ostalim filerima. OBC za mješavine sa cementom i mineralnim filerom iznosi 5%, dok neznatno veću vrijednost OBC od 5.2% za mješavine sa pepelom, autori opravdavaju činjenicom da pepeo ima veću specifičnu površinu i finoću zrna od ostala dva filera.

Sa druge strane, Androić i sar. (2013.) u svom radu prikazuju povećanje šupljina u asfaltnoj mješavini sa EFP klase F u odnosu na standardnu kontrolnu mješavinu, što ukazuje na potrebu povećanja količine bitumena kako bi se prevazišao ovaj nedostatak mješavine. Takođe, i Faleh Al-Ani (2017.) je zapazio u svom istraživanju da optimalni udio bitumena (OBC) ima stalni prirast sa povećanjem procenta zamjene što se dovodi u vezu sa značajno većom specifičnom površinom pepela u odnosu na filer.

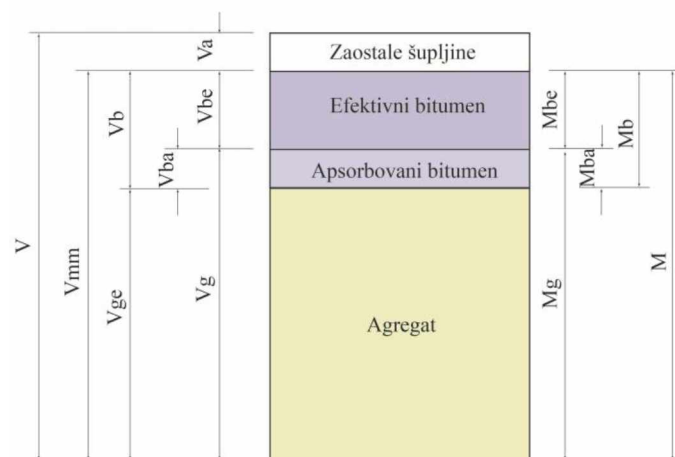
Sa namjerom da se posmatra isključivo uticaj procenta zamjene filera elektrofilterskim pepelom i cementom Likitlersuang & Chompoorat (2016.) u svom istraživanju su odredili OBC za kontrolnu mješavinu, po metodi Maršala, koji su primijenili na sve

eksperimentalne mješavine. Oni su u svom istraživanju upoređivali osobine asfaltnih mješavina u kojima je standardni filer zamijenjen EFP, cementom i njihovom mješavinom u različitim odnosima. Isti pristup u svom istraživanju primijenili su i Ali i sar. (2013.). koji su ispitivali osobine asfaltnih mješavina za habajući sloj sa dodatkom pepela klase F, kao zamjene za mineralni filer u procentima 0%, 2%, 4% i 6% u odnosu na ukupnu masu agregata, pri OBC od 5%.

Generalno, OBC ne zavisi od vrste EFP, već od njegovog sadržaja i specifične površine. Sa povećanjem ovih parametara povećava se OBC kako bi šupljine u asfaltnoj mješavini zadovoljile propisani raspon.

2.3.3. Analiza zapreminske strukture i zapreminske mase

Od izuzetnog je značaja poznavanje zapreminskih karakteristika zbijene asfaltne mješavine u toku procesa projektovanja mješavine, ali i tokom kontrole kvaliteta izvedenog asfalt betonskog sloja. Projektovanje asfaltne mješavine je proces određivanja optimalnog odnosa zapremina bitumena i agregata, koji će rezultirati mješavinom propisanih karakteristika. Ključni faktori po kojima se razlikuju fileri, kao najsitnija frakcija agregata, su oblik i veličina zrna, sadržaj šupljina, tekstura površine zrna, granulometrija, kao i mineralne i hemijske karakteristike. Varijacije ovih komponenti uzrokuju različite karakteristike asfaltnih mješavina (Zulkati i sar. 2012.). Na slici 2.7 prikazana je zapreminska struktura asfaltne mješavine.



Slika 2.7 Maseni i zapreminski odnosi komponentnih materijala u asfaltnoj mješavini

gdje je:

M - ukupna masa ($M_g + M_b$);	V _{be} - efektivna zapremina bitumena
M _g - masa agregata;	V _{ba} - zapremina apsorbovanog bitumena;
M _b - masa bitumena ($M_{be} + M_{ba}$);	V _b - zapremina bitumena ($V_{be} + V_{ba}$);
M _{be} - masa efektivnog bitumena;	V _a - zapremina šupljina između zrna
M _{ba} - masa apsorbovanog bitumena;	agregata obavijenih bitumenom;
V - ukupna zapremina zbijene mješavine;	V _{ge} - efektivna zapremina agregata ($V_g - V_{be}$);
V _g - zapremina agregata (sa šupljinama);	V _{mm} - zapremina mješavine bez šupljina;

Parametri preko kojih se najbolje mogu sagledati zapreminske karakteristike mješavine i koji se najčešće koriste prilikom analiziranja zapreminske strukture asfaltnih mješavina, su procenat šupljina u asfaltnoj mješavini (AV – eng. Air Voids), procenat šupljina u mineralnoj mješavini (VMA – eng. Voids in the Mineral Aggregate), procenat šupljina ispunjenih bitumenom (VFB – eng. Voids Filled with Bitumen), zapreminska masa (G) i maksimalna zapreminska masa (G_{max}) asfaltne mješavine. Karakteristike asfaltne mješavine direktno zavise od vrijednosti prikazanih parametara. Iz tog razloga standard EN 13108-1 za asfaltne slojeve definiše klase u pogledu sadržaja šupljina, dok se nacionalnim specifikacijama nekih država propisuju granične vrijednosti AV i VFB u zavisnosti od grupe saobraćajnog opterećenja. Tako, prema Tehničkim uslovima za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije 2012)* za habajuće slojeve, dozvoljene vrijednosti za AV se kreću u granicama od 3% do 6.5 %, a za VFB od 65% do 80%. Vrijednosti AV veće od 6.5% ukazuju na veću poroznost asfalta koja utiče na brže starenje i manju trajnost sloja, dok je minimalna vrijednosti od 3% određena tako da, tokom eksploatacije, obezbijedi minimalnu fleksibilnost i prostor za ekspanziju bitumena i naknadno zbijanje usled dejstva saobraćajnog opterećenja.

Trajnost kolovozne konstrukcije takođe zavisi i od sadržaja šupljina ispunjenih bitumenom. Manje količine sadržaja efektivnog bitumena, koje se ogledaju u nedovoljnoj zapremini VFB, mogu uticati na smanjenje trajnosti konstrukcije, dok prekomjerna veličina VFB može rezultirati nestabilnom mješavinom.

Vrijednosti pomenutih parametara definisane su sledećim izrazima:

* U Crnoj Gori ne postoji zvaničan dokument ove vrste.

$$AV = \frac{V_a}{V} \cdot 100 \quad (2.1)$$

$$VMA = \frac{V_a + V_{be}}{V} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$VFB = \frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Zapreminska masa asfaltnog uzorka u zbijenom stanju dobija se pomoću formule:

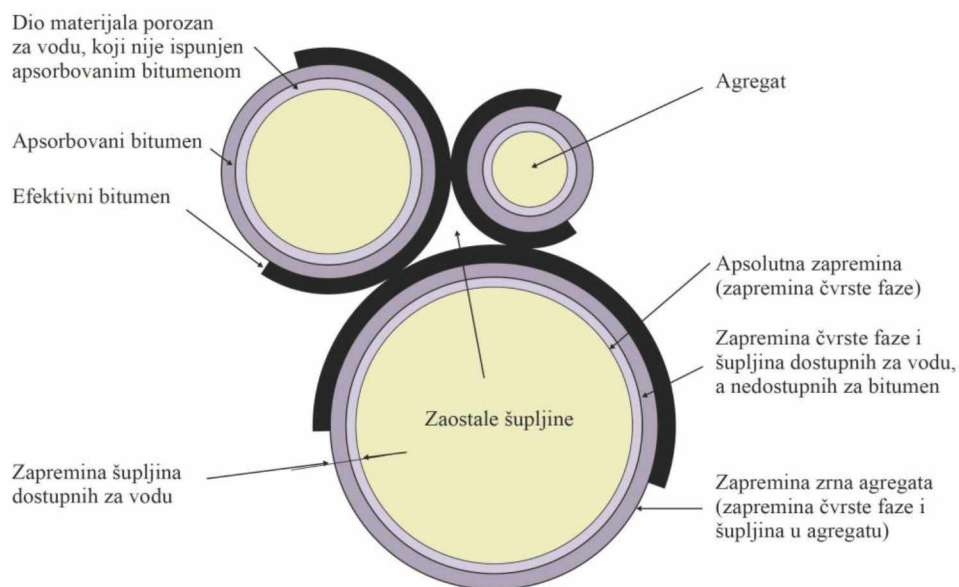
$$G = \frac{A}{B - C} \quad (2.4)$$

gde je:

A - masa suvog uzorka (kg);

B - masa vodom zasićenog površinski suvog uzorka (kg);

C - masa potopljenog vodom zasićenog uzorka (kg)



Slika 2.8 Šematski prikaz komponenti asfaltne mješavine (Žmavc, 2007.)

Maksimalna zapreminska masa asfaltnog uzorka dobija se pomoću sledeće formule:

$$G_{max} = \frac{A}{A - D} = \frac{100}{\left(\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b} \right)} \quad (2.5)$$

gde je:

D - masa potopljenog uzorka u rastresitom stanju (uzorka bez šupljina) (kg);

Ps - procenat učešća mineralne mješavine: $Ps = Mg/M$;

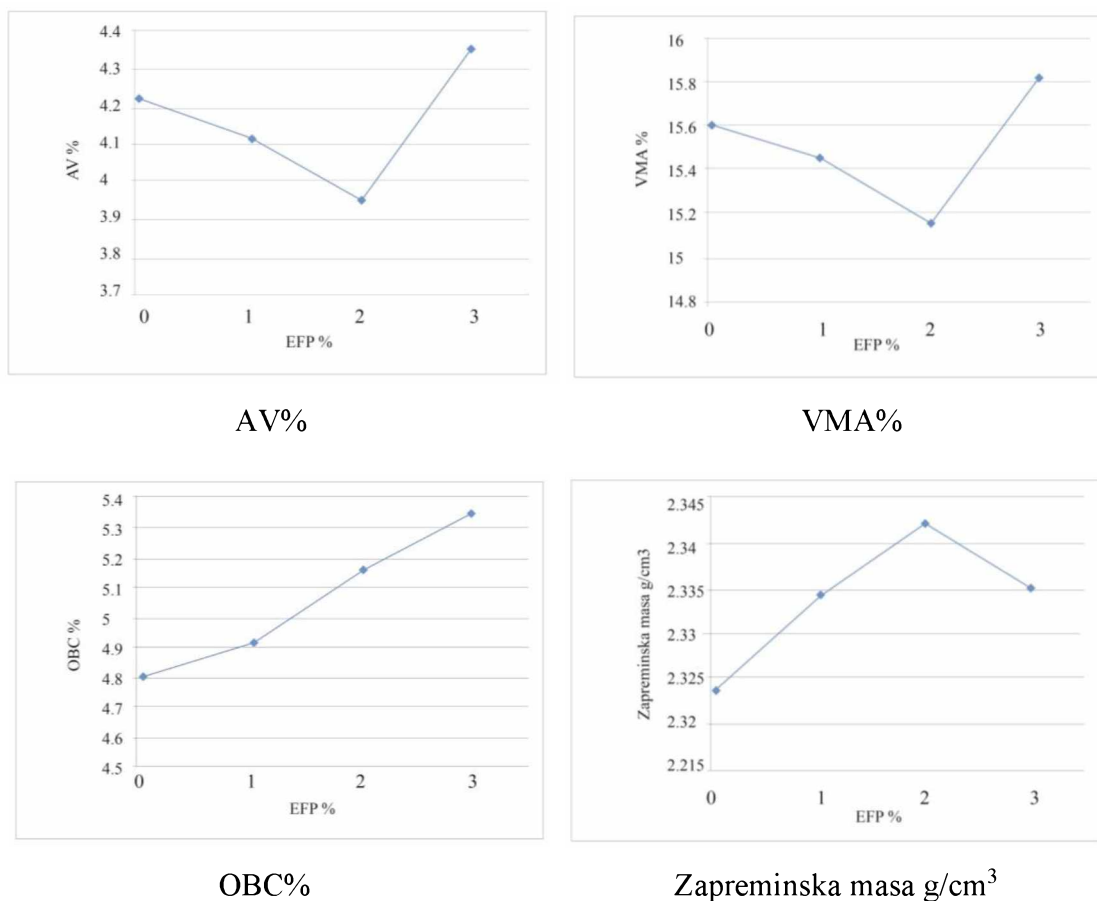
Pb - procenat učešća bitumena u mješavini $Pb = Mb/M$;

Zse - zapreminska masa mineralne mješavine bez šupljina (kg/m^3);

Zb - zapreminska masa bitumena (kg/m^3).

Značajan uticaj EFP kao filera na smanjenje šupljina u asfaltnoj mješavini, kao i na povećanje zapreminske mase asfaltne mješavine prikazuju u svom radu Likitlersuang & Chompoorat (2016.) gdje zaključuju da se dodavanjem 5% u odnosu na ukupnu masu agregata postižu najbolji rezultati u pogledu zapreminske mase i AV. Ovo navodi na zaključak da je moguće da EFP čija je veličina zrna u određenom rasponu, na dobar način popunjava šupljine u agregatnoj matrici, čime se smanjuju VMA. Smanjenje VMA indirektno vodi ka smanjenju AV pri konstantnoj količini bitumena, dok upotreba filera koji imaju veću specifičnu površinu, može rezultirati povećanjem VFB.

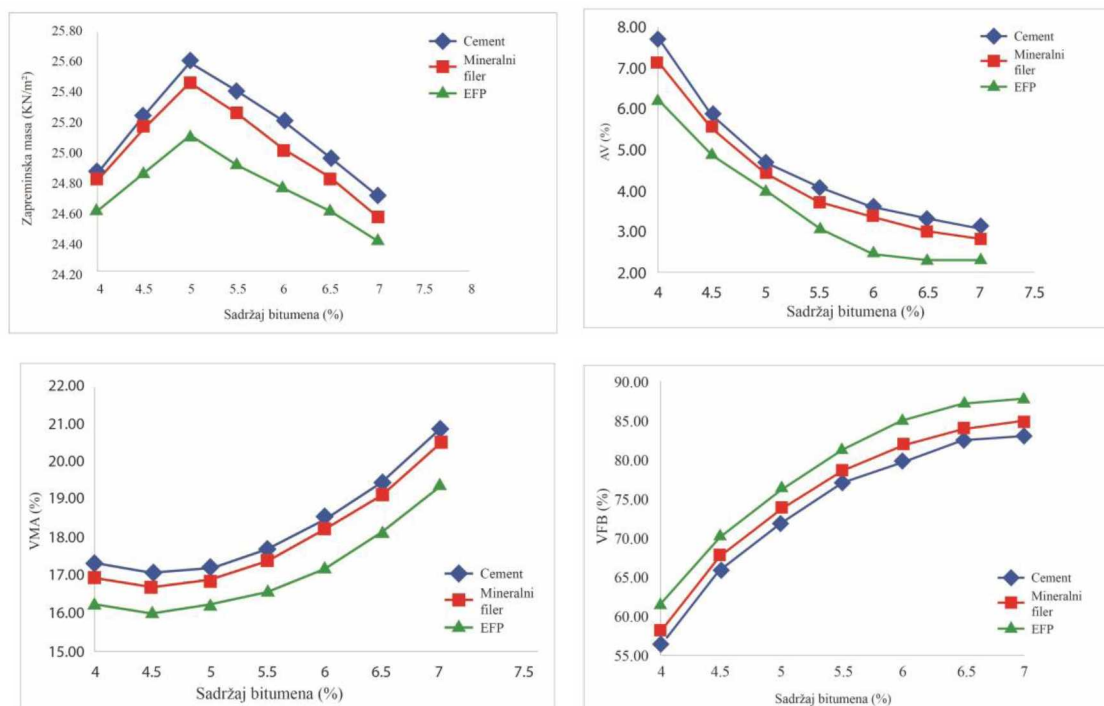
Faleh Al-Ani (2017) je analizirao uticaj zamjene mineralnog filera pepelom količini od 0%, 1%, 2% i 3% u odnosu na ukupnu masu agregata u asfaltnoj mješavini habajućeg sloja. Pepeo je predominantno silicijumski, manje specifične težine od filera, ali 2 do 3 puta veće specifične površine. Na slici 2.9 autor je prikazao rezultate istraživanja zapreminskih karakteristika mješavine, pri čemu je dobio da se najmanje vrijednosti šupljina u mineralnom agregatu (VMA) ostvaruju zamjenom od 2%, dok se sa daljim povećanjem taj procenat znatno povećava. Takođe, sa zamjenom od 2% ostvaruju se i najmanje vrijednosti šupljina u asfaltnoj mješavini AV. Zapreminska masa ima prirast do 2% zamjene, dok se sa većim procentom zamjene smanjuje. Zapreminske karakteristike asfaltne mješavine u funkciji procenta zamjene filera pepelom autor je prikazao dijagramima na slici 2.9. Kao što je naprijed rečeno, OBC ima stalni prirast sa povećanjem procenta zamjene što se dovodi u vezu sa značajno većom specifičnom površinom pepela u odnosu na filer.



Slika 2.9 Zapreminske karakteristike asfaltnje mješavine u funkciji procenta zamjene filera pepelom (Faleh Al-Ani, 2017.)

Kar i sar. (2014.) su upoređivali karakteristike asfaltnih mješavina sa različitim filerima, mineralnim filerom i cementom, kao najčešće primjenjivanim filerima i elektrofilterskim pepelom, kao alternativnim materijalom. Na slici 2.10 prikazane su zapreminske karakteristike dobijene ovim istraživanjem. Zapreminska masa svih mješavina ostvaruje najveću vrijednost pri OBC od 5%. Za sve primijenjene procenat bitumena zapreminska masa mješavina sa cementom i mineralnim filerom ima veće vrijednosti od zapreminske mase mješavina sa EFP. Za sve tri vrste filera, procenat AV se smanjuje sa povećanjem procenta OBC, pri čemu je uočeno da EFP uzrokuje najmanje vrijednosti AV u poređenju sa cementom i mineralnim filerom. Ovo se dovodi u vezu sa činjenicom da pepeo ima veću finoću zrna i veću specifičnu površinu, što omogućava efikasnije popunjavanje šupljina. To je također razlog zbog čega je OBC za EFP nešto veći od ostalih filera. OBC za EFP je 5.2%, dok za ostale filere OBC iznosi 5%. Generalni zaključak ovog istraživanja u pogledu zapreminskih karakteristika, je da

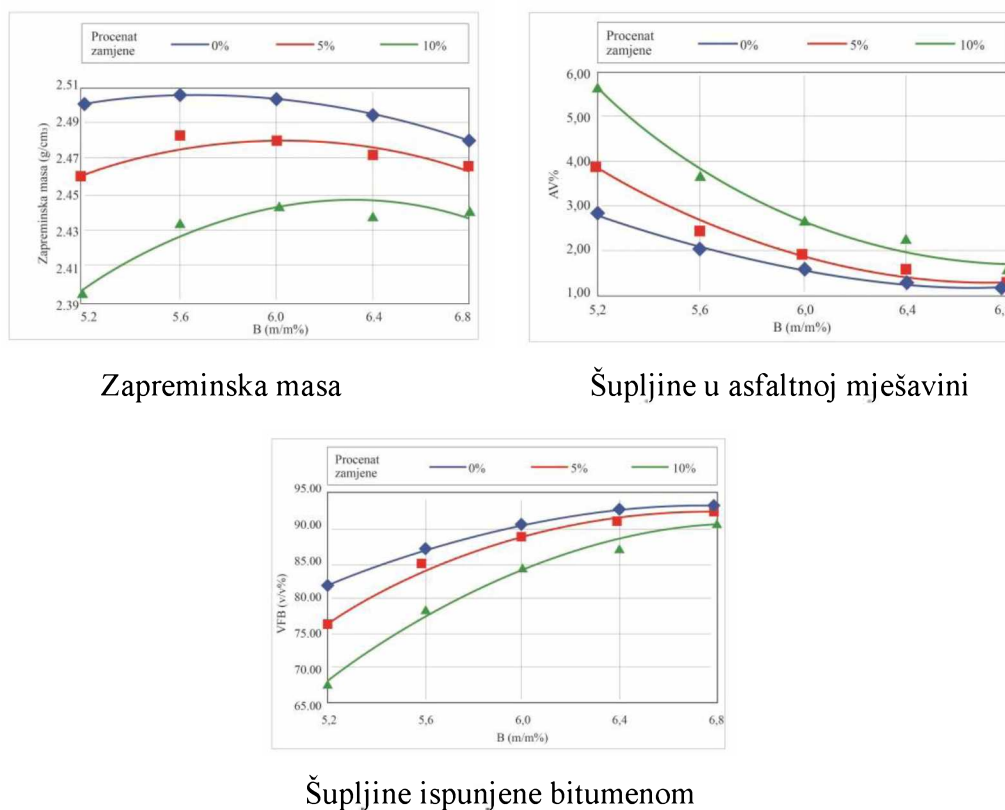
su razlike dobijenih rezultata vrlo male, kao i da vrijednosti VMA i VFB, kao i AV i zapreminska masa svih mješavina zadovoljavaju ulove MORTH (2013.).



Slika 2.10 Zapreminska masa, VA, VMA i VFB mješavina sa različitim filerima
(Kar i sar., 2014.)

Za razliku od prethodne studije, gdje je zapreminska masa, za sva tri filera dostigla najveće vrijednosti za isti sadržaj bitumena (5%), u studiji koju su sprovedeli Adorjányi & Széchenyi (2006.) izvedeni su drugačiji zaključci. Studija je sprovedena sa ciljem da se utvrde fundamentalne osobine asfaltne mješavine sa dodatkom pepela. Kontrolna mješavina je spravljena sa standardnim kalcijumskim filerom (procenat zamjene 0%), dok su dvije eksperimentalne mješavine spravljene sa 50% i 100% zamjene kalcijumskog filera silikatnim EFP. U odnosu na masu agregata ovi se procenti zamjene mogu izraziti kao 0%, 5% i 10%. Primijenjeni pepeo ima veću vrijednost šupljina i manju zapreminsku masu u poređenju sa standardnim filerom. Sa dijagrama prikazanog na slici 2.11 vidi se da su maksimalne vrijednosti zapreminske mase mješavina sa različitim filerima ostvarene pri različitim vrijednostima OBC, što autori dovode u vezu sa manjom zapreminskom masom EFP u odnosu na kalcijumski filer. Za određeni sadržaj bitumena AV imaju prirast sa povećanjem procenta zamjene EFP, što je dovedeno u vezu sa manjim sadržajem finih čestica u primijenjenom pepelu. Kako bi se

za mješavine sa EFP zadovoljile specifikacije za AV potrebna je veća količina bitumena, što rezultira i povećanjem VFB.



Slika 2.11 Zapreminska masa, AV i VFB (Adorjányi & Széchenyi 2006.)

Značajne varijacije u granulometrijskom sastavu, zapreminskoj masi, obliku zrna, teksturi površine čestica, hemizmu i ostalim svojstvima različitih EFP, rezultiraju i različitim uticajem pepela na karakteristike asfaltne mješavine.

2.3.4. Stabilnost i tečenje po Maršalu

U svim primjerima razmatrane literature, projektovanje asfaltnih mješavina sa dodatkom elektrofilterskog pepela izvršeno je u skladu sa procedurom Maršalovog opita, koji je i danas najčešće primjenjivani opit i pored drugih metoda koje su u primjeni (Superpave, Hveem). Stabilnost i tečenje po Maršalu predstavljaju važne parametre prilikom projektovanja asfaltnih mješavina, jer upravo njihove vrijednosti definišu čvrstoću i fleksibilnost asfalt betonske mješavine na eksploatacionim temperaturama. Stabilnost po Maršalu asfaltnog betona predstavlja maksimalnu silu

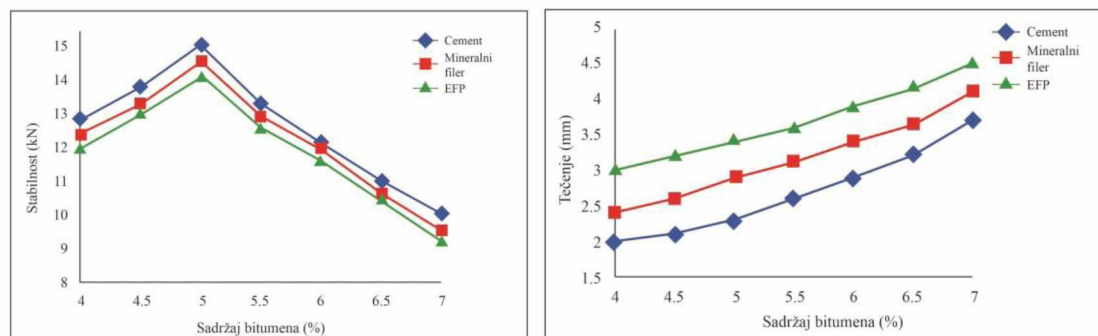
koja dovodi do loma uzorka na temperaturi od 60°C, sa konstantnim priraštajem deformacije od 50 mm/min. Tečenje po Maršalu je definisano kao deformacija uzorka koja odgovara maksimalno postignutoj vrijednosti sile. Odnos stabilnosti i tečenja naziva se Maršalov koeficijent (MQ) i predstavlja empirijski pokazatelj krutosti asfaltne mješavine.

U posmatranoj literaturi ispitivani su Maršalova stabilnost i tečenje asfaltne mješavine. Rezultati sprovedenih ispitivanja su pokazali da filer ima veliku ulogu u karakteristikama asfaltne mješavine u pogledu boljeg pakovanja i povezivanja sitnih i krupnih zrna agregata. Takođe utiče na povećanje stabilnosti (AASHTO M 17-07, 2007.). Međutim, različite osobine filera, uzrokuju i različite karakteristike asfaltnih mješavina. Zbog toga ključnu ulogu igraju oblik i veličina zrna, procenat šupljina, površina zrna, kao i mineralni i hemijski sastav i ostale fizičke osobine filera upotrijebljenog u asfaltnoj mješavini. Različite vrste elektrofilterskog pepela na različit način utiču na osobine asfaltnih mješavina.

Koristeći dominantno silicijumski elektrofilterski pepeo Mistry i Roy (2016.) su uočili da je Maršalova stabilnost postigla maksimum sa procentom zamjene od 6%, dok je sa 8% zamjene postigla nešto manju vrijednost, ali obje vrijednosti su više od kontrolne mješavine spravljene sa 2% mineralnog filera. Mješavine sa nižim procentima zamjene (2% i 4%) nisu dostigle vrijednosti kontrolne mješavine.

Koristeći kalcijumski pepeo Androić i sar. (2013.) takođe uočavaju da manji primijenjeni procenti zamjene od 3% daju veću Maršalovu stabilnost u odnosu na standardnu kontrolnu mješavinu, kao i u odnosu na mješavinu sa 6.2% zamjene.

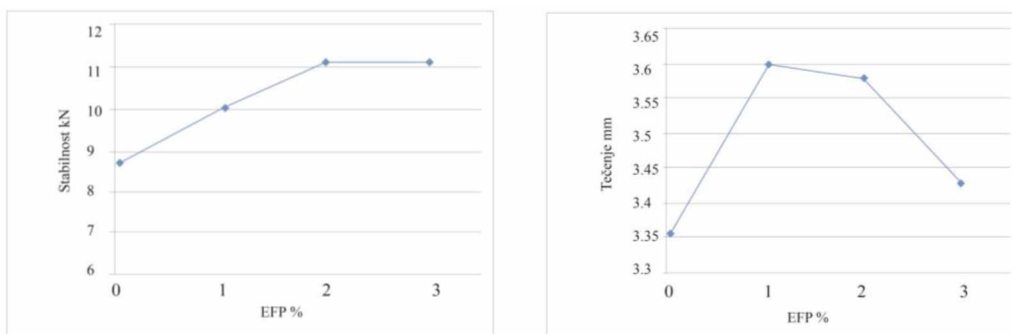
Sa druge strane Kar i sar. (2014.) su uočili konstantno nižu stabilnost kod svih ispitivanih mješavina sa različitim procentima bitumena u rasponu od 4% do 7%, pri čemu sve mješavine dostižu maksimalnu vrijednost stabilnosti za sadržaj bitumena od 5%. Iste mješavine su pokazale konstantno veće vrijednosti tečenja za sve primijenjene procente bitumena. Autori su zaključili da ipak sve mješavine zadovoljavaju Maršalove kriterijume pri optimalnom sadržaju bitumena koji je određen za sve mješavine, što je prikazano na slici 2.12.



Slika 2.12 Stabilnost i tečenje mješavina sa različitim filerima za različite sadržaje bitumena od 4% do 7% (Kar i sar., 2014.)

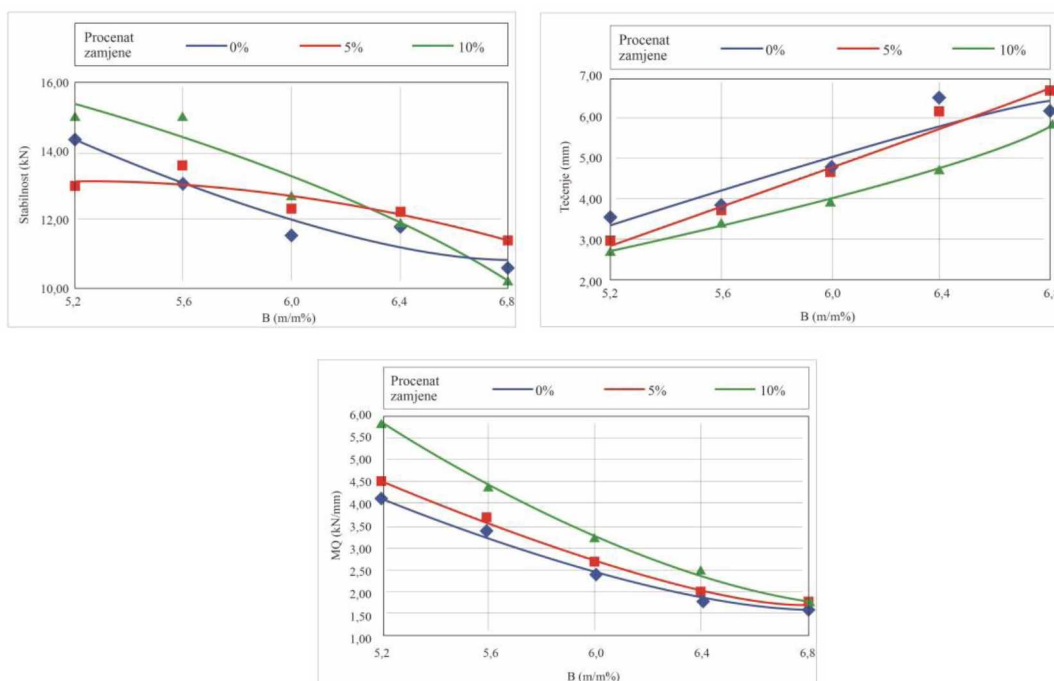
Dok su Mistry i Roy (2016.) sa silicijumskim pepelom postigli veće vrijednosti Maršalovog koeficijenta, Likitlersuang i Chompoorat (2016.) su sa kalcijumskim pepelom ostvarili vrijednosti MQ iste kao kod kontrolne mješavine. Kar i sar. (2014.) su sa pepelom nepoznatog hemizma dobili niže vrijednosti od kontrolne mješavine. Ovo je važan aspekt sagledavanja MQ kao mjere otpornosti mješavine na smicanje, na trajnu deformaciju, a samim tim i na pojavu kolotruga. Veće veličine MQ obezbjeđuju mješavini veću krutost i otpornost na deformaciju tečenja. Iz dostupne literature nije moguće dati jednoznačan zaključak koja vrsta pepela utiče na poboljšanje MQ.

Osim zapreminskih karakteristika Faleh Al-Ani (2017.) je u svom istraživanju uočio da OBC raste sa porastom procenta zamjene, što se dovodi u vezu sa značajno većom specifičnom površinom pepela u odnosu na filer. Sa dijagrama stabilnosti na slici 2.13 može se zapaziti da se maksimalna vrednost postiže sa 2% zamjene, dok se sa 3% zamjene postiže neznatno veća stabilnost, dok OBC ima značajan prirast. Uočljiva je veza visoke vrijednosti tečenja (slika 2.13) i najmanje vrijednosti AV (slika 2.9) za 2% zamjene, dok veličina tečenja opada sa većim procentom zamjene.



Slika 2.13 Stabilnost i tečenje u funkciji procenta zamjene filera pepelom
(Faleh Al-Ani, 2017.)

Adorjányi & Széchenyi (2006.) su zaključili da se sa porastom procenta primijenjenog pepela značajno unapređuje stabilnost mješavine, i u skladu sa tim, te mješavine se odlikuju manjim vrijednostima tečenja. Stavljajući ove dvije vrijednosti u odnos, autori su zaključili da mješavine sa 100% pepela postižu najveće vrijednosti Maršalove krutosti (MQ), dok slijedi mješavina sa 50% zamjene. U ovom istraživanju primijenjena količina krečnjačkog filera je 10% u odnosu na ukupanu masu agregata, dok su procenti zamjene iznosili 0%, 5% i 10%. Na slici 2.14 prikazani su rezultati ovog istraživanja.



Slika 2.14 Maršalova stabilnost, tečenje i Maršalov koeficijent
(Adorjányi & Széchenyi 2006.)

2.3.5. Otpornost na dejstvo vode

Slabe ili narušene veze athezije između zrna agregata i bitumena u slojevima kolovozne konstrukcije imaju za posledicu nastanak oštećenja asfaltnih slojeva. Do smanjenja athezije dolazi u prisustvu vlage koja uzrokuje skidanje bitumenskog omotača sa zrna agregata. Ova pojava kasnije može uzrokovati različita oštećenja fleksibilnih kolovoza, npr. pojavu kolotraga, udarnih rupa i oštećenja usled zamora materijala. Na slici 2.15 prikazani su asfaltni uzorci bez i sa oštećenjem usled dejstva vode.

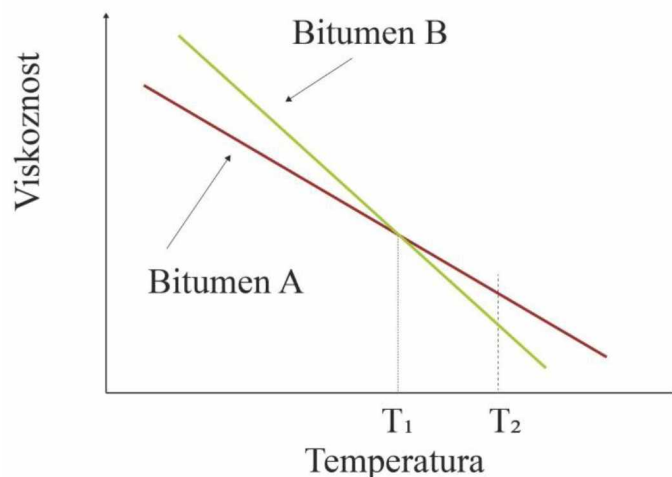


Slika 2.15 Asfaltni uzorak bez oštećenja (lijevo) i sa oštećenjem usled dejstva vode (desno)

Osjetljivost asfaltnih mješavina na dejstvo vode je složen fenomen i prije svega zavisi od karakteristika glavnih komponentnih materijala, bitumena i agregata, ali i od drugih faktora koji na asfaltni sloj utiču tokom ugradnje i eksploatacije, koji su predstavljeni u daljem tekstu.

Karakteristike bitumena - Starenje bitumena počinje još u fazi proizvodnje asfaltne mješavine, pa sve do ugradjivanja asfaltne mješavine i taj dio starenja se naziva kratkoročnim starenjem. U to je uključeno i starenje bitumena koje se dešava tokom miješanja pri čemu se zrna agregata obavijaju vrlo tankim slojem bitumena pri vrlo visokim temperaturama (135-163°C). U zavisnosti od zaostalih šupljina u mješavini i intenziteta saobraćajnog opterećenja tokom eksploatacije, nastavlja se starenje bitumena tokom eksplatacije i taj dio starenja se naziva dugoročnim starenjem. Sa većim šupljinama veći su negativni uticaji vazduha, vode, Sunca i mraza. Rezultati ovog starenja su vidljivi tek poslije dužeg perioda u kojem dolazi do razvoja pukotina i prodora vlage u asfaltne slojeve.

Kako je bitumen termoelastoplastičan materijal, njegova se konzistencija mijenja u zavisnosti od temperature, tako da postaje čvršći i viskozniji sa smanjenjem temperature, odnosno mekši, manje viskozan, sa porastom temperature. Čak i kada dva bitumena imaju istu krutost ili viskoznost na određenoj temperaturi, oni još uvijek mogu drugačije reagovati na promjenu temperature, kao što je ilustrovano na slici 2.16.



Slika 2.16 Temperaturna osjetljivost bitumena (Pellinen i Xiao, 2006.)

Temperaturna osjetljivost je brzina kojom se mijenja konzistencija bitumena sa promjenom temperature i smatra se prilično važnim svojstvom bitumena. Vrlo visoka osjetljivost bitumena na temperaturne promjene nije poželjna, jer pri visokim temperaturama ugradnje može izazvati nepoželjno omekšavanje mješavine, a sa druge strane, pri najnižim temperaturama može uzrokovati nastanak termičkih pukotina u kolovozu. Veza temperaturne osjetljivosti i penetracije se ogleda u indeksu penetracije kojim se izražava temperaturna osjetljivost bitumena preko penetracije i tačke razmekšanja (Pfeiffer, 1950.)

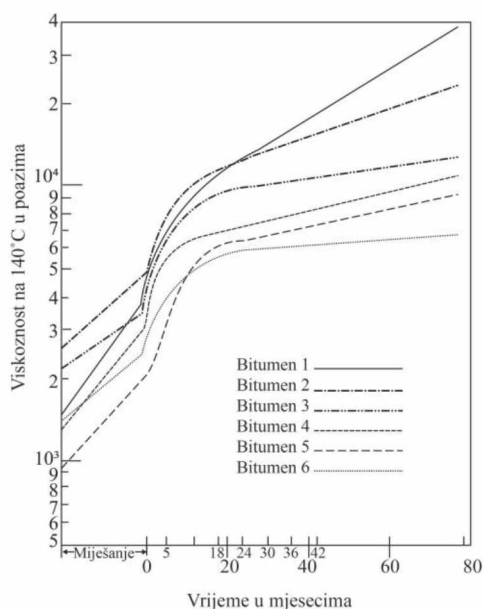
Viskoznost bitumena je vrlo važno svojstvo bitumena u pogledu otpornosti asfaltne mješavine na dejstvo vode. Asfaltne mješavine spravljene sa bitumenima manje viskoznosti su osjetljivije na dejstvo vode, jer takvi bitumeni se odlikuju manjim sadržajem asfaltena koji utiču na povećanje prionljivosti bitumena za zрно agregata.

Viskoznost bitumena predstavlja odnos između smičućeg naprezanja i gradijenta brzine smicanja pri određenoj temperaturi i brzini smicanja. Na visokim temperaturama

bitumen se ponaša kao jednostavni njutnovski fluid, konstantnog odnosa smičućeg naprezanja i gradijenta brzine smicanja, dok se na niskim temperaturama ponaša kao nenjutnovski fluid i odnos smičućeg naprezanja i gradijenta brzine smicanja nije konstantan. Dvije ključne temperature na kojima je važno poznavati veličinu viskoznosti su 60°C , približna najvećoj ljetnjoj temperaturi kolovoza i 135°C , približna temperaturi miješanja i ugradnje asfaltne mješavine (Roberts i sar. 1996.).

Tokom vremena bitumeni različitog porijekla i hemijskog sastava imaju različit odgovor u procesu starenja bitunena i reakcije na okruženje, što sve utiče na njegovu viskoznost.

Na slici 2.17 dat je prikaz tipične promjene viskoznosti tokom vremena na temperaturi 60°C za šest različitih bitumena koji su iskorišteni u jednoj studiji trajnosti. (Kandhal i sar. 1973.).



Slika 2.17 Promjena viskoznosti tokom vremena (mjeseci) na 60°C
(Kandhal i sar. 1973.)

Mješavine sa bitumenima manje viskoznosti su osjetljivije na dejstvo vode. Zato je važno napomenuti da na viskoznost bitumena značajno utiče i vrsta filera sa kojom bitumen čini bitumenski malter. Zbog različitog hemizma i afiniteta prema bitumenu različit je i uticaj na viskoznost maltera.

U literaturi se uočava da upotreba alternativnih filera, EFP, pozitivno utiče na ugao smicanja mastiksa metodom DSR. Sobolev i sar. 2014. su takođe pokazali da se sa 15% zamjene bitumena EFP klase F povećava otpornost na trajnu deformaciju pri visokim temperaturama, dok optimalna količina zamjene za pepeo klase C iznosi 30%. Mladenović i Đureković 2015., koristeći princip Time Temperature Superposition (TTSP) tj, superpoziciju uticaja temperature i vremena na mastikse spravljene sa dva različita pepela klase F, u svom radu su ispitivali karakteristike mastiksa sa različitim odnosom bitumena i pepela. Autori su zaključili da mastiksi sa pepelom, generalno daju bolje rezultate u pogledu temperaturne osjetljivosti u odnosu na nemodifikovani bitumen, s tim da je viskoelastični odgovor mastiksa sa pepelom koji sadrži nešto veći procenat kalcijum oksida, sporiji u vremensko-temperaturnom sistemu. Ovo je u saglasnosti i sa činjenicom da ovaj filer daje bolji efekat ukrućenja bitumena, kao i da to rezultira većom otpornošću tokom nanošenja opterećenja.

Karakteristike agregata - Veličina pora predstavlja važan faktor u pogledu osjetljivosti asfaltne mješavine na vodu. Povećano učešće pora u agregatu dovodi do povećane apsorbuje bitumena od strane agregata, pri čemu ostatak bitumena, tzv. efektivni bitumen, nije dovoljan da obavije zrna agregata i popuni šupljine u mineralnoj mješavini. Takva mješavina je osjetljivija na dejstvo vode, što znači da mješavine sa poroznim agregatom zahtijevaju više bitumena. (Radević, 2017.). Prilikom definisanja sadržaja bitumena u mješavinama sa ovakvim agregatom, neophodno je uzeti u obzir ovu činjenicu kako bi se povećala količina efektivnog bitumena u svrhu adekvatnog obavijanja zrna bitumenskim filom. U suprotnom, u nedostatku dovoljne količine bitumena, vazduh će imati olakšan prodor u mješavinu, što podspješuje oksidaciju bitumena i dovodi do veće osjetljivostimješavine na dejstvo vode.

Takođe, izuzetno važan faktor u pogledu otpornosti mješavine na vodu je otpornost zrna agregata na ljuštenje bitumenskog filma, na šta značajan uticaj ima hemijski i mineraloški sastav agregata.

Kako otpornost asfaltne mješavine na negativno dejstvo vode zavisi od obavijenosti zrna agregata bitumenom i njegove prionljivosti, važno je poznavati hemijska svojstva na površini zrna agregata, koja zavise od sadržaja određenih vrsta minerala. Tako, u

pogledu otpornosti na dejstvo vode, povoljni elementi u sastavu agregata su gvožđe, magnezijum i aluminijum, a nepovoljni natrijum i kalijum (Hicks i sar.1993.)

Agregati zbog svog hemizma na površini zrna mogu imati negativan ili pozitivan naboj u dodiru sa vodom, što određuje njihov afinitet prema vodi, tj. prema bitumenu. Tako, krečnjački agregati imaju pozitivan naboj na površini zrna, što ih čini odbojnim prema vodi, tj. hidrofobnim. Ovi agregati imaju jak afinitet prema bitumenu ostvarujući dobru vezu zrna i agregata, što ih čini otpornim na skidanje bitumenskog filma, a asfaltnu mješavinu otpornu na negativno dejstvo vode.

Sa druge strane, silicijumski agregati, zbog negativnog naboja na površini zrna, imaju afinitet prema vodi, skloni su jačem upijanju vode tj. hidrofilni su. Ova karakteristika ih čini odbojnim prema bitumenu, što znači da ovi agregati ostvaruju slabiju vezu zrna i bitumena, što ih čini manje otpornim na skidanje bitumenskog filma sa zrna agregata, a asfaltnu mješavinu manje otpornu na dejstvo vode.

Posebno važan dio agregatne matrice predstavlja mineralno brašno, odnosno kameno brašno – filer. Uloga mineralnog filera u asfaltnim mješavinama ne sastoji se samo u tome da se popune šupljine u mineralnoj mješavini, već filer umiješan sa bitumenom čini bitumenski malter i poboljšava reološke osobine bitumena.

Osim standardom propisanih osobina filera (granulometrijski sastav, zapreminska i specifična masu itd.), na promjenu reoloških osobina bitumena utiče oblik zrna i tekstura površine čestice filera, hemijski sastav i druge osobine filera. Fileri štapičastog oblika zrna su pogodniji od onih sa česticama kubičastog oblika u pogledu postizanja većeg viskoziteta mješavine.

Mineralni sastav filera takođe u velikoj mjeri utiče na osobine mješavine filera i bitumena (Bedaković 1964.). Fileri od kalcita, dolomita i krečnjaka, vrlo čvrsto vežu sloj bitumena za površinu zrna kamenog brašna. Asfaltne mješavine sa ovim filerima odlikuju se velikom stabilnošću, a pri kontaktu sa vodom one zadržavaju svoja visoka mehanička svojstva.

Fileri dobijeni od kvarca, kaolina, granita, trahita i vulkanskih tufova imaju neutralnu ulogu i u uglavnom samo popunjavaju šupljine u mineralnoj mješavini. Bitumen je

veoma slabo vezan za mineralno zrno ovog filera koji u veoma maloj količini upija lake frakcije bitumena, što dovodi do toga da se dobijaju asfaltne mješavine sa manjom stabilnošću. Prilikom dejstva vode na ovakve mješavine, brzo se narušava slaba veza između bitumena i površine čestica filera, što dovodi do odvajanja sloja bitumena sa površine čestica pod uticajem vode.

Kod filera od feldspata, liskuna, azbesta, gabra i dijabaza ostvaruje se prilično čvrsta veza između bitumena i filera i to naročito u suvom stanju, dok se talk i granit ponašaju neutralno i imaju ulogu mehaničkog punioca.

Zbog određene veze mineralogije sitnih čestica i bitumenskog veziva moguće su razlike u ponašanju, što zavisi od materijala koji se upotrebljavaju. Ove činjenice su bile predmet kojim su se bavili u svojim radovima Anderson & Taris 1982., Anderson 1987., Craous i sar. 1978. i Eric & Shook 1978.

Sadržaj vazduha - Sadržaj šupljina u asfaltnim mješavinama veći od 8%, može može uzrokovati međusobno povezivanje pora i omogućiti lakši prodor vode kroz asfaltne slojeve konstrukcije. Usled ove pojave mogu nastati oštećenja asfaltnih slojeva uzrokovana velikim pritiskom u porama i ekspanzijom leda.

Vremenski uslovi pri ugrađivanju - Veću poroznost asfaltne mješavine mogu uzrokovati uslovi ugradnje. Niske temperature prilikom ugradnje asfaltne mješavine mogu uzrokovati nedovoljnu zbijenost asfaltnog sloja, što ima za rezultat povećanu poroznost. Takođe, vlažni uslovi prilikom izvođenja asfaltnih radova dovode do povećanja vlage u asfaltnoj mješavini.

Klimatski uslovi - Povećanje osjetljivosti asfaltnih mješavina na dejstvo vode nastaje u uslovima vlažnije klime, kao i pri temperaturnim oscilacijama, pogotovo kada su zastupljeni ciklusi smrzavanja i odmrzavanja.

Saobraćaj – Superpozicijom prisustva vode u asfaltnim slojevima i povećanjem saobraćajnog opterećenja doći će do ubrzanja procesa oštećenja. Prisustvo vode u asfaltnim porama, pod dejstvom saobraćajnog opterećenja uzrokuje povećanje unutrašnji napona u porama. Ovako povećani naponi mogu uzrokovati odvajanje bitumena od zrna agregata, što predstavlja početak propadanja konstrukcije.

Procjena otpornosti asfaltnih mješavina na dejstvo vode može se sprovesti kroz više različitih opita:

- opit u ključaloj vodi;
- opit smrzavanja i odmrzavanja;
- opit aksijalnim pritiskom kondicioniranih i kontrolnih uzoraka;
- opiti indirektnim zatezanjem kondicioniranih i kontrolnih Maršalovih uzoraka;
- Lotmanov test;
- Hamburški opit točkom itd.

Zajedničko svim navedenim opitima je to što ispitane uzroke dijele na dijele dvije grupe: uzorke koji se njeguju na suvom (kontrolna grupa) i uzorke kondicionirane u vodi. Otpornost asfaltne mješavine na dejstvo vode procjenjuje se na osnovu odnosa prosječnih vrijednosti čvrstoća ove dvije grupe uzoraka.

Tabela 2.9 prikazuje zahtijevane vrijednosti odnosa čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR – Indirect Tensile Strength Ratio) za pojedine evropske države modificovane od strane autora (Chomicz-Kowalska i sar.2016., Radević, 2017.).

Tabela 2.9 Tehnički uslovi za asfaltne mešavine u odnosu na ITSR (izvor: Chomicz-Kowalska i sar. 2016 i Radević, 2017.)

Država	Zahtjevana minimalna vrijednost ITSR (%)			Ciklusi smrzavanja
	Habajuci sloj	Vezni sloj	Noseći sloj	
Crna Gora	NR	NR	NR	NE
Holandija	80	70	70	NE
Njemačka	NR	NR	NR	NE
Norveška	70	70	70	NE
Poljska	90	80	70	DA
Slovačka	80	80	80	NE
Slovenija	NR	NR	NR	NE
Srbija	NR	NR	NR	NE
Turska	80	80	80	DA
Švedska	75	75	75	NE

* NR – nije definisano

Likitlersuang i Chompoorat (2016.) su razmatrali uticaj EFP kao filera sa sadržajem od 1%, 3% i 5%, u suvim i vlažnim uslovima, na 25°C i 55°C, pri čemu su zaključili da dodatak pepela u svim procentima značajno utiče na unapređenje antistripping svojstva (prionljivost bitumena za zrno agregata), a time i otpornosti na negativno dejstvo vode, a najveće vrijednosti ITSR pokazala je mješavina sa 3% pepela. Ali i sar. (2013.) su uočili da najveću otpornost na dejstvo vode pokazuju mješavine sa potpunom zamjenom mineralnog filera pepelom u količini od 6% mase agregata.

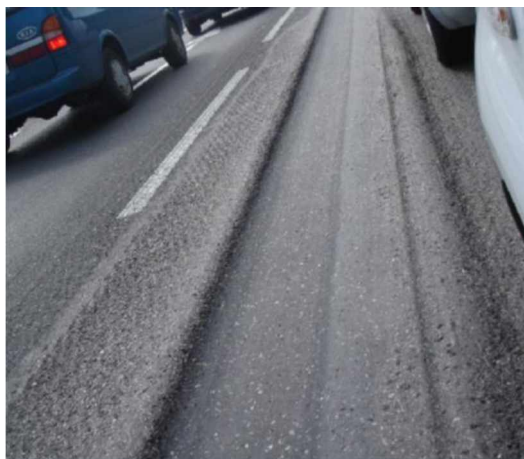
U studiji Sharma i sar. (2010.) uočavaju najveće vrijednosti ITSR kod mješavina spravljenih sa pepelom sa najvećim sadržajem kalcijuma (4.33%) u odnosu na ostale ispitivane pepele, što ga čini filerom sa najboljom vezom agregata i bitumena (sa najvećom otpornošću na ljuštenje – stripping). Zaključak ove studije u pogledu otpornosti na dejstvo vode je uočljiv uticaj hemijskog sastava pepela na otpornost asfaltne mješavine na dejstvo vode, gdje su autori zaključili da mješavine sa svim primijenjenim pepelima, imaju veću otpornost na dejstvo vode, ali pepeli sa većim procentom kalcijum oksida doprinose ostvarenju najveće otpornosti mješavine na negativno dejstvo vode.

2.3.6. Otpornost na trajnu deformaciju

Trajne deformacije koje se javljaju na površini asfaltnih kolovoza u tragovima točkova nazivaju se kolotrazi i predstavljaju najznačajniji vid oštećenja kolovoza (Barksdale 1967.). Slika 2.18 prikazuje jedan takav primjer. Sa ciljem da se odrede najčešći tipovi oštećenja na putevima, u sklopu COST 333 (1999.) projekta sprovedena je anketa u 22 zemlje evropske unije. Rezultati ankete su pokazali da su najčešći oblik oštećenja, upravo trajne deformacije asfaltnih slojeva.

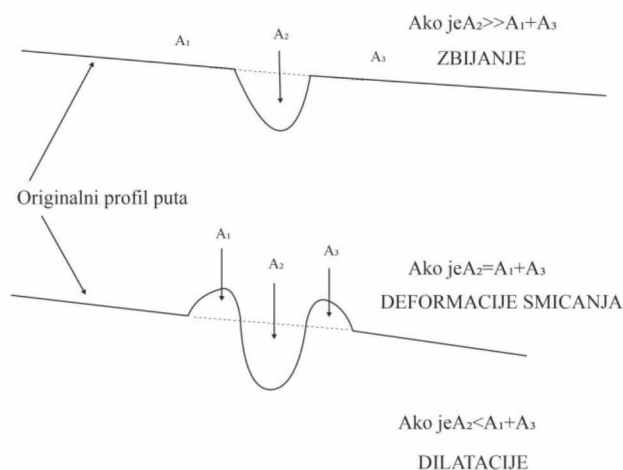
Uzrok nastanka kolotraga je dejstvo saobraćajnog opterećenja, neadekvatne fizičko-mehaničke karakteristike slojeva i neadekvatna struktura kolovozne konstrukcije. Ako je kolotrag nastao u posteljici ili podlozi zbog njihovih neadekvatnih svojstava, najčešće je to rezultat poddimenzionisane kolovozne konstrukcije što dovodi do toga da je nivo naprezanja veći nego što može da izdrži dati sloj. Ovaj uzročnik nastanka kolotraga nije

dalje razmatran u ovom radu, već je fokus usmjeren na uzročnike koji se odnose na karakteristike asfaltnih slojeva i akumulaciju trajnih deformacija u tim slojevima.



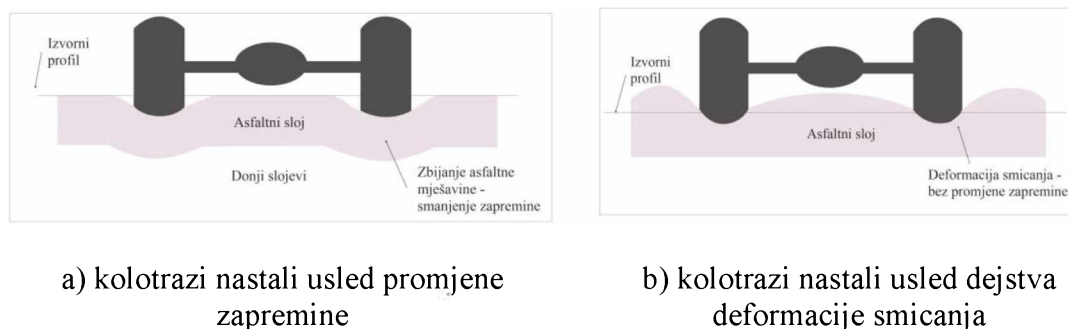
Slika 2.18 Trajne deformacije asfaltnih slojeva, kolotrazi

Kada se posmatraju samo asfaltni slojevi, uočena su dva osnovna mehanizma koja dovode do pojave kolotraga. Jedan se ispoljava kroz zbijanje (smanjenje zapremine) asfaltne mješavine, dok se drugi ispoljava velikim bočnim pomijeranjem, uzrokovanim smičućom deformacijom (bez promjene zapremine) u asfaltnom sloju. (Nevelt & Thanfold. 1988., Brown & Cross 1992.). Ukoliko se u asfaltnim slojevima ne koriste adekvatni materijali, deformacije se mogu pojaviti i na većim dubinama asfaltnog sloja. Deformacije smicanja predstavljaju dominantniji mehanizam za pojavu kolotraga u odnosu na promjenu zapremine (zbijanje) (Hofstra & Klomp 1972., Eisenmann & Hilmer 1987.). Na slici 2.19 ilustrovana su dva mehanizma nastajanja kolotraga.



Slika 2.19 Ilustracija mehanizama pojave kolotraga (Garba 2002.)

Dispozicije kolotraga u odnosu na opterećenje točkova usled promjene zapremine i usled dejstva deformacije smicanja prikazane su na slici 2.20.



Slika 2.20 Dispozicije kolotraga u odnosu na opterećenje točkova

(izvor: Strineka i sar. 2010)

U novije vrijeme, zbog povećanja saobraćajnog opterećenja i čestog prekoračenja dozvoljenog osovinskog opterećenja, kao i upotrebe guma sa visokim pritiskom, dolazi do smanjenja kontaktne površine kolovoza i pneumatika, što sve povećava destruktivni uticaj na asfaltne slojeve. Tako, do pojave kolotraga dolazi uglavnom u asfaltnim slojevima, koji nerijetko nisu u stanju da odgovore ovim povećanim izazovima. Najčešće greške koje se dešavaju prilikom projektovanja asfaltne mješavine, a koje dovode do smanjene otpornosti na kolotrage su izbor prevelike količine bitumena, prevelika količina mineralnog filera ili previše obliih zrna u frakciji agregata.

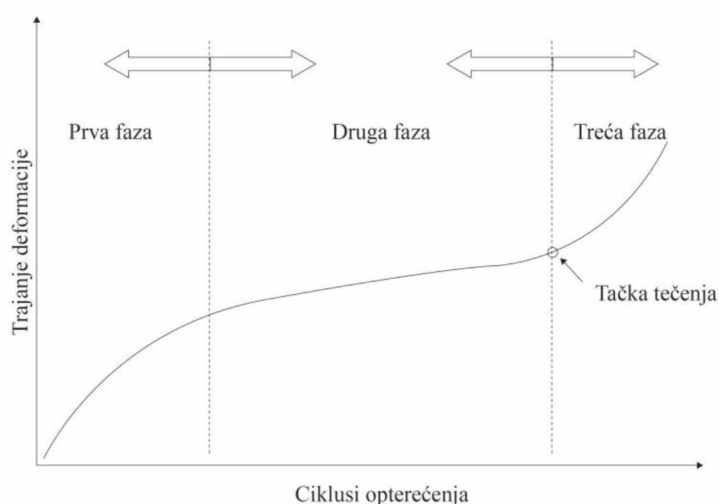
Prevelika količina bitumena je najčešći uzrok nastanka kolotraga. Pojedinačno ili u kombinaciji više elemenata može uticati na izbor prevelike količine bitumena (Brown, 1987.).

Iako je potrebna određena količina filera koji prolazi kroz sito 0.075, radi postizanja tražene stabilnosti, treba imati na umu da prevelika količina rezultira mješavinom koja će, i uz OBC biti krta i podložna pucanju. Kada se primjenjuje veća količina mineralnog filera, neophodno je prilagoditi OBC, u protivnom je neminovan nastanak kolotraga.

Asfaltne mješavine projektovane sa oblozrim prirodnim pijeskom i šljunkom su nestabilne i podložne nastanku kolotraga. Iz tog razloga, za različite vrste saobraćajnog

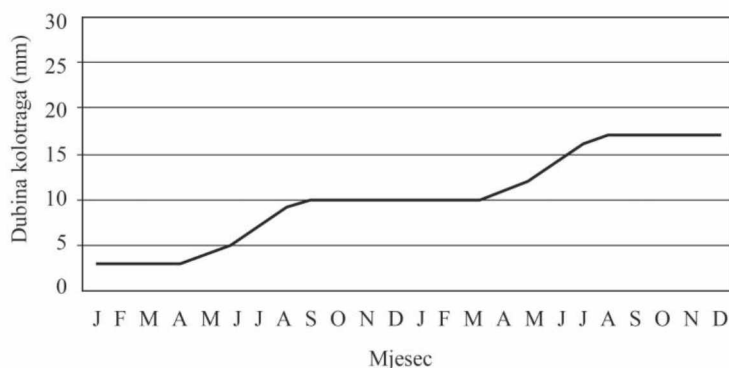
opterećenja, propisane su specifikacije koje jasno definišu procenat lomljenih zrna i broja lomljenih stranica zrna za krupni i za sitni agregat (Radević, 2017.).

Povećanje trajnih deformacija direktno je vezano za povećanje saobraćaja u vidu broja prelaza i veličine osovinskog opterećenja. Dijagram trajnih deformacija u funkciji broja ciklusa opterećenja prikazan je na slici 2.21. Tokom prve faze, na početku nanošenja saobraćajnog opterećenja, kao posledica zbijanja asfaltnih slojeva, javljaju se male zapreminske deformacije. U ovoj fazi, sa povećanjem broja ciklusa opterećenja dolazi do opadanja nagiba krive tečenja. Drugu fazu karakteriše konstantan priraštaj trajnih deformacija u toku vremena sa blažim trendom u odnosu na početnu fazu. U ovoj fazi, uzrok nastanka deformacija su naponi smicanja koji uzrokuju premještanje asfaltne mase (smicanja) bez promjene zapremine, pa se tako u zoni ispod pneumatika formira udubljenje, a u bočnim zonama dolazi do izdizanja materijala asfaltnog sloja. Na ovaj način nastaju kolotrazi čiji je mehanizam već objašnjen ranije u ovom poglavlju. Ovdje je opisan mehanizam nastajanja trajnih deformacija čije se formiranje odvija tokom većeg dijela životnog vijeka kolovoza. Treća, poslednja faza se odlikuje ubrzanim prirastom plastičnih deformacija u odnosu na broj ciklusa opterećenja. Razvoj deformacija u ovoj fazi vodi ka strukturnom lomu konstrukcije i ukazuje na gubitak upotrebljivosti kolovoza.



Slika 2.21 Klasičan oblik dijagrama trajnih deformacija u funkciji broja ciklusa opterećenja (izvor: NCHRP RPT 580)

Smjene godišnjih doba i hidrološko-temperатурne promjene koje ih prate imaju različiti uticaj na mehanizam nastajanja kolotrаga. Zbog niskih temperatura tokom jeseni i zime, asfaltne mješavine se odlikuje povećanom krutošću, dok su posteljica i nevezani slojevi i u nekim slučajevima čak i smrznuti. U ovakvim okolnostima formiranje kolotrаga nije uobičajeno. Tokom proljeća, kada dolazi do otapanja zamrznutih slojeva, zbog velike vlažnosti, nosivost nevezanih slojeva i posteljice je mala, što pogoduje nastanku kolotrаga. Sa blagim porastom temperatura krajem proljeća i početkom ljeta, sa smanjenjem vlage u nevezanim slojevima i posteljici, obično dolazi do usporavanja procesa formiranja kolotrаga. Ljetnji mjeseci pogoduju nastanku i razvoju kolotrаga zbog relativno visokih temperatura pri kojima krutost asfaltnih slojeva opada i dovodi do akumulacije trajnih deformacija u gornjim asfaltnim slojevima. Uticaj varijacije sezonskih temperatura i vlažnosti na formiranje kolotrаga prikazan je na slici 2.22.



Slika 2.22 Uticaj sezonskih efekata na kolotrаge (izvor: NCHRP RPT 468-a)

Karakteristike agregata, bitumena i njihove varijacije i međusobna interakcija višeznačno utiču na otpornost asfaltnih mješavina na pojavu trajnih deformacija, što ovu osobinu asfaltnih mješavina čini kompleksnom. Zbog toga je, ponašanje asfaltnih mješavina na visokim temperaturama uslovljeno zapreminskom strukturom mješavine, sadržajem i starenjem bitumena, kao i uslovima na terenu. U tabeli 2.10 prikazan je uticaj različitih faktora i njihovih varijacija na trajnu deformaciju asfaltnih mješavina

Muraya (2007.) je u svojoj studiji dao detaljan pregled uticaja različitih faktora na trajnu deformaciju asfaltnih mješavina. Sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom (AV) i šupljina ispunjenih bitumenom (VFB) imaju veliki uticaj na pojavu kolotrаga, zato je prilikom određivanja postupka za projektovanje sastava asfaltnih mješavina potrebno propisati

dopuštene vrijednosti AV i VFB. Opšti zahtjevi za kolovozne konstrukcije (Putevi Srbije 2012.) za asfaltna slojeve propisuju sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom u rasponu od 3% do 6.5% i sadržaj šupljina ispunjenih bitumenom u rasponu od 65% do 80%. Propisivanje jasnih granica u pogledu dozvoljenog procenta AV i VFB sa jedne strane, obezbjeđuje sprečavanje prepunjavanjenosti praznih prostora u mješavini bitumenom, usled povećanja njegove zapremine na visokim temperaturama. Sa druge strane, sprječava pojavu kolotruga pri malim sadržajima AV u mješavini (<3%). (Roberts et al 1996.).

Tabela 2.10 Otpornost na trajnu deformaciju asfaltnih mješavina – faktori uticaja
(Sousa i sar. 1994.,Kandhal & Cooley 2003.)

	Faktor	Promjena faktora	Uticaj Promjene faktora
Agregat	Površinska tekstura	Glatka ka hrapavoj	Povećava
	Granulometrija	Otvorena ka zatvorenoj	Povećava
	Oblik	Zaobljena ka oštroičnim	Povećava
	Krupnoća	Manje ka većem max. zrnju	Povećava ¹
Bitumen	Krutost ²	Povećanje	Povećava
Asfaltna mješavina	Sadržaj bitumena	Povećanje	Smanjuje
	Sadržaj šupljina ³	Povećanje	Smanjuje
	Šupljine u mineralnoj mješavini ⁴	Povećanje	Smanjuje
	Način ugrađivanja	- ⁵	- ⁵
Uslovi na terenu	Temperatura	Povećanje	Smanjuje
	Veličina napona/deformacija	Povećanje pritiska u pneumaticima	Smanjuje
	Br. ciklusa opterećenja	Povećanje	Smanjuje
	Voda	Suva površina ka mokroj	Smanjuje ako je mješavina osjetljiva na vodu

¹ Uz pretpostavku da je debljina sloja konstantna

² Odnosi se na krutost na temperaturi na kojoj se ispituju kolotrazi. Mogu se koristiti polimer modifikovani bitumeni za povećanje krutosti na kritičnim temperaturama kako bi smanjili kolotrage

³ Kada je sadržaj vazduha manji od približno 3%, asfalt je osjetljiviji na pojavu trajnih deformacija

⁴ Treba izbjegavati veoma male sadržaje šupljina u mineralnoj mješavini (npr. <10%)

⁵ Način ugrađivanja asfalta, bilo u laboratoriji ili na terenu, može uticati na strukturu mješavine i na njenu osjetljivost na trajne deformacije

Osim što uzrokuju manju trajnost, kao i povećanje troškova održavanja kolovoza, kolotrazi smanjuju bezbjednost u saobraćaju zbog onemogućavanja poprečnog odvodnjavanja, a u zimskim mjesecima i stvaranja ledenih površina. Javna uprava za puteve Norveške sprovela je istraživanje koje je pokazalo da učestalost saobraćajnih nesreća proporcionalno raste sa povećanjem dubine kolotraga. (Sund, 2002.).

Sve navedeno opravdava tendenciju inženjera da se pravilnim projektovanjem asfaltne mješavine i kvalitetnom ugradnjom, obezbijede sigurni i dugotrajni kolovozi. U svrhu procjene otpornosti asfaltnih mješavina na trajnu deformaciju danas se koriste brojni opiti koji se mogu podijeliti na tri grupe: fundamentalni opiti, empirijski opiti i simulacioni opiti. Karakteristika fundamentalnih opitja je to što omogućavaju određivanje napona i deformacija, koje je kasnije, primjenom teorijskih modela, moguće konvertovati u podatke o predviđenoj dubini kolotraga u funkciji saobraćajnog opterećenja. Ova metoda daje prilično kompleksne rezultate koji su komplikovani za tumačenje, što se smatra njenim nedostatkom.

Simulacioni opiti, zbog svoje jednostavnosti i kvalitetne procjene kolotraga na terenu, našli su veliku primjenu i predstavljaju najčešće korištene opite za određivanje otpornosti asfaltnih mješavina na trajnu deformaciju. Simulacioni opit točkom, pri prethodno definisanim uslovima, daje podatke da li neka mješavina zadovoljava zahtijevane kriterijume, ili ne. Nedostatkom ove metode smatra se to što ova metoda ne pruža podatke o fundamentalnim karakteristikama mješavine, koji bi se mogli koristiti pri upotrebi teorijskih modela za utvrđivanje ponašanja materijala u eksploataciji.

Ispitujući otpornost na trajnu deformaciju Sharma (2010.) je zaljučio da sve asfaltne mješavine spravljene sa EFP imaju veću otpornost na pojavu kolotraga, dok mješavine sa pepelom koji sadrži veći procenat kalcijum oksida (CaO) pokazuju najbolje rezultate u pogledu otpornosti na kolotrage. U ovoj studiji je zaključeno da prisustvo veće CaO vodi poboljšanju karakteristika bitumena. Ovo ispitivanje je sprovedeno primjenom Static Creep Test-a (jednoaksijalno konstantno opterećenje Maršalovih uzoraka) na relativno niskoj temperaturi od 30°C, što nije u potpunosti reprezentativna temperatura kada je se razmatraju uslovi nastajanja kolotraga. Likitlersuang & Chompoorat (2016.) su u svojoj studiji, takođe primjenom Dinamic Creep Test-a u suvim i vlažnim uslovima na 25°C i 55°C razmatrali uticaj dodatka EFP kao filera u 1%, 3% i 5%, pri čemu su

zaključili da dodatak pepela klase C (dominantno kalcijumski pepeo) u svim procentima značajno utiče na unapređenje otpornosti na trajnu deformaciju, a najveće vrijednosti krutosti pokazala je mješavina sa 3% pepela. Sa druge strane, Ali i sar (2012.). ispitujući primjenu pepela klase F (dominantno silicijumski pepeo) u asfaltnoj mješavini, su uočili da mješavina sa 50% zamjene pepela (2% EFP i 2% mineralnog filera) ima najmanju dubinu kolotraga, tj. pokazuje najveću otpornost na trajnu deformaciju.

2.3.7. Krutost

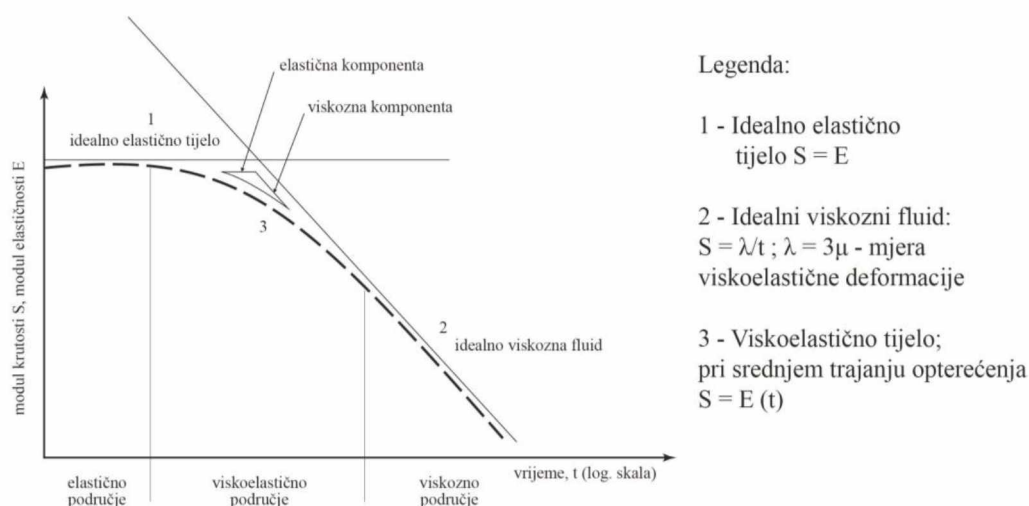
Krutost asfaltna mješavine se najjednostavnije može predstaviti kao odnos napona i odgovarajuće deformacije u funkciji vremena i temperature. Odnos napona, deformacija i vremena zavisi od reoloških osobina bitumena, a samim tim i asfaltna mješavine. Poznavanjem krutosti asfaltna mješavine može se ocijeniti i ponašanje konstrukcije u koju je ta mješavina ugrađena, koje mogu imati različite uloge, kao npr. kolovozna konstrukcija magistralnog puta ili kolovozna konstrukcija avionske piste (Finn, 1967.). Poznavanje krutosti asfaltna mješavine je od izuzetne važnosti prilikom projektovanja fleksibilne kolovozne konstrukcije, jer ova veličina predstavlja osnovnu karakteristiku materijala potrebnu za određivanje stanja napona i deformacija u kolovoznoj konstrukciji pod dejstvom opterećenja. Krutost praktično predstavlja sposobnost asfaltnog sloja da preuzme opterećenje i rasporedi ga na niže slojeve kolovozne konstrukcije, tako da različitim nivoima opterećenja odgovaraju i različite deformacije na kontaktu svih slojeva konstrukcije. Na ovaj način krutost indirektno utiče i na pojavu pukotina usled zamora (Kok & Yilmaz 2009.).

Krutost asfaltna mješavine je u direktnoj vezi sa krutošću bitumena. Različite krutosti bitumena su pogodne za različite klimatske uslove. Veća krutost bitumena je poželjna pri višim temperaturama eksploatacije (60°C) kako bi se izbjegla pojava kolotraga, dok je manja krutost bitumena poželjna pri nižim temperaturama kako bi se izbjegla pojava skupljanja asfaltnog sloja izazvana niskim temperaturama i nastanak termičkih pukotina.

Kao što je izloženo u prethodnom potpoglavlju otpornost na kolotrage kod visokih temperatura se može postići odgovarajućim izborom agregata, jer je u ovom slučaju

krutost bitumena od sekundarnog značaja. Međutim, krutost bitumena je od primarnog značaja za pojavu pukotina pri niskim temperaturama.

Na slici 2.23 prikazan je pojednostaljen dijagram na kojem se vidi zavisnost modula krutosti asfaltne mješavine od vremena opterećenja na određenoj temperaturi.



Slika 2.23 Funkcije idealizovane zavisnosti krutosti (napon/deformacija) od vremena opterećenja bitumena podvrgnutog aksijalnom naponu zatezanja (Žmavc, 2007.)

Asfaltne mješavine koje se odlikuju većom krutošću omogućavaju smanjenje debljine asfaltnog sloja, smanjujući troškove izgradnje. Sa druge strane, prevelika vrijednost krutosti smanjuje fleksibilnost asfaltnog sloja što rezultira mješavinom neotpornom na niske temperature i sklonom termičkim pukotinama (Roberts, 1996.).

Odgovor asfaltnog sloja na trodimenzionalni sistem naprezanja prilično je kompleksan i karakterizacija istog postaje još teža kada odgovor zavisi od temperature i od vremena (brzine) nanošenja opterećenja. Tretirajući bitumen, tj. asfaltne mješavine kao viskoelastični materijal još 1954. godine Van der Poel je uveo pojam krutosti (Van der Poel, 1954.) predlažući, kao dovoljno relevantno za većinu situacija, da se u obzir uzme samo jedno naprezanje i rezultujuća deformacija, definišući krutost kao odnos napona i pripadajuće deformacije u određenom trenutku i pri određenoj temperaturi.

$$S_{(t,T)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

gdje je:

S – modul krutosti

σ - aksijalno naprezanje

ε - aksijalna deformacija

t - vrijeme opterećenja

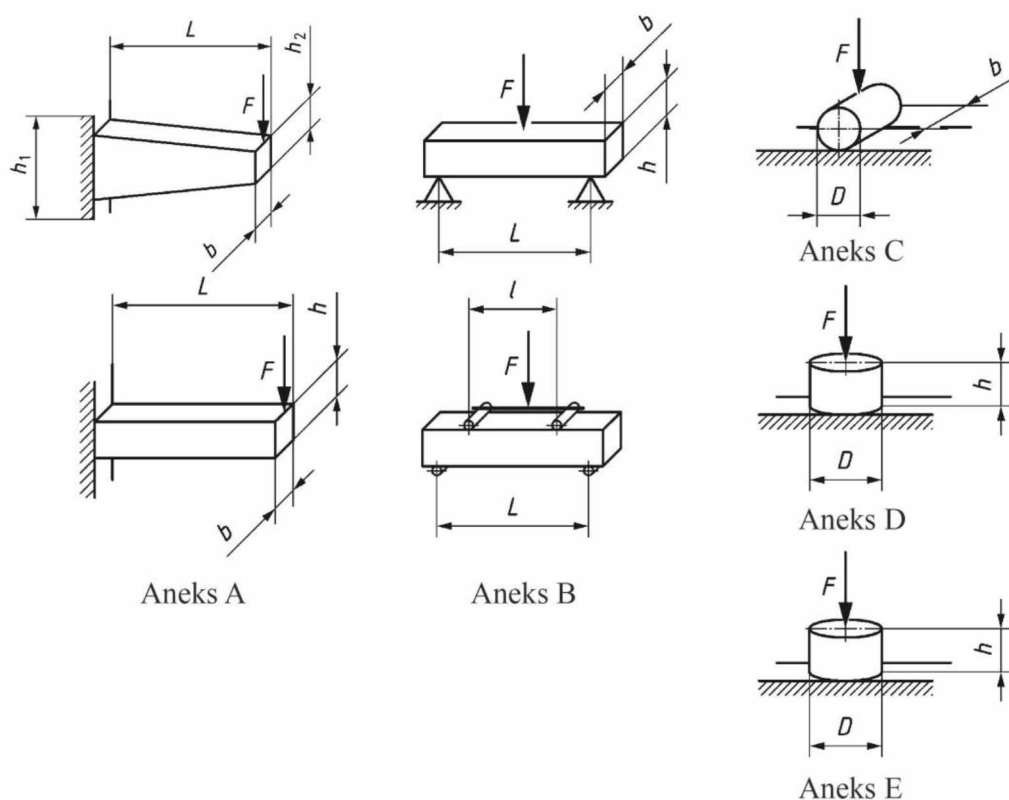
T - temperatura

Od postavljanja Van Der Poel-ove korelacije, pa do danas, predlagani su različiti koncepti za prikaz krutosti i različite metode za njeno određivanje. Tako se u literaturi nailazi na različite stavove po pitanju najprikladnijeg "modula krutosti" kao mehaničke karakterizacije asfaltnih mješavina. Kao najprikladniji parametri za efikasno predstavljanje naponsko-deformacijskog odgovora konstrukcije definisani su "kompleksni modul" i "povratni modul".

U metodama za projektovanje kolovoznih konstrukcija kao što su American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1993.), Asphalt Institute design method (2001.) i Australian pavement design guide (AUSTROADS 2004.), povratni modul (E) predstavlja sastavni dio proračuna u projektovanju kolovoznih konstrukcija. Razvojem analitičko-empirijskih metoda za projektovanje kolovoza (M-EPDG 2008.) od strane National Cooperative Highway Research Programs (NCHRP 2002.) Project 1-37 A, povratni modul (ASTM D 4123) je zamijenjen dinamičkim (kompleksnim) modulom $|E^*|$ (ASTM D 3497).

Sa ciljem da u izvjesnoj mjeri uskladi različite metode ispitivanja modula krutosti asfaltnih mješavina u evropskim državama objavljen je i evropski standard EN 12697-26 (2012.).

Preciznije, ovaj standard opisuje određivanje "modula krutosti" bitumeniziranih mješavina primenom različitih opita: savijanje u dvije tačke trapezoidnih i prizmatičnih uzoraka (Aneks A), savijanje prizmatičnih uzoraka - gredica opterećenih u 3 ili 4 tačke (Aneks B), indirektno zatezanje cilindričnih uzoraka (Aneks C), aksijalno zatezanje/pritiskanje cilindričnih uzoraka (Aneks D) i opit direktnog zatezanja cilindričnih ili prizmatičnih uzoraka (Aneks E). Dispozicije ispitivanja prema navedenim opitima prikazane su na slici 2.24.



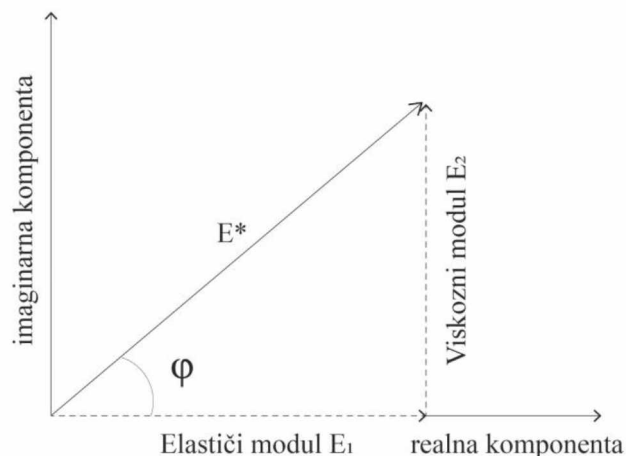
Slika 2.24 Dispozicije ispitivanja modula krutosti prema standardu EN 12697-26

Standard EN 12697-26, definiše modul krutosti $|E^*|$ kao apsolutna vrijednost kompleksnog modula E^* , nezavisno od vrste opita.

Teorija kompleksnog modula je prikaz složenog ponašanja asfaltne mješavine ugrađene u sloj asfaltnog kolovoza, kroz koji se posmatra odgovor ovog složenog materijala na opterećenje, pod dejstvom temperature u toku vremena.

Sa slike 2.25 se može uočiti da je kompleksni modul E^* vektorska veličina u kompleksnoj ravni i on predstavlja ukupni otpor asfaltnog sloja pri određenoj temperaturi za zadatu učestalost opterećenja. Kompleksni modul E^* je definisan preko dvije veličine, E_1 i E_2 , gdje E_1 predstavlja realni, elastični (povratni) modul akumulacije, dok E_2 predstavlja imaginarni, viskozni modul gubitka. Elastična komponenta ili modul akumulacije označava količinu energije koja se u uzorku akumulira tokom svakog ciklusa nanošenja opterećenja, dok viskozna komponenta ili modul gubitka označava energiju koja se gubi tokom svakog ciklusa ispitivanja, tj. modul izgubljene energije, jer

pokazuje veličinu rada koji je utrošen na ostvarenje trajne deformacije (American Society for Testing and Materials, 1994).

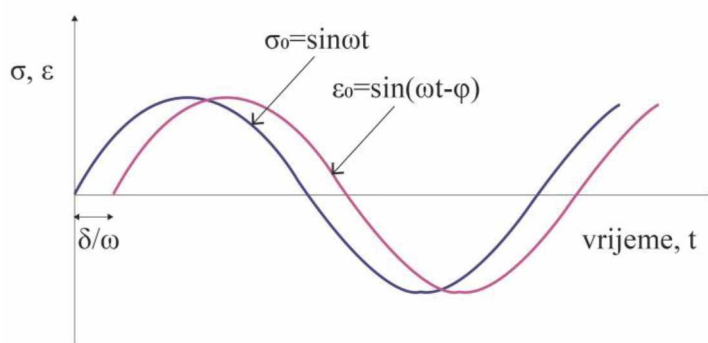


Slika 2.25 Komponente kompleksnog modula E^*

Vrijeme kašnjenja, tj. vrijeme koje protekne od nanošenja naprezanja do ostvarenja deformacije naziva se fazni ugao φ i izražava se u stepenima. Teorijski, kod savršeno elastičnog materijala odziv je trenutni, pa je zbog toga vrijeme između nanošenja naprezanja i nastanka deformacije jednako nuli. Kada se ispituje viskozni material, poput vrućeg bitumena, vrijeme kašnjenja je veliko, pa vrijednost faznog ugla φ može dostići i vrijednost do 90° . Odziv asfaltne mješavine pri radnim temperaturama je uglavnom u rasponu između te dvije granične veličine $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ (McGennis i sar., 1994.).

Može se zaključiti da je fazni ugao φ koji E^* zaklapa sa elastičnom komponentom E_1 predstavlja „brzinu” odgovora materijala na opterećenje pri datom uslovim, tj. kašnjenje nastajanja deformacije u odnosu na početak djelovanja napona.

Kada je linearno visko-elastični materijal izložen jednoaksijalnoj sili smicanja, pri ugaonoj brzini nanošenja opterećenja ω , koja je u funkciji frekvencije opterećenja, tada se kompleksni modul E^* može izraziti kao odnos amplitude napona $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$ (u bilo kom trenutku vremena t , i pri bilo kojoj ugaonoj brzini ω) i amplitude dilatacije $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$ (u istom trenutku t i pri istoj ugaonoj brzini ω). Napon i dilatacija imaju sinusoidalni oblik i fazno su pomjereni za veličinu faznog ugla φ kao što ilustruje slika 2.26.



Slika 2.26 Dijagram napona i dilatacija u vremenu, pri dinamičkom opterećenju
(*Stiffness of Asphalt Mix*, 2006.)

Matematički prikaz kompleksnog modula E^* u zavisnosti od ugaone brzine ω ima sledeći oblik:

$$|E^*(\omega)| = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Ako se vrijednosti za $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$ i $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$ uvrste u jednačinu (2.7) dobija se

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} \quad (2.8)$$

$$E^* = |E^*| \cdot (\cos \varphi + i \cdot \sin \varphi) = E_1 + i \cdot E_2 \quad (2.9)$$

odnosno:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.10)$$

gdje se E_1 i E_2 mogu izraziti kao:

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos \varphi}{\varepsilon_0} \quad i \quad E_2 = \frac{\sigma_0 \sin \varphi}{\varepsilon_0} \quad (2.11)$$

gde je:

σ_0 - maksimalan napon (Pa);

ε_0 - maksimalna dilatacija (m/m);

ω - ugaona brzina (Hz); $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$,

f - frekvencija opterećenja (Hz);

φ - fazni ugao (rad);

t - vrijeme (s);

E_1 - elastična komponenta modula (Pa);

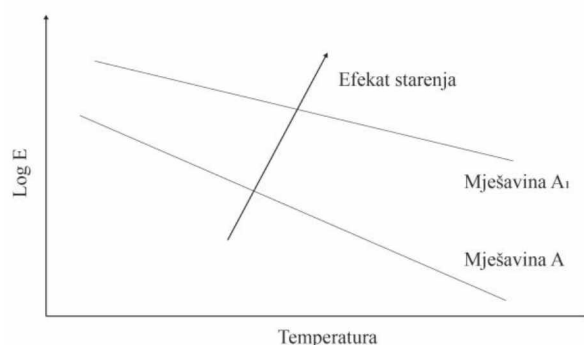
E_2 - viskozna komponenta modula (Pa).

Ovdje predstavljene komponente kompleksnog modula prilično dobro opisuju vrlo složeno ponašanje visko-elastičnog materijala i pružaju mogućnost uvida koja od dvije komponente modula preovladava prilikom primjene različitih temperatura i frekvencija opterećenja.

Prilikom određivanja povratnog modula (E) asfaltnih mješavina, za razliku od kompleksnog modula, opterećenje se najčešće nanosi u vidu sinusne funkcije ("haversine" sinusoide), gdje poslije perioda nanošenja opterećenja slijedi period relaksacije. Period relaksacije karakteriše pojava povratne dilatacije, koja se koristi prilikom proračuna povratnog modula. Upravo zbog postojanja perioda relaksacije, pri istoj amplitudi i frekvenciji opterećenja, povratna dilatacija kod opita povratnog modula, je nešto veća od amplitude dilatacije kod kompleksnog modula, što znači da će vrijednosti E biti niže od vrijednosti $|E^*|$. Prilikom laboratorijskih ispitivanja Flintsch i ost. (2005.), Loulizi i ost. (2006.), Ping & Xiao (2007.), Hu i ost. (2008.) i Shu i ost. (2010.) došli su do rezultata koji su potvrdili ovaj fenomen.

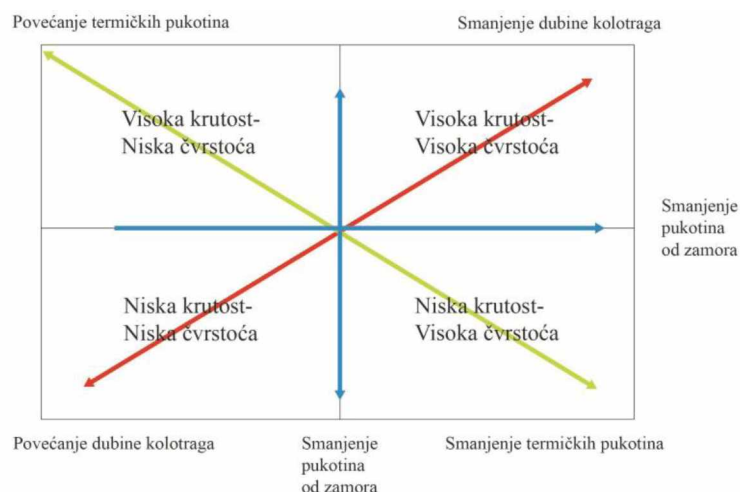
Frekvencija i oblik signala opterećenja, granulometrijski sastav i tekstura površine zrna agregata, dimenzije uzoraka, temperatura, krutost bitumena su parametri koji direktno utiču na krutost asfaltne mješavine (Ahmed i ost. 2014., Tjan & Napitupulu 2013.). Kamal i ost. (2005.) su došli do rezultata koji pokazuju da sa povećanjem temperature sa 25°C na 40°C dolazi do pada krutosti od približno 85%. Slično tome, povećanje trajanja opterećenja sa 150 na 450 ms utiče na smanjenje krutosti i do 30%.

Kao posledica starenja bitumena, tokom eksploatacionog vijeka konstrukcije, nezavisno od sastava asfaltne mješavine, njena krutost se mijenja. Uticaj temperature i starenja bitumena na krutost asfaltne mješavine prikazani su na slici 2.27, gdje "mješavina A1" predstavlja ostarelu "mješavinu A".



Slika 2.27 Osjetljivost krutosti asfaltne mješavine na promjenu temperature i starenje bitumena

Pellinen (2004.) je uočila da za neke asfaltne mješavine, svojstva krutosti i čvrstoće na smicanje koreliraju, što dovodi do sličnih performansi bitnih za predviđanje ponašanja kolovoza, ali za neke mješavine ta svojstva nisu povezana, što dovodi do toga da su mehanizmi predviđanja drugačiji. U cilju postizanja optimalnih karakteristika kolovoznih konstrukcija, Pellinen je predložila, da se obje veličine, krutost i čvrstoća na smicanje mješavine moraju razmotriti. Na slici 2.28 prikazana je međuzavisnost krutosti, termičkih pukotina, pukotina od zamora, čvrstoće na smicanje i kolotruga u toku eksploatacije kolovoza.



Slika 2.28 Međuzavisnost osobina asfaltnog sloja (Pellinen, 2004.)

U ranim ispitivanjima Tons i sar. (1983.) ispitivali su uticaj zamjene određene količine bitumena elektrofilterskim pepelom, čak i sa zamjenom do 30% i zaključili su da svi ispitani tipovi pepela imaju pozitivan efekat na skoro sve fizičko-mehaničke osobine

asfaltnih mješavina: otvrdnjavanje bitumena, otpornost na vlagu kao i na niske temperature, životni vijek asfaltnog sloja, kolotrage, čvrstoću pri zatezanu i krutost. Sa druge strane Dukaz & Anderson (1980.) su utvrdili da neki mineralni fileri, iako mogu služiti kao zamjena za dio bitumena, uzrokuju smanjenje krutosti mješavine.

Iako je poznavanje krutosti materijala kao njegove „jačine“ u procesu projektovanja i provjere kvaliteta asfaltne mješavine od izuzetnog značaja, danas je još uvijek češće korištena metoda određivanja krutosti mješavine preko indirektne čvrstoće na smicanja u skladu sa standardom EN 12697-23, zato što je ispitivanje krutosti mješavine po standardu EN 12697-26 značajno komplikovanije i skuplje. Zato su Cerni i sar. (2017.) u svom radu ponudili korelaciju ova dva parametra kako bi se na lakši način uveo pulsirajući efekat konsolidacije mješavine u ocjenjivanje postignute krutosti.

Iako se teži ka povećanju krutosti asfaltne mješavine, veće vrijednosti krutosti mogu da dovedu do neželjenih efekata tokom eksploatacije. Adorjányi & Széchenyi (2006.) su u svom istraživanju uočili da mješavine sa EFP ostvaruju značajno veće vrijednosti na testu puzanja pri jednoaksijalnom naprezanju, kao i manji nagib krive pri minimalnom naprezanju, što sve ukazuje na povećanu krutost mješavine. Oni su uočili da ove mješavine imaju manju otpornost na zamor pri većem broju ciklusa opterećenja. Ovaj efekat pretjeranog ukrućivanja mješavine može se kontrolisati odnosom miješanja pepela i standardnog filera.

Sa promjenom temperature mijenja se i opseg kompleksnog modula kao odgovora posmatranog materijala na promjene temperature i frekvencije opterećenja. Da bi se stekao bolji uvod u linearno viskoelastično ponašanje asfaltnih mješavina i izvan dobijenog opsega temperatura ili frekvencija, rezultate je potrebno predstaviti tako da se kompleksni podaci predstave jednom karakterističnom krivom, tzv „master krivom“. Prilikom konstrukcije master krive primijenjen je princip superpozicije vremena i temperature, tako da za određeni materijal predstavljaju promjenu kompleksnog modula u zavisnosti od frekvencije opterećenja pri konstantnoj temperaturi ili u zavisnosti od temperature pri konstantnoj frekvenciji opterećenja. Ovaj princip omogućava da se podaci prikupljeni tokom ispitivanja na različitim temperaturama ili frekvencijama, horizontalno pomjeraju do referentne temperature ili frekvencije. Na ovaj način se od različitih krivih linija formira jedna glatka karakteristična kriva - „master kriva“.

Horizontalno pomjeranje se vrši za veličinu faktora pomjeranja, $\alpha(T)$, koji definiše potrebno pomjeranje na posmatranoj temperaturi. Redukovana frekvencija karakteristična za master krivu dobija se kada se stvarna frekvencija podijeli sa faktorom pomjeranja:

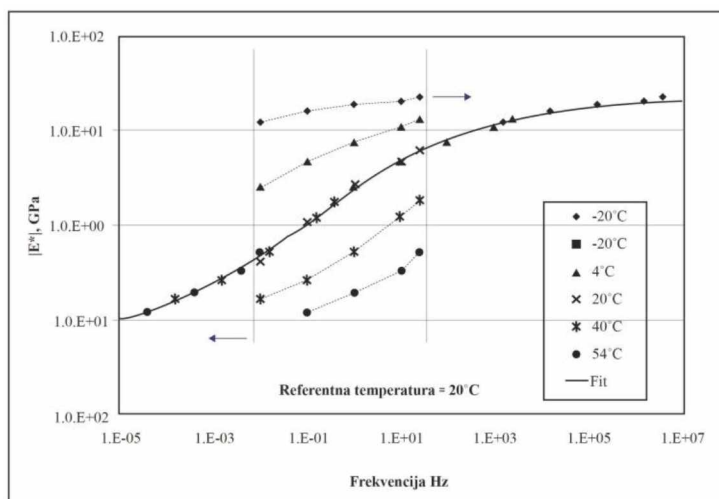
$$\alpha(T) = \frac{f}{f_r} \quad (2.12)$$

$$f_r = \frac{f}{\alpha(T)} \quad (2.13)$$

$$\log f_r = \log f - \log[\alpha(T)] \quad (2.14)$$

Master kriva za određenu asfaltnu mješavinu može se konstruisati korišćenjem proizvoljno odabrane referentne temperature, T_R , na koju se horizontalnim pomjeranjem “lijepe” podaci dobijeni na različitim temperaturama. Na referentnoj temperaturi, faktor pomijeranja je $\alpha(T) = 1$, dok faktor pomjeranja na pojedinačnim temperaturama ispitivanja ima vrijednost $\alpha(T)$ shodno jednačini (2.12). Nekoliko različitih modela se primjenjuje u određivanju faktora pomjeranja: jednačina Williams-Landel-Ferry (WLF) (Williams i sar. 1995.), Arenijusova jednačina, Kristian-Andersonov model (MEST EN 12697-26).

Na slici 2.29 je prikazan primjer kako se od više kraćih krivih linija, dobijenih za veličine kompleksnog modula na različitim temperaturama uz pomoć faktora pomjeranja, formira jedna kompaktna, glatka master kriva za referentnu temperaturu.



Slika 2.29 Primjer master krive kompleksnog modula (izvor: MnDOT 2003.)

Imajući u vidu da modul E^* u opsegu realnih okolnosti (slika 2.23) zavisi od vremena opterećenja na određenoj temperaturi, predstavlja krutost (S) asfaltne mješavine, Master kriva se može predstaviti nelinearnim sigmoidalnim modelom u sledećem obliku (Design Guide Draft, 2002.):

$$\log|S| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(\omega_r)}} \quad (2.15)$$

gdje su:

ω_r – redukovana frekvencija opterećenja na referentnoj temperaturi,

δ - minimalna vrijednost $|S|$,

$\delta + \alpha$ - maksimalna vrijednost $|S|$, tj, $\alpha = |S_{\max}| - |S_{\min}|$

β i γ - parametri koji opisuju oblik sigmoidalne funkcije.

Kada se u jednačinu (2.15) uvrste naprijed navedene korelacije za α i δ , dobija se sledeći izraz za master krivu:

$$\log|S| = \log(S_{\min}) + \frac{\log(S_{\max}) - \log(S_{\min})}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f \omega_r)}} \quad (2.16)$$

Prema Arenijusovoj jednačini koja se, pored Kristian-Andersonovog (MEST EN 12697-26) modela najčešće koristi za determinisanje master krive, dobija se sledeći izraz za redukovanu frekvenciju:

$$\log \omega_r = \log \omega + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (2.17)$$

U jednačinama (2.16) i (2.17) korištene su sledeće oznake:

S – krutost asfaltne mješavine (MPa);

S_{\min} - minimalna vrijednost kompleksnog modula (Pa);

S_{\max} - maksimalna vrijednost kompleksnog modula (Pa);

β, γ - parametri koji opisuju oblik sigmoidalne funkcije (-);

ω_r - redukovana frekvencija na referentnoj temperaturi (Hz);

ω – frekvencija na temperaturi ispitivanja (Hz);

ΔE_a - aktivaciona energija (J/mol);

T - temperatura ispitivanja (K);

T_r - referentna temperatura (K);

Kada se jednačina (2.17) uvrsti u jednačinu (2.16) dobija se sledeći oblik jednačine master krive:

$$\log|S| = \log S + \frac{\log S_{max} - \log S_{min}}{1 + e^{\beta + \gamma \left[\log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right]}} \quad (2.18)$$

gdje su, za svaku temperaturu, dati faktori pomjeranja sledećom jednačinom:

$$\log a(T) = \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (2.19)$$

Osim temperature i frekvencije opterećenja postoji niz drugih promjenljivih koje u manjoj ili višoj mjeri utiču na rezultate ispitivanja krutosti. U izveštaju sa projekta Strategic Highway Research Program SHRP-A-003-A (Tangella i sar. 1990.), detaljno su opisane veze ovih promjenljivih sa dobijenim rezultatima krutosti čiji su zaključci prikazani u tabeli 2.11. Ova analiza je zasnovana na rezultatima brojnih istraživanja (Bazin i sar. 1967., Pell & Brown 1972., Monismith i sar. 1971.)

Tabela 2.11 Faktori koji utiču na krutost asfaltne mješavine
(Tangella i sar. 1990.)

FAKTOR	PROMJENA FAKTORA	UTICAJ PROMJENE FAKTORA
Viskozitet bitumena	Porast	Porast
Sadržaj bitumena	Porast	Porast ¹
Granulometrija agregata	Od otvorenije ka zatvorenijoj mineralnoj mješavini	Porast
Sadržaj šupljina ispunjenih vazduhom	Smanjenje	Porast
Temperatura	Smanjenje	Porast ²

¹ Dostiže optimalne vrijednosti pri količinama većim od onih koje su zahtijevane za stabilnost.

² Dostiže granične vrijednosti na temperaturama nižim od temperature smrzavanja.

2.3.8. Svojstva asfalt betonskih mješavina sa elektrofilterskim pepelom

Upotreba EFP u asfaltnim mješavinama zastupljena je u asfaltnim betonima habajućeg sloja i asfaltnim mješavinama nosećih slojeva konstrukcije.

Svojstva EFP značajno variraju u zavisnosti od porijekla, ali i u okviru istog izvorišta javljaju se varijacije u toku vremena eksploatacije majdana uglja. Kako je ranije prikazano u ovom poglavlju postoje različite klasifikacije pepela, ali sa stanovišta upotrebe u asfaltnim mješavinama, izdvaja se podjela prema dominantnom hemijskom sastavu, na uglavnom kalcijumske, uglavnom silicijumske i one kod kojih su ove komponente izbalansirane.

Procenat primjene EFP u asfaltnim mješavinama u prikazanoj literaturi autori su izrazili na različite načine, u odnosu na ukupnu masu agregata ili u odnosu na količinu bitumena. Takođe, za kontrolnu mješavinu neki autori su uzimali mješavinu sa standardnim filerom, kamenim brašnom (Ali i sar., 2014.; Androić i sar., 2013.), neki su za kontrolnu uzimali mješavinu spravljen u potpunosti sa pepelom (Faleh Al.ani, 2017.), dok su drugi autori za kontrolnu uzimali mješavinu bez filera (Likitlersuang & Chompoorat, 2016.).

Iz navedenih razloga, kao i zbog specifičnosti karakteristika različitih pepela, nemoguće je sa preciznošću izvesti zaključke o najpogodnijim procentima zamjene mineralnog filera pepelom. Svakako, dostupna literatura pruža mogućnost uvida u generalne trendove količine primjenjenog EFP u asfaltnim mješavinama i generalne zaključke.

Tako, Ali i sar (2013.) su u svom istraživanju izvršili zamjenu 0%, 2%, 4% i 6% , pri OBC od 5%. Mehaničke karakteristike su ispitane na različitim temperaturama (0°C, 20°C i 40°C). Autori su došli do zaključaka da EFP upotrijebljen u funkciji mineralnog filera doprinosi čvrstoći mješavine i njenoj otpornosti na negativno dejstvo vode, izraženoj kroz bolju atheziju bitumenskog omotača i zrna agregata. Mješavima sa 2% zamjene dala je najbolje rezultate u pogledu otpornosti na trajnu deformaciju, kao i modul elastičnosti pri niskim i visokim temperaturama, ali tokom eksploatacije, mješavine sa pepelom nisu pokazale unapređenje u pogledu karakteristika kolovoza. Istraživanja sa zamjenom mineralnog filera pepelom u iznosima od 5%, 6%, 7% i 8% u odnosu na ukupnu težinu agregata mogu se vidjeti kod Çelika (2008.) gdje je autor došao do zaključka da mješavine sa 5% pepela imaju najveću stabilnost u odnosu na standardnu mješavinu. Mistry i Roj (2016.) su ispitivali karakteristike asfaltnih mješavina spravljenih sa pepelom klase F u iznosima od 2%, 4%, 6% i 8% u odnosu na masu agregata, upoređujući ih sa kontrolnom mješavinom spravljenom sa 2% filera od hidratisanog kreča. Laboratorijske

analize su pokazale da je kod mješavina sa 2% do 6% pepela, stabilnost povećala do 21% u odnosu na kontrolnu mješavinu, dok je sa 8% pepela uslijedio pad stabilnosti. OBC se smanjuje progresivno sa sadržajem pepela od 2% do 6%, dok sa 8% raste, i biva veći čak i u odnosu na kontrolnu mješavinu. Zamjena sa 4% pepela daje najmanje vrijednosti odnosa stabilnosti i tečenja (MQ), ali veće od standardne mješavine, dok mješavine sa 6% i 8% pepela imaju značajan prirast MQ i prevazilaze dozvoljenu granicu od 5 kN/mm, što ukazuje na prejak efekat ukrućenja pepela na mješavinu. Najveća stabilnost postignuta je na mješavini sa 5% pepela.

Iz literature se može zaključiti da srednje vrijednosti učešća pepela u mineralnoj mješavini, 2% - 6% daju najbolje rezultate u pogledu fizičko-mehaničkih osobina asfaltne mješavine, dok veće vrijednosti učešća pepela u asfaltnoj mješavini mogu dati nezadovoljavajuće rezultate u pogledu krutosti mješavine.

Sa druge strane Al-Suheibani & Tons (1991.) su vršili zamjenu bitumena pepelom i pri čemu su zaključili da je dodavanje do 40% pepela u odnosu na zapreminu bitumena, u suvim klimatskim uslovima, rezultiralo boljom čvrstoćom mješavine na zatezanje, boljom otpornošću na kolotrage i dužim vijekom trajanja. Za vlažne klimatske uslove autori su preporučili da ovaj procenat ne bi trebao da pređe 30%. Prilikom ispitivanja pepela tri vrste krupnoće, takođe su došli do zaključka da je srednjevni pepeo (1-44 µm) najpogodniji kao dodatak bitumenu u cilju povećanja krutosti mješavine.

Optimalna količina bitumena, u posmatranoj literaturi, obično je određena za svaki procenat zamjene mineralnog filera pepelom. OBC zavisi od procenta primjene EFP kao i od specifične površine i finoće zrna pepela. Uglavnom, mješavine sa EFP zahtijevaju veći OBC, ali ne uvijek. Tako su Mistry & Roy (2016.) uočili da se kod mješavina sa 2% pepela, što je zapravo 100% zamjena filera pepelom, OBC smanjuje za 2.7%. Trend smanjivanja OBC za mješavine sa 4% i 6% pepela (u odnosu na ukupnu masu agregata) se nastavlja, sa 5.95% i 7.9% respektivno, dok se sa 8% pepela, OBC povećava za 3.64% u odnosu na standardnu mješavinu sa 2% krečnjačkog filera.

Filer u asfaltnoj mješavini ima dvostruku ulogu, dio koji je finijih čestica, manjih od debljine bitumenskog omotača, miješajući se sa bitumenom čini bitumenski malter ili mastiks i u toj formi obavija zrno, dok krupniji dio filera popunjava šupljine u

agregatnoj matrici. Shodno ovim činjenicama, Sharma i sar. (2010.) su ispitivali OBC sa aspekta koncepta debljine bitumenskog omotača. Uzimajući za prosječnu debljinu omotača 6 μm , posmatrali su četiri tipa EFP tj. njihov prolaz kroz sito 6 μm . Imajući na umu prethodno, autori su pošli od pretpostavke da će zrna EFP manja od 6 μm , zajedno sa bitumenom preuzeti ulogu omotača i na taj način smanjiti OBC. Međutim, rezultati studije su pokazali suprotno, EFP koji je imao čak 90% prolaza kroz sito 6 μm , imao je najveće vrijednosti OBC pri zahtjevu 4% AV. Autori su zaključili da, osim veličine zrna, važan uticaj na OBC imaju i granulometrijski sastav, oblik i površina zrna. Ovdje se može uočiti i činjenica da ključnu ulogu u određivanju OBC ima specifična površina filera, jer pepeo sa čak 90% prolaza kroz sito 6 μm ima najveći OBC.

Sa druge strane, u nekim studijama nije varijantisan sadržaj bitumena, već je OBC određen na standardnoj, kontrolnoj mješavini i primijenjen na ostale mješavine sa pepelom (Likitlersuang & Chompoorat, 2016., Ali i sar. 2013.) posmatrajući tako karakteristike mješavina varijantisane samo po vrsti i količini pepela.

Kao što je izloženo u ovom poglavlju ranije, na zapreminske karakteristike asfaltne mješavine snažan uticaj imaju karakteristike EFP: granulometrija, oblik i veličina zrna, tekstura površine čestice, hemijski i mineraloški sastav. Kada se uzme u obzir i činjenica da sva ova svojstva pepela, dodatno variraju u zavisnosti od porijekla pepela, kao i u protoku vremena, nameće se zaključak da je od izuzetne važnosti imati stalnu kontrolu svojstava pepela, kao i mogućnost njihovog održavanja u okviru konstantnih vrijednosti.

Generalno, pepeli manje zapreminske mase i sa manjim udjelom sitnijih frakcija daju mješavine sa većim vrijednostima AV, što može uzrokovati povećanjem VFB (Adorjányi & Széchenyi, 2006.). Pepeli koji imaju značajno učešće sitnijih frakcija, se odlikuju boljim popunjavanjem šupljina u agregatnoj matrici, što ima za rezultat i smanjenje AV (Kar i sar. 2014.).

Generalni zaključci u pogledu uticaja EFP na stabilnost, tečenje, krutost, otpornost na dejstvo vode i trajnu deformaciju asfaltnih mješavina u kojima je primijenjen pepeo u određenom procentu, mogu se okarakterisati kao pozitivni.

Osim u nekim slučajevima kada je uočena diskretno manja stabilnost mješavina sa pepelom (Kar i sar. 2014.), mješavine sa pepelom se odlikuju višim vrijednostima stabilnosti u odnosu na standardne mješavine. Kao što je uočeno prilikom pregleda literature, mnogi autori su primijetili da su mješavine sa srednjim vrijednostima procenta zamjene dale maksimalne vrijednosti stabilnosti, dok niže i više vrijednosti zamjene rezultiraju mješavinama sa manjom stabilnošću.

Kao što je ranije izloženo, Mistry & Roy (2016.) uočili da 6% zamjene (u odnosu na masu ukupnog agregata) daje maksimalnu vrijednost stabilnosti, dok Androić i sar. (2013.) maksimalnu vrijednost stabilnosti ostvaruju pri 3% zamjene, Faleh Alani, (2017.) pri 2%. Adorjányi & Széchenyi (2006.) su zaključili da se najveće vrijednosti za stabilnost dobijaju ipak pri najvećem procentu, 10% u odnosu na ukupnu masu agregata. Najveće ostvarene vrijednosti stabilnosti u prikazanoj literaturi prate najmanje vrijednosti tečenja. Maršalov koeficijent (MQ), kao odnos stabilnosti i tečenja, predstavlja pokazatelj otpornosti mješavine na smicanje i na trajnu deformaciju dajući sliku o empirijskoj krutosti mješavine i njenoj otpornosti na deformaciju tečenja. Pregledom literature uočeno je da mješavine sa djelimičnom ili potpunom zamjenom mineralnog filera pepelom, uglavnom imaju veće vrijednosti MQ od mješavina sa standardnim filerom.

Otpornost asfaltne mješavine na dejstvo vode zavisi od više faktora ranije izloženih u ovom poglavlju. Kada je riječ o asfaltnim mješavinama spravljenim sa EFP, a u pogledu otpornosti na dejstvo vode, prije svega moraju se imati na umu karakteristike pepela: oblik i površina zrna, hemijski i mineraloški sastav. Obla i glatka zrna pepela omogućavaju lakšu obradljivost mješavine, ali zrna nepravilnog oblika hrapave teksture ostvaruju jače veze i rezultiraju mješavinama otpornim na dejstvo vode. Pepeli sa sadržajem kalcita, dolomita, krečnjaka, kao i feldspata, liskuna azbesta, gabra i dijabaza, obezbjeđuju prilično čvrste veze između bitumena i pepela, što u kontaktu sa vodom omogućava zadržavanje visokih mehaničkih svojstava. Osim minerološkog sastava i oblika zrna, u studiji Sharma i sar. (2010.) može se vidjeti i uticaj hemijskog sastava pepela na otpornost asfaltne mješavine na dejstvo vode, gdje su autori zaključili da mješavine sa svim primijenjenim pepelima, imaju veću otpornost na dejstvo vode, ali pepeli sa većim procentom kalcijum oksida doprinose ostvarenju najveće otpornosti mješavine na negativno dejstvo vode.

Generalno, otpornost na trajnu deformaciju je veća kod mješavina sa dodatkom pepela u odnosu na standardne mješavine, kao što je prikazano u studijama Sharma (2010.), Likitlersuang & Chompoorat (2016.), Ali i sar. (2012.) gdje je uočljiva činjenica da je od velikog uticaja na ostvarene vrijednosti otpornosti na trajnu deformaciju procenat u kojem je primijenjen EFP u mješavini, kao i hemijski sastav pepela. Najbolje rezultate u pogledu trajne deformacije daje pepeo sa većim postotkom kalcijum oksida, a najpogodniji procenti primjene EFP se kreću u srednjem rasponu, kao što je detaljno prikazano ranije u ovom poglavlju.

2.4. Rezime

Pregled dostupne literature, sagledavajući karakteristike elektrofilterskog pepela različitog porijekla, kao i karakteristike asfaltnih mješavina sa djelimičnom ili potpunom zamjenom mineralnog filera elektrofilterskim pepelom, pruža mogućnost sledećih zaključaka:

- Karakteristike elektrofilterskih pepela se razlikuju u zavisnosti od porijekla pepela, a variraju i u okviru istog izvora, kao i u toku eksploatacije izvorišta. Najveće razlike se zapažaju u granulometrijskom sastavu, veličini i obliku zrna, teksturi površine zrna, hemijskom i mineraloškom sastavu. Zbog različitih osobina, uticaj pepela na karakteristike asfaltne mješavine je različit, ali generalni zaključak je da se EFP može upotrijebiti kao djelimična ili potpuna zamjena za mineralni filer u asfaltnim mješavinama.
- Uobičajena optimalna količina bitumena u asfaltnim betonima za habajuće slojeve kreće se u rasponu od 5% do 6% u odnosu na ukupnu masu mješavine. Optimalna količina bitumena u mješavinama spravljenim sa EFP, u posmatranoj literaturi, obično je određena za svaki procenat zamjene mineralnog filera pepelom. Kako je izloženo u razmatranoj literaturi uočen je dvojak trend kada je riječ o međuzavisnosti OBC i procenta zamjene filera pepelom: da se OBC uglavnom smanjuje sa povećanjem procenta zamjene filera pepelom, ali do određenog procenta zamjene, poslije čega daljim uvećanjem procenta zamjene dolazi do uvećanja OBC. Obavijenost zrna filera bitumenom, a samim tim i

obavijenost zrna agregata, kao i ostale karakteristike mješavine zavise od karakteristika filera, tj. veličine njegovih čestica, teksture zrna, hemijskog sastava, specifične površine itd. Svojstva pepela prilično variraju, pa se zbog toga i rezultati dobijeni u prikazanim studijama razlikuju. Rezultati razmatranih istraživanja nisu konzistentni u pogledu procenta zamjene filera elektrofilterskim pepelom koji će dati najpovoljnije zapreminske karakteristike. Uzrok ovome su razlike u karakteristikama primijenjenih pepela. Ono što se može zaključiti je da, generalno, pepeli manje zapreminske mase i sa manjim udjelom sitnijih frakcija daju mješavine sa većim vrijednostima AV, što može uzrokovati povećanje VFB. Pepeli koji imaju značajno učešće sitnijih frakcija, se odlikuju boljim popunjavanjem šupljina u agregatnoj matrici, što ima za rezultat i smanjenje AV.

- Na stabilnost i tečenje asfaltnih mješavina po Maršalu, u kojima je mineralni filer zamijenjen elektrofilterskim pepelom, najveći uticaj ima veza koju ostvaruje filer i bitumen sa zrnima agregata. Zbog finoće čestica i povećane specifične površine, većina EFP ostvaruje odličnu vezu sa bitumenom. Visoke vrijednosti stabilnosti mogu se postići i sa dominantno silicijumskim pepelom i sa dominantno kalcijumskim pepelom. Sa porastom procenta zamjene, generalno unapređuje se stabilnost mješavine i smanjuju vrijednosti tečenja.
- Otpornost asfaltnih mješavina sa elektrofilterskim pepelom na dejstvo vode generalno je veća u odnosu na mješavine sa standardnim filerima. Ovo se posebno odnosi na pepele koji se odlikuju finijom granulacijom i većim sadržajem sitnih čestica, što rezultira većom specifičnom površinom. Značajnu ulogu ima hemijski sastav pepela, tj. njegov afinitet prema bitumenu. Tako pepeli koji su dominantno kalcijumski, ili čak dominantno silicijumski sa znatnim procentom CaO, ostvaruju jake athezione veze pepela i bitumena, a time i zrna agregata i bitumenskog maltera. Sve ovo poboljšava otpornost mješavine na ljuštenje i spiranje bitumena sa zrna agregata, što rezultira povećanjem otpornosti asfaltne mješavine na negativno dejstvo vode.
- Mješavine spravljene sa EFP generalno, ostvaruju veću otpornost na trajnu deformaciju. Prisustvo većeg procenta kalcijum oksida u elektrofilterskom pepelu rezultira poboljšanjem karakteristika bitumena i znatnom otpornošću mješavine na trajnu deformaciju. Mješavine sa ovom vrstom pepela, takođe imaju

poboljšanu otpornost na trajnu deformaciju u vlažnim klimatskim uslovima. Mješavine sa dominantno silicijumskim pepelom, takođe postižu veće vrijednosti u pogledu otpornosti na trajnu deformaciju, s tim da se to postiže primjenom manjih procenata zamjene.

- Primjenom EFP u asfaltnim mješavinama povećava se krutost mješavine. Važno je napomenuti, iako se teži povećanju krutosti, veće vrijednosti krutosti mogu da dovedu do neželjenih efekata tokom eksploatacije. Efekat pretjeranog učvršćivanja mješavine može se kontrolisati odnosom procenta zamjene, tj. odnosa miješanja standardnog mineralnog filera i elektrofilterskog pepela.

U većini radova, koji su obuhvaćeni pregledom literature, zaključeno je da se ispitani pepeli mogu primijeniti u spravljanju asfaltnih mješavina u cilju dobijanja mješavina čija će svojstva zadovoljiti zahtjeve specifikacija ili unaprijediti ista. Prilikom projektovanja asfaltnih mješavina sa EFP treba imati na umu varijabilnost svostava pepela, čak i u okviru istog izvora tokom dužih perioda eksploatacije. Različitosti u karakteristikama pepela i procenta njegove primjene mogu se smatrati razlogom zašto sprovedena ispitivanja mješavina sa EFP nisu mogla dati konzistentne zaključke u pogledu idealnih procenata učešća elektrofilterskog pepela u mineralnoj, odnosno asfaltnoj mješavini.

U razmotреноj literaturi, osim u jednom radu, nisu prikazani rezultati dugoročnog uticaja primjene pepela u asfaltnim mješavinama, tj. nije posmatrano ponašanje asfaltna mješavine u eksploataciji čime bi se prikazao uticaj pepela na starenje mješavine i njenih svojstava tokom vremena.

Takođe, u okviru analizirane literature, istraživački fokus je stavljen na ispitivanje svojstava asfaltnih mješavina sa pepelom, dok su detaljnija ispitivanja samog pepela uglavnom izostala. Podaci o svojstvima primijenjenih pepela izložena su u skromnom i ponekada, nedovoljnom obliku, na osnovu kojih nije bilo moguće izvesti jasne zaključke o uticaju svojstava pepela na karakteristike asfaltnih mješavina.

Ispitivanje modula krutosti asfaltnih mješavina generalno se rijetko srijeće u dostupnoj literaturi, dok je ispitivanje modula krutosti asfaltnih mješavina sa dodatkom pepela u potpunosti nezastupljeno.

3. Metodologija, materijali i program eksperimenta

3.1. Uvod

Kako se sastav i karakteristike pepela razlikuju u zavisnosti od porijekla i vrste uglja koji sagorijeva, kao i od karakteristika energetskih postrojenja, za potrebe ove disertacije analizirani su pepeli iz tri različita izvora: TE „Pljevlja“, TE „Gacko“ i TE „Kosovo B“. Izbor primjene ova tri pepela u eksperimentu rezultat su pregleda dostupne literature i zaključaka polaznih istraživanja, pri čemu se došlo do zaključka da se ova tri pepela razlikuju po svojim hemijskim i fizičko-mehaničkim karakteristikama i, da su kao takvi pogodni za eksperimentalno istraživanje u ovoj disertaciji.

Stoga je u okviru rada na ovoj disertaciji sprovedeno eksperimentalno istraživanje i izvedeni naučno verifikovani zaključci, sa ciljem da se utvrdi uticaj konkretnih pepela na fizičko-mehaničke karakteristike asfaltnih mješavina, u okviru koga je izvršena djelimična ili potpuna zamjena kamenog brašna elektrofilterskim pepelom u asfaltnoj mješavini.

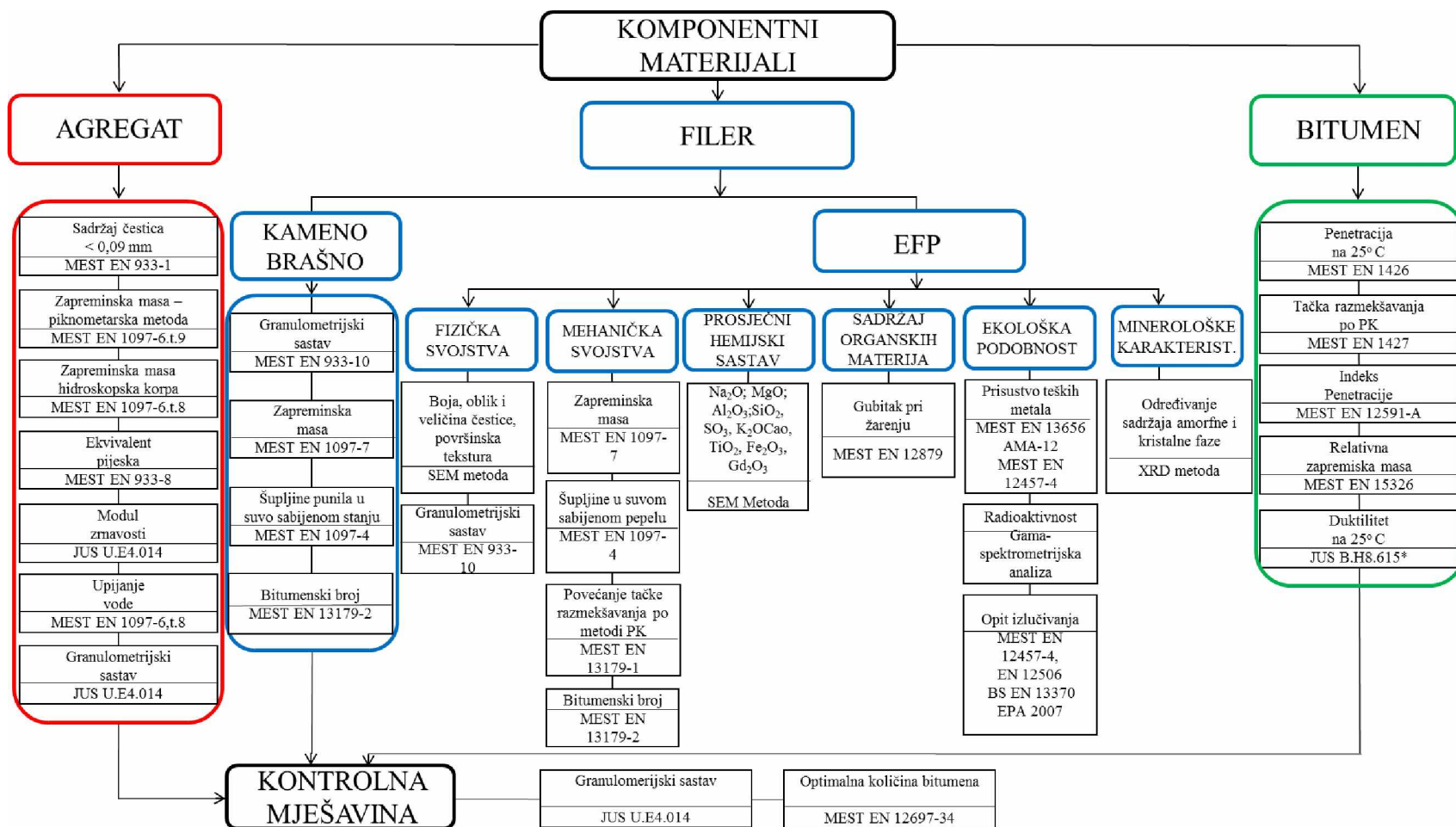
3.2. Metodologija

U okviru predmetnih istraživanja izvršena su ispitivanja svojstava svih komponentnih materijala. Takođe, izvršena su ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika asfaltnih mješavina sa različitim sadržajem EFP. Rezultati dobijeni u eksperimentalnom istraživanju upoređeni su sa karakteristikama kontrolne mješavine spravljene sa standardnim filerom, kamenim brašnom.

Poseban akcenat u ispitivanju osobina komponentnih materijala je dat na elektrofilterskom pepelu gdje su utvrđene fizičko-mehaničke i hemijske osobine tri različita pepela, kao i njihova mineraloška karakterizacija i ekološka podobnost.

Matrica eksperimentalnih ispitivanja komponentnih materijala prikazana je na slici 3.1.

Slika 3.1 Matrica ispitivanja komponentnih materijala



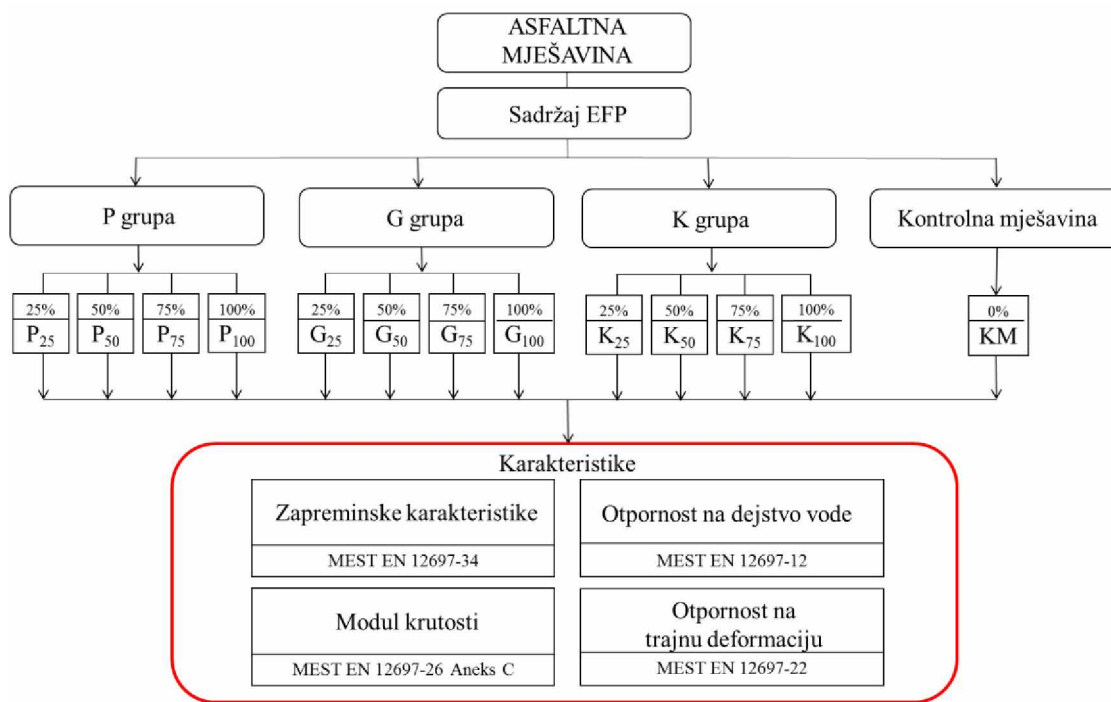
Za potrebe sprovedenih ispitivanja spravljeno je 12 eksperimentalnih mješavina u kojima je izvršena zamjena kamenog brašna pepelom u različitim procentima (25%, 50%, 75%, i 100%) i kontrolna mješavina spravljena sa 100% standardnog filera. Od svih 13 mješavina ispitana su po četiri uzorka. Grupe mješavina sa pepelima iz TE “Pljevlja”, TE “Gacko” i TE “Kosovo B” imenovane su početnim slovom koje ukazuju na njihovo izvoriste: P, G i K, respektivno. U okviru svake od ovih grupa formirane su podgrupe u kojima je izvršena zamjena kamenog brašna pepelom u različitim procentima (25%, 50%, 75% i 100%). Procenat zamjene EFP pridružen je nazivu grupe u vidu indeksa. Tako dobijeni kodovi mješavina prikazani su u tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Kodovi mješavina u skladu sa procentom zamjene kamenog brašna elektrofilterskim pepelom

Grupe pepela	Kod mješavine												
	KM	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₁₀₀	G ₂₅	G ₅₀	G ₇₅	G ₁₀₀	K ₂₅	K ₅₀	K ₇₅	K ₁₀₀
P grupa	0	25	50	75	100	0	0	0	0	0	0	0	0
G grupa	0	0	0	0	0	25	50	75	100	0	0	0	0
K grupa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	50	75	100

Važno je napomenuti da procenti zamjene mineralnog filera pepelom 25%, 50%, 75% i 100%, izraženi u odnosu na ukupnu masu agregata iznose 1%, 2%, 3% i 4%. U cilju spravljanja eksperimentalnih mješavina pod istim uslovima pod kojima je spravljena kontrolna mješavina, sve mješavine projektovane su sa istim granulometrijskim sastavom mineralnog agregata, istom količinom bitumena BIT 50/70 u sadržaju od 5,6% koji je određen Maršalovom metodom na kontrolnoj mješavini. Jedina varijabla u mješavini je odnos mineralnog filera i EFP. Projektovana asfaltna mješavina je mješavina za habajući sloj AB11s surf. Zbog svoje pozicije u kolovoznoj konstrukciji, ovaj sloj mora biti otporan na klimatske uticaje i zadovoljiti uslove direktne izloženosti saobraćajnom opterećenju (kočenje, ubrzavanje, direktno vertikalno opterećenje) kao i pružiti dovoljan otpor klizanju prilikom skretanja i kočenja vozila, te stoga mora zadovoljiti strožije tehničke uslove.

Za svih 13 mješavina ispitane su zapreminske karakteristike, Maršalova stabilnost i tečenje, otpornost na dejstvo vode, modul krutosti i otpornost na trajnu deformaciju, kao što je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2 Matrica ispitivanja asfaltnih mješavina

3.3. Komponentni materijali

Karakteristike komponentnih materijala direktno se reflektuju i na svojstva asfaltnih mješavina. Kako bi se utvrdio obim i zakonitost ove zavisnosti, izvršena su opsežna ispitivanja svih materijala upotrijebljenih u eksperimentu. Ispitivanja sprovedena u cilju određivanja karakteristika komponentnih materijala izvršena su u Laboratoriji TPA za obezbjeđenje kvaliteta i inovacije, Čačak, Centru za ekotoksikološka ispitivanja – Laboratorija za ekotoksikološka ispitivanja i zaštitu od zračenja, Podgorica, Laboratoriji za kolovozne konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu i Laboratoriji za skenirajuću elektronsku mikroskopiju Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

3.3.1. Agregat

Za spravljanje asfaltne mješavine upotrijebljen je kameni materijal iz kamenoloma Okruglički krš, Štitarica, Mojkovac, Crna Gora. Vrsta stijene je kvarc – latit. Na slici 3.3 prikazane su frakcije kamenog agregata koji je upotrijebljen u eksperimentu.



Slika 3.3 Frakcije kamenog agregata iz kamenoloma Okruglički krš, Štitarica

3.3.2. Bitumen

Za spravljanje asfaltne mješavine upotrijebljen je BIT 50/70, Rafinerija nafte „Pančevo“, Republika Srbija.



Slika 3.4 Bitumen BIT 50/70

3.3.3. Filer

3.3.3.1. Kameno brašno

Za spravljanje asfaltnih mješavina upotrijebljen je kameno brašno proizvođača „Šišković“ – Podgorica, Crna Gora. Na slici 3.5 prikazano je kameno brašno upotrijebljeno u eksperimentu.



Slika 3.5 Kameno brašno „Šišković“

3.3.3.2. Elektrofilterski pepeo

Elektrofilterski pepeli su uzorkovani iz postrojenja tri termoelektrane u regionu: TE „Pljevlja“- Pljevlja, Crna Gora; TE „Gacko“ - Gacko, Bosna i Hercegovina; TE „Kosovo B“– Priština, Kosovo. U cilju određivanja osobina uzorkovanih pepela, i njihovog ocjenjivanja u smislu podobnosti primjene u asfaltnim mješavinama, ispitana su mehanička svojstva, prosječni hemijski sastav, ekološka podobnost, sadržaj organskih materija, i izvršena je mineraloška i fizička karakterizacija predmetnih pepela. U tabeli 3.1 predstavljen je kompletan obim izvršenih ispitivanja i pripadajućih metoda, dok slika 3.6 prikazuje pepele upotrijebljene u eksperimentu.

Tabela 3.2 Pregled sprovedenih ispitivanja uzorkovanih pepela

Mehanička svojstva / metoda	Zapreminska masa MEST EN 1097-7	Šupljine u suvom sabijenom pepelu MEST EN 1097-4	Povećanje tačke razmekšavanja po metodi PK MEST EN 13179-1	Bitumenski broj MEST EN 13179-2
Prosječni hemijski sastav / metoda	Na ₂ O, MgO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , SO ₃ , K ₂ O, CaO, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Gd ₂ O ₃ , R SEM metoda			
Ekološka podobnost / metoda	Prisustvo teških metala MEST EN 13656; AMA-12; MEST EN 12457-4.	Radioaktivnost Gama-spektrometrijska analiza	Opit izlučivanja EN 12457-4, EN 12506, EN 13370, EPA 2007	
Sadržaj organskih materija / metoda	Gubitak pri žarenju (Loss on ignition - LOI) EN 12879			
Mineraloška karakterizacija / metoda	Određivanje sadržaja amorfne i kristalne faze SEM metoda			
Fizička karakterizacija	Boja, oblik i veličina čestice, površinska tekstura SEM metoda	Granulometrijski sastav MEST EN 933 - 10		



Pepeo iz TE "Pljevlja"



Pepeo iz TE "Gacko"



Pepeo iz TE "Kosovo B"

Slika 3.6 Elektrofilterski pepeli upotrijebljeni u eksperimentu

Mehanička svojstva

S obzirom da su se karakteristike pepela ispitivale za prprimjenu u asfaltnim mješavinama u svrhu zamjene za kameno brašno, ispitivanjem su bili obuhvaćeni određivanje bitumenskog broja koji predstavlja prividnu viskoznost mješavine kamenog

brašna/EFP i vode, kao i povećanje tačke razmekšavanja koja definiše stepen ukrućivanja mješavine kamenog brašna/EFP i bitumena.

Hemijska svojstva

Prosječan hemijski sastav elektrofilterskog pepela određen je metodom skenirajućeg elektronskog mikroskopa, metoda SEM, model aparata JSM-6610LV.

Analiza materijala vršena je pod elektronskim snopom koji zahtijeva elektroprovodljivost uzorka, zbog čega je ispitani materijal prethodno prekriven tankim slojem zlata (15-25 nm) kako bi se ostvarila zahtijevana elektroprovodljivost i bolji kontrast na snimku (slika 4.4) Ovo je razlog zbog kojeg se na Energy dispersive X-ray spektrogramu (EDS) na kojima je prokazan sadržaj hemijskih elemenata pojavljuje i element zlata koji inače nije element sadržan u uzorcima pepela.

Sadržaj organskih materija

Značajno hemijsko svojstvo EFP je i gubitak pri žarenju (LOI – eng. Loss on Ignition) koji predstavlja mjeru količine ostatka ugljenika koji se zadržao u EFP nakon izlaganja visokoj temperaturi (800°C). Ovom metodom se ustanovljava sadržaj organskih materija u ispitivanom materijalu.

Sadržaj teških metala – metoda ukupnog sadržaja elemenata

Ukupni sadržaj elemenata u uzorcima elektrofilterskog pepela određen je metodom propisanom u standardu MEST EN 13656:2013, osim sadržaja žive koji je određen tehnikom atomske apsorpcione spektrofotometrije na čvrstoj fazi. Uzorci pepela ispitivani su na ukupan sadržaj sljedećih elemenata: Sb, As, Ba, Cu, Zn, Cr, Sn, Co, Cd, Ni, Pb, Se, Ag, Hg i Mo.

Sadržaj teških metala – metoda određivanja sadržaja parametara izlučevine L/S

Izlučevina dobijena metodom opisanom u standardu MEST EN 12457-4:2013 (odnos L/S=10 l/kg) analizirana je na sadržaj istih elemenata za koje je određen ukupan sadržaj, primjenom metoda opisanih u standardima BS EN 12506:2003, BS EN 13370:2003 i EPA 200.7. U tabeli 4.11 prikazani su rezultati analize sadržaja parametara izlučevine u

uzorcima elektrofilterskih pepela koji su ovom analizom tretirani kao otpadni materijal, kao i dozvoljene količine za različite načine odlaganja.

Određivanje aktivnosti radionuklida izvršeno je na uzorcima pepela gama-spektrometrijskom analizom. Analiza je izvršena na sistemu sa poluprovodničkim HPGe detektorom firme ORTEC, relativne efikasnosti 41%. Obrada snimljenih spektara obavljena je softverom Gamma Vision 32, Nuclide Navigator. Energetska kalibracija i kalibracija efikasnosti HPGe detektora urađena je korišćenjem tačkastih izvora i multi standarda proizvođača Czech Metrological Institute. Priprema uzorka i analiza je urađena u skladu sa normativima IAEA i EML, prema metodi Measurement of Radionuclides in Food and the Enviroment; Technical Reports series No 295. Uzorak je doveden do visokog stepena homogenosti i upakovan u standardne Marineli posude od 1 litra, u kojima je i obavljeno snimanje.

Mineraloška karakterizacija elektrofilterskog pepela utvrđena je metodom rentgenske difraktometrije (XRD) na difraktometru za prah: PHILIPS PW 171 pod sledećim uslovima: zračenje sa antikatode bakra: $\text{CuK}\alpha = 1,54178 \text{ \AA}$ i grafitni monohromator, napon na cijevi: $U = 40 \text{ kV}$, jačina struje: $I = 30 \text{ mA}$. Svi uzorci su podvrgnuti istom opsegu ispitivanja $3 - 60^\circ 2\theta$ sa korakom: $0,02^\circ$, vremensko zadržavanje po koraku: $2,0 \text{ s}$.

3.4. Projektovanje asfaltnih mješavina

Da bi se dobila asfaltna mješavina koja će zadovoljiti zahtjeve u pogledu ekonomičnosti i traženih karakteristika asfaltnog sloja, potrebno je izvršiti projektovanje asfaltna mješavine kojim će se dobiti optimalna količina bitumena za ciljani granulometrijski sastav. Karakteristike i tip upotrijebljenih materijala, intenzitet saobraćajnog opterećenja, kao i klimatski uslovi utiču na izbor optimalnog sadržaja bitumena u mješavini. Ukoliko se upotrijebi količina bitumena niža od optimalne, tada zrna agregata neće biti obavijena slojem bitumena u dovoljnoj mjeri i doći će do štetnog uticaja vazduha i vode na mješavinu. Nedovoljna obavijenost zrna agregata bitumenom rezultira manjom stabilnošću i manjom trajnošću mješavine. Sa druge strane, ukoliko se upotrijebi više bitumena, zrna agregata će izgubiti međusobni kontakt i “plivati” u višku

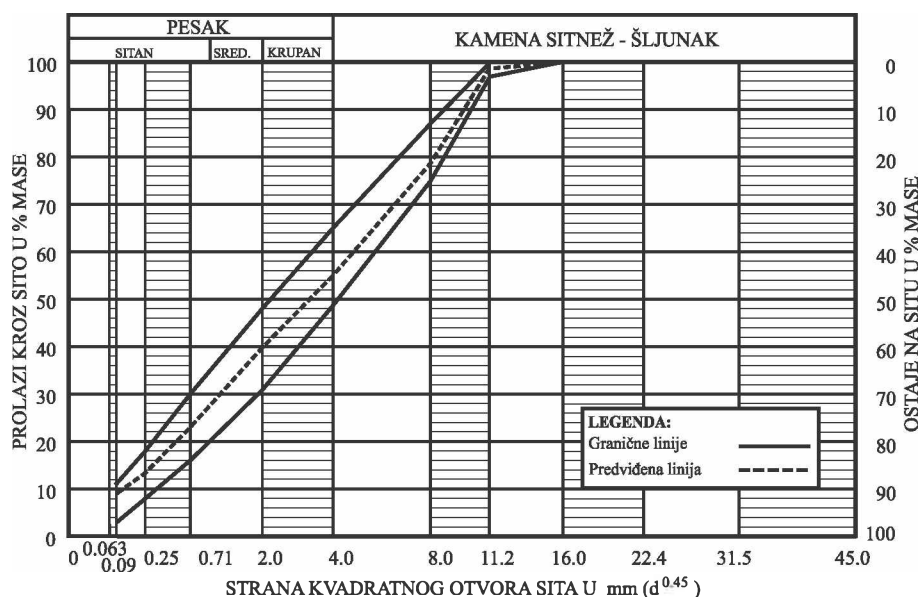
bitumena što će imati za posledicu pomijeranje zrna agregata pod dejstvom saobraćajnog opterećenja, što će uticati na povećanje deformabilnosti asfaltnog sloja. Ovo može da dovede do isplivavanja bitumena na površinu, poremećaja strukture asfalt betona i umanjnja njegove stabilnosti (Mamlouk & Zaniewski 2011). Količina bitumena za habajuće slojeve definisana je u vrlo uskim granicama, od 5% do 6% u odnosu na ukupnu masu mješavine.

Dobro projektovana asfaltna mješavina odlikuje se sledećim karakteristikama:

- trajnost (otpornost na klimatske uticaje i dejstvo saobraćaja);
- stabilnost (otpornost na deformacije pod opterećenjem);
- fleksibilnost (otpornost na zamor pod dejstvom opterećenja);
- hrapavost (otpornost na klizanje površine kolovoza);
- vodonepropustljivost i
- ugradljivost.

3.4.1. Mineralna mješavina

Mineralnu mješavinu upotrijebljenu u ovom eksperimentu, čine: agregat sačinjen od frakcija sledećih nazivnih veličina: 0/4 mm (50%), 4/8 mm (23%) i 8/11 mm (23%) i kameno brašno (4%). Granulometrijska kriva mineralne mješavine prirodnog agregata prikazana je na slici 3.7.



Slika 3.7 Granulometrijski sastav mineralne mješavine

3.4.2. Projektovanje asfaltnih mješavine metodom Maršala

Optimalni sadržaj bitumena za kontrolnu mješavinu AB11s SURF određen je Maršalovom metodom (MEST EN 12697-34) na temperaturi od 150°C, sa energijom zbijanja definisanom sa dva puta po 50 udaraca. Pripremljeni Maršalovi uzorci su cilindričnog oblika prečnika 101.6 mm i visine 61-66 mm. Za optimalni sadržaj bitumena usvojena je vrijednost 5.6%, pri čemu je ostvaren ciljani sadržaj šupljina (AV) od 5%. Na slici 3.8 prikazana je mješalica u kojoj je vršena homogenizacija asfaltne mase.



Slika 3.8 Laboratorijska mješalica

U cilju ispitivanja eksperimentalnih mješavina pod istim okolnostima kao i kontrolne mješavine, optimalna količina bitumena od 5.6% primijenjena je pri spravljanju svih mješavina. Za svih trinaest mješavina spravljena su po četiri Maršalova uzorka.

Za sve asfaltne mješavine određeni su zapreminska struktura i vrijednosti stabilnosti i tečenja po Maršalu: šupljine u asfaltnoj mješavini, šupljine u mineralnoj mješavini, procenat šupljina ispunjenih bitumenom, zapreminska masa, maksimalna zapreminska masa, stabilnost, tečenje i Maršalov koeficijent MQ. Tabela 3.2 prikazuje učešće komponentnih materijala u projektovanom sastavu asfaltne mješavina.

Tabela 3.3 Učešće komponentnih materijala u projektovanom sastavu asfaltne mješavine

Komponentni materijali	Porijeklo materijala	Mineralna mješavina (%)	Asfaltna mješavina (%)
Kameno brašno	"Šišković" Podgorica	4	3.8
0/4	"Štitarica" Mojkovac	50	47.2
4/8	"Štitarica" Mojkovac	23	21.7
8/11	"Štitarica" Mojkovac	23	21.7
BIT 50/70	Rafinerija nafte „Pančevo“	-	5.6
Ukupno		100	100

3.5. Priprema uzoraka asfaltne mješavine

Pri laboratorijskom spravljanju asfaltnih uzoraka sa određenim sadržajem EFP vodilo se računa da se uzorci spravljaju na način koji će što približnije predstavljati način spravljanja mješavina u asfaltnoj bazi. Iz tog razloga nije razmatrana količina zaostalog filera na zrnima agregata, već samo količina filera koji se dodaje kao posebna komponenta mješavine.

Komponentni materijali su, nakon odmjeravanja potrebnih količina, zagrijani na temperaturi od 150°C. Nakon postizanja temperature od 150°C, izvršeno je njihovo umešavanje u automatskoj mješalici (slika 3.8).

Ugradnja asfaltne mješavine u uzorke za određivanje otpornosti na kolotrage izvršena je u segmentnom nabijaču, dok je za ostale uzorke korišten postupak ugradnje asfaltnih mješavina Maršalovim postupkom.

3.5.1. Maršalovi uzorci

Spravljanje standardnih Maršalovih uzoraka sprovedeno je umješavanjem svih komponenti prethodno zagrijani na temperaturi od 150°C. Tako spravljena mješavina njegovana je u trajanju od 1 h na temperaturi od 150°C, posle čega je uslijedilo ugrađivanje u Maršalovom nabijaču (slika 3.9). Zbijanje asfaltne mješavine je vršeno

udarnim opterećenjem tega težine 4.45 kg, koji slobodno pada sa visine 46 cm, pri čemu je prečnik Maršalovog tega je jednak prečniku uzoraka. Kod standardnih Maršalovih uzoraka zbijanje se vrši sa po 50 udaraca sa obje strane cilindričnog uzorka. Tako dobijeni cilindrični uzorci imaju dimenzije prečnika 101.6 mm i visine cca. 63.5 mm. Na standardnim Maršalovim uzorcima sprovedeno je ispitivanje zapreminskih karakterisitika, stabilnosti i tečenja po Maršalu.



Slika 3.9 Maršalov nabijač i Maršalovi uzorci

Za sprovođenje opita otpornosti asfaltne mješavine na dejstvo vode spravljaju se Maršalovi uzorci po istoj proceduri, ali je energija zbijanja definisana sa 2×35 udaraca u skladu sa MEST EN 12697-12.

Opit modula krutosti izveden je na Maršalovim uzorcima na kojima su ispitane zapreminske karakteristike mješavina.

3.5.2. Ploče za kolotrage

Kako bi se što bolje simulirali uslovi na asfaltnoj bazi i na terenu, asfaltna mješavina nakon umješavanja, a prije ugradnje kondicionirana na temperaturi 135°C u trajanju od

4 h. Za svaku asfaltnu mješavinu, u skladu sa MEST EN 12697-33, u segmentnom nabijaču pripremljene su po dvije ploče dimenzija 320x260x70 mm.

Proces zbijanja asfaltne mješavine segmentnim nabijačem (slika 3.10) definisan je kroz nekoliko koraka i osmišljen tako da što bolje simulira ugradnju asfalta na terenu pomoću mehanizacije. Zagrijavanje kalupa i valjka na temperaturi od 80 °C prethodi zbijanju mješavine sa nemodifikovanim bitumenom. Nakon toga, u kalup se sipa asfaltna mješavina i započinje proces zbijanja: prvo se vrši zbijanje prelazima čeličnim segmentom pri konstantnoj deformaciji i ograničenom opterećenju, sa hodom od 0.5 mm po prelazu, do maksimalne sile od 2.6 kN; potom slijedi tzv. ravnanje uzorka sa 7 prelaza segmenta pri konstantnoj sili. Na ovaj način se simulira rad finišera na terenu. Poslije toga vrši se zbijanje konstantnim opterećenjem od 0.5 kN i to sa 15 prelaza segmenta; potom se zbija sa potrebnim brojem prelaza segmenta sa konstantnim priraštajem opterećenja od 1.3 kN/prelazu do maksimalne sile od 19.5 kN, i rasterećuje istom brzinom, čime se simulira završno zbijanje valjcima. Na slici 3.10 prikazana je oprema za spravljanje uzoraka na kojima se sprovodi test kolotražnja, kao i oprema za kolotražnje.



Slika 3.10 Segmentni nabijač i oprema za opit kolotražnja

Za potrebe sprovedenog ispitivanja asfaltnog betona, ugradnja asfaltne mješavina je sprovedena Maršalovim postupkom i segmentnim nabijačem. Na tako dobijenim cilindričnim uzorcima određene su zapreminske karakteristike, stabilnost, tečenje i otpornost na dejstvo vode. Na cilindričnim uzorcima je određen i modul krutosti, dok je na pločastim uzorcima ispitana otpornost mješavina na trajnu deformaciju.

3.6. Rezime

U ovom poglavlju prikazan je program eksperimenta, svi materijali koji su primjenjeni prilikom eksperimentalnog istraživanja, kao i metodologija po kojoj je eksperiment izvršen. Kompletan obim istraživanja koja su izvršena za potrebe ove disertacije podijeljena su u dva dijela.

Prvi dio eksperimentalnog istraživanja odnosi se na ispitivanje karakteristika svih komponentnih materijala. U ovom poglavlju predstavljeni su materijali korišteni u eksperimentu, kao i metode kojima su utvrđene karakteristike pepela u svrhu utvrđivanja njihove podobnosti za upotrebu u drugom dijelu eksperimenta. Komponentni materijali korišteni u ovom eksperimentu su: agregat (Okruglački krš, Štitarica, Mojkovac, Crna Gora), bitumen (Rafinerija nafte „Pančevo“, Republika Srbija), kameno brašno („Šišković“, Podgorica, Crna Gora) i elektrofilterski pepeo (TE „Pljevlja“- Pljevlja, Crna Gora; TE „Gacko“ - Gacko, Bosna i Hercegovina; TE „Kosovo B“– Priština, Kosovo).

Drugi dio eksperimentalnog istraživanja odnosi se na utvrđivanje karakteristika asfalt betonske mješavine za habajući sloj, AB11s surf. U ovom poglavlju dat je program eksperimenta kao i prikaz pripreme uzoraka različitih asfaltnih mješavina. Prikazana je i metodologija ispitivanja koja se odnose na određivanje karakteristika eksperimentalnih mješavina spravljenih sa određenim procentom EFP i kontrolne mješavine spravljene s standardnim filerom. Svojstva 13 različitih asfaltnih mješavina koja su ispitana u drugom dijelu eksperimentalnog istraživanja su: zapreminske karakteristike, Maršalova stabilnost i tečenje, otpornost na dejstvo vode, otpornost na trajnu deformaciju i modul krutosti.

Rezultati prvog eksperimentalnog dijela, koji se odnosi na komponentne materijale prikazani su u četvrtom poglavlju, dok su rezultati drugog eksperimentalnog dijela, koji se odnose na karakteristike asfaltnih mješavina, prikazani u petom poglavlju.

4. Rezultati i diskusija ispitivanja komponentnih materijala

4.1. Uvod

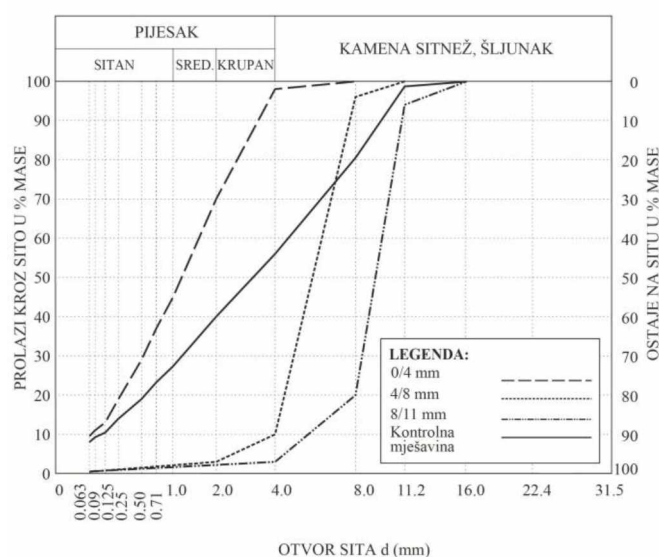
U prvom dijelu eksperimentalnog istraživanja ispitane su karakteristike komponentnih materijala. Za kontrolnu mješavinu je uzeta asfalt betonska mješavina AB11s spravljena od standardnih materijala, čiji su rezultati ispitivanja predstavljeni u ovom poglavlju. Posebna pažnja u ovom dijelu istraživanja data je elektrofilterskom pepelu, industrijskom otpadnom materijalu koji je u ovom eksperimentu tretiran kao ravnopravan građevinski materijal. U ovom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja pepela, koji su diskutovani sa aspekta upoređenja sa standardnim kamenim brašnom.

4.2. Agregat

Granulometrijski sastav agregata je prikazan u tabeli 4.1, kao i na slici 4.1, što je takođe predstavljeno i dijagramom na slici 4.1 Fizičke karakteristike frakcija kamenog agregata prikazane su u tabeli 4.2.

Tabela 4.1 Granulometrijski sastav frakcija kamenog agregata i kriterijumi prema JUS U.E4.014

Otvor sita (mm)	Frakcija kamenog agregata (mm/mm)					
	0/4		4/8		8/11	
	Prolazi kroz sito u % (m/m) MEST EN 933-1					
	Rezultat	Kriterijum	Rezultat	Kriterijum	Rezultat	Kriterijum
0,063	9.5	-	0.3		0.4	
0,09	11	max 10	0	max 1	0	max 1
0,125	13					
0,25	19	12 – 25				
0,71	37	33 – 70				
1,0	45					
0,50	29					
2,0	70	65 – 100	3	max 5		
4,0	98	90 - 100	10	max 15	3	max 5
8,0	100	100	96	min 90	20	max 15
11,2			100	100	94	min 90
16,0					100	100
22,4						
31,5						



Slika 4.1 Granulometrijski sastav frakcija kamenog agregata

Tabela 4.2 Fizičke karakteristike frakcija kamenog agregata i kriterijumi prema JUS U.E4.014

Svojstvo	Metoda	Frakcije kamenog agregata (mm)					
		0/4		4/8		8/11	
		Veličina Kriterijum		Veličina Kriterijum		Veličina Kriterijum	
Sadržaj čestica manjih od 0,09 mm (%)	MEST EN 933-1	11	max 10	0	max 1	0	max 1
Zapreminska masa piknom.met. (kg/m ³)	MEST EN 1097-6, t.9	2730	-	-	-	-	-
Zapreminska masa hidr. korpa (kg/m ³)	MEST EN 1097-6, t.8	-	-	2724	-	2719	-
Ekvivalent pijeska (%)	MEST EN 933-8	65.4	min 60	-	-	-	-
Modul zrnivosti	JUS U.E4.014	2.64	1.95 – 3.00	-	-	-	-
Upijanje vode (%)	MEST EN 1097-6, t.8	-	-	0.6	max 1.6	-	-

4.3. Bitumen

Rezultati standardnih ispitivanja bitumena prikazani su u tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Karakteristike bitumena - kriterijum: MEST EN 12591

Svojstvo	Metoda	Vrijednost	Kriterijum
Penetracija na 25°C (0.01 mm)	MEST EN 1426	61	50 - 70
Tačka razmekšavanja po PK (°C)	MEST EN 1427	50,1	46 - 54
Indeks penetracije	MEST EN 12591-A	-0,1	-1.5 – 0.7
Relativna zapreminska masa (Mg/m ³)	MEST EN 15326	1.011	
Duktilitet na 25°C (cm)	JUS B.H8.615 *		

* Za duktilitet nema evropskog standarda. Kriterijum za duktilitet je dat prema JUS U.M3.010

4.4. Filer

4.4.1. Kameno brašno

Kameno brašno upotrijebljeno u eksperimentu je krečnjačkog porijekla, dominantno kalcijumskog sadržaja sa neznatnim primjesama drugih elemenata. Rezultati ispitivanja standardnog kamenog brašna prikazani su u tabeli 4.4.

Tabela 4.4 Karakteristike kamenog brašna – kriterijum: JUS B.B3.045:1982

Ispitivanje	Metoda	Rezultati	Kvalitet I	Kvalitet II
Granulometrijski Sastav (%)	0.063	80.8	60 - 85	50 - 85
	0.09	90.2	80 - 95	65 - 95
	0.25	99.6	95 - 100	95 - 100
	0.71	100	100	100
Zapreminska masa (kg/m ³)	MEST EN 1097-7	2711		/
Šupljine punila u suvosabijenom stanju (%)	MEST EN 1097-4	31.5		/

4.4.2. Elektrofilterski pepeo

Fizička svojstva

U tabeli 4.5 su prikazane fizičke karakteristike kamenog brašna i tri vrste pepela.

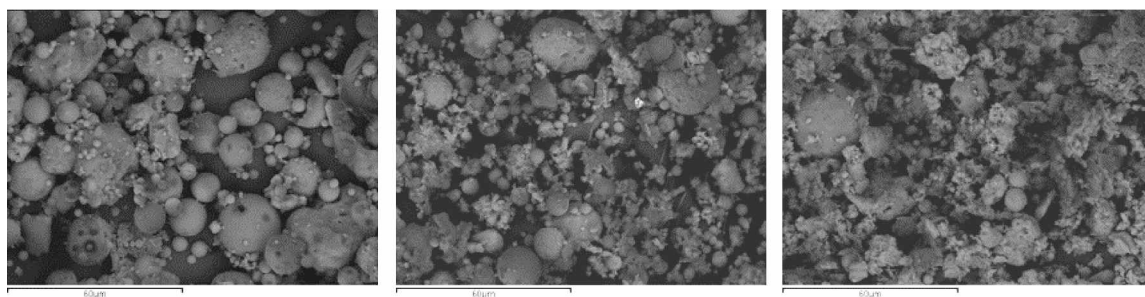
Tabela 4.5 Fizičke karakteristike elektrofilterskog pepela i kamenog brašna

Svojstvo	Porijeklo pepela			Kameno brašno
	P	G	K	
Boja	Siva	Blijeda mrkožuta	Tamno žuta	Bijela
Oblik čestice	Uglavnom sferičan	Sferičan i nepravilan, kombinovano	Sferičan i nepravilan, kombinovano	Uglasta do prizmatična
Tekstura površine	Uglavnom glatka	Uglavnom hrapava	Uglavnom hrapava	Uglavnom hrapava

Čestice pepela TE „Pljevlja” su većinom pravilnog sferičnog oblika, veličine 2-30 μm sa manjim udjelom zrna nepravilnog oblika sa malo izraženom tendencijom aglomeracije. Sferične čestice se odlikuju glatkom površinskom teksturom, ali i izvjesnom mjerom poroznosti. Sferične forme su produkti sagorijevanja i to je zapravo amorfna i često šuplja materija, dok su pojedine kristalne faze zastupljene u nepravilnim formama ispitivanog materijala. Sipka, zrnasta struktura i siva boja su najizrazitije vizuelne karakteristike ovog pepela.

Oblik čestica pepela TE „Gacko“ može se opisati kao kombinacija sferičnih i nepravilnih oblika, veličine 1-20 μm . Površinska tekstura čestica je uglavnom hrapava, dok je pojava aglomeracije vrlo izražena. Vizuelni opis ovog pepela može se izraziti brašnastom strukturom i blijedom mrkožutom bojom.

Oblik čestica pepela TE „Kosovo B“ može se takođe opisati kao kombinacija sferičanih i nepravilnih oblika, veličine 1-20 μm , uglavnom hrapave površinske teksture i izražene sklonosti ka aglomeraciji. Ovaj pepeo karakteriše tamna mrkožuta boja.



(a) TE "Pljevlja"

(b) TE "Gacko"

(c) TE "Kosovo B"

Slika 4.2 SEM snimci uzoraka EFP

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava pepela, uporedno sa granulometrijskim sastavom kamenog brašna, prikazani su u tabeli 4.6.

Pepeo iz TE "Gacko" u potpunosti zadovoljava zahtjeve u pogledu granulometrijskog sastava prema MEST EN 13043, dok se pepeo iz TE "Kosovo B" nalazi na granici u pogledu zadovoljenja uslova za prolaz na situ 0.125 mm. Pepeo iz TE "Pljevlja" je krupnozrniji i ne zadovoljava zahtjeve standarda MEST EN 13043.

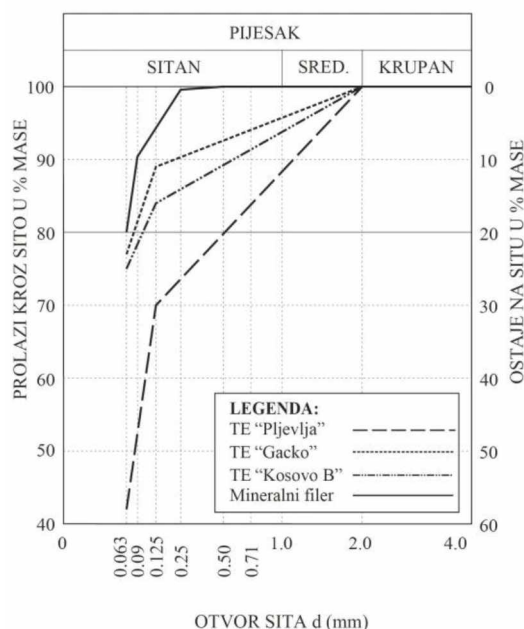
EFP iz TE “Gacko” i “Kosovo B” zadovoljavaju u pogledu prolaza na situ 0.063 mm za kvalitet I prema standardu JUS B.B3.045. Prolaz na situ 0.125 mm je dosta blizak zahtijevanim prolazima na situ 0.09 mm prema standardu, tako da se može smatrati da ova dva pepela generalno zadovoljavaju u pogledu granulometrijskog sastava za kvalitet I prema navedenom standardu. EFP iz TE “Pljevlja” ne zadovoljava u pogledu granulometrijskog sastava ni za kvalitet II. Zahtjevi kvaliteta za I i II klasu filera/pepela prema JUS B.B3.045 prikazani su u tabeli 4.4.

Mehanička svojstva

U tabeli 4.6 dat je zbirni prikaz mehaničkih karakteristika EFP i kamenog brašna, dok su na slici 4.3 prikazane krive granulometrijskog sastava kamenog brašna i tri pepela.

Tabela 4.6 Mehaničke karakteristike uzoraka elektrofilterskog pepela i kamenog brašna

Svojstvo	Metoda	Min. filer Šišković	EFP			Uslov
			P	G	K	MEST EN 13043
Granulometrijska raspodjela (prolaz kroz otvor sita, mm) [%]	0.063	80.8	42	74	75	70-100
	0.09	90.2	57	82	80	85-100
	0.125	92.8	70	89	84	
	0.25	99.6	74	91	86	
	0.71	100	84	94	92	100
	2.0		100	100	100	
Stvarna zapreminska masa [Mg/m ³]	MEST EN MEST 1097-7	2.711	2.272	2.966	2.821	
Šupljine u suvozbijenom kamenom brašnu/pepelu [%]	MEST EN 1097-4	31.5	46	59	55	
Povećanje tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice ($\Delta R\&B$ test) [°C]	MEST EN 13179-1	10.3	17.0	28.8	38.6	
Bitumenski broj (BN) [ml]	MEST EN 13179-2	21	45	27	46	



Slika 4.3 Krive granlometrijskog sastava kamenog brašna i tri EFP

Iskustva pokazuju da mineralni fileri imaju šupljine u suvosabijenom stanju (šupljine po Rigdenu) najčešće između 28% i 45%, dok za krečnjačke filere taj raspon iznosi od 30% do 34% (Grabowski i sar., 2009). Pepeo iz TE "Pljevlja", se odlikuje najmanjim procentom šupljina u zbijenom uzorku, 46% što je nešto više od uobičajenog sadržaja šupljina za krečnjačko kameno brašno. Pepeli iz TE "Kosovo B" i TE "Gacko" imaju veći sadržaj šupljina (55% i 59%, respektivno) i nalaze u zoni gornje granice šupljina, tj. nešto više nego što se srijeće kod različitih filera, ali što nije neuobičajeno za elektrofilterske pepele (Voskuilen i Molenaar, 1996). Međutim, kako je prema MEST EN 13043 povoljni raspon za Rigdenove šupljine 28 – 38%, i prema JUS B.B8.102 taj raspon 30-40%, može se zaključiti da sva tri pepela imaju povećan sadržaj šupljina u suvozbijenom stanju. Povećani sadržaj šupljina po Rigdenu može imati značajnog uticaja na zahtijevanu količinu bitumena u asfaltnoj mješavini.

Ispitivanje povećanja tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice ukazuje na povećanje krutosti bitumena 70/100 u koji se doda 37.5 % (v/v) određenog filera. Mineralni fileri imaju povećanje tačke razmekšavanja između 8°C i 25°C, pri čemu je tipična vrijednost 15°C.

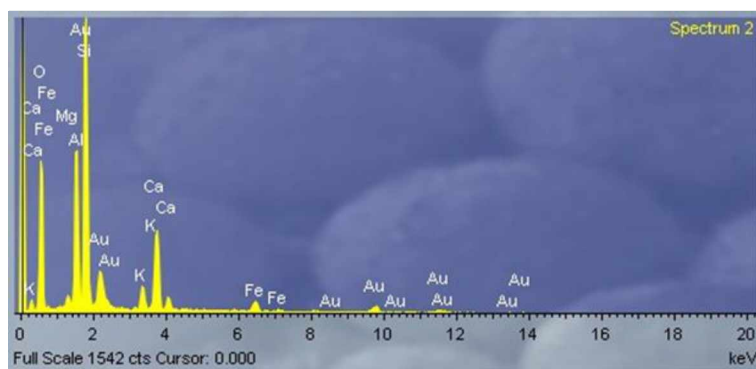
Povećanje tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice je najmanje za pepeo iz TE "Pljevlja" i nalazi se u očekivanom rasponu, što znači da mastiks sa tim pepelom

iskazuje najmanje povećanje krutosti bitumena, u poređenju sa druga dva pepela, što je povoljno sa aspekta dugotrajnosti asfaltnih mješavina i njihove otpornosti na pucanje. Ova veličina za pepeo iz TE “Gacko” je nešto iznad gornje granične vrijednosti, dok je za pepeo iz TE “Kosovo B” značajno van zahtijevanog raspona, što znači da kosovski pepeo značajno utiče na povećanje krutosti bitumena.

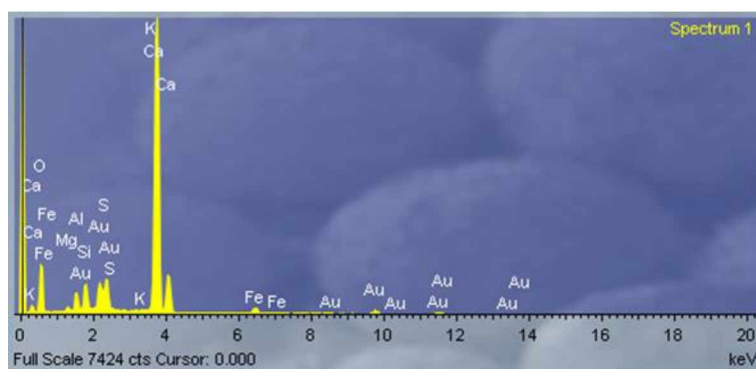
Bitumenski broj ukazuje na količinu vode potrebnu da se doda pepelu kako bi se postigao prividni viskozitet adekvatan za proizvodnju asfaltnih mješavina. Veličina bitumenskog broja, po pravilu se kreće između 40 i 50 za mineralne filere. Pepeo iz TE “Gacko” ima najmanji bitumenski broj koji je niži u poređenju sa očekivanim vrijednostima za kameno brašno, dok druga dva pepela imaju bitumenski broj u očekivanim granicama.

Hemijska svojstva

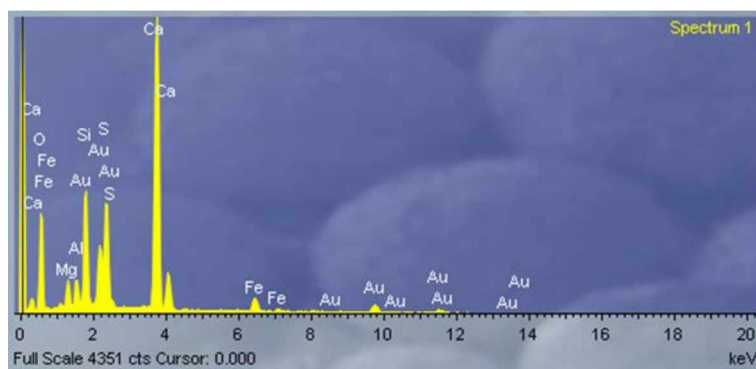
Na slici 4.4 prikazani su spektrogrami čestica elektrofilterskih pepela korištenih u eksperimentu.



(a) Pepeo iz TE "Pljevlja"



(b) Pepeo iz TE "Gacko"



(c) Pepeo iz TE "Kosovo B"

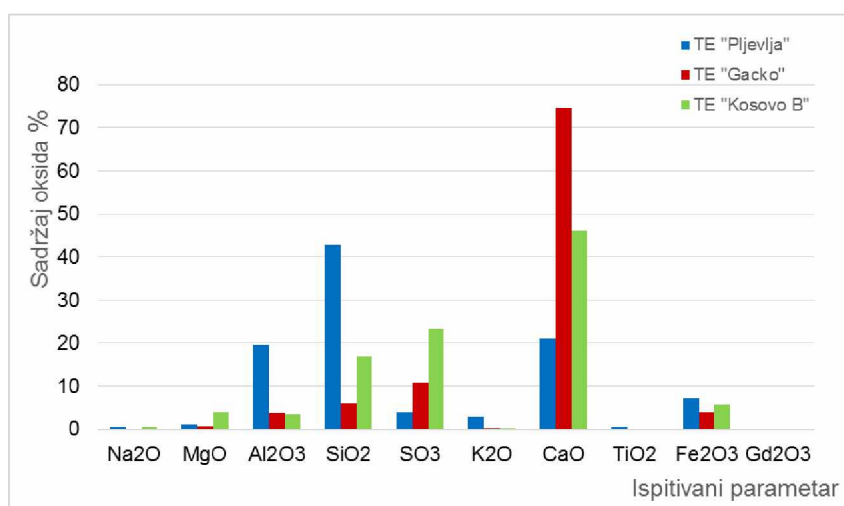
Slika 4.4 EDS spektrogrami čestica elektrofilterskih pepela

Na spektrogramu EFP iz TE "Pljevlja" uočljiv je izraziti pik silicijuma i nešto manji pikovi aluminijuma i kalcijuma, što u potpunosti korespondira sa procentom oksida Si, Al i Ca prikazanim u tabeli 4.7 sa prosječnim hemijskim sastavom. Na spektrogramu EFP iz TE "Gacko" dominantan je pik kalcijuma, dok su u značajno manjoj mjeri izraženi gvožđe, silicijum i sumpor, što je takođe u saglasnosti sa odnosom njihovih

oksida. EFP iz TE “Kosovo B” prati ovu analogiju sa dominantnim pikom kalcijuma kojeg slijede pikovi sumpora i silicijuma, što se u potpunosti poklapa sa podacima iz tabele 4.7 u kojoj su prikazani sumirani rezultati analize hemijskog sastava i dati u prosječnim vrijednostima. U istoj tabeli dat je uporedni prikaz hemijskog sastava kamenog brašna “Šisković” sa kojim je spravljena kontrolna mješavina. Na slici 4.5 prikazan je procentualni sadržaja oksida u pepelima.

Tabela 4.7 Prosječni hemijski sastav elektrofilterskog pepela - SEM metoda

Ispitivani parametar	Jed. mj.	TE „Pljevlja“	TE „Gacko“	TE „Kosovo B“
Na ₂ O	%	0.53	0	0.53
MgO	%	1.18	0.78	3.93
Al ₂ O ₃	%	19.62	3.77	3.51
SiO ₂	%	42.83	6.04	16.91
SO ₃	%	3.94	10.71	23.2
K ₂ O	%	2.9	0.22	0.22
CaO	%	21.08	74.44	45.98
TiO ₂	%	0.6	0	0
Fe ₂ O ₃	%	7.33	4.04	5.72
Gd ₂ O ₃	%	0	0	0
LOI	%	0.39	0.51	2.55
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	%	69.78	13.85	26.15



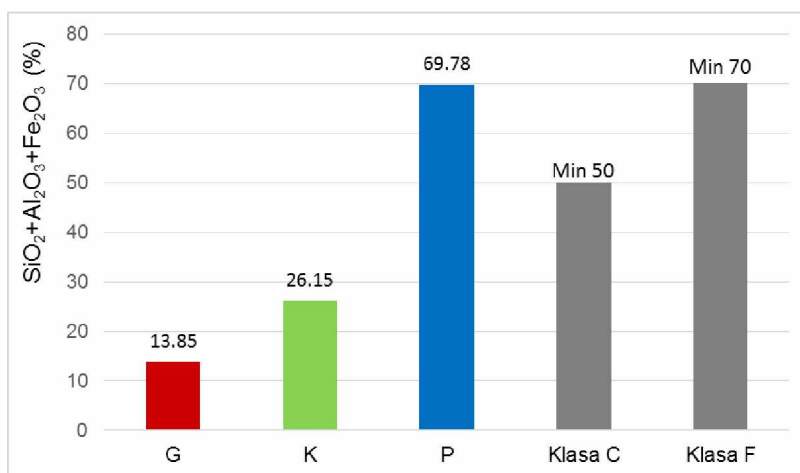
Slika 4.5 Uporedni prikaz sadržaja oksida

U pogledu hemijskih karakteristika pepela, u svijetu postoji više različitih klasifikacija, koje su detaljnije prikazane u drugom poglavlju.

Za potrebe ovog istraživanja pepeli su razvrstani prema tri klasifikacije: ASTM C 618-05, klasifikaciji Rudarskog instituta – Beograd (Grbović i sar., 1986.), kao i prema Ph klasifikaciji koja pepele dijeli na “kisele” i “bazne”, (Brzaković i Stamenković, 1971., Mihajlović, 2015.).

Pepele nastale sagorijevanjem uglja u termoelektranama američki standardi klasifikuju kao pepele klase F i pepele klase C. Za ovu klasifikaciju mjerodavan je zbirni sadržaj silicijum dioksida, aluminijum oksida i gvožđevog oksida ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), gdje pepeli sa zbirnim sadržajem ovih jedinjenja od min 50% spadaju u klasu C, a sa min 70% spadaju u klasu F.

Elektrofilterski pepeo TE “Pljevlja” se može klasifikovati kao pepeo klase F. Prema istom parametru, pepeli iz TE “Gacko” i TE “Kosovo B”, iako imaju visok sadržaj CaO - 74.44% i 45.98%, respektivno, ne mogu se svrstati u pepele klase C, jer je njihov zbirni udio $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ značajno manji od minimalnog zahtjeva od 50%, kao što je prikazano na slici 4.6. Međutim, prema modifikovanoj američkoj klasifikaciji (McCarthy i Canadian Standard Association) pepeli iz TE “Gacko” i TE “Kosovo B” sa punim pravom zaslužuju da budu klasifikovani kao pepeli klase C zbog sadržaja CaO značajno većeg od 20%.



Slika 4.6 Klasifikacija pepela prema ASTM C 618-05

Klasifikacija Rudarskog instituta, koja je nastala kao rezultat prilagođavanja raznih klasifikacija uslovima regiona, prepoznaje tri tipa elektrofilterskog pepela: silikatni, kalcijumski i silikatno-kalcijumski.

Pepeo TE “Gacko”, sa izrazito nadmoćnom količinom kalcijum oksida (CaO) od 74.44% u odnosu na silicijumov oksid (SiO_2) od 6.04% je tipičan predstavnik kalcijumskih pepela.

Pepeo TE “Kosovo B”, iako se odlikuje većim sadržajem CaO (45.98%) u odnosu na SiO_2 (16.91%), može se svrstati u silikatno–kalcijumske pepele sa dominacijom kalcijum oksida.

Pepeo TE “Pljevlja” se odlikuje većim sadržajem SiO_2 (42.83%) u odnosu na CaO (21.08%), ali se takođe može svrstati u silikatno–kalcijumske pepele sa dominacijom silicijum dioksida.

U smislu interakcije sa bitumenom u asfaltnim mješavinama, kalcijum oksid je svakako povoljniji od silicijum dioksida, tako da se i na bazi hemijskog sastava može pretpostaviti da je pepeo iz TE “Gacko” povoljniji za primjenu u asfaltnim mješavinama u odnosu na druga dva pepela.

Za ispitane pepele Ph klasifikacija (Brzaković i Stamenković, 1971., Milosavljević, 1974.), koja pepele dijeli na “kisele” i “bazne”, daje najizrazitiju podjelu. “Kiseli” pepeli nastaju sagorijevanjem kamenog uglja i u njima preovladavaju SiO_2 (30-50%) i Al_2O_3 (15-35%), dok “bazni” pepeli nastaju sagorijevanjem mrkog uglja i lignita kod kojih je osnovna komponenta CaO (20-50%). Razlikuju se četiri tipa pepela u zavisnosti od sadržaja SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO i SO_3 i to:

- tip 1 - kiseli pepeli sa velikom pucolanskom aktivnošću ($\text{SiO}_2 > 50\%$)
- tip 2 - alumosilikatni pepeli sa nižim učešćem SiO_2 (40-50%), Al_2O_3 (17-25%), Fe_2O_3 (18-12%) i CaO (9-22%) koji su pucolanski aktivni
- tip 3 - bazni pepeli sa visokim učešćem CaO (40-46%), $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (6-8%), SiO_2 (2-5%)
- tip 4 - visoko sulfatni i visoko bazni pepeli sa učešćem SO_3 ($>26\%$) i CaO ($>33\%$) koji nemaju pucolanska svojstva.

Tabela 4.8 Klasifikacija pepela prema Ph klasifikaciji

	Uslov klasifikacije	TE „Pljevlja“	TE „Gacko“	TE „Kosovo B“
Tip 1	SiO ₂ (>50%)	*	*	*
Tip 2	SiO ₂ (40-50%)	42.83	*	*
	Al ₂ O ₃ (17-25%)	19.62	*	*
	Fe ₂ O ₃ (18-12%)	7.33	*	*
	CaO (9-22%)	21.28	*	*
Tip 3	CaO (40-46%)	*	74.44	*
	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (6-8%)	*	7.81	*
	SiO ₂ (2-5%)	*	6.04	*
Tip 4	SO ₃ (>26%)	*	*	23.2
	CaO (>33%)	*	*	45.98

* ne pripada zahtijevanom intervalu

Iz tabele 4.8 uočljivo je da je pepeo TE „Pljevlja“ tipičan predstavnik tipa 2 - alumosilikatni pepeli, pucolanski aktivan, s tim što je sadržaj Fe₂O₃ manji u odnosu na raspon vrijednosti za ovaj tip. Pepeo TE „Gacko“ spada u pepele tipa 3 – bazne pepele, ali ima značajno veći sadržaj CaO, kao i veoma malo odstupanje parametra SiO₂, dok pepeo TE „Kosovo B“, uz veoma malo odstupanje parametra SO₃, spada u pepele tipa 4 - visoko sulfatne i visoko bazne pepele i nema pucolanskih svojstava. U tabeli 4.9 dat je zajednički prikaz opisanih klasifikacija u odnosu na ispitane pepele.

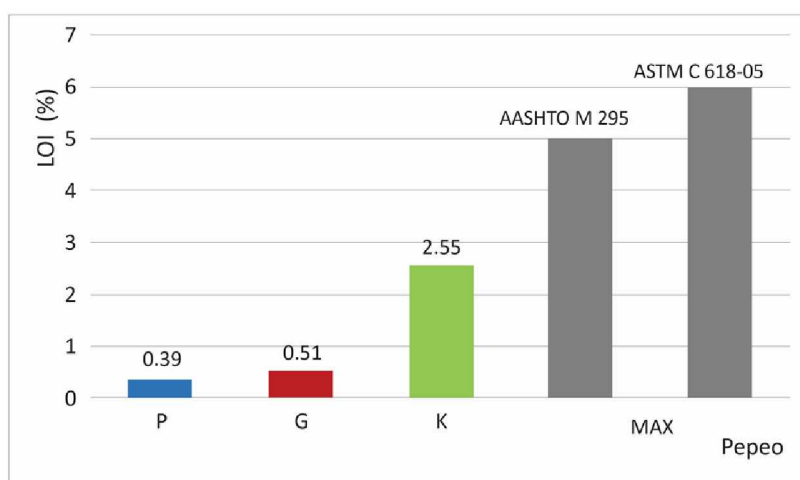
Tabela 4.9 Klasifikacija ispitanih pepela prema hemijskom sastavu

Porijeklo EFP	SiO ₂	CaO	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	Klasifikacija		
				ASTM C 618	Rudarski Institut Beograd	Ph klasifikacija
TE „Pljevlja“	42.83	21.08	69.78~70	F	silikatno-kalcijumski	alumosilikatni, pucolanski aktivan
TE „Gacko“	6.04	74.44	13.85<<50	C*	kalcijumski	bazni
TE „Kosovo B“	16.91	45.98	26.150<<50	C*	silikatno-kalcijumski	visoko sulfatni i visoko bazni, bez pucolanskih svojstva

* prema McCarthy

Sadržaj organskih materija

Iako ne postoji standard za sadržaj ugljenika ili gubitak pri žarenju (LOI) za pepele klase F i klase C koji se koriste kao fileri u asfaltnim mješavinama, smatraju se pogodnim standardi za upotrebu EFP u cementnim mješavinama. Naime, preporučljivo je koristiti pepele sa relativno niskim LOI, manjim od 5% (AASHTO M 295), odnosno manje od 6% (ASTM C 618-05) kako bi se moguća apsorpcija bitumena od strane čestica ugljenika svela na minimum. Uočljivo je da je kod sva tri ispitana pepela LOI znatno ispod maksimalnih preporučenih granica, što ove pepele preporučuje za korištenje u eksperimentu. Veličina Loss on ignition (LOI) ispitanih pepela prikazana je u tabeli 4.7, kao i na slici 4.7.



Slika 4.7 Sadržaj organskih materija

Ekološka podobnost

Zbog razlika u sastavu elektrofilterskog pepela pojedinih termoelektrana, uticaj elektrofilterskog pepela na životnu sredinu se ne može generalizovati.

Ekološka podobnost elektrofilterskog pepela je sagledana kroz prisustvo teških metala i aktivnost radionuklida. Prisustvo teških metala utvrđeno je određivanjem ukupnog sadržaja elemenata i analiziranjem dobijene izlučevine.

Sadržaj teških metala***Sadržaj teških metala – metoda ukupnog sadržaja elemenata***

U tabeli 4.10 prikazani su rezultati analize ukupnog sadržaja metala u uzorcima elektrofilterskih pepela koji su ovom analizom tretirani kao otpadni materijal.

Tabela 4.10 Sadržaj teških metala u uzorcima elektrofilterskog pepela

Parametar	Jed. mjere	Ispitivani pepeo			Oznaka metode
		EFP TE “Pljevlja”	EFP TE “Gacko”	EFP TE “Kosovo B”	
Ukupni sadržaj*					
Antimon (Sb)	mg/kg	<4.0	<4.0	<4.0	MEST EN 13656:2013
Arsen (As)	mg/kg	18.7	10.1	21.5	MEST EN 13656:2013
Barijum (Ba)	mg/kg	2.9	2.4	3.4	MEST EN 13656:2013
Bakar (Cu)	mg/kg	55.3±6.2	20.6±2.3	28.9±3.2	MEST EN 13656:2013
Cink (Zn)	mg/kg	88.9±9.2	38.5±4.0	25.8±2.74	MEST EN 13656:2013
Ukupni hrom (Cr)	mg/kg	124.5	34.5	74.0	MEST EN 13656:2013
Kalaj (Sn)	mg/kg	2.4	1.7	1.5	MEST EN 13656:2013
Kobalt (Co)	mg/kg	18.2±3.2	7.5±1.3	11.1±1.9	MEST EN 13656:2013
Kadmijum (Cd)	mg/kg	1.2±0.2	0.85±0.11	0.13±0.02	MEST EN 13656:2013
Nikal (Ni)	mg/kg	80.8±8.8	48.3±5.3	115.0±12.6	MEST EN 13656:2013
Olovo (Pb)	mg/kg	18.5±2.0	3.5±0.4	7.0±0.7	MEST EN 13656:2013
Selen (Se)	mg/kg	<0.8	<0.8	<0.8	MEST EN 13656:2013
Srebro (Ag)	mg/kg	<0.2	<0.2	<0.2	MEST EN 13656:2013
Živa (Hg)	mg/kg	0.26	0.041	0.112	AMA-112
Molibden (Mo)	mg/kg	<0.8	1.35	0.94	MEST EN 13656:2013
Žareni ostatak na 800° C	%	99.61	99.49	97.45	EN 12879
Silicijum kao SiO ₂	%	44.04	5.22	39.63	MEST EN 13656:2013
Kalcijum kao CaO	%	13.47	29.34	26.59	MEST EN 13656:2013

* - preračunato na suhu masu

Dobijeni rezultati za ukupan sadržaj elemenata, u skladu sa Pravilnikom o bližim karakteristikama lokacije (2013.), ne pokazuju visoke vrijednosti sadržaja bilo kojeg od

njih (manje su od 0.1%), iz čega se zaključuje da analizirani uzroci pepela nemaju karakteristiku opasnosti.

Sadržaj teških metala – metoda određivanja sadržaja parametara izlučevine L/S

Za sva tri ispitana pepela, sadržaj teških metala u analiziranim izlučevinama, u skladu je sa Pravilnikom o bližim karakteristikama lokacije, i ispunjava uslove za odlaganje kao bezopasnog otpada, i nije prepreka za upotrebu ispitanih pepela u asfaltnoj mješavini.

Tabela 4.11 Sadržaj parametara izlučevine u uzorcima elektrofilterskog pepela

Sadržaj parametara izlučevine L/S=10 l/kg	Jed. mjere	TE “Pljevlja”	TE “Gacko”	TE “Kosovo B”	Referentna vrijednost	Oznaka metode
Antimon (Sb)	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	(5) ¹ (0,7) ^{2,4,5} (0,06) ⁶	EPA 200.7
Arsen (As)	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	(25) ¹ (2) ^{2,4,5} (0,5) ⁶	BS EN 12506:2003
Barijum (Ba)	mg/kg	0.72	0.43	0.30	(300) ¹ (100) ^{2,4,5} (20) ⁶	BS EN 12506:2003
Bakar (Cu)	mg/kg	0.06	0.06	0.07	(100) ¹ (50) ^{2,4,5} (2) ⁶	BS EN 12506:2003
Cink (Zn)	mg/kg	0.04	0.05	0.05	(200) ¹ (50) ^{2,4,5} (4) ⁶	EPA 200.7
Ukupni hrom (Cr)	mg/kg	3.1	0.33	3.5	(70) ¹ (10) ^{2,4,5} (0,5) ⁶	EPA 200.7
Kalaj (Sn)	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05		EPA 200.7
Kobalt (Co)	mg/kg	<0.01	<0.01	<0.01		EPA 200.7
Kadmijum (Cd)	mg/kg	<0.005	<0.005	<0.005	(5) ¹ (1) ^{2,4} (3) ⁵ (0,04) ⁶	BS EN 12506:2003
Nikal (Ni)	mg/kg	<0.01	<0.01	<0.01	(40) ¹ (10) ^{2,4,5} (0,4) ⁶	BS EN 12506:2003
Olovo (Pb)	mg/kg	<0.05	<0.05	<0.05	(50) ¹ (10) ^{2,4,5} (0,5) ⁶	BS EN 12506:2003
Selen (Se)	mg/kg	<0.1	<0.05	<0.05	(7) ¹ (0,5) ^{2,4,5} (0,1) ⁶	EPA 200.7
Srebro (Ag)	mg/kg	<0.01	<0.01	<0.01		EPA 200.7
Živa (Hg)	mg/kg	0.001	0.002	0.001	(2) ¹ (0,2) ^{2,4,5} (0,01) ⁶	ENV 13370
Molibden (Mo)	mg/kg	<0.5	0.11	0.09	(30) ¹ (10) ^{2,4,5} (0,5) ⁶	BS EN 12506:2003

¹ Uslovi odnosno granične vrijednosti koje mora ispunjavati opasan otpad za odlaganje na deponiji za opasan otpad

² Uslovi odnosno granične vrijednosti za stabilni i nereaktivni otpad koji se odlaže na deponiji za neopasan otpad

³ Uslovi odnosno granične vrijednosti koje treba da ispunjava komunalni otpad za odlaganje na deponiji za neopasan otpad

- ⁴ Uslovi odnosno granične vrijednosti koje treba da ispunjava neopasni otpad za odlaganje na deponiji za neopasan otpad
⁵ Uslovi odnosno granične vrijednosti koje treba da ispunjava neopasni otpad sa visokim sadržajem biološki razgrađivih materija za odlaganje na deponiji za neopasan otpad
⁶ Uslovi odnosno granične vrijednosti koje treba da ispunjava inertni otpad za odlaganje na deponiji za inertni otpad

Određivanje aktivnosti radionuklida

Tabela 4.12 Aktivnost radionuklida u uzorcima elektrofilterskog pepela

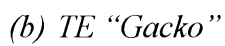
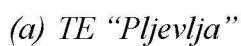
uzorak/jedinica (Bq/kg)	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	²³⁵ U	²³⁸ U
TE "Pljevlja"	107±7	68.1±2.4	678±22	≤ 0.32	7.7±1.8	130±28
TE "Gacko"	486±20	27.8±1.5	66.2±3.8	≤ 0.49	31.5±2.2	548±41
TE "Kosovo B"	48.9±6.7	26.9±1.3	148±6	≤ 0.36	≤ 2.43	67.1±7.0

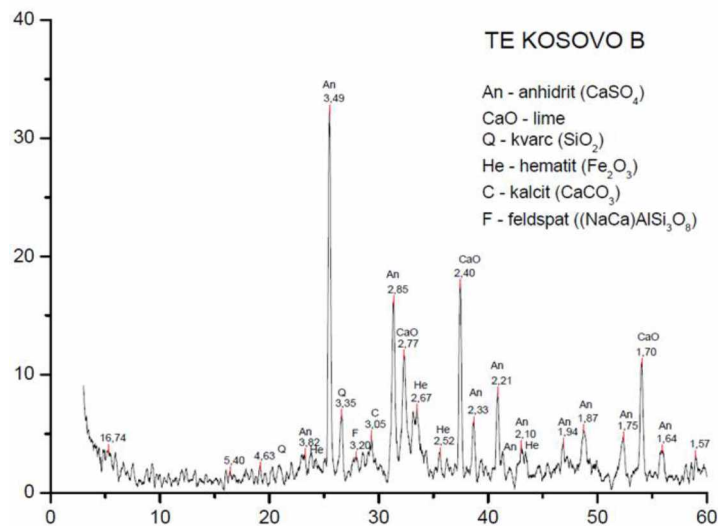
$$I = \frac{CRa}{700} + \frac{CTh}{500} + \frac{CK}{8000} < 1 \quad (4.1)$$

Prema Pravilniku o granicama sadržaja radionuklida - putevi i igrališta (2011.) vrijednost gama indeksa, predstavljenog jednačinom 4.1, mora biti manja od jedan. U jednačini 4.1 vrijednosti 700, 500 i 8000 označavaju granične, maksimalne vrijednosti radionuklida radijuma (Ra), torijuma (Th) i kalijuma (K), respektivno, za materijal koji se primjenjuje u niskogradnji, dok su CRa, CTh i CK detektovane vrijednosti radijuma, torijuma i kalijuma u uzorku. Kada se izmjerene vrijednosti radionuklida uvrste u jednačinu (4.1), dobijaju se vrijednosti 0.37; 0.75 i 0.142 za pepele Pljevlja, Gacko i Kosovo B, respektivno, što pokazuje da je traženi uslov zadovoljen. Može se zaključiti da su sva tri pepela bezbjedna sa stanovišta radioaktivnosti i da se mogu koristiti u asfaltnim mješavinama u svrhu zamjene kamenog brašna.

Mineraloška karakterizacija elektrofilterskog pepela

Rezultati mineraloških analiza prikazani su na slici 4.8. Dobijeni podaci položaja difrakcionih maksimuma 2Θ (°), vrijednosti međuplosnih rastojanja d (Å), kao i odgovarajući intenziteti, dati su grafički. Na osnovu dobijenih vrijednosti intenziteta I/I_{\max} i međuplosnih rastojanja d i upoređivanjem sa podacima iz literature i JCPDS





(c) TE "Kosovo B"

Slika 4.8 XRD snimci uzoraka elektrofilterskog pepela

Pregled skraćenica prisutnih minerala na difraktogramima:

Q – kvarc: SiO_2 ;	An – anhidrit: CaSO_4
F – feldpast: $(\text{NaCa}) \text{AlSi}_3\text{O}_8$;	M – mulit: $\text{Al}_6\text{Si}_4\text{O}_{13}$
Me – melilit (gelenit): $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$;	CaO - Kreč
C – kalcit: CaCO_3 ;	P - Portland $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Fe_2O_3 - Hematit;	Si-Al-O - Amorfna materija

Ispitivanja su pokazala da je u uzorku TE "Pljevlja" prisutna znatna količina amorfne materije. Od kristalnih faza javljaju se silikati: kvarc, feldspatski mineral iz grupe plagioklasa, melilitski mineral tipa gelenita i mulit. Takođe, prisutna je i mala količina anhidrita i slobodnog CaO, dok je u uzorku TE "Gacko" daleko najzastupljenija faza u uzorku slobodni CaO. Prate ga manje količine anhidrita i portlandita. U uzorku TE "Kosovo B" najzastupljenija faza je anhidrit. Prisutna je i nešto manja količina slobodnog CaO. Javlja se i malo hematita, kvarca, kalcita i vrlo malo feldspatskog minerala tipa plagioklasa. Pregled sadržaja amorfne i kristalne faze u elektrofilterskim pepelima prilazan je u tabeli 4.13.

Tabela 4.13 Sadržaj amorfne i kristalne faze u elektrofilterskim pepelima

Elektrofilterski pepeo	Sadržaj amorfne faze	Sadržaj kristalne faze
TE "Pljevlja"	Značajan	kvarc, feldspatski mineral iz grupe plagioklasa, melilitski mineral tipa gelenita i mulit, mala količina anhidrita i slobodnog CaO
TE "Gacko"	Beznačajan	najzastupljeniji anhidrit, manje količine anhidrita i portlandita
TE "KosovoB"	Beznačajan	najzastupljenija faza je anhidrit, malo hematita, kvarca, kalcita i vrlo malo feldspatskog minerala tipa plagioklasa

Iako su pogodniji za umješavanje zbog svog sferičnog oblika i glatke površinske teksture, primjena silikatnih filera, usled njihove hidrofilnosti i slabog afiniteta prema bitumenu, zna da rezultira slabijom otpornošću prema ljuštenju i treba biti oprezan u pogledu njihove primjene zbog relativno slabije adhezije čestica pepela i bitumena. Sa druge strane, fileri sa visokim udjelom poroznog krečnjaka, skloni su jakom upijanju uljnih komponenti bitumena, što može negativno uticati na svojstva bitumena i bitumenskih mješavina (Bedaković 1964.). Pepeli sa umjerenim sadržajem kreča (CaO) mogu se koristiti kao dodatak za poboljšanje adhezije agregata i bitumenskog veziva u asfaltnim mješavinama. Takođe pozitivno utiču i na stabilnost asfaltne mješavine (AASHTO, 2007.). Pepeli koji se ne mogu jasno specifikovati poznatim klasifikacijama mogu naći svoje mjesto u primjeni za stabilizaciju gornjeg i donjeg nevezanog nosećeg sloja i posteljice (Edil 2006.).

Pepeo TE "Pljevlja" je pucolanski aktivan alumosilikatni pepeo i spada u grupu pepela F klase, koji se zbog svoje pucolanske aktivnosti uglavnom preporučuju za upotrebu u cementnoj industriji. Takođe, prisustvo amorfne faze u pepelu TE "Pljevlja" treba da obezbijedi veću reaktivnost u odnosu na prisutne kristalne veze, što ovaj pepeo preporučuje kao zamjenu za prirodne materijale u mješavinama za sintezu portland-cementa. Međutim ovaj pepeo sadrži i značajan procenat kalcijum oksida (21.08 %), što je značajno više nego kod pepela F klase, kod kojih udio CaO uglavnom iznosi 1-12% (Knežević, 2014.). Prisustvo kalcijum oksida u ovoj mjeri čini pljevaljski pepeo podobnim za upotrebu u asfaltnim mješavinama.

Visok udio kreča (CaO) u pepelu TE “Gacko” (74.44%) i nešto manji u pepelu TE “Kosovo B” (45.98%) treba da bude preporuka za korištenje ovih pepela u asfaltnim mješavinama zbog svoje osobine poboljšavanja adhezije agregata i bitumenskog veziva. Ipak, pepeli TE “Gacko” i TE “Kosovo B” ne zadovoljavaju ASTM standard po pitanju minimalnog udjela $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ od 50%, pa se ne mogu svrstati u C klasu pepela. Pepeo TE “Gacko” je bazni pepeo sa visokim učešćem CaO, dok je pepeo TE “Kosovo B” visoko sulfatni i visoko bazni pepeo bez pucolanskih svojstava.

Povećana vrijednost tačke razmekšavanja po metodi PK ukazuje na sposobnost pepela iz TE “Kosovo B” da značajno utiče na povećanje krutosti asfaltne mješavine, što može biti povoljno u inicijalnim fazama eksploatacije kolovoza, u pogledu povećanja otpornosti asfaltne mješavine na trajnu deformaciju, ali dugoročno može dovesti do veće pretjerane krutosti i osjetljivosti na pucanje asfaltnih mješavina.

Uzimajući u obzir procenat zastupljenosti elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama (max 4% u odnosu na ukupnu masu agregata), i oštre zahtjeve Pravinika prema kojem je vršeno ispitivanje, može se zaključiti da rezultati analize pokazuju da svi ispitani EFP, planirani za upotrebu u asfaltnim mješavinama u svrhu djelimične ili potpune zamjene za kameno brašno, ispunjavaju sve uslove u pogledu sadržaja teških metala i predstavljaju bezbjedan materijal za primjenu u asfaltnim mješavinama.

Kako je gama indeks svih ispitanih pepela manji od jedan, može se zaključiti da su sva tri pepela bezbjedna za ugradnju u asfaltnu mješavinu, sa stanovišta radioaktivnosti. Fizičko-mehaničke osobine sva tri ispitana pepela su u zadovoljavajućem opsegu, kao i prisustvo organskih materija iskazano kroz veličinu gubitka pri žarenju.

4.5. Rezime

U ovom poglavlju predstavljeni su i diskutovani rezultati prvog eksperimentalnog dijela koji se odnose na komponentne materijale primijenjene u eksperimentu.

Sprovedena ispitivanja su pokazala da karakteristike standardnih komponentnih materijala, zadovoljavaju standardne zahtijevane kriterijume.

Na osnovu fizičko-mehaničkih i hemijskih svojstava elektrofilterskih pepela koje su ispitane za potrebe planiranog eksperimenta, kao i njihove mineroloških karakteristika i ekološke podobnosti, došlo se do zaključka da su ispitani pepeli pogodni za upotrebu u asfaltnim mješavinama kao djelimična ili potpuna zamjena za kameno brašno. Međutim, pojedina svojstva pepela izlaze iz zahtjeva za kvalitet filera sa kojima su upoređeni. Tako, u pogledu granulometričkog sastava gatački pepeo u potpunosti zadovoljava kriterijum MEST EN 13043, dok pljevaljski pepeo ima manje prolaze na sitima 0.063 i 0.125 i, kao krupnozrniji ne zadovoljava zahtjeve JUS B.B4.045 čak ni u pogledu klase II, prikazanih u tabeli 4.4. Kosovski pepeo ima neznatno manji prolaz na situ 0.125 i može se smatrati da zadovoljava uslove MEST EN 13034, dok ga manji prolazi na sitima 0.250 i 0.710 definišu kao krupnozrniji prema JUS B.B3.045 pri čemu ne zadovoljava kriterijume ni u pogledu klase II. Kameno brašno se odlikuje povoljnim uglasto-prizmatičnim oblikom čestica, pljevaljski pepeo sferičnom oblikom čestica, a gatački i kosovski kombinovano, sferičnim i nepravilnim oblikom čestica. Pljevaljski pepeo sa 46% šupljina se odlikuje najmanjim procentom šupljina u zbijenom uzorku i nešto je veći od uobičajenog sadržaja šupljina za krečnjačko kameno brašno, dok kosovski i gatački pepeo imaju veći sadržaj šupljina (55% i 59%, respektivno) što iznosi nešto više nego što se srijeće kod različitih filera, i iskustveno, navedene veličine nisu neuobičajene za elektrofilterske pepele. Međutim, u odnosu na kriterijume MEST EN 13043, kao i u odnosu na nešto blaže zahtjeve koji su propisani JUS B.B8.102, sva tri pepela se odlikuju povećanim vrijednostima šupljina po Rigdenu. Bitumenski broj gatačkog pepela iznosi 27ml što je ispod donje granične vrijednosti od 40ml, dok za pljevaljski i kosovski pepeo bitumenski broj ima vrijednosti 45ml i 46ml, respektivno. Povećanje tačke razmekšavanja po prstenu i kuglici za pljevaljski pepeo iznosi 17°C i pripada graničnom opsegu, dok gatački pepeo sa 28.8°C prevazilazi za nekoliko stepeni gornju graničnu vrijednost 25°C. Kod kosovskog pepela ova vrijednost je značajno iznad granične vrijednosti i iznosi 38.6°C, što će kod sagledavanja rezultata ispitivanja asfaltnih mješavina biti od značaja, jer ovaj pepeo izuzetno utiče na ukrućivanje veziva.

Na osnovu fizičko-mehaničkih i hemijskih osobina elektrofilterskih pepela koje su ispitane za potrebe planiranog eksperimenta, kao i njihove ekološke podobnosti izveden je zaključak da su ispitani pepeli ekološki bezopasni i pogodni za upotrebu u asfaltnim mješavinama kao djelimična ili potpuna zamjena za kameno brašno.

5. REZULTATI I DISKUSIJA ISPITIVANJA ASFALTNIH MJEŠAVINA

5.1. Uvod

Poslije pripreme odgovarajućih uzoraka u skladu sa Planom eksperimenta prikazanim u 3. Poglavlju, pristupilo se eksperimentalnim ispitivanjima asfaltnih mješavina sa različitim sadržajem elektrofilterskog pepela. U Laboratoriji TPA za obezbjeđenje kvaliteta i inovacije u Čačku sprovedena su ispitivanja zapreminskih karakteristika asfaltnih mješavina, određivanje Maršalove stabilnosti i tečenja, kao i pripremljeni uzorci za ispitivanje otpornosti na dejstvo vode, dok su u Laboratoriji za kolovozne konstrukcije Građevinskog fakulteta u Beogradu sprovedena ispitivanja koja obuhvataju određivanje otpornosti na dejstvo vode, modula krutosti i otpornosti na trajnu deformaciju.

U podpoglavljima 5.2 - 5.5 je prikazani su i diskutovani rezultati navedenih ispitivanja čija je matrica prikazana na slici 3.2.

5.2. Zapreminske karakteristike

Prosječne vrijednosti zapreminskih karakteristika dobijene ispitivanjem na Maršalovim uzorcima, zbijenim sa energijom zbijanja od 2x50 udaraca na temperaturi zbijanja od 150°C prikazane su u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Zapreminske karakteristike Maršalovih uzoraka

Mješavina	AV (%)	VMA (%)	VFB (%)	G (kg/m ³)	G _{max} (kg/m ³)	Stabilnost (kN)	Tečenje (mm)	MQ (kN/mm)
Kontrolna mješavina	5.0	18.1	72.6	2371	2488	10.2	4.2	2.4
P ₂₅	4.5	17.5	74.4	2346	2484	11.3	3.3	3.4
P ₅₀	4.9	17.9	72.6	2313	2480	10.0	3.4	2.9
P ₇₅	6.5	19.3	66.4	2300	2476	11.8	3.3	3.6
P ₁₀₀	7.1	19.8	64.2	2280	2471	11.2	2.5	4.5
G ₂₅	4.3	17.6	75.2	2376	2490	11.5	3.8	3.0
G ₅₀	4.0	17.2	76.8	2382	2492	10.7	3.7	2.9
G ₇₅	4.1	17.3	76.3	2380	2494	11.0	3.5	3.1
G ₁₀₀	4.1	17.3	76.3	2385	2495	11.3	3.7	3.1
K ₂₅	5.1	18.2	72.2	2360	2489	11.1	3.5	3.2
K ₅₀	4.0	17.2	76.8	2364	2490	10.4	3.6	2.9
K ₇₅	5.8	18.9	69.1	2348	2490	11.0	3.2	3.4
K ₁₀₀	6.6	19.5	66.4	2341	2491	9.8	3.3	3.0
Specifikacije	3.0–6.5	N/A	65–80			N/A	N/A	N/A

*N/A – nije definisano

U tabeli su korišćene sledeće oznake:

AV - sadržaj šupljina u asfaltnoj mješavini;

VMA - sadržaj šupljina u mineralnoj mješavini;

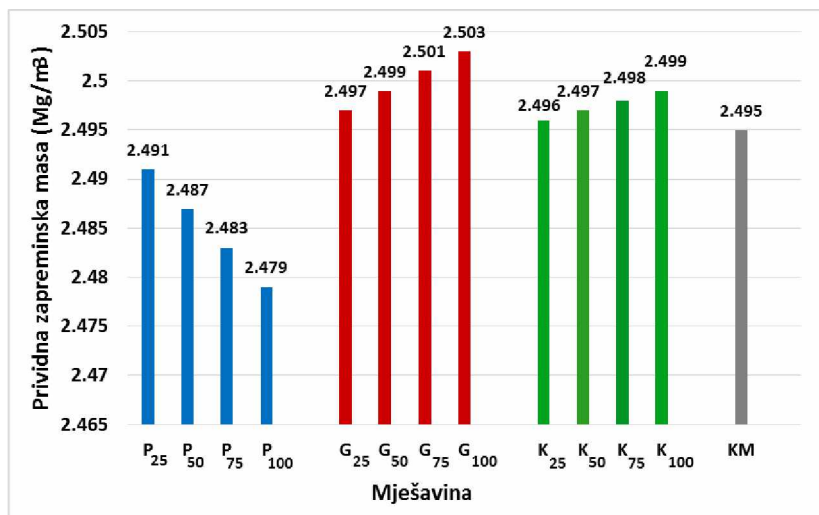
VFB - sadržaj šupljina ispunjenih bitumenom;

G - zapreminska masa asfaltne mješavine;

G_{max} - maksimalna zapreminska masa asfaltne mješavine;

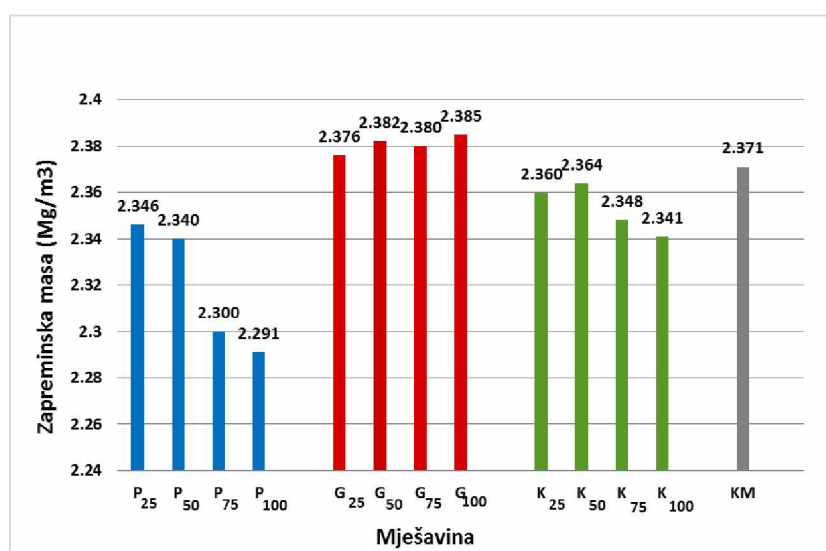
MQ – Maršalov koeficijent (odnos Maršalove stabilnosti i tečenja).

Rezultati za prividnu zapreminsku masu (G_{max}) dobijeni su računskim putem i u saglasnosti su sa zapreminskim masama pepela, kao i sa procentom primjene pepela u mješavini. Rezultati za prividnu zapreminsku masu prikazani su na slici 5.1, što je posledica zapreminske mase samog pepela.



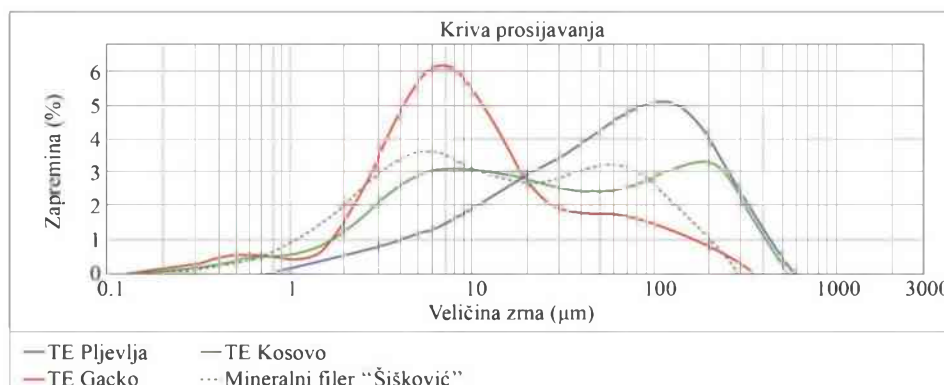
Slika 5.1 Prividna zapreminska masa

Od svih ispitanih mješavina jedino su mješavine G grupe postigle veće vrijednosti zapreminske mase (G) od kontrolne mješavine (KM), kao što pokazuje slika 5.2. Iako vrijednosti zapreminskih masa zavise od zapreminskih masa pepela, kao i od procenta njihove primjene, u K grupi primjetan je suprotan trend. Sa porastom procenta pepela, čija je zapreminska masa veća od zapreminske mase kamenog brašna, zapreminske mase u ovoj grupi imaju padajućii trend. Ovo se dovodi u vezu sa jakim efektom ukrućenja koji kosovski pepeo ima na mastiks, što se ogleda u vrijednosti $\Delta R\&B$ za kosovski pepeo (tabela 4.6). Najmanju zapreminsku masu ima mješavina P₁₀₀, za 3.4% manju od KM, dok najveću zapreminsku masu ima mješavina G₁₀₀, za 0.6 % veću od KM.



Slika 5.2 Zapreminska masa

Radi boljeg sagledavanja zapreminske strukture asfaltnih mješavina sa različitim vrstama pepela, na slici 5.3. date su raspodjele sadržaja u pogledu veličine zrna za kameno brašno i za sve uzorke pepela.

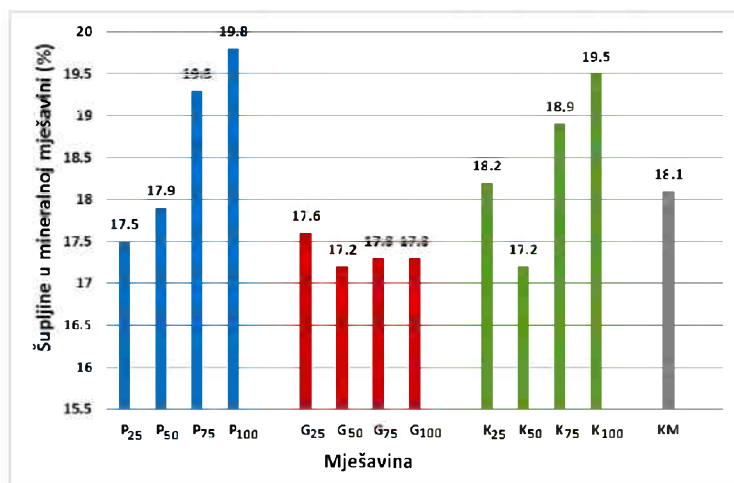


Slika 5.3 Granulometrijske krive prosijavanja pepela i mineralnog filera

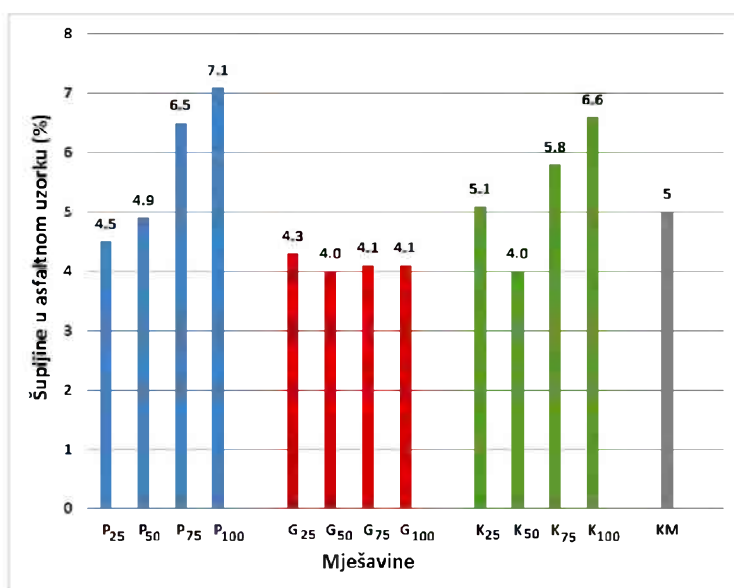
Gatački pepeo se odlikuje najvećom zapreminskom masom i visokom vrijednošću šupljina po Rigdenu, 59%, što je više od prosječnog mineralnog filera (28-45%). Takođe sadrži znatnu količinu sitnih čestica veličine 2 - 20 μm (slika 5.3) što, sa druge strane, rezultira dobrom popunjenošću agregatne matrice koja se odlikuje malim vrijednostima šupljina u mineralnoj mješavini G grupe, što je prikazano na slici 5.4. Sve ovo rezultira najvećim ostvarenim vrijednostima zapreminske mase asfaltnih mješavina čitave G grupe (slika 5.2).

U skladu sa istim principima, obrnut trend se javlja kod pljevaljskog pepela, koji ima značajan udio krupnijih čestica u rasponu 20 -120 μm (slika 5.3) i šupljine po Rigdenu od 46%, što rezultira visokim procentom šupljina u mineralnoj mješavini za mješavine sa većim procentom zamjene (P_{75} i P_{100}), kako prikazuje slika 5.4. Ovo je uzrokovalo najmanje vrijednosti zapreminske mase za mješavine P_{50} i P_{100} i najveće vrijednosti šupljina u asfaltnoj mješavini za iste mješavine (slika 5.5).

Kosovski pepeo ima gotovo ujednačene količine sitnih i krupnijih čestica, s tim da ima više krupnijih čestica od mineralnog filera (slika 5.3), pa su i šupljine u mineralnoj mješavini generalno veće od kontrolne mješavine, izuzev mješavine K_{50} (slika 5.4). U ove podatke uklapaju se i manje vrijednosti zapreminske mase K grupe (slika 5.2).



Slika 5.4 Šupljine u mineralnoj mješavini



Slika 5.5 Šupljine u asfaltnom uzorku

Šupljine u asfaltnoj mješavini (AV) su omeđene propisanim rasponom kako bi zadovoljile dvojaku potrebu. Gornja granična vrijednost za AV treba da obezbijedi nepropusnost za vazduh i vodu, kao uzročnike oksidacije bitumena i slabljenja veze bitumena i agregata. Donja granica za AV, i poslije konsolidacije kolovoznog sloja pod saobraćajnim opterećenjem, treba da obezbijedi dovoljno prostora efektivnom bitumenu/mortu da ekspandira tokom nanošenja opterećenja i periodu visokih temperatura.

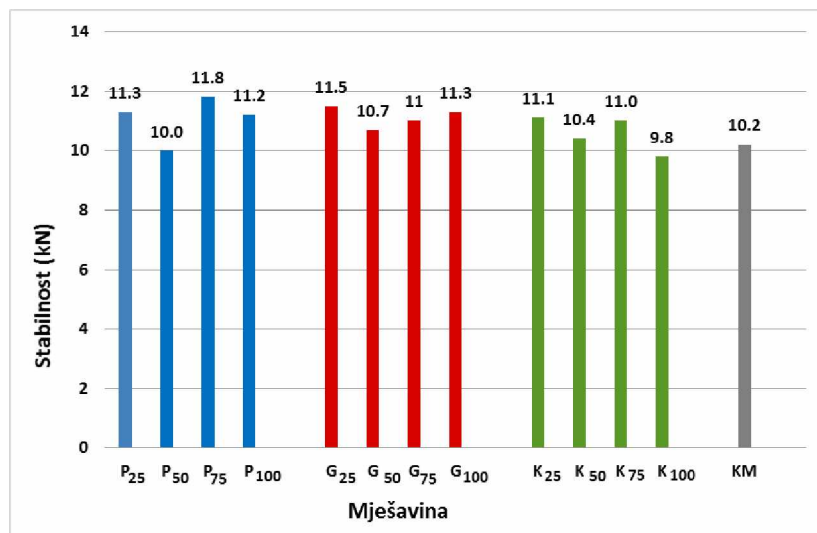
Propisani raspon za sadržaj šupljina u mješavini AB 11s surf je 3 - 6.5% (Putevi Srbije 2012.). Sadržaj šupljina u mješavini P₁₀₀ za 0.6% prevazilazi gornju propisanu granicu, dok je kod mješavina P₇₅ i K₁₀₀ jednak ili neznatno veći, respektivno, u odnosu na gornju graničnu vrijednost.

AV ostalih mješavina nalaze se u zahtijevanom rasponu 3 - 6.5% i uglavnom imaju isti trend u okviru grupe kao i šupljine u mineralnoj mješavini. Sve mješavine G grupe odlikuju se manjim šupljinama u asfaltnoj mješavini od kontrolne mješavine. Mješavine G₅₀ i K₅₀ odlikuju se najmanjim procentom AV, koje su za 25% manje od KM, kako je i prikazano na slici 5.5.

Propisani raspon za šupljine ispunjene bitumenom (VFB) je od 65 do 80%, što zadovoljavaju sve ispitane mješavine, osim mješavine P₁₀₀ koja ima VFB za 1.23% manje od donje propisane vrijednosti (tabela 5.1). Ovaj rezultat je u saglasnosti sa visokim vrijednostima VMA i prekomjernim vrijednostima AV, i kao što je već rečeno, dovodi se u vezu sa granulometrijskim sastavom pljevaljskog pepela.

Stabilnost, kao najveće opterećenje koje može podnijeti nabijeni uzorak, ujedno je i mjera viskoznosti asfaltne mješavine. Na stabilnost izuzetno utiče oblik zrna agregata i viskoznost bitumena na temperaturi od 60°C. Osim primjene oštroičnog (drobljenog) agregata, stabilnost se može povećati primjenom bitumena veće viskoznosti ili unapređenjem viskoznosti bitumenskog morta koji nastaje miješanjem bitumena i filera, tj. poboljšanjem reoloških svojstava bitumena dodavanjem filera određenih svojstava. Na slici 5.6 je uočljivo da zamjena mineralnog filera elektrofilterskim pepelom generalno, pozitivno utiče na povećanje stabilnosti asfaltne mješavine. Sve mješavine spravljene sa pepelom izuzev, P₅₀ i K₁₀₀, odlikuju se stabilnošću većom od kontrolne mješavine.

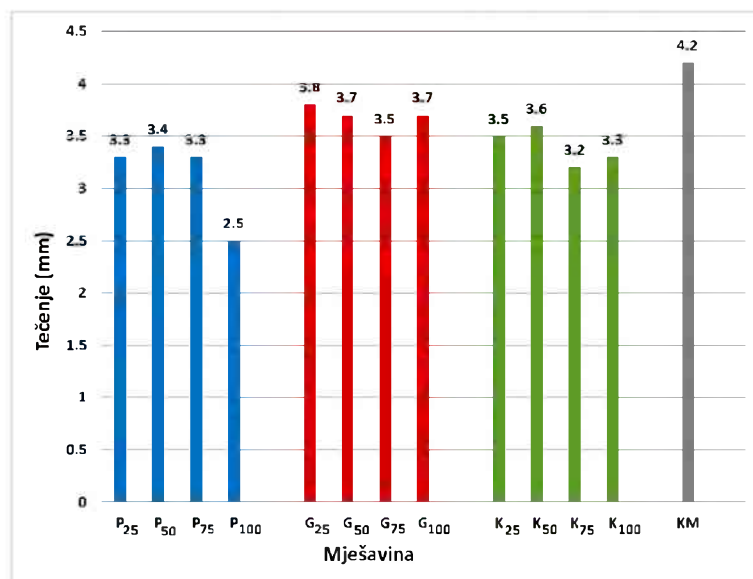
K₁₀₀ ima najmanju stabilnost od svih ispitanih mješavina, za 3.9% manju od KM, dok mješavina P₇₅ ima najveću stabilnost, za 15.7 % veću od KM.



Slika 5.6 Stabilnost

Kao što je već rečeno, deformacija uzorka koja odgovara maksimalnoj sili prilikom opita Maršalove stabilnosti, naziva se tečenje po Maršalu. Visoke vrijednosti tečenja ukazuju na plastičnu mješavinu koja će tokom eksploatacije biti podložna nastajanju trajnih deformacija. U izvedenom eksperimentu najveće vrijednosti tečenja pokazala je kontrolna mješavina. Niske vrijednosti tečenja upućuju na mješavinu sa visokim procentom šupljina i/ili nedovoljnom količinom bitumena, koje vode ranoj pojavi pukotina zbog krtosti mješavine. Svakako, dodavanjem filera dolazi do povećanja krutosti mješavine i manje deformabilnosti asfaltnog sloja na temperaturi od 60°C. Kako u sprovedenom eksperimentu količina bitumena nije mijenjana, već je na sve mješavine primijenjena ona količina bitumena koja je dobijena kao OBC za kontrolnu mješavinu, lako se uočava korelacija između najmanje vrijednosti za tečenje ostvarene za mješavinu P₁₀₀ i najviših vrijednosti AV u istoj asfaltnoj mješavini (slike 5.5 i 5.7).

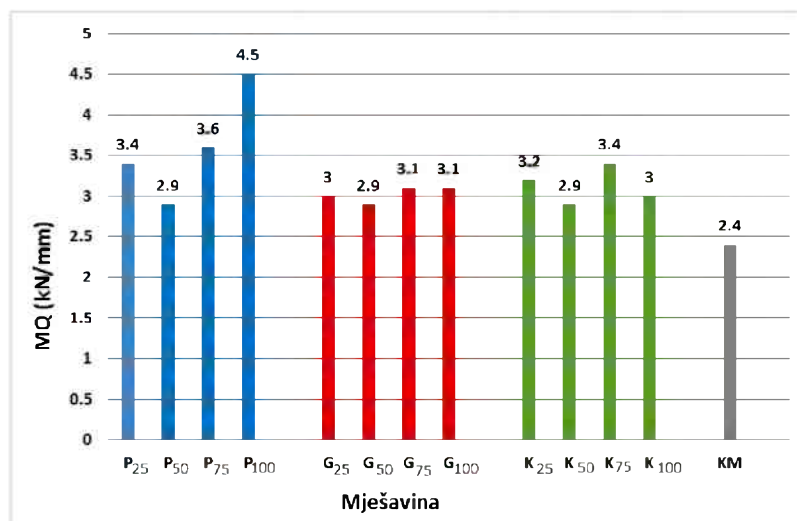
Vrijednosti tečenja za sve ostale eksperimentalne mješavine nalaze se između ova dva ekstremna rezultata. Mješavina P₁₀₀ ima najmanje tečenje, čak 40.5% manje od KM. Mješavine G i K grupe imaju uglavnom uravnotežene vrijednosti unutar grupe, u prosjeku za oko 16.7 % manje u odnosu na KM.



Slika 5.7 Tečenje

Maršalov koeficijent (MQ) kao odnos Maršalove stabilnosti i tečenja, empirijski ukazuje na krutost mješavine, tj. smatra se mjerom otpornosti mješavine na smicanje i trajnu deformaciju. MQ svih mješavina sa pepelom ima značajno veću vrijednost u odnosu na kontrolnu mješavinu, što je u saglasnosti sa dominantno većom stabilnošću i manjim tečenjem u odnosu na kontrolnu mješavinu. Najveća vrijednost MQ ostvarena je za mješavinu P₁₀₀, koja se odlikuje najmanjom veličinom tečenja. U P grupi je izražena varijacija rezultata MQ sa promjenom procenta zamjene, dok je u G i K grupi varijacija rezultata vrlo mala.

Uočljivo je da se u svakoj grupi bilježi blagi pad vrijednosti MQ za mješavine sa 50% zamjene. Najveći MQ ima P grupa, a mješavina P₁₀₀ bilježi najveću vrijednost, za 87.5 % veću od kontrolne mješavine.



Slika 5.8 Maršalov koeficijent

5.3. Otpornost na dejstvo vode

Poznavanje podataka dobijenih testom na indirektno zatezanje (ITS) važno je sa aspekta procjene otpornosti asfaltnog sloja na lom, kao i na poznavanje otpornosti asfaltnog sloja na negativno dejstvo vode.

Otpornost asfaltnih mješavina na dejstvo vode ispitana je mjerenjem čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS) uzoraka čuvanih na suvom i u vodi, u svemu prema standardu MEST EN 12697-12, metoda A. Za potrebe ovog ispitivanja, napravljeno je po četiri Maršalova cilindrična uzorka (vidjeti poglavlje 3.4.1) za sve tipove mješavina. Predmetni uzorci podijeljeni su na dvije grupe po dva uzorka, tako da prosječne vrijednosti zapreminskih masa u obje gupe budu što približnije. Jedna grupa je njegovana na suvom na sobnoj temperaturi od 20°C, dok je druga grupa prvo potopljena u vodu u trajanju od 30 min pod potpritiskom od 6.7 kPa, a potom u trajanju od 72 h kondicionirana u vodi na temperaturi od 40°C (slika 5.9). Nakon pomenutog kondicioniranja, prije mjerenja čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS), uzorci su čuvani na temperaturi od 25°C u trajanju od 2 h. Ispitivanje ITS je sprovedeno na univerzalnoj presi UTM-25 prema standardu MEST EN 12697-23 (slika 5.10). Čvrstoća pri indirektnom zatezanju je sračunata po sledećoj formuli:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot d_s} \quad (5.1)$$

gde je:

P - sila loma (kN);

h - visina uzorka (mm);

ds - prečnik uzorka (mm).

Mjera otpornosti asfaltnih mješavina na dejstvo vode definiše se kao odnos čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR) uzoraka njegovanih u vodi i na suvom:

$$ITSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \cdot 100 \quad (5.2)$$



Slika 5.9 Kondicioniranje Maršalovih uzoraka u vodi na temperaturi od 40°C



Slika 5.10 Položaj uzorka prilikom ispitivanja čvrstoće na indirektno zatezanje (ITS)

Izmjerene vrijednosti ITS svih ispitanih uzoraka su date u prilogu A, dok su u tabeli 5.2 prikazane prosječne vrijednosti uzoraka čuvanih na suvom (ITS_{dry}) i u vodi (ITS_{wet}) za svaku od ispitanih mješavina, kao i njihov odnos (ITSR). Na slici 5.11. dat je i grafički prikaz odnosa čvrstoća pri indirektnom zatezanju (ITSR) uzoraka potopljenih u vodu i suvih uzoraka.

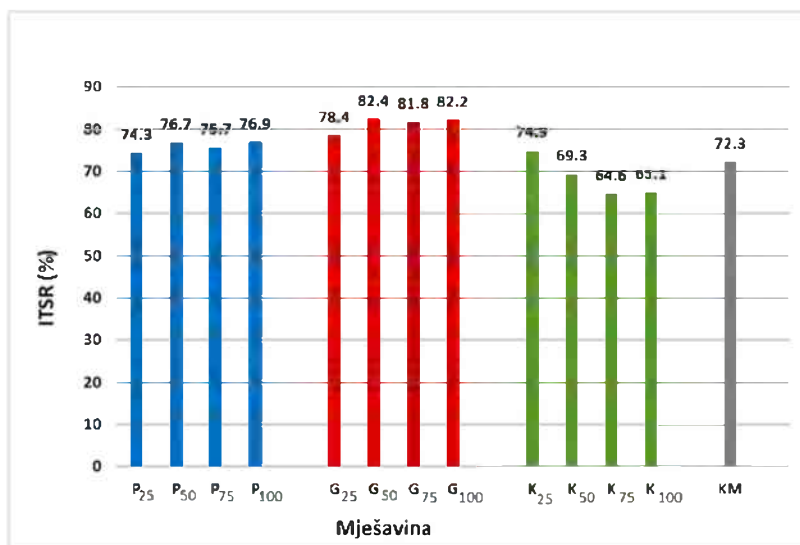
Tabela 5.2 Prosječne vrijednosti ITS i vrijednosti ITSR

Mješavina	ITS _{dry} (MPa)	ITS _{wet} (MPa)	ITSR (%)
KM	1.07	0.776	72.5
P ₂₅	1.14	0.85	74.1
P ₅₀	1.11	0.85	76.9
P ₇₅	1.17	0.89	75.9
P ₁₀₀	1.09	0.84	76.9
G ₂₅	1.15	0.90	78.4
G ₅₀	1.11	0.91	82.4
G ₇₅	0.99	0.81	81.6
G ₁₀₀	1.01	0.83	82.4
K ₂₅	1.00	0.75	74.8
K ₅₀	1.03	0.71	69.3
K ₇₅	0.96	0.62	64.7
K ₁₀₀	0.97	0.63	65.3

Odnos čvrstoća na indirektno zatezanje uzoraka u, vodom zasićenom stanju i uzoraka u suvom stanju trebao bi da bude veći od 70%, odnosno 80%, kao što propisuju specifikacije različitih zemalja (slika 2.9), dok minimalni zahtjev prema MORTH 2013. iznosi 75%, o čemu je detaljno pisano u potpoglavlju 2.3.5. Mjera otpornosti asfaltnih mješavina na dejstvo vode predstavljena odnosom čvrstoća pri indirektnom zatezanju, kod većine asfaltnih mješavina sa EFP ima veće vrijednosti u poređenju sa kontrolnom mješavinom, osim mješavina grupe K sa zamjenom 50%, 75% i 100%.

Kontrolna mješavina zadovoljava najniži zahtjev i ima ITSR veći od 70%, ali je ispod 75%. Sa dijagrama na slici 5.11 je uočljivo da mješavine K₅₀, K₇₅ i K₁₀₀ ne zadovoljavaju čak ni blaži od ova dva kriterijuma i imaju vrijednosti ITSR manje od 70%. Razlog za to može biti povećanje krutosti i krtosti mastiksa kao rezultat umješavanja ovog pepela sa bitumenom, tako da mješavine K grupe imaju najmanje vrijednosti čvrstoća na indirektno zatezanje, ali i najmanje vrijednosti odnosa ITSR u poređenju sa svim drugim mješavinama. Mješavine P grupe imaju vrijednosti ITSR veće od 70%, dok se mješavine G grupe odlikuju boljom otpornošću na dejstvo vode

od kojih većina ima vrijednosti ITSR veće od 80%. Mješavina G₅₀ ima najveću vrijednost ITSR, za 14% veći od KM.



Slika 5.11 ITSR - Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo vode

Odstupanja u odnosu na kontrolnu mješavinu kreću se u granicama od -10,6% za mješavinu K₇₅, do +14% za mješavinu G₅₀. Sva odstupanja vrijednosti ITSR u odnosu na kontrolnu mješavinu su veća od $\pm 3\%$ i mogu se smatrati signifikantnim. S obzirom da tehnička legislativa u Crnoj Gori ne propisuje minimalne uslove za ITSR i da su izmjerene vrijednosti ITSR kod devet eksperimentalnih asfaltnih mješavina veće u odnosu na kontrolnu mješavinu, kao i u odnosu na zahtjeve navedenih specifikacija drugih država, može se zaključiti da sa stanovišta otpornosti asfaltnih mješavina na dejstvo vode ne postoji prepreka za primjenu djelimične ili potpune zamjene prirodnog mineralnog filera pljevaljskim i gatačkom pepelom. Pažnju treba obratiti prilikom određivanja procenta primjrne kosovskog pepela, koji zbog jakog efekata ukrućenja na mastiks, daje nezadovoljavajuće rezultate otpornosti na negativno dejstvo vode za mješavine sa 50% i više procenata primjene ovog pepela.

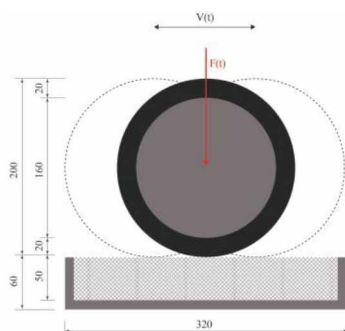
5.4. Otpornost na trajnu deformaciju

Poznavanje parametra otpornosti na trajnu deformaciju važan je podatak prilikom projektovanja asfaltne mješavine, kao i prilikom procjene karakteristika asfaltne mješavine.

Ispitivanje trajne deformacije asfaltnih mješavina sprovedeno je pomoću opita točkom na vazduhu, pri temperaturi od 60°C, nakon 10,000 ciklusa (20,000 prelaza), u svemu prema MEST EN 12697-22, Aneks B, mali uređaj. Opterećenje točka od 700 N prenosi se preko kontaktne površine od 1900 mm² sa frekvencijom od 0.88 Hz. Otpornost asfaltne mješavine na trajnu deformaciju, prema ovoj metodi, određuje se mjerenjem dubine kolotraga koji se formira nakon svakog ciklusa opterećenja točkom. Na slici 5.12 prikazan je laboratorijski uređaj za sprovođenje opita kolotražnja (eng. - Wheel Tracking Test, WTT) proizvođača INFRATEST 20-4000, pomoću kojeg je sproveden opit otpornosti na trajnu deformaciju. Način nanošenja opterećenja prikazan je na slici 5.13. Slika 5.14 prikazuje izgled ploča poslije opita kolotražnja.



Slika 5.12 Uređaj za ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju

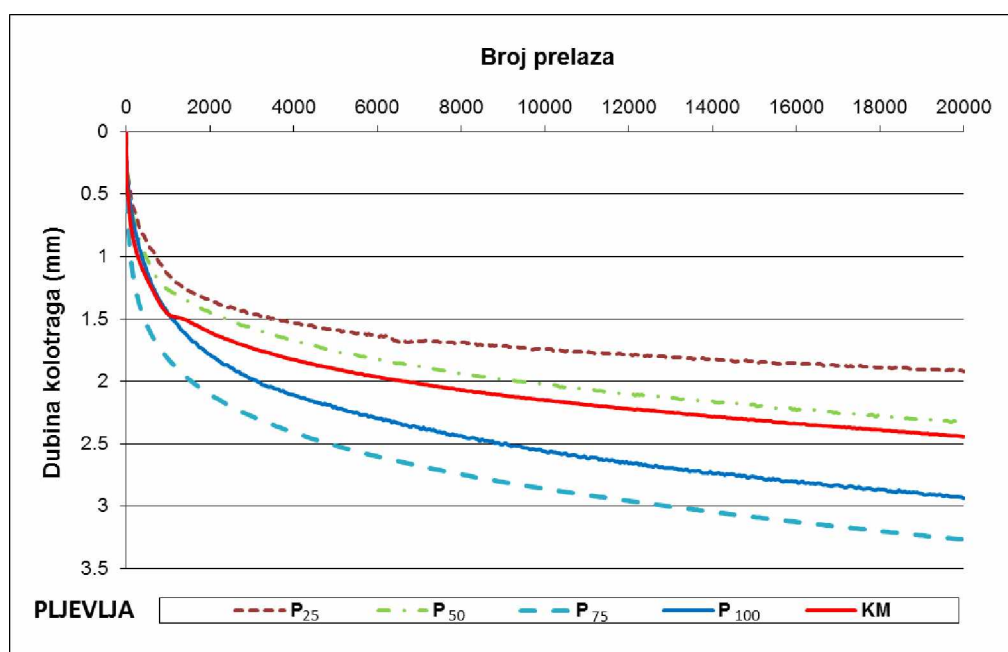


Slika 5.13 Dispozicija opterećenja uzorka prilikom ispitivanja asfaltne mješavine na trajnu deformaciju

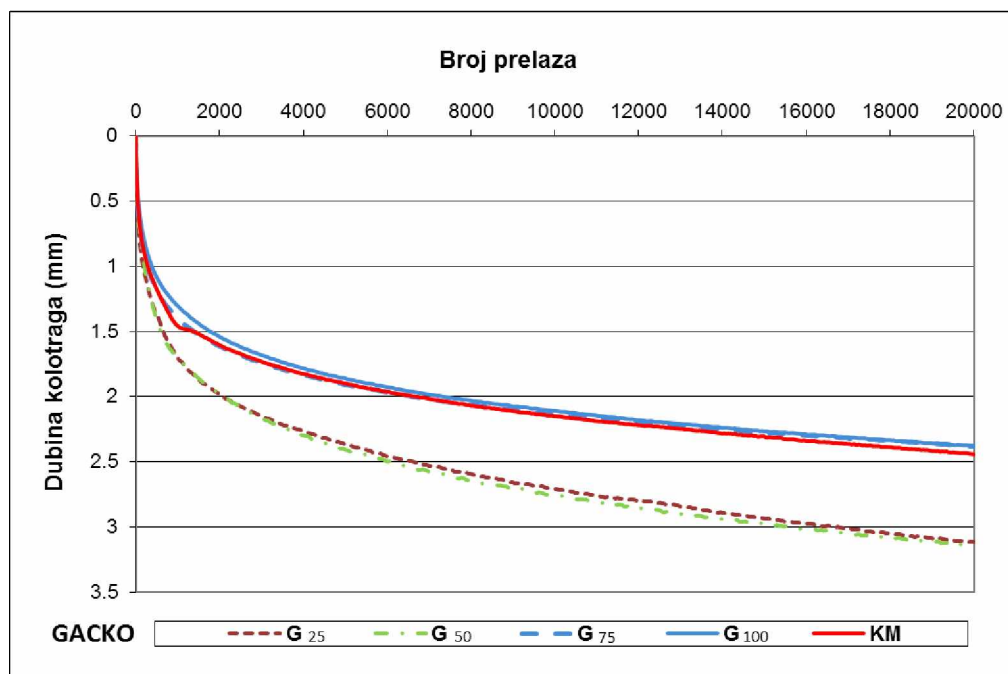


Slika 5.14 Izgled ploča poslije opita kolotražnja

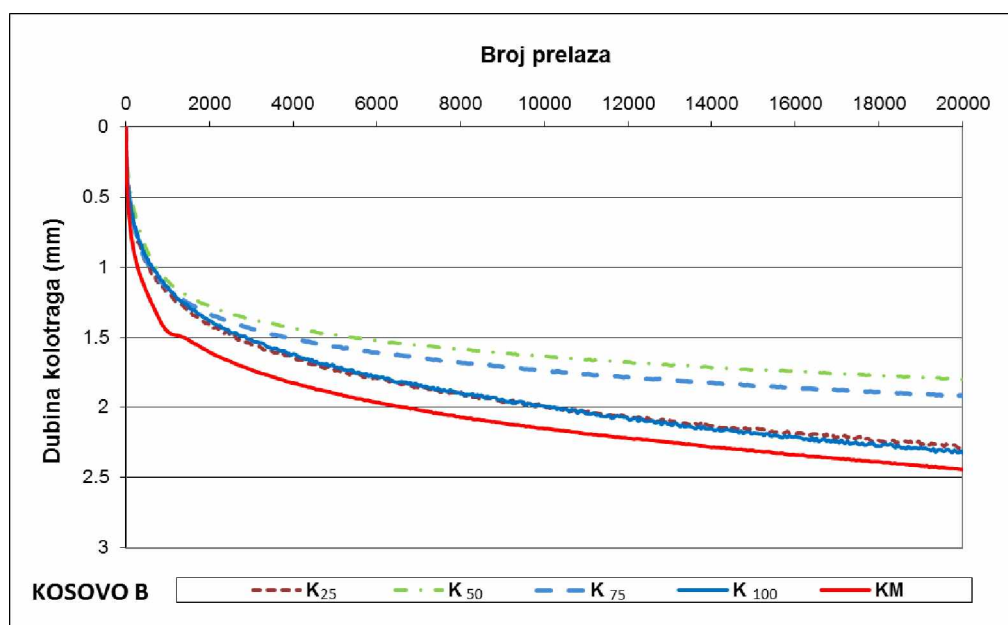
Dijagrami na slikama 5.15 – 5.17. prikazuju rezultate ispitivanja dubine kolotraga u funkciji broja ciklusa saobraćajnog opterećenja. Deformacije prikazane na ovim slikama predstavljaju srednje vrijednosti deformacija od po dva uzorka za sve tri grupe mješavina, koje su upoređene sa deformacijama kontrolne mješavine.



Slika 5.15 Trajna deformacija asfaltnih mješavina P grupe i KM



Slika 5.16 Trajna deformacija asfaltnih mješavina G grupe i KM



Slika 5.17 Trajna deformacija asfaltnih mješavina K grupe i KM

Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da zamjena mineralnog filera elektrofilterskim pepelom ima različit uticaj na trajnu deformaciju u zavisnosti od vrste i procenta primijenjenog pepela.

Tabela 5.3 Rezultati opita točkom

Mješavina	Dubina kolotruga (mm)	Proporcionalna dubina kolotruga (%)	Nagib krive tečenja (mm/10 ³ ciklusa)
KM	2.44	4.8	0.06
P ₂₅	1.92	3.8	0.03
P ₅₀	2.33	4.6	0.06
P ₇₅	3.27	6.5	0.08
P ₁₀₀	2.94	5.7	0.08
G ₂₅	3.12	6.2	0.08
G ₅₀	3.15	6.2	0.08
G ₇₅	2.38	4.8	0.05
G ₁₀₀	2.38	4.7	0.05
K ₂₅	2.38	4.6	0.06
K ₅₀	1.80	3.5	0.03
K ₇₅	1.92	3.8	0.04
K ₁₀₀	2.32	4.6	0.07
Kriterijum		*	**

U tabeli 5.3 prikazani su rezultati opita točkom koji uključuju vrijednosti dubine kolotruga i proporcionalne dubine kolotruga (eng. - Proportional Ruth Depth, PRD) koje su izmjerene nakon 10,000 ciklusa opterećenja, kao i nagib krive tečenja (eng. – Wheel Tracking Slope, WTS). Vrijednosti PRD su dobijene dijeljenjem dubine kolotruga sa stvarnom debljinom asfaltnog uzorka.

S obzirom da na povišenim temperaturama u bitumenu slabe karakteristične veze i čvrstoća na smicanje, pogodnim odnosom i dobrim sadejstvom bitumena i filera, može se postići poboljšanje reoloških osobina bitumena, kako bi se dobila mješavina optimalnih svojstava. U tom slučaju, važnu ulogu u otpornosti asfaltnih mješavina na trajnu deformaciju imaju veze koje ostvaruje bitumen sa najfinijim česticama mineralne

* Prema Putevi Srbije (2012.) ova granica je 5%, prema Hrvatske ceste (2012.) ova granica je 7%. U Crnoj Gori ova granica nije definisana specifikacijama.

** Prema Hrvatske ceste (2012.) ova granica je 0.07mm/10³ ciklusa. U Crnoj Gori ova granica nije definisana specifikacijama.

mješavine, što zavisi od hemijskih osobina filera, odnosno pepela, o čemu je opširnije pisano u 2. poglavlju. Takođe, važnu ulogu u povećanju otpornosti mješavine na trajnu deformaciju imaju i oblik i tekstura površine čestica filera. Sa druge strane, izuzetno važnu ulogu u otpornosti mješavine na trajnu deformaciju ima količina čestica manjih od $10\mu\text{m}$. Shodno konceptu debljine bitumenskog omotača, prosječna debljina bitumenskog omotača oko zrna agregata, u prosjeku, je manja od $10\mu\text{m}$. Najsitnije čestice mineralnog filera, manje od $10\mu\text{m}$, čineći sa bitumenom bitumenski mastiks, postaju dio bitumenskog omotača, djelujući kao dopuna bitumenskom vezivu, pri tome poboljšavajući reološka svojstva bitumena.

Gatački pepeo odlikuje se visokim sadržajem čestica manjim od $10\mu\text{m}$, čak 56%. Čestice pepela imaju sferičan i nepravilan oblik, kombinovano, a tekstura površine zrna je uglavnom hrapava. Sa aspekta hemijskog sastava, sa 74.4% sadržaja CaO, čestice ovog pepela imaju jak afinitet prema bitumenu. Sve ovo ukazuje na ostvarenje jakih veza bitumena i čestica pepela, a tim i na jake veze mastiksa i zrna agregata, što rezultira povećanjem otpornosti mješavina G grupe na trajnu deformaciju sa povećanjem procenta pepela u mješavini. Kao što je prikazano na slici 5.18, mješavine sa većim procentom pepela, G₇₅ i G₁₀₀ daju najbolje rezultate u G grupi, koji su na nivou rezultata KM, dok mješavine sa manjim procentom zamjene G₂₅ i G₅₀ imaju za 29.2% manju otpornost na kolotrage od KM. Iz ovoga se može uočiti da trend prirasta otpornosti na trajnu deformaciju prati trend povećanja procenta gatačkog pepela u mješavini. Kao što je ranije predstavljeno u tabeli 4.6, gatački pepeo se odlikuje manjim bitumenskim brojem, kao i blago povećanom tačkom razmekšavanja po metodi prestena i kuglice. Ove veličine nisu dovedene u vezu sa rezultatima otpornosti na trajnu deformaciju.

Za razliku od gatačkog pepela, pljevaljski pepeo kao krupnozrniji ima svega 16% čestica manjih od $10\mu\text{m}$, i izrazito sferičan oblik i glatku teksturu površine čestica. Učešće SiO₂ od 42.83% čini ovaj pepeo manje prionljivim za bitumen. Ove karakteristike pljevaljskog pepela direktno se povezuju sa smanjenjem otpornosti na trajnu deformaciju sa povećanjem procenta pepela u mješavini, što je prikazano na slici 5.18. U P grupi mješavine sa manjim procentom pepela, P₂₅ i P₅₀ pokazuju veću otpornost na kolotrage u odnosu na KM, za 20.83% i 4.17% , respektivno, i smatra se da

manje količine ovog pepela još uvijek nisu narušile vezu filera i bitumena u mješavini koju ostvaruje veći procenat kamenog brašna u mješavini. Mješavine sa većim procentom pepela, P₇₅ i P₁₀₀ pokazuju manju otpornost na kolotrage u odnosu na KM, za 35.42% i 18.75 %, respektivno, u kojima dolaze do izražaja navedene karakteristike pljevaljskog pepela. Iz ovoga se može uočiti da je trend prirasta otpornosti na trajnu defraciju suprotan od trenda povećanja procenta pljevaljskog pepela u mješavini.

Vrijednosti za šupljine po Rigdeni, razmekšanje po metodi prstena i kuglice i bitumenski broj za pljevaljeski pepeo nalaze se u rasponu propisanom za mineralne filere i smatra se da nisu imale uticaja na otpornost P grupe mješavina na trajnu defraciju.

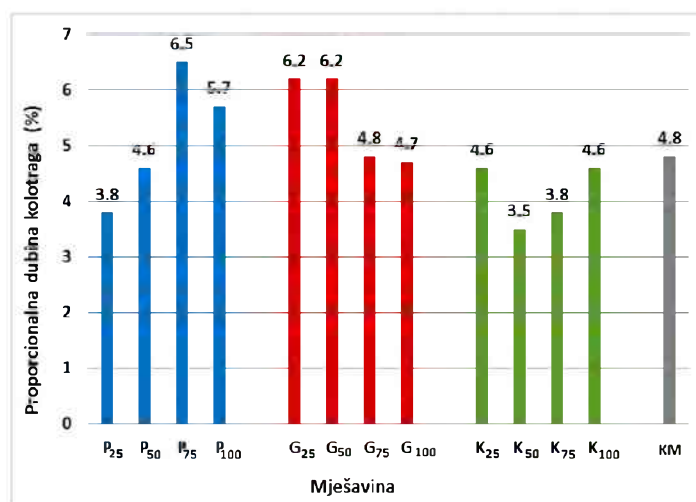
Granulometrijski sastav kosovskog pepela pokazuje uglavnom uravnotežen odnos sitnih i krupnih čestica koji upućuje na stabilnost mješavine. Kao i kod gatačkog pepela, čestice kosovskog pepela imaju sferičan i nepravilan oblik, kombinovano, dok je tekstura površine zrna je uglavnom hrapava. Sa 45.98% sadržaja CaO, čestice ovog pepela imaju jak afinitet prema bitumenu. Na slici 5.18 je uočljivo da se sve mješavine K grupe odlikuju izraženom otpornošću na pojavu kolotraga. Osim već navedenih svojstava kosovskog pepela, izražena otpornost na pojavu kolotraga u K grupi dovodi se u vezu i sa značajno većom tačkom razmekšanja po prstenu i kuglici, čak 38.6°C, što značajno prevazilazi gornju uobičajenu granicu od 25°C. Ovo svojstvo se može smatrati uzročnikom velikog povećanja krutosti mastiksa sa kosovskim pepelom u odnosu na bitumen. Ovako značajno ukrućenje bitumena daje mješavine otporne na trajnu defraciju, što može predstavljati prednost u samom početku eksploatacije, dok tokom vremena takve mješavine postaju krte i osjetljive na pucanje, pa samim tim i znatno osjetljivije na niske temperature i na zamor. Mješavine K₂₅ i K₁₀₀ imaju veću otpornost na trajnu defraciju od KM za 4.17%, dok mješavina K₅₀ ima za 27.1% veću otpornost na kolotrage od KM. Mješavina K₅₀ je ujedno mješavina sa najvećom otpornošću na trajnu defraciju u odnosu na sve ispitane mješavine. Kod ove grupe mješavina nema pravilnog trenda prirasta trajne defracije u odnosu na procenat pepela u mješavini.

Povećane šupljine po Rigdeni i bitumenski broj u granicama uobičajenog, nisu dovedeni u vezu sa rezultatima otpornosti na trajnu defraciju za mješavine K grupe.

Neki autori navode pozitivan uticaj prisustva kalcijum oksida u fileru na otpornost mješavine na pojavu kolotraga. Sharma (2010.) smatra da je prisustvo CaO od presudnog značaja za poboljšanje karakteristika asfaltnih mješavina (otpornost na kolotrage, ITSR), navodeći da ipak, više od 7% CaO dovodi do izrazitog stvrdnjavanja mješavine što uzrokuje probleme prilikom miješanja i ugradnje mješavine, kao i rane pojave pukotina.

Sadržaj CaO u pepelima koji su korišteni u ovom istraživanju je značajno iznad ovog limita, pljevaljski pepeo sadrži 21,08% kalcijum oksida, gatački 74,4% i kosovski 45,98%. Rezultati ovog istraživanja ipak upućuju da vrlo visok sadržaj CaO nije prepreka za njihovu upotrebu u asfaltnim mješavinama, već naprotiv. Generalno, u pogledu sadržaja CaO, najbolje rezultate otpornosti na trajnu deformaciju imaju mješavine K grupe koja za sva četiri procenta zamjene ima manju dubinu kolotraga od KM.

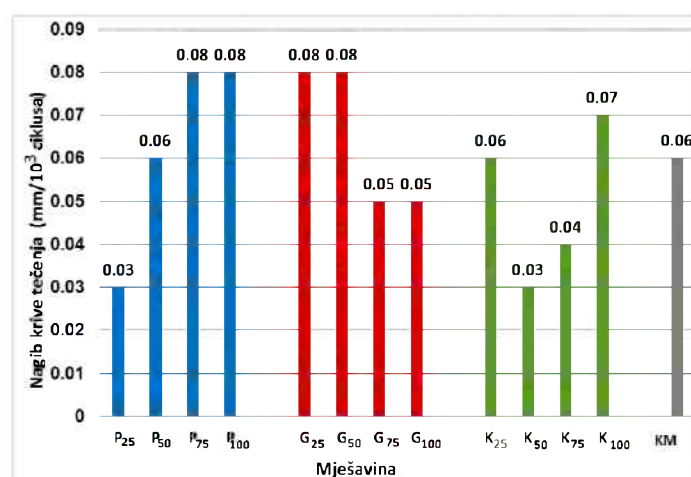
Ovdje je važno istaći da je i kontrolna mješavina, takođe pokazala dobru otpornost na trajnu deformaciju, što je iskazano veličinom PRD od 4.8%, što zadovoljava strožiji od dva komentarisana zahtjeva. Tim prije, rezultati otpornosti na trajnu deformaciju mješavina sa pepelom, koji su bolji od rezultata KM, dobijaju na značaju (slika 5.18). Generalno, sve ispitane mješavine, izuzev P₇₅, P₁₀₀, G₂₅ i G₅₀ zadovoljavaju strožiji uslov da je PRD manje od 5%.



Slika 5.18 Proporcionalna dubina kolotraga

U Crnoj Gori ne postoji zvaničan dokument koji propisuje vrijednosti PRD i WTS. Prema Tehničkim uslovima za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije, 2012.) koji propisuju maksimalnu dozvoljenu vrijednost za PRD za asfalt betone habjućih slojeva iznosi 5%. Sa dijagrama prikazanog na slici 4.18 uočljivo je da mješavine P₇₅, P₁₀₀, G₂₅ i G₅₀ ne zadovoljavaju ovaj uslov, dajući mješavine koje prevazilaze ovaj propisani parametar za 30%, 14%, 24% i 24% respektivno. Sa druge strane Tehnička svojstva i zahtjevi za građevne proizvode za proizvodnju asfaltnih mješavina i za asfaltne slojeve kolnika (Hrvatske ceste, 2012.) vrijednost za PRD za asfaltne betone habajućih slojeva ograničavaju na 7%, što znači da sve ispitane mješavine zadovoljavaju u pogledu maksimalne proporcionalne dubine kolotruga.

Za sve ispitane mješavine, određen je i nagib krive tečenja (WTS) između 5,000 i 10,000 ciklusa opterećenja koji predstavlja mjeru brzine prirasta deformacije testiranog materijala na djelovanje opterećenja, tj. sposobnost materijala da što sporije odreaguje na opterećenje. Brzina prirasta deformacije značajno zavisi od vrste, viskoziteta i krutosti bitumena. Vrijednosti nagiba krive tečenja prikazane u tabeli 5.3, kao i na slici 5.19, dok se zapreminske mase i dimenzije uzoraka za ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju i dijagrami proporcionalnih dubina kolotruga za sve mješavine nalaze u Prilogu B.



Slika 5.19 Nagib krive tečenja

U ovom eksperimentu nagib krive tečenja generalno prati trendove proporcionalne dubine kolotraga, što je vidljivo na slikama 5.18 i 5.19. Kod mješavine P grupe povećanje dubine kolotraga se ubrzava sa povećanjem procenta pepela, dok je kod mješavina u G grupi evidentan opadajući trend, odnosno dodatak pepela utiče na smanjenje brzine prirasta deformacije. Kod mješavina grupe K nagib krive tečenja se smanjuje sa dodatkom pepela do 50%, a zatim, slično mješavinama u grupi P, povećava sa dodatkom veće količine pepela. Mješavine P₂₅ i K₅₀ imaju nagib krive tečenja 0.06mm/10³ ciklusa, isti kao i KM. Mješavine P₇₅, P₁₀₀, G₂₅, G₅₀ i K₁₀₀ karakteriše veća brzina prirasta trajne deformacije od KM, dok se mješavine P₂₅, G₇₅, G₁₀₀, K₅₀, i K₇₅ odlikuju jednakom ili manjom brzinom prirasta trajne deformacije u odnosu na KM, koja se kod nekih od njih približava vrijednostima koje se uobičajeno dobijaju kod mješavina sa polimer-modifikovanim bitumenom.

Mješavine P₇₅, P₁₀₀, G₂₅ i G₅₀ se odlikuju većom brzinom nastanka deformacije, tj. kraćim vremenom odgovora na opterećenje, što je iskazano vrijednostima brzine prirasta trajne deformacije većim od 0.07 mm/10³ ciklusa, koliko je propisano Hrvatskim specifikacijama (Hrvatske ceste, 2012.). Ostale mješavine zadovoljavaju ovaj kriterijum, pri čemu P₂₅ i K₅₀ ostvaruju za 50% manje vrednosti od kontrolne mješavine.

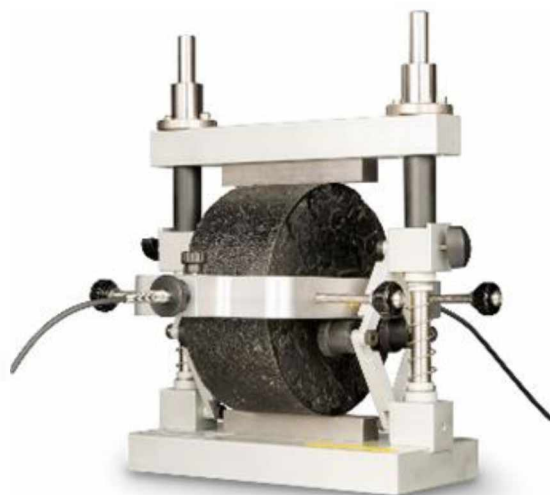
Iz navedenog se može zaključiti da svi pepeli korišteni u eksperimentu, primijenjeni u određenom procentu, daju mješavine sa poboljšanom otpornošću na trajnu deformaciju, pri čemu su one i dalje manje od dopuštenih 7% koliko je dopušteno prema važećim Hrvatskim specifikacijama (Hrvatske ceste, 2012.) i saglasno dosadašnjim iskustvima omogućavaju da se projektuju asfaltne mešavine sa dobrom otpornošću na trajnu deformaciju.

5.5. Modul krutosti

Krutost mješavine, kao indikator kvaliteta asfaltne mješavine koristi se u postupcima dimenzionisanja kolovoznih konstrukcija, kao i za procjenu osjetljivosti mješavine na

promjenu temperature i frekvencije opterećenja, kao i za procjenu osjetljivosti mješavine na starenje.

Krutost tipično opada sa povećanjem temperature, a raste sa njenim smanjenjem. Modul krutosti ispitan je na laboratorijski spravljenim cilindričnim uzorcima, u svemu prema MEST EN 12697-26, Annex C kojim je definisana metoda za karakterizaciju krutosti asfaltnih mješavina pod dejstvom cikličnog opterećenja pri indirektnom zatezanju. Procedura je nedestruktivna i namijenjena klasifikaciji asfaltnih mješavina na osnovu krutosti, kao indikatora za relativno ponašanje različitih tipova asfaltnih mješavina u kolovoznoj konstrukciji. Važan je podatak za proračun nosivosti kolovozne konstrukcije i za ocjenu rezultata ispitivanja u skladu sa specifikacijama asfaltnih mješavina.



Slika 5.20 Dispozicija ispitivanja modula krutosti

Dispozicija ispitivanja modula krutosti prikazana je na slici 5.20. Pri ovom ispitivanju cilindrični uzorak je postavljen u horizontalan položaj tako da horizontalni držači čeljusti preko kojih se nanosi sila opterećenja, naliježu na uzorak u punoj dužini, jedna sa gornje, druga sa donje strane. Zakrivljeni oblik horizontalnih držača omogućava idealno nalijezanje na asfaltni uzorak, čime se omogućava ravnomjerno prenošenje sile opterećenja preko gornjeg držača koji je povezan sa sistemom za opterećenje.

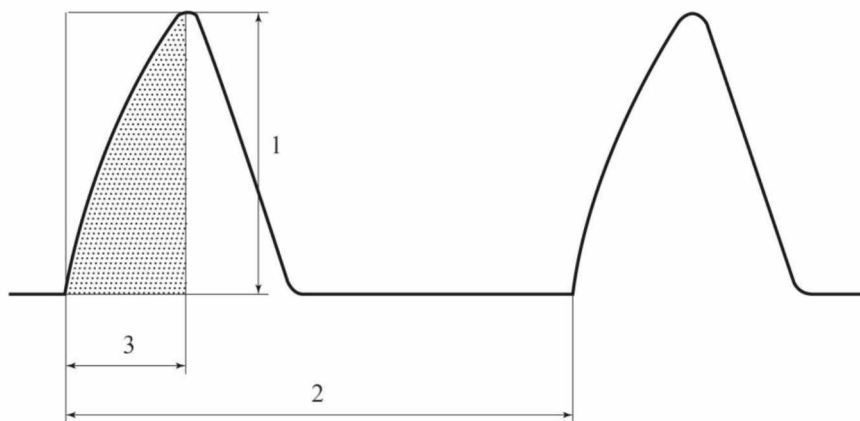
Opit je izvršen na šest temperatura 5, 10, 15, 20, 25 i 30°C i na tri frekvencije opterećenja 2, 2.51 i 3.98 Hz kako bi se primijenio princip superpozicije vremena trajanja opterećenja i temperature ispitivanja (time-temperature superposition) i omogućilo formiranje master krivih za temperaturu od 20°C za ispitivane asfaltna mješavine. Opterećenje je nanošeno pomoću aktivatora opterećenja po izvodnici jednog markiranog prečnika cilindričnog uzorka koji je, u horizontalnom položaju, postavljen u čeljusti mjerne opreme. Drugo nanošenje opterećenja na uzorak se vrši poslije rotacije uzorka oko njegove osovine za 90°, tj. u pravcu drugog markiranog prečnika koji je pod uglom od 90° u odnosu na prvi. Opit je sproveden u klima komori Controls 77-B3300 (slika 5.21).



Slika 5.21 Ispitivanje modula krutosti

Opterećenje je nanošeno u vidu sinusne funkcije „haversine“ sinusoide sa kontrolisanom dilatacijom od 50 µε sa ciljem sprečavanja pojave oštećenja usled zamora. Vrijeme trajanja rasta opterećenja je iznosilo 125 ms, 200 ms i 300 ms u svrhu postizanja zahtijevane horizontalne deformacije uzorka, dok je ciklus opterećenje/rasterećenje trajao 250 ms, 400 ms i 600 ms, za frekvencije opterećenja od 2 Hz, 2.51 Hz i 3.98 Hz, respektivno. Ponavljanje kompletnog ciklusa, uključujući vrijeme opterećenja, rasterećenja i vrijeme bez opterećenja, vršeno je nakon 3s koje je

kontrolisano tokom sprovođenja opita. Opterećenje oblika heversine sinusoide prikazano je na slici 5.22.



Slika 5.22 Oblik signala opterećenja prilikom ispitivanja modula krutosti

gdje je:

- 1 – vršno opterećenje;
- 2 – period ponavljanja pulsnog opterećenja u trajanju od 3 s;
- 3 – vrijeme prirasta opterećenja.

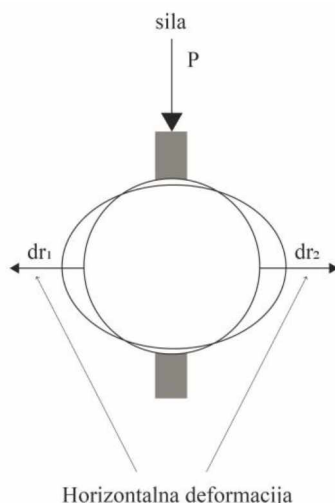
Odnos šrafirane površine i maksimalnog opterećenja predstavlja faktor opterećenja sa preporučenom veličinom od $0,60 \pm 0,10$.

Ponavljanje opterećenja u svrhu kondicioniranja uzorka i postizanja zahtijevane deformacije je vršeno u 10 ciklusa, poslije čega su u narednih pet ciklusa vršena mjerenja, određen faktor opterećenja i modul krutosti, prema formuli:

$$E = \frac{F \cdot (v + 0.27)}{(dr_1 + dr_2)} \quad (5.3)$$

gdje je:

- E – izmjereni modul krutosti (MPa);
- F – maksimalna vrijednost vertikalnog opterećenja (N);
- $dr_1 + dr_2 = z$ – ukupna horizontalna deformacija nastala u ciklusu opterećenja (mm);
- v – Poasonov koeficijent koji je za asfalt iznosi 0,35



Slika 5.23 Dispozicija sile i deformacije u odnosu na opterećeni uzorak

Krutost mješavine se najčešće procjenjuje na bazi tzv. master krivih, odnosno krivih koje predstavljaju zavisnost krutosti u odnosu na frekvenciju (odnosno trajanje) opterećenja i temperaturu.

U ovom radu master krive su formirane koristeći sigmoidalni model (jednačina 5.4).

$$\log(S) = \log(S_{min}) + \frac{\log(S_{max}) - \log(S_{min})}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \log \omega_r}} \quad (5.4)$$

gdje je:

S – krutost asfaltne mješavine (MPa);

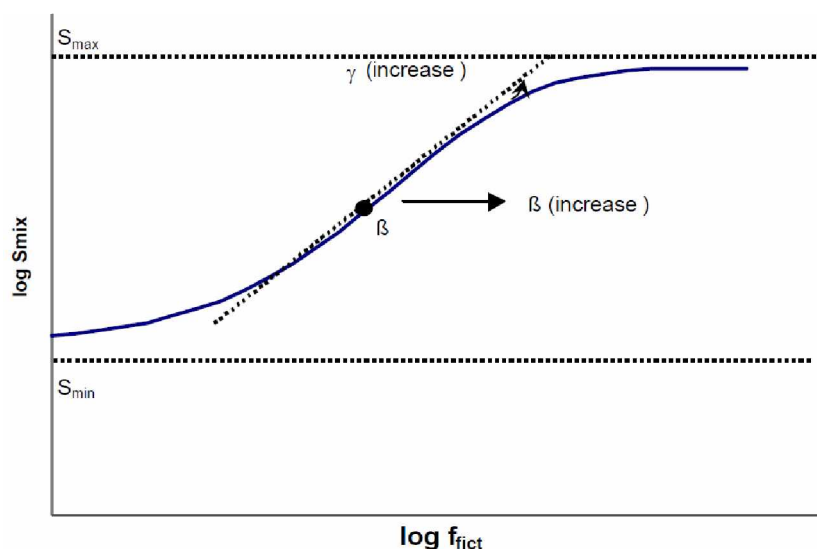
S_{min} – minimalna krutost asfaltne mješavine (MPa);

S_{max} – maksimalna krutost asfaltne mješavine (MPa);

ω_r - redukovana frekvencija (Hz);

β, γ - parametri uklapanja koji se određuju pomoću metode najmanjih kvadrata.

Parametri β i γ definišu oblik master krive u skladu sa slikom 5.24.



Slika 5.24 Formiranje master krive u zavisnosti od β i γ parametara

Vrijednosti regresionih parametara dobijenih za potrebe formiranja master krivih, vrijednosti maksimalnog i minimalnog modula krutosti i aktivacione energije dobijenih tokom opita, prikazane su u tabeli 5.4.

Redukovana frekvencija je sračunata primjenom Arenijusove jednačine (5.5):

$$\log(\omega_r) = \log(\omega) + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (5.5)$$

gdje je:

ω_r – redukovana frekvencija na referentnoj temperaturi (Hz);

ω – frekvencija opterećenja na temperaturi ispitivanja (Hz);

T_r – referentna temperatura (°K);

T – temperatura ispitivanja (°K);

ΔE_a – aktivaciona energija (koja se tretira kao faktor uklapanja).

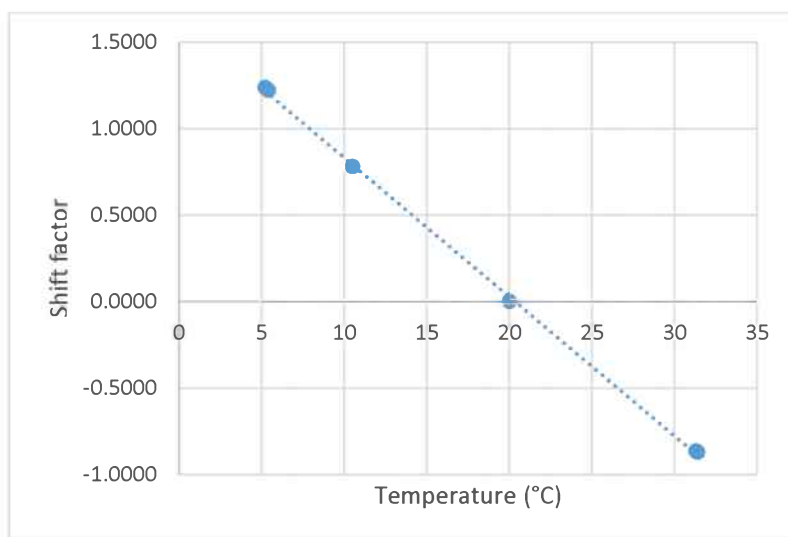
Faktor pomijeraja (tzv. shift factor) je za svaku temperaturu određen jednačinom (5.6):

$$\log(\alpha(T)) = \frac{\Delta E_a}{19.14714} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (5.6)$$

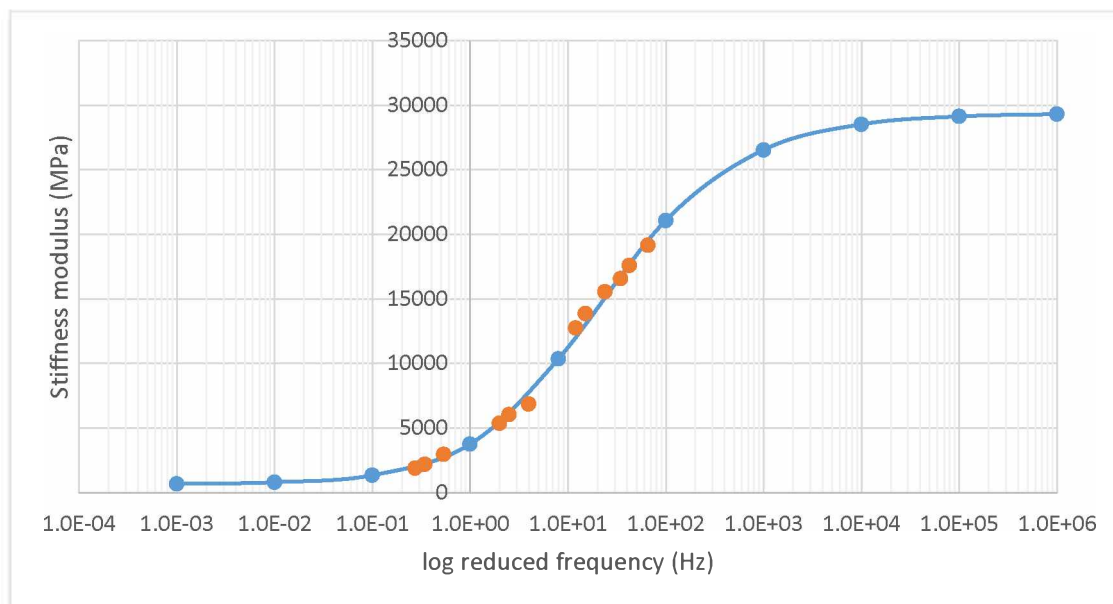
Tabela 5.4 Rezultati ispitivanja modula krutosti

Frekvencija	Kontrolna mješavina	Kosovo B				Gacko				Pljevlja			
		25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.0E+06	29296.8	21742	21953.8	20728.8	22773.1	16920.7	18210.8	21301.9	24172.2	21964.4	20936.5	19873	16163.7
1.0E+05	29117	21621.9	21793.1	20622.6	22649.7	16890.4	18170	21153.9	23875.3	21751.7	20566.2	19471	16030.4
1.0E+04	28505	21179.8	21250.9	20237	22213.9	16757.5	17999.7	20656.8	23011.6	21130.5	19638.6	18588.4	15644.3
1.0E+03	26523	19644.6	19534.7	18906.4	20748.8	16190.5	17310.3	19086	20690	19426.9	17484.3	16757	14579
1.0E+02	21056.9	15267.1	15080.5	15045.4	16569.8	14022.7	14830.9	14977.8	15632.4	15488.9	13297.1	13388.1	12010.2
1.0E+01	10347.7	7269.78	7415.16	7448.08	8252.28	7766.31	8175.03	7683.26	8037.58	8735.23	7105.23	8008.58	7063.24
1.0E+00	3745.23	3022.97	3211	2977.33	3166.43	2818.12	3101.09	3459.27	3830.15	4305.49	3268.98	3832.6	3286.55
1.0E-01	1336.47	1541.66	1609.97	1354.16	1294.03	1043.46	1214.06	1768.72	1997.13	2149.62	1379.51	1252.84	1315.8
1.0E-02	794.953	1184	1190.57	967.874	856.347	699.367	822.296	1312.69	1437.51	1467.36	771.211	395.79	721.999
1.0E-03	661.722	1093.78	1076.79	871.102	747.062	628.291	736.951	1187.37	1264.37	1255.71	576.064	166.447	550.061
log(Smax)	4.4679	4.33817	4.34281	4.3174	4.35833	4.22865	4.26063	4.32966	4.38598	4.34383	4.32569	4.30515	4.21037
log(Smin)	2.78616	3.026	3.01358	2.92234	2.84924	2.78393	2.85192	3.05586	3.07252	3.06239	2.6711	1.7946	2.67227
β	0.12755	0.63525	0.52819	0.42503	0.27531	0.15627	0.18441	0.49262	0.45229	0.21649	-0.0387	-0.9078	-0.1968
γ	-1.246	-1.3249	-1.2431	-1.3092	-1.2817	-1.4846	-1.4377	-1.2375	-1.1087	-1.1043	-0.9672	-0.8313	-1.0894
EA	130640	184574	204018	196106	161240	188822	195750	178554	209863	180291	211745	189199	220265

Slika 5.25 prikazuje vrijednosti faktora pomjeranja za kontrolnu mješavinu.

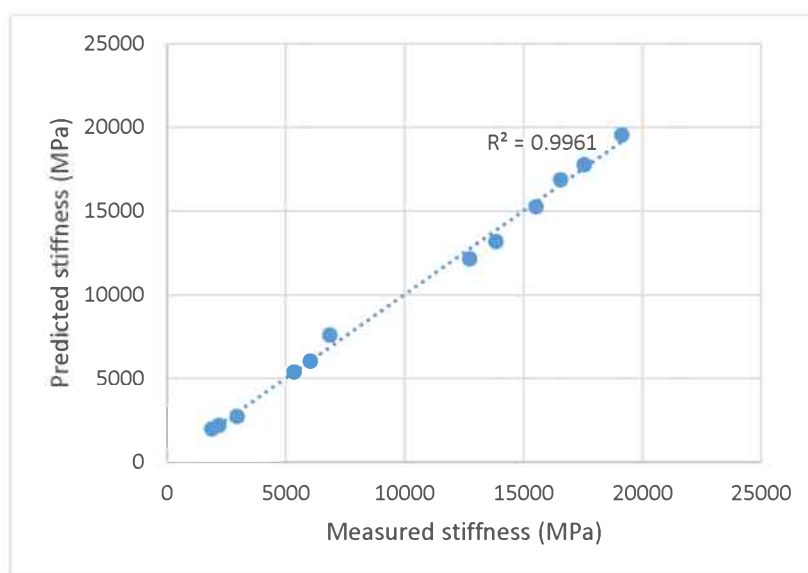

Slika 5.25 Faktori pomjeraja za kontrolnu mješavinu

Slika 5.26 prikazuje master krivu za kontrolnu mješavinu za referentnu temperaturu od 20°C. Žutim tačkama su označene vrijednosti dobijene na osnovu ispitivanja, dok su plavim označene vrijednosti dobijene na osnovu modela.



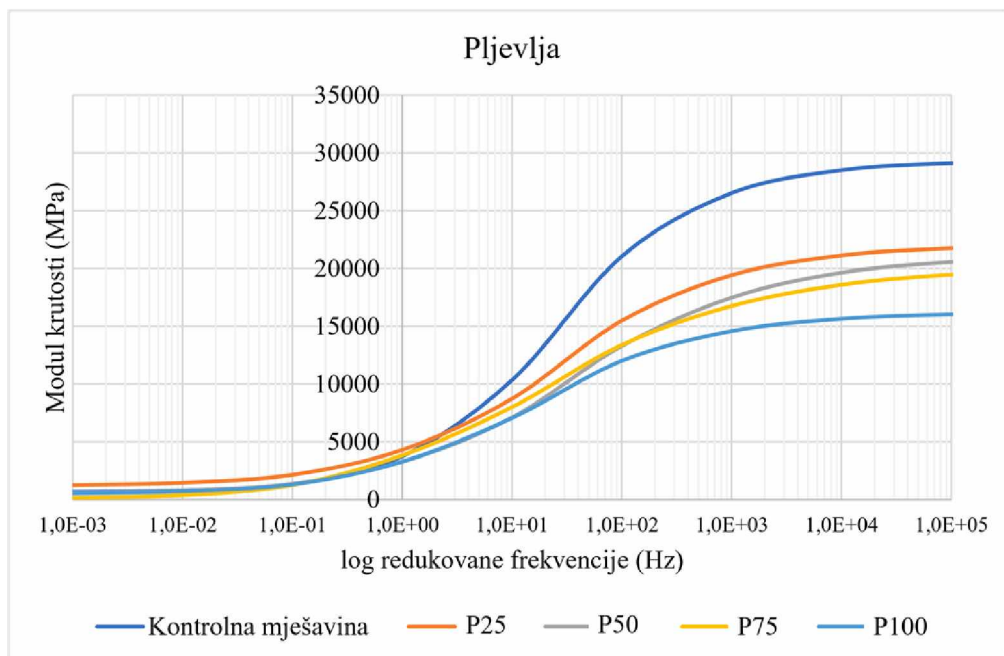
Slika 5.26 Master kriva za kontrolnu mješavinu na 20°C

Na slici 5.27 je prikazano upoređenje vrijednosti modula krutosti dobijenih eksperimentalnim putem i na bazi modela. Može se zaključiti da model korišćen za formiranje master krive na adekvatan način prikazuje rezultate eksperimentalnog određivanja modula krutosti.

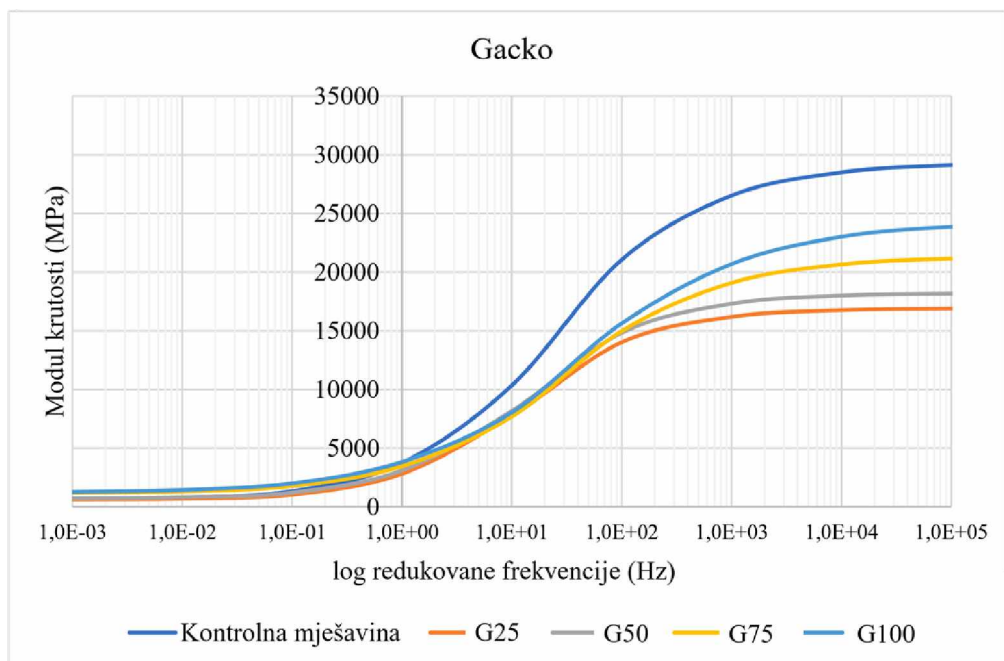


Slika 5.27 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti modula krutosti za kontrolnu mješavinu

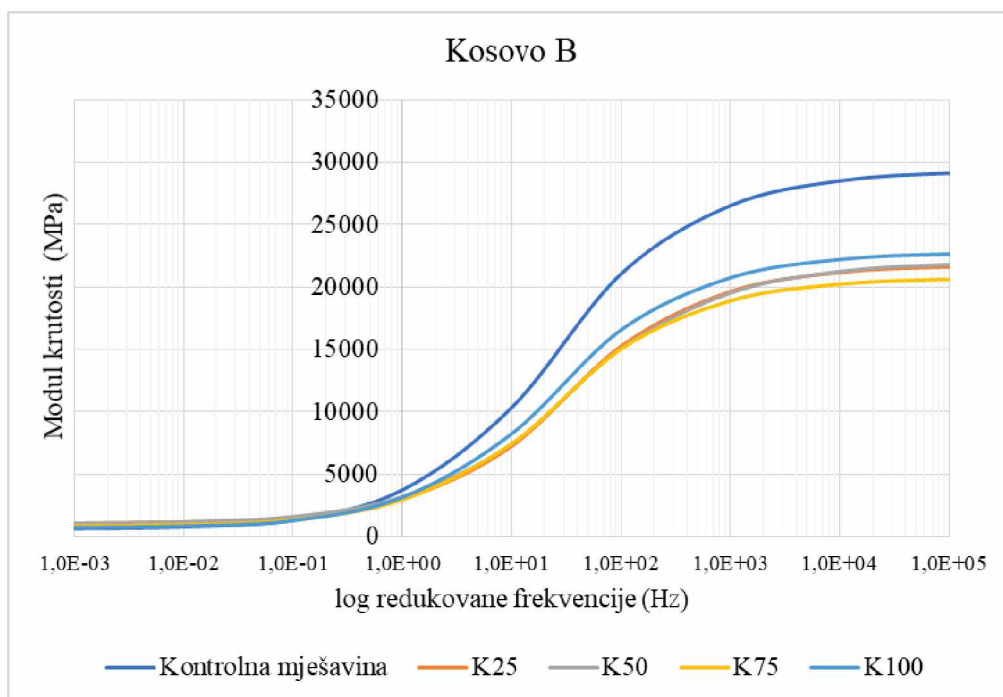
Na sličan način su definirane master krive za sve ostale asfaltne mješavine sa pepelom, koje su prikazane na slikama 5.28 – 5.30. Faktori pomjeraja, master krive na 20°C i upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti modula krutosti za eksperimentalne mješavine prokazani su u Prilogu C.



Slika 5.28 Master krive za mješavine P grupe



Slika 5.29 Master krive za mješavine G grupe



Slika 5.30 Master krive za mješavine K grupe

Rezultati ispitivanja modula krutosti pružaju mogućnost sledećih zaključaka.

- Na niskim temperaturama, simuliranim visokim frekvencijama opterećenja, sve ispitane mješavine imaju manju krutost od kontrolne mješavine, što je povoljna karakteristika mješavina u pogledu otpornosti na niske temperature.
- Mješavine K grupe imaju najmanju varijabilnost u rezultatima modula, tj. najmanji pad modula, i može se uočiti da je uticaj sadržaja pepela na krutost, u ovoj grupi najmanji. Mješavine P i G grupe pokazuju veći pad i veću varijabilnost modula.
- Na visokim temperaturama, simuliranim niskim frekvencijama, sve mješavine K grupe imaju veću krutost od kontrolne mješavine, što ukazuju na veću otpornost mješavina na trajnu deformaciju, s tim da sa povećanjem sadržaja pepela krutost opada. Ovo je u saglasnosti sa rezultatima otpornosti na trajnu deformaciju jer ove mješavine imaju manju trajnu deformaciju u odnosu na kontrolnu mješavine i na mješavine sa pepelima P i G.
- Mješavine P grupe sa manjim sadržajem pepela (P₂₅ i P₅₀) imaju veće vrijednosti modula krutosti od kontrolne mješavine, dok je kod mješavina G grupe obrnut trend. Mješavine G grupe sa većim sadržajem pepela (G₇₅ i G₁₀₀) imaju vrijednosti modula krutosti veće od kontrolne mješavine.

Rezultati modula krutosti mogu se komentarisati i sa aspekta zapreminskih masa pepela i mineralnog filera, kao i njihovih hemijskog sastava.

Čestice mineralnog filera sa kojim je spravljena kontrolna mješavina su hrapave površine i prizmatičnog oblika, što je povoljniji oblik od, uglavnom sferičnih čestica sva tri primijenjena pepela. Visoki udio CaO (55.25%) i skoro potpuno odsustvo silicijumskih čestica (0.1%) u mineralnom fileru stvaraju jak afinitet prema bitumenu ostvarujući jake sile adhezije između čestica filera i bitumena, što se može dovesti u vezu sa visokim vrijednostima modula krutosti koje pokazuje kontrolna mješavina na niskim temperaturama.

Mješavine sa gatačkim pepelom, koji ima najveću zapreminsku masu (2.969Mg/m^3) pokazuju srazmjeran porast modula krutosti sa povećanjem sadržaja pepela. Gatačkom pepelu ide u prilog i izuzetno visok procenat CaO, čak 75%, i mali procenat SiO₂ (6%), što uzrokuje ostvarenje jakih veza bitumena i čestica ovog pepela. Gatački pepeo sadrži i veliki procenat čestica manjih od 10 μm , čak 56%, koje pomiješane sa bitumenom čine bitumenski malter, poboljšavajući reološke osobine bitumena. Zbog svoje veličine koja je manja od prosječne debljine bitumenskog omotača ove čestice učestvuju u omotaču zrna agregata, ostvarujući na taj način jake veze sa zrnima agregata. Porast modula krutosti sa većim sadržajem gatačkog pepela može se dovesti u vezu sa ovdje iznijetim činjenicama.

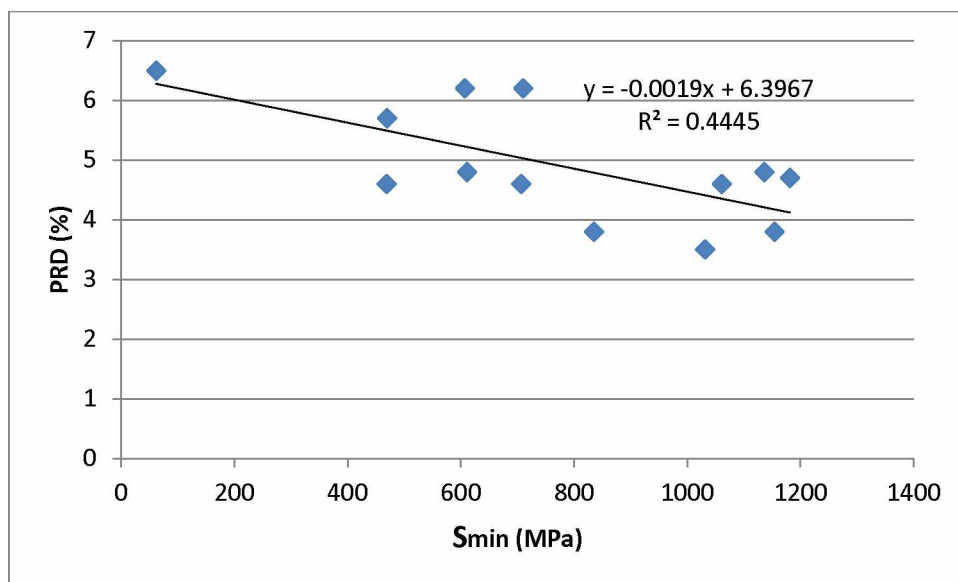
Mješavine sa pljevaljskim pepelom, koji ima najmanju zapreminsku masu (2.272Mg/m^3) pokazuju pad modula krutosti sa povećanjem sadržaja pepela. Ovom opadajućem trendu može se pridružiti i podatak visokog procenta SiO₂ (43%) u pljevaljskom pepelu koji nepovoljno djeluje na vezu bitumena i čestica pepela, kao i sferičan oblik i glatka površina čestica. Pad modula krutosti sa većim sadržajem pljevaljskog pepela može se dovesti u vezu i sa šupljinama u asfaltnoj mješavini koje za P₇₅ i P₁₀₀ iznose 6.5% i 7.1%, respektivno, što je na gornjoj dozvoljenoj granici, odnosno više od dozvoljenih 6.5% za habajući sloj.

Sve mješavine sa kosovskim pepelom imaju veću krutost od kontrolne mješavine na visokim temperaturama, ali se odlikuju nepravilnim trendom u pogledu vrijednosti modula krutosti i sadržaja pepela. Izrazito visoka vrijednost povećanja tačke

razmekšanja po metodi P&K (38.6°C) kojom se odlikuje kosovski pepeo, ukazuje na jak uticaj ovog pepela na ukrućivanje bitumena, što se dovodi u vezu sa ostvarenim vrijednostima modula krutosti mješavina K grupe na visokim temperaturama.

Kada se uporede rezultati modula krutosti dobijene na visokim temperaturama sa rezultatima otpornosti na trajnu deformaciju, može se uočiti da su veće vrijednosti minimalnog modula krutosti vezane za manje vrijednosti trajne deformacije, tj. S_{min} se može posmatrati kao indikator osjetljivosti na kolotrage; veća vrijednost parametra ukazuje na bolju otpornost na trajnu deformaciju.

Na slici 5.31 prikazana je zavisnost proporcionalne dubine kolotraga (PRD) od S_{min} i može se uočiti da rezultati PRD dobijeni opitom kolotražnja prilično koreliraju sa trendom S_{min} .



Slika 5.31 Zavisnost PRD od S_{min}

5.6. Rezime

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati drugog eksperimentalnog dijela koji se odnose na karakteristike asfaltnih mješavina spravljenih sa elektrofilterskim pepelom prema programu eksperimenta predstavljenom u trećem poglavlju. Izvršena je analiza i

diskusija rezultata poslije čega su izvedeni zaključci o uticaju primjene elektrofilterskog pepela na ispitana svojstva asfaltnih mješavina.

- VMA mješavina G grupe imaju generalno najveće vrijdnosti i ujednačene su u okviru grupe. VMA mješavina P i K grupe su veće od KM i imaju konstatnan prirast sa povećanjem procenta pepela, što je više izraženo za mješavine P grupe zbog krupnijih čestica pljevaljskog pepela.
- AV generalno prate iste trendove u okviru grupe kao i VMA. Sve mješavina G i K grupe zadovoljavaju uslov specifikacija ($< 6.5\%$), osim K_{100} koja neznatno prelazi uslov specifikacije. Mješavine P grupe sa manjim procentima zamjene (P_{25} i P_{50}) zadovoljavaju uslov specifikacija, dok P_{75} ima graničnu vrijednost AV, a mješavina P_{100} , sa AV od 7.1% prevazilazi zahtijevane uslove za 9.2% . U grupi K mješavina K_{100} ima neznatno veću vrijednost AV, dok ostale mješavine ove grupe zadovoljavaju uslov specifikacija.
- Vrijednosti za VFB zadovoljavaju sve mješavine, osim mješavine P_{100} koja ima neznatno manju vrijednost od zahtjeva specifikacija.
- Zapreminske karakteristike asfaltnih mješavina sa pepelom generalno zadovoljavaju zahtijevane uslove. Takođe, u poređenju sa kontrolnom mješavinom u većini slučajeva postižu iste ili bolje rezultate. Uočeno je da u okviru svake grupe mješavina određeni procenti primjene pepela daju zadovoljavajuće rezultate u pogledu posmatranog svojstva.
- Veće vrijednosti za stabilnost i manje za tečenje skoro svih mješavina sa pepelom u poređenju sa KM, rezultat su efekta koji imaju primijenjeni pepeli na ukrućivanje mastiksa, a time i asfaltne mješavine u odnosu na kameno brašno sa kojim je sačinjena KM. Ovaj efekat je više izražen na visokim temperaturama, što je u korelaciji sa dobijenim rezultatima modula krutosti. Povećanje stabilnosti i smanjenje tečenja u sprovedenom istraživanju skladu je sa zaključcima Andrioića (2013.) i Çelik (2008.), ali suprotna od Kar i sar. (2014.) koji su dobili smanjenje stabilnosti i povećanje tečenja u mješavinama sa pepelom. Stabilnost svih mješavina je veća od stabilnosti kontrolne mješavine, osim za mješavine P_{50} i K_{100} . Tečenje svih mješavina sa pepelom je manje od kontrolne mješavine, dok je Maršalov koeficijent svih mješavina sa pepelom veći od kontrolne mješavine.

- Otpornost na dejstvo vode, izražena preko ITSr, svih mješavina P i G grupe je veća od kontrolne mješavine. U K grupi jedino je mješavina K₂₅ veća od KM, dok za ostale mješavine vrijednost za ITSr opada sa povećanjem procenta pepela. Ovo upadljivo opadanje vrijednosti ITSr kod K grupe mješavina dovodi se u vezu sa jakim efekton ukrućivanja mastiksa sa kosovskim pepelom, zbog povećane vrijednosti $\Delta R\&B$, što mješavinu čini krtijom i rezultira manjim vrijednostima ITSr.
- Otpornost na trajnu deformaciju mješavina sa pepelom je generalno veća od kontrolne mješavine. Četiri mješavine koje imaju manju otpornost na trajnu deformaciju od KM su mješavine P grupe sa većim procentima pepela (P₇₅ i P₁₀₀) i mješavine G grupe sa manjim procentima pepela (G₂₅ i G₅₀), što je izraženo povećanim vrijednostima proporcionalne dubine kolotruga. Ove mješavine, takođe imaju i brži prirast deformacije izražen povećanim nagibom krive tečenja. Rastući trend vrijednosti PRD u P grupi mješavina, kao i opadajući trend PRD u G grupi dovodi se u vezu sa oblikom i teksturom površine čestica pepela. Izrazito sferičan oblik i glatka tekstura površine čestica, kao i krupnija granulacija pljevaljskog pepela, uzrokuju povećanje trajne deformacije sa povećanjem procenta pepela u P grupi, dok nepravilan oblik čestica hrapave površine i sitnozrnija granulacija gatačkog pepela, uzrokuju smanjenje trajne deformacije sa porastom pepela u G grupi. U K grupi mješavina prisutan je promjenljiv trend, ali sve mješavine ove grupe imaju bolju otpornost na trajnu deformaciju od KM.
- Modul krutosti na niskim temperaturama, za sve mješavine sa pepelom je manji u odnosu na kontrolnu mješavinu, što je povoljna karakteristika u pogledu otpornosti mješavine na niske temperature.
- Modul krutosti na visokim temperaturama, za sve mješavine K grupe, kao i za mješavine P grupe sa manjim procentima (P₂₅ i P₅₀) i mješavine G grupe sa većim procentima (G₇₅ i G₁₀₀) je veći od kontrolne mješavine, što ukazuje na otpornost mješavina na trajnu deformaciju.
- Rezultati ispitivanja modula krutosti su u korelaciji sa rezultatima ispitivanja na trajnu deformaciju.

- Trend pada otpornosti na trajnu deformaciju u P grupi mješavina sa porastom procenta pepela, je u korelaciji sa rezultatima ispitivanja modula krutosti na visokim temperaturama, koji za mješavine ove grupe, takođe ima trend pada sa porastom procenta pepela u mješavini.
- Takođe, trend rasta otpornosti na trajnu deformaciju u G grupi mješavina sa porastom procenta pepela, je u korelaciji sa rezultatima ispitivanja modula krutosti na visokim temperaturama, koji za mješavine ove grupe, takođe ima trend rasta sa porastom procenta pepela u mješavini.
- Sve mješavine K grupe pokazuju veću otpornost na trajnu deformaciju od KM, što je u korelaciji sa ostvarenim vrijednostima krutosti ove grupe mješavina, koje su sve veće od KM. Nepravilan trend rezultata otpornosti na trajnu deformaciju u odnosu na procenat pepela, zastupljen je i kod rezultata modula krutosti na visokim temperaturama.

6. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA

6.1. Zaključci

Poslednje dvije decenije obilježio je porast naučno-istraživačke djelatnosti u oblasti primjene alternativnih materijala u građevinarstvu, uključujući i primjenu elektrofilterskog pepela sa namjerom da se zaštiti životna sredina od negativnog uticaja otpadnog materijala i, sa druge strane, da se smanji eksploatacija prirodnog kamenog materijala u svrhu štednje prirodnih resursa. Dosadašnja istraživanja primjene pepela u asfaltnim mješavinama su pokazala da se elektrofilterski pepeo može koristiti kao zamjena za mineralni filer, ali i kao zamjena za određenu količinu bitumena.

Većina ispitivanja koja su obuhvaćena pregledom literature vršena su na asfaltnim uzorcima spravljenim prema Maršalovoj proceduri u laboratorijskim uslovima, dok je svega par ispitivanja prikazalo rezultate opita koji ukazuju na ponašanje asfaltnih mješavina tokom eksploatacije. U dostupnoj literaturi koja razmatra uticaj pepela na karakteristike asfaltne mješavine, nisu detaljno i sveobuhvatno ispitivane karakteristike primijenjenih pepela, a posebno su ograničeni podaci o ispitivanju koji se odnose na pepele raspoložive u regionu i u Crnoj Gori. Takođe, u literaturi se srijeću i kontradiktorni zaključci o uticaju elektrofilterskog pepela na svojstva asfaltnih mješavina. Generalno, sva istraživanja ukazuju na mogućnost primjene elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama u određenom procentu, kao i to da njegov uticaj na karakteristike asfaltne mješavine direktno zavisi od karakteristika samog pepela i procenta njegove primjene.

Ispitivanja sprovedena za potrebe ove disertacije odnose se na sagledavanje karakteristika asfaltnih mješavina spravljenih sa tri vrste elektrofilterskog pepela, različitih karakteristika, primijenjenih u različitim procentima zamjene standardnog mineralnog filera u asfaltnoj mješavini. Takođe, sprovedena su i detaljna ispitivanja primijenjenih pepela sa različitih aspekata, a pogotovo sa aspekta njihove ekološke podobnosti, koja su dokazala njihovu podobnost za primjenu u ovom istraživanju.

6.1.1. Zaključci u vezi sa rezultatima ispitivanja elektrofilterskog pepela

U cilju primjene u ovom istraživanju ispitani su uzorci elektrofilterskog pepela iz tri izvora: TE „Pljevlja“, TE „Gacko“ i TE „Kosovo B“. Sprovedene su analize mehaničkih, hemijskih i fizičkih svojstava pepela, ispitivanje sadržaja organskih materija i mineraloška karakterizacija. Ekološka podobnost uzorkovanih pepela sagledana je kroz ispitivanje prisustva teških metala, ispitivanja radioaktivnosti i opita izlučivanja.

Na osnovu rezultata sprovedenih ispitivanja može se zaključiti sledeće.

- Rezultati ispitivanja prisustva teških metala, ispitivanja radioaktivnosti i opita izlučivanja su pokazali da su sva tri pepela pogodna za ugradnju u asfaltna slojeva sa ekološkog stanovišta.
- Sadržaj organskih materija u svim pepelima je u granicama propisanih vrijednosti, što ove pepele preporučuje za primjenu u asfaltnim mješavinama.
- U pogledu fizičko-mehaničkih osobina glavni zaključci su: granulometrijski sastav gatačkog pepela u potpunosti zadovoljava kriterijum MEST EN 13043 u kojem su kriterijumi nešto strožiji od JUS B.B3.045. Pljevaljski pepeo, kao krupnozrniji ne zadovoljava zahtjeve čak ni za klasu II prema kriterijumima iz JUS B.B3.045. Kosovski pepeo ima neznatno manji prolaz na situ 0.125 i može se smatrati da zadovoljava uslove MEST EN 13043, dok ga manji prolazi na sitima 0.250 i 0.710 definišu kao krupnozrniji prema JUS B.B3.043, pri čemu ne zadovoljava kriterijume ni u pogledu klase II.
- Za razliku od mineralnog filera koji ima povoljni uglasto-prizmatični oblik čestica, pljevaljski pepeo ima sferičan oblik čestica, dok gatački i kosovski pepeli imaju kombinovano, sferičan i nepravilan oblik. U odnosu na MEST EN 13043, kao i u odnosu na stariji JUS B.B8.102, sva tri pepela imaju povećane vrijednosti šupljina po Rigdenu. Međutim, iskustvo pokazuje da te vrijednosti nisu neuobičajene za elektrofilterske pepele. Povećane vrijednosti tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice pokazuje gatački pepeo sa 28.8°C prevazilazi za nekoliko stepeni gornju graničnu vrijednost 25°C, dok je za kosovski pepeo ova veličina značajno iznad očekivanih vrijednosti za mineralni filer i iznosi 38.6°C. Bitumenski broj gatačkog pepela iznosi 27 ml, što je ispod

očekivanih vrijednosti za mineralne filere od oko 40ml. Ostali pepeli zadovoljavaju ovaj uslov.

- Generalni zaključak prvog dijela ispitivanja je da su sva tri ispitana elektrofilterska pepela pogodna za primjenu u asfaltnim mješavinama, kao djelimična ili potpuna zamjena za mineralni filer.

6.1.2. Zaključci u vezi sa rezultatima ispitivanja asfaltnih mješavina

Tri elektrofilterska pepela različitih fizičko-mehaničkih i hemijskih karakteristika primijenjena su kao potpuna ili djelimična zamjena za mineralni filer u različitim procentima. Izabrani procenti zamjene iznose 25%, 50%, 75% i 100% kako bi se promjene karakteristika mješavina sa pepelom sagledale u cjelokupnom rasponu moguće zamjene mineralnog filera pepelom. U cilju posmatranja direktnog uticaja pepela i procenta zamjene na karakteristike asfaltne mješavine AB11s surf, nije varijantisana količina bitumena, već je eksperiment sproveden sa količinom bitumena koja je određena kao optimalna za kontrolnu mješavinu spravljenju sa standardnim mineralnim filerom. Rezultati ispitivanja asfaltnih mješavina sadrže podatke eksperimentalnih mješavina upoređenih sa rezultatima kontrolne mješavine i zahtjevima specifikacija. U ovom dijelu eksperimentalnog istraživanja karakteristike asfaltnih mješavina sagledane su kroz analizu zapreminskih svojstava, stabilnosti, tečenja, otpornosti na dejstvo vode, otpornosti na trajnu deformaciju i modula krutosti.

Na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja asfaltnih mješavina sa djelimičnom ili potpunom zamjenom mineralnog filera elektrofilterskim pepelom, došlo se do sledećih zaključaka.

- Zapreminske karakteristike asfaltnih mješavina sa pepelom generalno zadovoljavaju zahtijevane uslove. Takođe, u poređenju sa kontrolnom mješavinom u većini slučajeva postižu iste ili bolje rezultate. Veće vrijednosti za stabilnost i manje za tečenje, skoro svih mješavina sa pepelom u poređenju sa kontrolnom mješavinom, rezultat su efekta koji imaju primijenjeni pepeli na ukrućivanje mastiksa, a time i asfaltne mješavine u odnosu na kameno brašno sa kojim je sačinjena kontrolna mješavina. Ovaj efekat je više izražen na visokim

temperaturama, što je u korelaciji sa dobijenim rezultatima otpornosti na trajnu deformaciju i modula krutosti.

- Otpornost asfaltnih mješavina na dejstvo vode ispitana je mjerenjem čvrstoće pri indirektnom zatezanju (ITS) suvih i vlažnih uzoraka. U poređenju sa kontrolnom mješavinom, kod devet od dvanaest eksperimentalnih mješavina izmjerena je veća otpornost na dejstvo vode, pri čemu mješavine G grupe pokazuju najveće vrijednosti u pogledu otpornosti na dejstvo vode, gdje mješavina G₅₀ pokazuje najveću vrijednost, 14% veću od kontrolne mješavine. Čitava P grupa pokazuje zadovoljavajuće rezultate, veće od kontrolne mješavine, dok mješavine K grupe pokazuju najmanje vrijednosti u pogledu otpornosti na dejstvo vode, gdje tri mješavine (K₅₀, K₇₅ i K₁₀₀) pokazuju rezultate manje od kontrolne mješavine. Mješavina K₇₅ se odlikuje najmanjom vrijednošću otpornosti na dejstvo vode, 10.6% manjom od kontrolne mješavine. Mješavine K₅₀, K₇₅ i K₁₀₀ pokazuju vrijednosti odnosa čvrstoće pri indirektnom zatezanju u vlažnom i suvom stanju (ITSR) manje od donje zahtijevane vrijednosti koja se srijeće u stranim specifikacijama. Propisima u Crnoj Gori nisu definisani minimalni uslove za otpornost asfaltnih uzoraka na dejstvo vode, ali u poređenju sa navedenim specifikacijama drugih zemalja, sve mješavine P i G grupe zadovoljavaju propisane uslove i može se zaključiti da, sa aspekta otpornosti asfaltnih mješavina na dejstvo vode, nema prepreke za primjenu pljevaljskog i gatačkog pepela u svim primijenjenim procentima. Međutim, rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo vode, pokazuju da kosovski pepeo doziran u procentima većim od 25% daje mješavine slabije otpornosti na dejstvo vode, što je prilično ograničenje primjene kosovskog pepela u većim procentima.
- Ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju uzoraka asfaltnih mješavina izvršeno je pomoću opita točkom. S obzirom na činjenicu da u Crnoj Gori ne postoji zvaničan dokument koji propisuje maksimalne vrijednosti za proporcionalnu dubinu kolotraga (PRD) i nagib krive tečenja (WTS) dobijeni rezultati su upoređeni sa specifikacijama zemalja iz okruženja. Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji (Putevi Srbije, 2012) propisuju maksimalnu dozvoljenu vrijednost za PRD od 5% za asfalt betone u habajućim slojevima. Primjena pljevaljskog pepela u većim procentima, 75% i 100%, kao i gatačkog

pepela u manjim procentima 25% i 50% daju mješavine koje prevazilaze ovaj propisani parametar za 30%, 14%, 24% i 24% respektivno. Sve ostale mješavine, uključujući i kontrolnu mješavinu, zadovoljavaju ovaj uslov. Međutim, Tehnička svojstva i zahtjevi za građevne proizvode za proizvodnju asfaltnih mješavina i za asfaltne slojeve kolnika (Hrvatske ceste, 2012) propisuju maksimalnu vrijednost za PRD od 7% za asfalt betone habajućih slojeva. Prema ovim tehničkim zahtjevima sve ispitane mješavine zadovoljavaju u pogledu proporcionalne dubine kolotraga, tj. svi pepeli primijenjeni u eksperimentu zadovoljavaju uslov primjene u pogledu otpornosti asfaltne mješavine na trajnu deformaciju. Hrvatske specifikacije, takođe propisuje i gornju graničnu vrijednost za WTS, gdje se navodi da brzina nastanka kolotraga ne bi trebala da prelazi vrijednost od $0.07 \text{ mm}/10^3$ ciklusa. Uočljivo je da iste mješavine koje nisu zadovoljile uslov za PRD po srpskim specifikacijama (P_{75} , P_{100} , G_{25} i G_{50}), po hrvatskim specifikacijama, imaju prekoračenje vrijednosti WTS za 11%.

- Modul krutosti je ispitan na cilindričnim uzorcima pod dejstvom cikličnog opterećenja pri indirektnom zatezanju. Ispitivanje je pokazalo da na niskim temperaturama, sve ispitane mješavine imaju manju krutost od kontrolne mješavine, što predstavlja povoljnu karakteristiku asfaltne mješavine u pogledu otpornosti na niske temperature. Na visokim temperaturama, sve mješavine K grupe pokazuju veću krutost od kontrolne mješavine, što ukazuje na veću otpornost ovih mješavina na trajnu deformaciju i konzistentno je sa rezultatima ispitivanja otpornosti na trajnu deformaciju. Mješavine P grupe sa manjim sadržajem pepela (P_{25} i P_{50}), kao i mješavine G grupe sa većim sadržajem pepela (G_{75} i G_{100}) imaju veće vrijednosti modula krutosti od kontrolne mješavine. Takođe je uočena korelacija rezultata minimalnog modula krutosti i trajne deformacije, što se može smatrati i potvrdom ispravnosti rezultata.

Sledeći zaključci izvedeni na osnovu rezultata eksperimentalnog istraživanja su u saglasnosti sa postavljenim ciljevima disertacije.

- Zamjena standardnog mineralnog filera elektrofilterskim pepelom iz TE “Pljevlja”, TE “Gacko” i TE “Kosovo B” je moguća.
- Optimalna količina zamjene zavisi od vrste pepela i ispitivanog svojstva asfaltne mješavine.

- Za sve ispitane karakteristike asfaltnih mješavina, predviđene planom eksperimenta, utvrđen je procenat zamjene određenog pepela koji doprinosi poboljšanju razmatranog svojstva.
- Na osnovu dobijenih i razmatranih rezultata ispitivanja, kao i izvedenih zaključaka moguće je predložiti smjernice za primjenu i dalja istraživanja na ovom polju.

Nakon sprovedenog istraživanja i analiziranih rezultata, sa aspekta polaznih hipoteza disertacije, može se zaključiti sledeće:

- Rezultati prvog eksperimentalnog dijela pružili su mogućnost zaključka da su ispitani elektrofilterski pepeli podobni materijali za upotrebu u putogradnji.
- Primjenom svakog od tri elektrofilterska pepela, kao djelimične ili potpune zamjene za kameno brašno u asfaltnim mješavinama, ustanovljen je procenat pri kome su zadržane ili poboljšane određene karakteristike asfaltne mješavine.
- Procentualno učešće elektrofilterskog pepela u asfaltnoj mješavini utiče na ispitane karakteristike asfaltne mješavine.
- Pepeli različitih fizičko-mehaničkih i hemijskih karakteristika imaju različit uticaj na svojstva asfaltnih mješavina.

Dobijeni rezultati eksperimentalnog istraživanja ukazuju da su ostvareni postavljeni ciljevi i da su potvrđene polazne hipoteze.

S obzirom na zaključke razmatrane literature i uočenih nedostajućih ispitivanja na polju analize svojstava elektrofilterskog pepela, kao i karakteristika asfaltnih mješavina spravljenih sa pepelom, mogu se navesti dva osnovna doprinosa ove disertacije.

1. Tri elektrofilterska pepela, lokalnog porijekla, detaljno su ispitana sa aspekta ekološke podobnosti, sadržaja organskih materija, fizičko-mehaničkih svojstava, hemijskih svojstava i mineraloškog sastava. Rezultati ovih ispitivanja omogućili su bolje sagledavanje uticaja pojedinačnih svojstava pepela na karakteristike asfaltnih mješavina, što je unaprijedilo zaključke disertacije.
2. Ispitane su asfaltne mješavine sa dodatkom elektrofilterskog pepela sa aspekta njihovih zapreminskih karakteristika i ponašanja u odnosu na otpornost na vodu, otpornost na trajnu deformaciju i promjene krutosti u rasponu temperatura/frekvencija opterećenja, što je posebno važno, jer nije zastupljeno u dostupnoj literaturi.

6.2. Preporuke za dalja istraživanja

Sagledavanjem rezultata istraživanja karakteristika asfaltnih mješavina sa elektrofilterskim pepelom, dostupnim u literaturi, stiže se opsežan uvid u karakteristike ovih mješavina. Istraživanja na asfaltnim mješavinama spravljenim sa djelimičnom ili potpunom zamjenom mineralnog filera elektrofilterskim pepelom, sprovedena za potrebe ove disertacije, dala su uvid u zapreminske karakteristike ispitanih mješavina, kao i otpornosti na negativno dejstvo vode, otpornosti na trajnu deformaciju i modula krutosti pri različitim frekvencijama opterećenja i na različitim temperaturama. Ipak, i dalje postoji nekoliko pravaca u kojima bi trebalo produbiti poznavanje ponašanja asfaltnih mješavina sa pepelom i unaprijediti karakteristike istih varijantisanjem komponentnih materijala u zavisnosti od njihovih karakteristika. Ovdje su ponuđeni neki od pravaca u kojima se može nastaviti naučno-istraživački rad iz ove oblasti.

- Na osnovu rezultata dobijenih u sprovedenom eksperimentu, suziti matricu eksperimenta i odrediti optimalnu količinu bitumena za svaku mješavinu.
- Na osnovu rezultata iz svjetske literature izvršiti ispitivanje mješavina u kojima je izvršena djelimična zamjena bitumena elektrofilterskim pepelom i ispitati mogućnot primjene ispitivanih pepela u tu svrhu.
- Ispitati ponašanje reoloških karakteristika mastiksa sa istim pepelima, što bi omogućilo detaljnije sagledavanje interakcije između bitumena i pepela u pogledu otpornosti na trajnu deformaciju, zamor i niske temperature.
- Ispitane pepele primijeniti u asfaltnim mješavinama za noseće slojeve, uključujući i ispitivanje otpornosti na zamor i otpornosti na niske temperature mješavina sa elektrofilterskim pepelom.
- Sprovedeni eksperiment omogućava da se izgrade opitne dionice i prati ponašanje asfaltnih slojeva sa pepelom u eksploataciji.
- Analizirati upotrebu elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama sa ekonomskog aspekta:
 - efekat primjene pepela na smanjenje upotrebe mineralnog filera;
 - efekat primjene pepela na smanjenje potrebne količine bitumena.
- Izvršiti procjenu uticaja na životnu sredinu primjenom LCA (Life Cycle Assessment) metodologije.

7. LITERATURA

- AASHTO M 17-07, 2007, Standard specification for mineral filler for bituminous paving mixtures. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO M 295, 2011, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- AASHTO, 1993, Guide for the Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Adorjányi K. & Széchenyi I., 2006., Properties of Hot Asphalt Mixes Containing Fly Ash Filler, International Road Conference Budapest, 23-25.04.2006, Budapest, Budapest, Volume: pp.1-6.
- Adriano, C. 2001., Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. 2nd Edition, Springer, New York, 867.
- Ahmed, K., Muhammad, I., Sarfraz, A., Arsalan, A., Afaq, K., 2014., Experimental Investigation of Strength and Stiffness Characteristics of Hot Mix Asphalt (HMA). Procedia Engineering, 77, pp.155–160.
- Ali, N., Chan, J.S., Simms, S., Bushman, R., Bergan, A.T., 2013., Mechanistic Evaluation of Fly Ash Asphalt Concrete Mixtures. International Journal of Innovation and Applied Studies, ISSN 2028-9324 Vol.3 No. 4, pp.1101-1190, Innovative Space of Scientific Research Journals.
- Al-Suhaibani, A.R. & Tons, E.T., 1991., Properties of Fly Ash-extended asphalt concrete mixes. Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board, No. 1323:123-133.

- Al-Suhaibani, A.S. & Tons, E.T., 1991., Properties of Fly Ash-Extended Asphalt Concrete Mixes; Transportation Research Record 1323: 123–133.
- Al-Suheibani, A.R., 1968., The Use of Fly Ash as an Asphalt Extender. PhD thesis, Univ. of Michigan, University of Microfilms International, Ann Arbor, MI.
- American Coal Ash Association (ACAA). 2006., Coal Combustion Product (CCP) Production and Use. Aurora, CO: American Coal Ash Association; August, 2007.
- American Coal Ash Association: Coal Combustion Products, Key Findings 2015, U.S. Historical Perspective and Forecast, 2015.
- American Society for Testing and Materials, 1994 Annual book of ASTM Standards, Vol.04.04. Rubber, Natural and Synthetic – General Test Methods, 1994.
- Anderson, D.A. & Tarris, J.P. 1982., Adding Dust Collection Fines to Asphalt Paving Mixtures. Transportation Research Board, NCHRP report 252.
- Anderson, D.A., 1987., Guidelines on the Use of Baghouse Fines, National Asphalt Pavement Association, Information Series 101.
- Androić, I., Kaluđer, G., Komljen, M., 2013., Usage of the Fly Ash in Hot Mix Asphalt Mixes. XXVIII International Baltic Road Conference, Vilnius, Lithuania.
- Asphalt Institute design method, 2001, SP-1 Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specifications and Testing.
- ASTM C 618-05: 2006., Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- ASTM D 3497:2003., Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.
- ASTM D 4123: 1995., Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures.

- Austroroads, 2004., Pavement Design - A Guide to the Structural Design of Road Pavements, AP-G17/04, Austroroads, Sidney.
- Barić, M.S., 2015., Kvalitet bitumena u Hrvatskoj I njen uticaj na kvalitet ugrađenih asfaltnih slojeva; Seminar Asfaltni kolovozi, Opatija mart 2015.
- Barksdale R.D., 1967. Predicting Performance of Bituminous Surfaced Pavements, Proceedings of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 321-340, University of Michigan Ann Arbor, United States of America.
- Baščarević, Z., Komljenović, M., Petrašinović Stojkanović, LJ. Jovanović, N., Rosić, Ršumović, A. M., 2006., Ispitivanje svojstava elektrofilterskog pepela termoelektrana u cilju njegove upotrebe kao sekundarne sirovine za proizvodnju Portland cementnog klinkera. 6. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "KVALITET 2009", Neum, B&H.
- Bazin, P., & Saunier, J., 1967., Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes. Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan.
- Bedaković, V. (1964) Asfalt, Društvo građevinskih inženjera i tehničara, Zagreb, I izdanje.
- Brown, E.R., 1987., Design of Asphalt Mixture for High Tire Pressures, Austin, Texas.
- Brzaković, P. & Stamenković, V., 1971., Utvrđivanje osnovnih karakteristika pepela iz nekih jugoslovenskih termoelektrana. Rudarski institut, Beograd, Studija I arhivi RI.
- Butul, B., 2000., Performance characteristics of coal fly ash and wood ash-modified asphalt mixtures, Master thesis, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida.
- Canadian Standard Association CSA, <https://www.csagroup.org/standards/>

- Carpenter, C.A., 1952., A comparative study of fillers in asphaltic concrete; Public Roads, Vol. 27, No. 5, pp.101-110.
- Çelik, Ö., 2008., Influence of Fly Ash on the Properties of Asphalt, Petroleum Science and Technology; Volume 26, Issue 13; pp. 1571–1582.
- Cerni G, Bocci E., Cardone F., Corradini A. 2017., Correlation Between Asphalt Mixture Stiffness Determined Through Static and Dynamic Indirect Tensile Tests; Arab Journal Scientific Engineering, Vol. 42, pp. 1295–1303.
- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., Iwanski, M. M., 2016., Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen, Construction and Building Materials, Vol. 126, Nov.2016pp. 108-118
- Cmiljanić, S., Vujanić, V., Rosić, B., Jotić, S., Tošović, S., Mitrović, P., Vuksanović, B., 2010., Korištenje elektrofilterskog pepela za potrebe putogradnje. Put i saobraćaj, broj 1.
- Collins RJ & Ciesielski SK., 1994., Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board; Washington, DC.
- COST 333, European Commission, 1999. Development of new pavement design method - Final report of the action, Brussels, Belgium.
- Craous, J., I. Ishai, & A. Sides, 1978., Some Physico -Chemical Aspects of the Filler Effects and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixture. Proceedings, Association of asphalt Paving Tehnologist, Vol. 47.
- Design Guide Draft – 2.4 Modulus of Elasticity for Major Material Groups, 2002 NCHR Pavements, AP-G17/04, Austroads, Sidney.
- Despotović, Ž., 2016., Predavanje u okviru obuke kontinuiranog profesionalnog usavršavanja članova Inženjerske komore Srbije, Beograd 03.11. 2016 god.

- Dockter BA & Jagiella DM., 2005., Engineering and environmental specifications of state agencies for utilization and disposal of coal combustion products. In: 2005 world of coal ash conference, Lexington, KY.
- Dukatz E. L. & Anderson D. A., 1980., The Effect of Various Fillers on the Mechanical Behavior of Asphalt and Asphaltic Concrete. Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 49, pp. 530-549.
- Dureković A. & Mladenović G., 2015., The performance of bitumen mastics with the addition of fly ash, Bituminous Mixtures & Pavements VI, A. Nikolaides, Ed., pp. 115–122, Taylor and Francis Group, London, UK.
- Dureković, A. & Mladenović, G., 2015., The Performance of bitumen mastics with the addition of fly ash, Bituminous Mixtures & Pavements VI – Nikolaides (Ed.), Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02866-1.
- Edil T.B., Acosta H.A., Benson C.H., 2006., Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash. J Mater Civ Eng; 18:283-94.
- Eisenmann, J., & A. Hilmer, 1987., Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt-Pavements-Experiments and Theoretical Investigations. Proceedings, Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, pp. 392-403.
- Environmental Protection Agency - EPA 2007., Fiscal Year 2007 Performance.
- EN 12879:2000 Characterization of sludges - Determination of the loss on ignition of dry mass.
- EN 12506:2003 Characterization of waste. Analysis of eluates. Determination of pH, As, Ba, Cd, Cl-, Co, Cr, Cr VI, Cu, Mo, Ni, NO₂-, Pb, total S, SO₄²⁻, V and Zn.
- EN 13370:2003 Characterization of waste - Analysis of eluates - Determination of Ammonium, AOX, conductivity, Hg, phenol index, TOC, easily liberatable CN-, F-.

- Eric, J.M. & J.F. Shook, 1978., The Effect of Baghouse Fines on Asphalt Mixtures. The Asphalt Institute, Research Report 78-3 (Rr-78-3).
- European Aggregate Association, Annual Review 2017-2018, <http://www.uepg.eu/uploads/Modules/Publications/uepg-annual-review-2017-2018.pdf>, (pristupljeno 28. jula 2019).
- European Asphalt Pavement Association, <https://eapa.org/>
- Faleh Al-Ani A.; 2017., Effect of Fly-ash on The Performance of Asphalt Concrete Mixes; Journal of Babylon University, Engineering Sciences, Vol.25, No.5, pp. 1693-1707.
- Federal Highway Administration (FHWA), 2003., Fly Ash Fact for Highway Engineers. American Coal Fly Ash Association (ACAA); Report 06-13-2003.
- FHWA 2003 - Federal Highway Administration, American Coal Ash Association (ACAA). Fly ash facts for highway engineers. 06-13-2003. FHWA-IF-03-019
- Finn, F. N., 1967., Factors Involved in the Design of Asphalt Pavement Surfaces. Transportation Research Board, Report No. 39, pp. 1-112.
- Flintsch, G. W., Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., Mokarem, D., 2005. Laboratory Tests for Hot-Mix Asphalt Characterization in Virginia, Report VTRC 05-CR22. Virginia.
- Fox, J.M., 2017., Fly Ash Classification – Old and New Ideas, Conference in Lexington, KY, May 9-11, 2017., <http://www.flyash.info/>
- Garba, R., 2002., Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures, Doctoral thesis submitted to the Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology.
- Grabowski, W., Wilanowicz, J., Sobol, T., 2009., Structural and Functional Properties of Mineral Fillers Modified with Hydrated Lime. Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (MAIREPAV6), Torino.

- Grbović, M., Košutić, Lj., Knežević, D., 1986., Hidrauličko deponovanje pepela. Separat I jugoslovensko-poljskog simpozijuma o PMS, Opatija.
- Hicks, R. G., Finn, F. N., Monismith, C. L., Leahy, R. B., 1993. Validation of SHRP binder specification through mix testing. J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 62, pp. 565–614.
- Hofstra, A., & Klomp, A.J.G., 1972., Permanent Deformation of Flexible Pavements Under Simulated Road Traffic Conditions, Proceedings, Third International Conference on tire Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, London, pp.613-621.
- <http://www.zelenazemlja.com/vest.php?id=19&str=2> ažurirano 03.03.2011.
- Hu, S., Zhou, F., Hu, X., Scullion, T., Qi, X., Walubita, L. F., Claros, G., 2008., Consideration of HMA Resilient Modulus (Mr) for M-E Pavement Design and Analysis. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 77, pp. 663–708.
- Hucnar, J., 1985., Znaczenie procesu grudkowania w gospodarce popiołowej, Zbornik simpozijuma Granulacija – stan techniki i perspektywy rorwojy procesow i aparaty, Pulawy, pp.5.1-5.15.
- Indian Roads Congress, 2008., Tentative specifications for stone matrix asphalt, IRC: SP: 79.
- Jitsangiam,P, Huan,Y., Siripun, K., Leek, C., Nikraz, H., 2012., Effect of Binder Content and Active Filler Selection on Foamed Bitumen Mixtures: Western Australian Experience; ISSN 1997-1400 International Journal of Pavement Research and Technology Vol. 5, No. 6, pp. 411-418
- Joint Committee on Powder Diffraction Standard,s Anal. Chem. 1970, 42, 11, 81A-81A
- Publication Date:September 1, 1970, <https://doi.org/10.1021/ac60293a779>

- Jovanović, M., Mijušković, A., Šeper, A., 2011., Mechanical Properties of Bituminous Aggregate Mixture BNS22A Prepared with Fly Ash from Power Plant “Gacko” as a Filler Replacement. 15th International Research/Expert Conference ”Trends in the Development of Machinery and Associated Technology” TMT, Prague, Czech Republic.
- JUS U.E4.014 rojektovanje i gradenje puteva - Izrada habajucih slojeva od asfaltnih betona po Vrućem postupku - Tehnički uslovi
- Kamal, M. A., Shazib, F., Yasin, B., 2005. Resilient Behaviour of Asphalt Concrete under Repeated Loading & Effects of Temperature. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 1329-1343.
- Kandhal, P. S., Cooley, L. A., 2003., NCHRP Report 508: Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Kandhal, P.S., Sandvig, L.D., Koehler, W.C., Wenger, M.E., 1973., Asphalt Viscosity-Related Properties of In-Service Pavements in Pennsylvania. ASTM , Special Technical Publication No.532.
- Kar D., Panda M., Giri J. P., 2014., Influence of fly ash as a filler in bituminous mixes, Journal of Engineering and Applied Science, Vol. 9, No. 6, pp. 895–900.
- Kisić, D., Miletić, S., Janačković, Đ., Todorović, D., Radonjić, V., 2012., Prirodna radioaktivnost letećeg pepela iz termoelektrane Nikola Tesla B. I simpozijum: Odsumporavanje dimnih gasova, IV savetovanje deponije pepela i šljake i jalovine u termoelektranama i rudnicima, sa međunarodnim učešćem, Palić, str. 217–227.
- Kliwer, J., Zeng, H., & Vinson, T., 1996. Aging and Low-Temperature Cracking of Asphalt Concrete Mixture. Journal of Cold Regions Engineering, Vol.10, No.3, pp. 134–148.
- Knežević, D., 1996., Possibilities and Conditions for Ash Self-solidification Ash Generated from Kosovo-B Thermal Power Plant, Mining Science and Technology, Beograd, Vol. 1, No. 1-2, pp. 19-36.

- Knežević, D., 2015., Odlaganje industrijskog otpada, Udžbenik za istoimeni predmet; Rudarsko – geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Li Y., Zhou H., Su L., Hou H., Dang L., 2017., Investigation into the application of construction and demolition waste in urban roads, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, Article ID 9510212, 12 pages.
- Likitlersuang S. & Chompoorat T., 2016., Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 9, No. 5, pp. 337–344.
- Loulizi, A., Flintsch, G. W., Al-Qadi, I. L., Mokarem, D., 2006., Comparing Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt as Material Properties for Flexible Pavement Design, *Transportation Research Record*, No. 1970, pp. 161–170.
- Mahvash S., Popez-Querol S., Bahadori-Jahromi A., 2017., Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization,” *Heliyon*, Vol. 3, No. 3.
- Mashifana T.P., Okonta F. N., Ntuli F., 2018., Geotechnical properties and microstructure of lime-fly ashphosphogypsum-stabilized soil, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Article ID 3640868, 9 pages.
- Matsumoto S., Ogata S., Shimada H., Sasaoka, T., Kusuma, G.J., Gautama, R.S., 2016. Application of coal ash to postmine land for prevention of soil erosion in coal mine in Indonesia: utilization of fly ash and bottom ash, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, Article ID 8386598, 8 pages.
- McCarthy, G.J., Solem, J.K., Manz, O.E., Hassett, D.J., 1990. Use of Database of Chemical Mineralogical and Physical properties of North American Fly Ash Study the Nature of Fly Ash and its Utilization as a Mineral Admixture in Concrete, *Material Research Symposium Proceedings*, Material Research Society, Vol. 178, pp. 3-33.
- McGennis, R.B., S. Shuler, H.U. Bahia; 1994., Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods. FHWA, Report No.FHWA-SA-94-069, July 1994.

M-EPDG – Mechanical-Empirical Pavement Design Guide, 2008.

Melentjev, V.A., 1978., Ash and Slag Materials and Ash Disposal, Energy, Moscow.

MEST EN 12697-34:2013 Asfaltne mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 34: Ispitivanje po Maršalu (Marshall).

MEST EN 12697-12:2010 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 12: Određivanje osjetljivosti bitumenskih uzoraka na vodu.

MEST EN 12697-26:2013 Aneks C Asfaltne mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 26: Krutost.

MEST EN 12697-22:2010+A1:2010 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 22: Tragovi točkova.

MEST EN 1097-7:2009 Ispitivanja mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Dio 7: Određivanje zapreminske mase kamenog brašna - Piknometarska metoda.

MEST EN 1097-4:2009 Ispitivanja mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Dio 4: Određivanje šupljina u suvom sabijenom kamenom brašnu.

MEST EN 13108-1:2017 Bitumenske mješavine - Specifikacije materijala - Dio 1: Asfalt beton

MEST EN 13179-1:2015 Ispitivanja kamenog brašna koje se koristi u bitumenskim mješavinama - Dio 1: Ispitivanje pomoću delta prstena i kuglice.

MEST EN 13179-2:2010 Ispitivanja kamenog brašna koje se koristi u bitumenskim mješavinama - Dio 2: Bitumenski broj.

MEST EN 13656:2018 Karakterizacija otpada - Mikrotalasna razgradnja u smješi fluorovodonične (HF), azotne (HNO₃) i hlorovodonične (HCl) kisjeline radi određivanja elemenata.

MEST EN 12457-4:2018 Karakterizacija otpada - Leaching (test mobilnosti)- Ispitivanje usklađenosti leaching-a zrnastih otpadnih materijala i muljeva - Dio 4:

Jednostepeno šaržno ispitivanje pri odnosu tečno-čvrsto od 10 l/kg za materijale sa veličinom čestica manjom od 10 mm (bez ili sa smanjenjem veličine čestica).

MEST EN 933-10:2009 Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata - Dio 10: Ocjena sitnih čestica - Razvrstavanje kamenog brašna (sijanje vazdušnim mlazom).

MEST EN 1097-6:2015 Ispitivanja mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Dio 6: Određivanje zapreminske mase zrna i upijanja vode.

MEST EN 933-8:2016 Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata - Dio 8: Ocjena sitnih (finih) čestica - Ispitivanje ekvivalenta pijeska.

MEST EN 1426:2016 Bitumen i bitumenska veziva - Određivanje penetracije iglom.

MEST EN 1427:2016 Bitumen i bitumenska veziva - Određivanje tačke razmekšavanja - Metoda prstena i kuglice.

MEST EN 12591-A:2010 Bitumen i bitumenska veziva - Specifikacije bitumena za asfaltne kolovoze.

MEST EN 15326:2010 Bitumen i bitumenska veziva - Mjerenje gustine i specifične težine - Metoda pomoću piknometra sa kapilarnim čepom.

MEST EN 12697-6-procedure B:2013 Asfaltne mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 6: Određivanje zapreminske mase bitumenskih uzoraka.

MEST EN 12697-5-procedure C:2010 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 5: Određivanje maksimalne gustine.

MEST EN 12697-8:2010 Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 8: Određivanje karakteristika šupljina u bitumenskim uzorcima.

MEST EN 12697-34:2013 Asfaltne mješavine - Metode ispitivanja vrućih asfaltnih mješavina - Dio 34: Ispitivanje po Maršalu (Marshall).

- Mihailovic, A., 2015., Fizičke karakteristike zemljišta i distribucija teških metala na gradskom području Novog Sada, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku.
- Mikoč, M. & Marković, D., 2010., Influence of Slag, Fly Ash and Silica on the Mechanical and Physical Properties of Asphalt. Tehnički vjesnik, Vol.17, No.4, pp. 505-514.
- Milosavljević, P., 1974., Metode ispitivanja mineralnih sirovina u pripremi mineralnih sirovina. Rudarski institute, Beograd.
- Ministry of Road Transport and Highways (MoRTH), 2013., Specifications for Road and Bridgeworks, Fifth Revision, Indian Roads Congress, New Delhi, India.
- Mistry, R. & Roy, T.K., 2016., Effect of Fly Ash as Alternative Filler in Hot Mix Asphalt. Perspectives in Science, Vol. 8, pp. 307-309.
- Mohammadafzali M., Ali H., Musselman J. A., Sholar G.A., Massahi A., 2017., The effect of aging on the cracking resistance of recycled asphalt, Advances in Civil Engineering, vol. 2017, Article ID 7240462, 7 pages.
- Monismith, C. L., Epps, J. A., Kasianchuk, McLean, D. B., 1971., Asphalt Mixture Behavior on Repeated Flexure. Report No. TE 70-5, University of California, Berkeley, 303.
- MORTH, 2013., Specifications for Road and Bridge Works, 5th revised edition, Indian Roads Congress (IRC), Ministry of Road Transport & Highways, India.
- Muraya, P. M., 2007., Permanent Deformation of Asphalt Mixtures, Doctoral Dissertation, Technische Universiteit Delft, ISBN-13: 978-90-9021895-3.
- NCHRP 01-37A, 2004. Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Draft Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

- NCHRP RPT 468-a, 2002., Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements, Project C1-34A FY'99, ISBN 0-309-06721-9, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- NCHRP RPT 580, 2007. Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Nevelt, G., & Thanfold, H., 1988., Evaluation of the Resistance to Deformation of Different Road Structures and Asphalt Mixtures Determined in the Pavement-Rutting Tester. Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 57.
- Panteleev, V. G., 1985, Composition and Properties of Sols and Slag TES, Energoatomizdat, Moscow.
- Pavement Structures in Florida, Report BC-352-12, Florida Department of ASTM C 618-05 (2005) Standard specification for fly ash and row or calcined natural puzzolan for mineral admixture in Portland cement concrete ASTM.
- Pell, P. S. & Brown, S. F., 1972.. The Characteristics of Materials for the Design of Flexible Pavement Structures, Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, 326.
- Pellinen, T.K. & Xiao, S., 2006., Stiffnes of Asphalt Mix, Final Report FHWA/IN/JTRP-2005/20, Joint Transportation Research Program, Project No. C-36-31M, File No. 2-11-13, SPR -2644, Purdue University West Lafayette, Indiana, March 2006.
- Pellinen, T.K., 2004., Conceptual Performance Criteria for Asphalt Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 73, pp.337- 366.
- Peploe R.J. & Dawson A., 2006., Environmental Impact of Industrial By-products in Road Construction – a Literature Review, Land Transport New Zealand Research Report 308. ISBN 0-478-28720-8ISSN 1177-0600

- Pfeiffer, J.Ph., 1950., Properties of Asphaltic Bitumen, Ed.,Elsevier Publishing Company, Inc., NewYork, First Edition.
- Ping, W. V., & Xiao, Y., 2007., Evaluation of the Dynamic Complex Modulus Test and Indirect Diametral Test for Implementing the AASHTO 2002 Design Guide for Pavement Structures in Florida, Report BC-352-12, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL.
- Pourtahmasb M. S. & Karim M. R., 2014., Utilization of recycled concrete aggregates in stone mastic asphalt mixtures,” Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2014, Article ID 902307, 9 pages.
- Pravilnik o bližim karakteristikama lokacije, uslovima izgradnje, sanitarno-tehničkim uslovima, načinu rada i zatvaranja deponija, "Službeni list Crne Gore", br. 031/13.
- Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije životne sredine i o načinu sprovođenja dekontaminacije, Sl. list SRJ br. 9/99.
- Pravilnik o granicama sadržaja radionukleida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet, Službeni list RS br. 86/2011.
- Prezzi, M., Bandini. P., Carraro J. A. H., P. J. M. Monteiro, 2011., Use of recyclable materials in sustainable Civil engineering applications, Advances in Civil Engineering, Vol. 2011, Article ID 896016, 2 pages.
- Putevi Srbije 2012, Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, Javno preduzeće Putevi Srbije.
- Radević, A., 2017., Karakteristike asfaltnih mešavina sa agregatom od recikliranog betona, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Ramme B. W., Covi A., Faheem A., Sobolev K., 2016., Fly Ash - An Important Ingredient for use in Hot-Mix ASHphalt Concrete, Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Las Vegas, USA, August 7-11.

- Rashad A.M., 2015., A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement - a guide for Civil Engineer, International Journal of Sustainable Built Environment, Vol. 4, No. 2, pp. 278–306.
- Reid, J. M., Evans, R. D., Holnsteiner, R., Wimmer, B., Gaggli, W., Berg, F., Pihl, K. A., Milvang-Jensen, O., Hjelm, O., Rathmeyer, H., François, D., Raimbault, G., Johansson, H. G., Håkansson, K., Nilsson, U., Hugener, M., 2001., ALT-MAT Contract No.: RO-97-SC.2238, Project funded by the European Commission under the transport RTD programme of the 4th framework programme.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. & Kennedy, T. W., 1996., Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, Lanham, Maryland, United States of America.
- Rongali, U., Singh, G., Chourasiya, A., Jain, P.K., 2013., Laboratory investigation on use of fly ash plastic waste composite in bituminous concrete mixtures; 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG); ScienceDirect; Procedia - Social and Behavioral Sciences Vol. 104, pp. 89 – 98.
- Sahu V., Srivastava A., Misra A. K., Sharma A. K., 2017., Stabilization of fly ash and lime sludge composites: assessment of its performance as base course material, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 475–485.
- Scrivener K.L., John V. M., Gartner E. M., 2018., Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, Cement and Concrete Research, vol. 114, pp. 2–26.
- Sharma, V.; Chandra, S.; Choudhary, R., 2010., Characterization of Fly Ash Bituminous Concrete Mixes, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 22, No. 12, pp. 1209-1216.
- Shu, X., Huang, B., Qian, G., 2010., A Practical Method for Converting Resilient Modulus to Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures, 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya, Aichi, Japan, pp. 797-806.

- Sobolev, K., Flores, I.V, Saha, R. Wassiudin, N.M., 2014., The Effect of Fly Ash in the Rheological Properties of Bituminous Materials, *Fuel*, Vol. 116, 15 January 2014, pp.471477
- Sobolev, K., Flores, I.V., Bohler J. D., Faheem, A., Covi A., 2013., Application of Fly Ash in ASHphalt Concrete: from Challenges to Opportunities, *World of Coal Ash Conference*, April 22-25, 2013, Lexington, Kentucky, USA.
- Souliman M. I. & Eifert A., 2016., Mechanistic and economical characteristics of asphalt rubber mixtures, *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2016, Article ID 8647801, 6 pages.
- Sousa, J. B., Craus, J., Monismith, C. L., 1991., Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete (SHRP-A/IR-91-104). Strategic Highway Research Program, Washington, DC.
- Strineka A., Putrić Brkić J., D. Sekulić, 2010., Utjecaj sasatava na deformabilnost asfalta; *Građevinar* Vol.62, No.9, pp. 803-811.
- Sun, J.S., Dou,Y.M., Chun-feng Yang,C.F., Xiao,T., 2011., Study On The Performances of The Mixture of High Calcium Fly Ash and Fly ash in Highway Application. Road Pavement and Material Characterization, Modeling and Maintenance; Geotechnical Special Publication No.213 ASCE.
- Sund, E. K., 2002., Optimal Road Maintenance and Operations – Results of New Research and Analysis in Norway, *NORDIC Road and Transportation Research*, NPRA, Norway.
- Tangella, R., Craus, J., Deacon, A., Monismith, L., 1990., SHRP-A-003-A, Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures, TM-UCB-A- 003A-89-3.
- Tehnička svojstva i zahtjevi za građevne proizvode za proizvodnju asfaltnih mješavina i za asfaltne slojeve kolnika, 2012, Hrvatske ceste.
- Tehnički uslovi za građenje puteva u Republici Srbiji, 2012., Putevi Srbije

- Tjan, A., & Napitupulu, R. 2013., Verification of Resilient Modulus Prediction of Asphalt Mixtures, Eastern Asia Society for Transportation Studies, Paper presented at the Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies.
- Tons E. et al. 1983., Fly Ash as an Asphalt Reducer in Bituminous Base Courses. Report prepared by the University of Michigan; The Board of Water and Light; Consumers Power Co. and Detroit Edison Co. Detroit, Michigan, 1983 Ann Arbor, June 1983.
- Uputstvo za korisnike nusproizvoda i upotrebu sekundarnih sirovina u izgradnji puteva 2010., Projekat za Republiku Srbiju G2G09/SB/5/4 u okviru kratkog G2G programa.
- Uredba o tehničkim i drugim zahtjevima za pepeo, kao građevinski materijal za upotrebu u izgradnji, rekonstrukciji, sanaciji i održavanju infrastrukturnih objekata javne namjene, ("Sl. glasnik RS", br. 56/2015.
- Van Der Poel, C., 1954., A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data. Journal of Applied Chemistry, 4, pp. 221–236.
- Voskuilen, J.L.M., Molenaar, J.M.M., 1996., Adsorption and desorption of bitumen in toluene on mineral aggregate, Proc. 1st Eurasphalt and Eurobitume Congress, paper 4.078.
- Williams, M. L., Landel, R. F., Ferry, J. D., 1955., The Temperature Dependence of Relaxation Mechanism in Amorphous Polymers and Other Glass-Liquids, J. of American Chemical Society., Vol. 77, pp. 3701-3707.
- Witezak, M.W. & J. Bari, 2004., Development of Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphalt Mixtures, Arizona State University Research Project; July 2004.
- Yang Y. & Cheng Y., 2016., Preparation and performance of asphalt compound modified with waste crumb rubber and waste polyethylene, Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2016, Article ID 5803709, 6 pages.

- Zimmer, F. V., 1970., Fly ash as a bituminous filler, U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C.
- Zulkati A., Diew Y., Delai D.S.; 2012,. Effects of fillers on properties of asphalt–concrete mixture, J. Transp. Eng. Vol. 138, No. 7, pp. 902–910.
- Žmavc, J., Gradnja cest - Voziščne konstrukcije, 2007., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

PRILOG A

Rezultati ispitivanja uzoraka na indirektno zatezanje

Tabela A.1 Rezultati ispitivanja suvih i vlažnih uzoraka na indirektno zatezanje P grupe mješavina

Mješavine P grupe								
	25%		50%		75%		100%	
Broj uzorka	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)
1	1.15	0.843	1.11	0.849	1.21	0.876	1.14	0.839
2	1.14	0.855	1.1	0.852	1.18	0.908	1.09	0.83
3	1.12	0.837	1.13	0.86	1.13	0.89	1.14	0.844
ITSR %	74.1		76.9		75.9		76.9	

Tabela A.2 Rezultati ispitivanja suvih i vlažnih uzoraka na indirektno zatezanje G grupe mješavina

Mješavine G grupe								
	25%		50%		75%		100%	
Broj uzoraka	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)
1	1.18	0.909	1.11	0.911	0.988	0.811	1.04	0.846
2	1.13	0.896	1.15	0.912	0.992	0.82	0.999	0.824
3	1.14	0.901	1.07	0.922	0.938	0.792	1	0.828
ITSR %	78.4		82.4		81.6		82.4	

Tabela A.3 Rezultati ispitivanja suvih i vlažnih uzoraka na indirektno zatezanje K grupe mješavina

Mješavine K grupe								
	25%		50%		75%		100%	
Broj uzoraka	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)
1	1.04	0.749	0.101	0.711	0.964	0.623	0.971	0.641
2	0.969	0.751	0.999	0.717	0.969	0.616	0.98	0.652
3	0.988	0.744	0.107	0.705	0.953	0.626	0.966	0.634
ITSR %	74.8		69.3		64.7		65.3	

Tabela A.4 Rezultati ispitivanja suvih i vlažnih uzoraka na indirektno zatezanje kontrolne mješavine

Kontrolna mješavina		
Broj uzoraka	SUVO (MPa)	VLAŽNO (MPa)
1	1.09	0.776
2	1.02	0.767
3	1.11	0.785
ITSR%	72.3	

PRILOG B

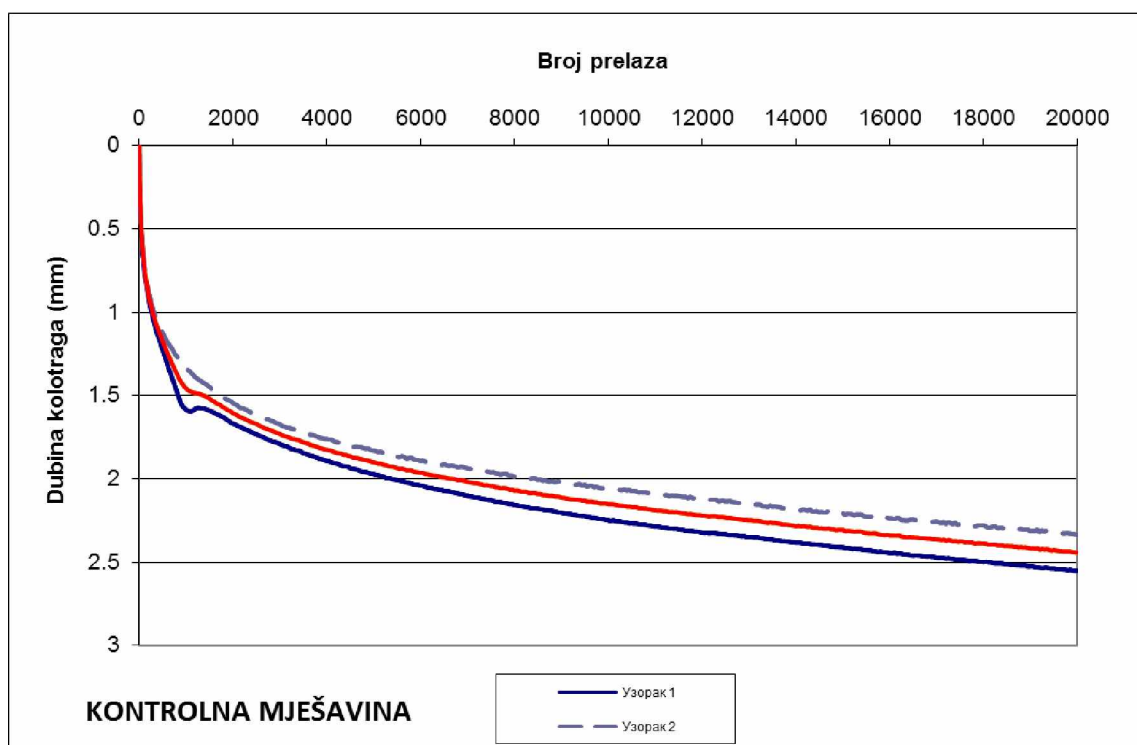
Rezultati ispitivanja otpornosti na trajnu deformaciju

Tabela B.1 Rezultati ispitivanja kontrolne mješavine – dubina kolotraga

	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak		Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak
Zapr. masa (kg/m ³)	2386	2376	2381	Zapr. Masa (kg/m ³)	2386	2376	
Debljina uzorka (mm)	50.8	50.8		Debljina uzorka (mm)	50.8	50.8	
Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotraga (mm)			Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotraga (mm)		
100	0.71	0.69	0.70	11000	2.29	2.09	2.19
500	1.23	1.13	1.18	12000	2.32	2.12	2.22
1000	1.59	1.33	1.46	13000	2.35	2.15	2.25
2000	1.67	1.54	1.61	14000	2.38	2.19	2.28
3000	1.79	1.67	1.73	15000	2.41	2.20	2.31
4000	1.89	1.76	1.82	16000	2.44	2.24	2.34
5000	1.97	1.83	1.90	17000	2.47	2.25	2.36
6000	2.04	1.89	1.96	18000	2.50	2.28	2.39
7000	2.10	1.93	2.02	19000	2.52	2.31	2.42
8000	2.16	1.98	2.07	20000	2.55	2.33	2.44
9000	2.20	2.02	2.11				
10000	2.25	2.05	2.15				

Napomena: ¹ 1 ciklus = 2 prelaza (prema EN 12697-22/2003+A1/2007)

Parametar	Oznaka	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak	Kriterijum
Dubina kolotraga (mm)	RD _{AIR}	2.55	2.33	2.44	
Proporcionalna dubina kolotraga(%)	PRD _{AIR}	5.0	4.6	4.8	
Nagib krive tečenja (mm/10 ³ ciklusa opterećenja)	WTS _{AIR}	0.06	0.06	0.06	



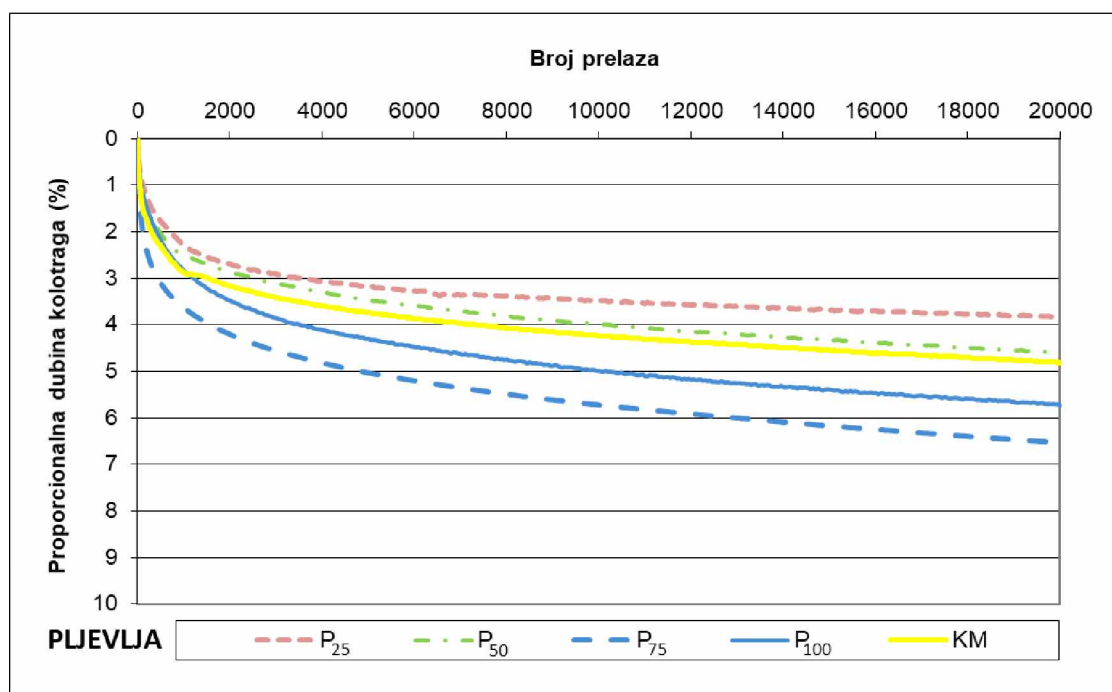
Slika B.1 Rezultati ispitivanja kontrolne mješavine – dubina kolotraga

Tabela B.2 Rezultati ispitivanja kontrolne mješavine – P grupa mješavina

	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak		Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak
Zapr. masa (kg/m ³)	2332	2331	2331	Zapr. masa (kg/m ³)	2332	2331	
Debljina uzorka (mm)	50.0	50.0		Debljina uzorka (mm)	50.0	50.0	
Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotruga (mm)			Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotruga (mm)		
100	0.55	0.38	0.47	11000	1.83	1.72	1.77
500	1.04	0.74	0.89	12000	1.85	1.73	1.79
1000	1.26	1.02	1.14	13000	1.87	1.75	1.81
2000	1.44	1.25	1.34	14000	1.89	1.76	1.82
3000	1.54	1.37	1.45	15000	1.90	1.79	1.85
4000	1.61	1.45	1.53	16000	1.92	1.78	1.85
5000	1.67	1.52	1.59	17000	1.93	1.82	1.88
6000	1.71	1.56	1.63	18000	1.95	1.83	1.89
7000	1.74	1.63	1.68	19000	1.96	1.85	1.91
8000	1.77	1.61	1.69	20000	1.97	1.86	1.92
9000	1.79	1.64	1.71				
10000	1.81	1.68	1.74				

Napomena: 1 ciklus = 2 prelaza (prema EN 12697-22/2003+A1/2007)

Parametar	Oznaka	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak	Kriterijum
Dubina kolotruga (mm)	RD _{AIR}	1.97	1.86	1.92	
Proporcionalna dubina kolotruga (%)	PRD _{AIR}	3.9	3.7	3.8	
Nagib krive tečenja (mm/10 ³ ciklusa opterećenja)	WTS _{AIR}	0.03	0.04	0.03	



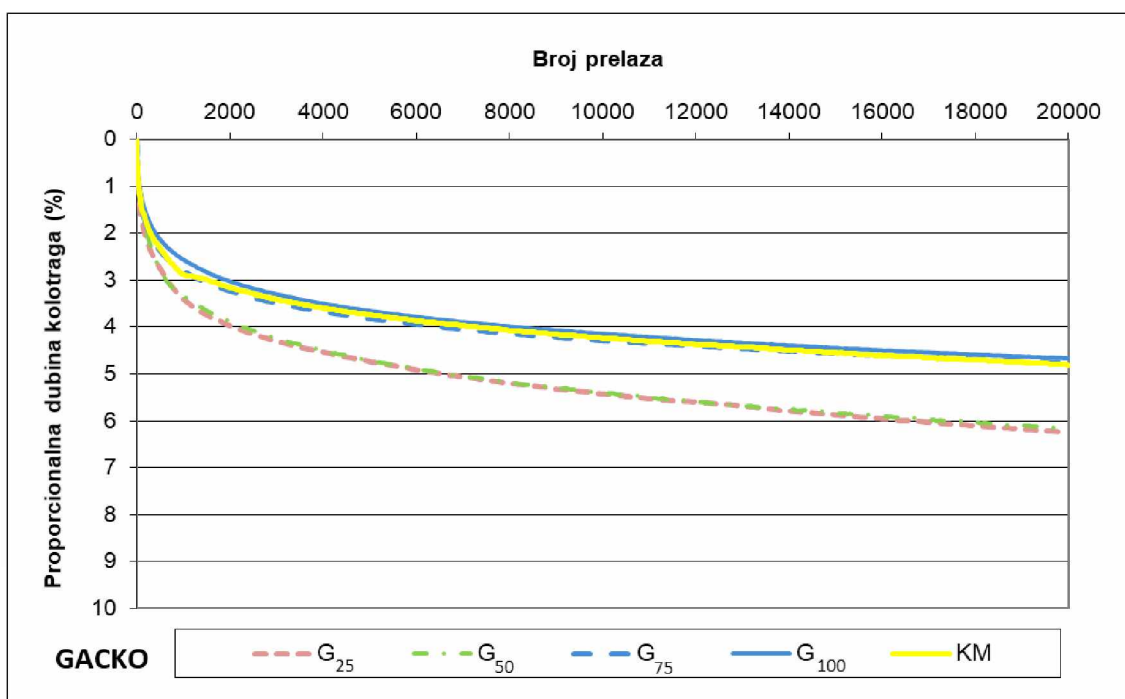
Slika B.2 Rezultati ispitivanja P grupe mješavina – dubina kolotruga

Tabela B.3 Rezultati ispitivanja kontrolne mješavine – G grupa mješavina

	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak		Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak
Zapr.masa (kg/m ³)	2359	2343	2351	Zapr. masa (kg/m ³)	2359	2343	
Debljina uzorka (mm)	49.9	50.2		Debljina uzorka (mm)	49.9	50.2	
Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotruga (mm)			Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotruga (mm)		
100	0.87	0.80	0.83	11000	2.85	2.67	2.76
500	1.41	1.34	1.37	12000	2.91	2.67	2.79
1000	1.68	1.72	1.70	13000	2.95	2.73	2.84
2000	1.95	2.02	1.98	14000	3.03	2.75	2.89
3000	2.12	2.19	2.15	15000	3.09	2.79	2.94
4000	2.27	2.26	2.26	16000	3.12	2.83	2.98
5000	2.38	2.36	2.37	17000	3.17	2.85	3.01
6000	2.48	2.43	2.46	18000	3.23	2.87	3.05
7000	2.58	2.48	2.53	19000	3.26	2.92	3.09
8000	2.66	2.53	2.60	20000	3.31	2.92	3.12
9000	2.72	2.60	2.66				
10000	2.79	2.63	2.71				

Napomena: 1 ciklus = 2 prelaza (prema EN 12697-22/2003+A1/2007)

Parametar	Oznaka	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak	Kriterijum
Dubina kolotruga (mm)	RD _{AIR}	3.31	2.92	3.12	
Proportionalna dubina kolotruga (%)	PRD _{AIR}	6.6	5.8	6.2	
Nagib krive tečenja (mm/10 ³ ciklusa opterećenja)	WTS _{AIR}	0.10	0.06	0.08	



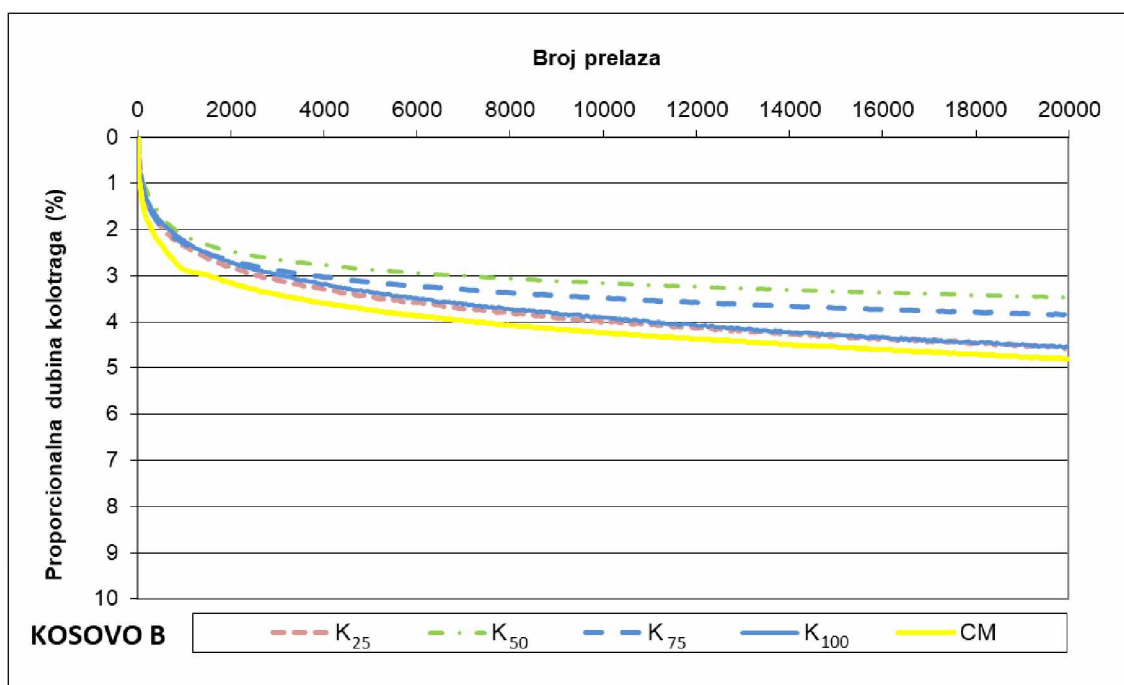
Slika B.3 Rezultati ispitivanja G grupe mješavina – dubina kolotruga

Tabela B.4 Rezultati ispitivanja kontrolne mješavine – K grupa mješavina

	Uzorak1	Uzorak 2	Prosjeak		Uzorak 1	Uzorak 2	prosjeak
Zapr. masa (kg/m ³)	2353	2336	2344	Zapr. masa (kg/m ³)	2353	2336	
Debljina uzorka (mm)	50.0	50.2		Debljina uzorka (mm)	50.0	50.2	
Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotruga (mm)			Broj prelaza opterećenja ¹	Dubina kolotruga (mm)		
100	0.62	0.44	0.53	11000	2.33	1.74	2.03
500	1.10	0.82	0.96	12000	2.37	1.77	2.07
1000	1.34	1.03	1.18	13000	2.40	1.78	2.09
2000	1.60	1.22	1.41	14000	2.45	1.82	2.13
3000	1.76	1.34	1.55	15000	2.47	1.83	2.15
4000	1.88	1.42	1.65	16000	2.52	1.86	2.19
5000	1.98	1.50	1.74	17000	2.54	1.87	2.21
6000	2.04	1.54	1.79	18000	2.57	1.90	2.24
7000	2.12	1.60	1.86	19000	2.61	1.92	2.26
8000	2.16	1.62	1.89	20000	2.63	1.94	2.28
9000	2.24	1.68	1.96				
10000	2.27	1.70	1.98				

Napomena: 1 ciklus = 2 prelaza (prema EN 12697-22/2003+A1/2007)

Parametar	Oznaka	Uzorak 1	Uzorak 2	Prosjeak	Kriterijum
Dubina kolotruga (mm)	RD _{AIR}	2.63	1.94	2.28	
Proporcionalna dubina kolotruga (%)	PRD _{AIR}	5.3	3.9	4.6	
Nagib krive tečenja (mm/10 ³ ciklusa opterećenja)	WTS _{AIR}	0.07	0.05	0.06	



Slika B.4 Rezultati ispitivanja K grupe mješavina – dubina kolotruga

PRILOG C

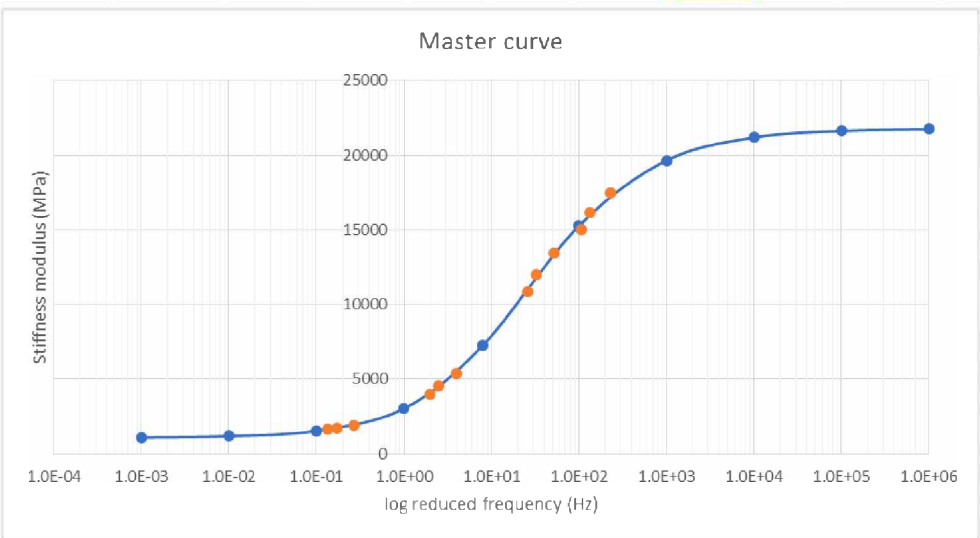
Rezultati ispitivanja modual krutosti

Series_1 - CONTROL MIXURE																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve				Solver variables		
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	loga(t)	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.4	3.98	19136	4.2819	4.2908	19537	0.0090	0.0001	1.2195	1.8194	65.9747	1.0E+06	4.47	29296.8	log(Emax)	4.467901		
5.3	2.51	17572	4.2448	4.2494	17757	0.0045	0.0000	1.2283	1.6280	42.4582	1.0E+05	4.46	29117	log(Emin)	2.786162	0.5	
5.2	2	16567	4.2192	4.2272	16872	0.0079	0.0001	1.2371	1.5381	34.5237	1.0E+04	4.45	28505	β	0.127549	-1	
10.5	3.98	15532	4.1912	4.1833	15252	-0.0079	0.0001	0.7792	1.3791	23.9400	1.0E+03	4.42	26523	ν	-1.24598	-0.5	
10.5	2.51	13857	4.1417	4.1194	13164	-0.0223	0.0005	0.7792	1.1789	15.0979	1.0E+02	4.32	21056.9	EA	130639.9	200000	
10.5	2	12742	4.1052	4.0842	12140	-0.0210	0.0004	0.7792	1.0803	12.0302	8.0E+00	4.01	10347.7	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	6859	3.8363	3.8796	7579	0.0434	0.0019	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.57	3745.23				
20	2.51	6038	3.7809	3.7810	6040	0.0001	0.0000	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.13	1336.47				
20	2	5352	3.7285	3.7306	5377	0.0021	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.90	794.953				
31.4	3.98	2961	3.4714	3.4347	2721	-0.0367	0.0013	-0.8709	-0.2710	0.5357	1.0E-03	2.82	661.722				
31.3	2.51	2189	3.3402	3.3420	2198	0.0017	0.0000	-0.8636	-0.4639	0.3436	1.0E-04	2.80	625.515				
31.3	2	1897	3.2781	3.2972	1983	0.0192	0.0004	-0.8636	-0.5625	0.2738	1.0E-05	2.79	615.28			1.00E-04	
						SUM	0.0048		Se	0.0173							

Slika C.1 Numerički podaci – kontrolna mješavina

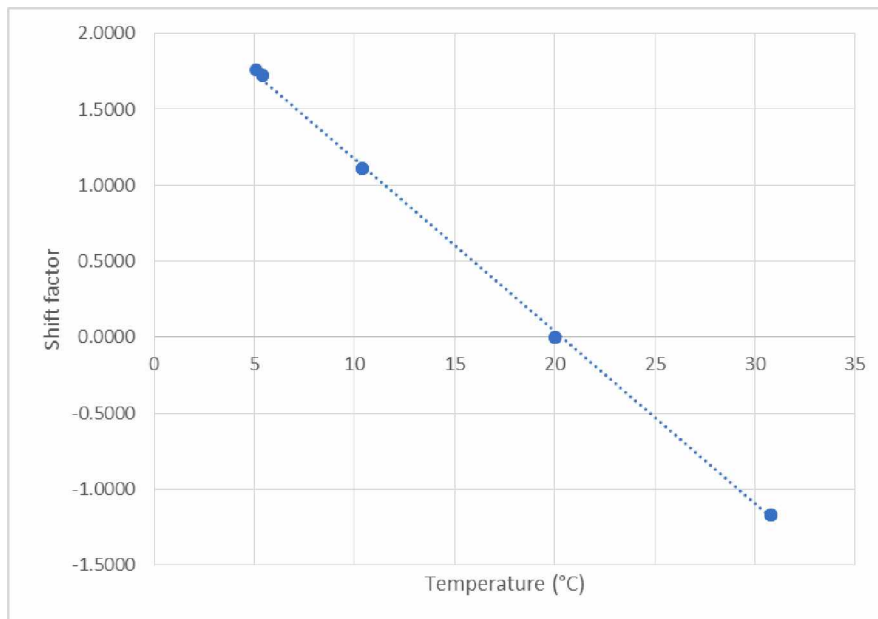
Stika C.2 – C.5 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije 2 – Kosovo B 25%

Series_2 - KOSOVO B 25%																	
Measured Values (input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve				Solver variables		
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	log $\alpha(t)$	log(ωr)	ωr	ωr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.1	3.98	17470	4.2423	4.2379	17296	-0.0043	0.0000	1.7603	2.3601	229.1598	1.0E+06	4.34	21742	log(E _{max})	4.338173		
5.4	2.51	16141	4.2079	4.2047	16020	-0.0033	0.0000	1.7230	2.1226	132.6265	1.0E+05	4.33	21621.9	log(E _{min})	3.026001	0.5	
5.4	2	15023	4.1768	4.1881	15422	0.0114	0.0001	1.7230	2.0240	105.6785	1.0E+04	4.33	21179.8	β	0.635249	-1	
10.4	3.98	13425	4.1279	4.1240	13305	-0.0039	0.0000	1.1129	1.7128	51.6193	1.0E+03	4.29	19644.6	γ	-1.32491	-0.5	
10.4	2.51	11989	4.0788	4.0722	11808	-0.0066	0.0000	1.1129	1.5126	32.5539	1.0E+02	4.18	15267.1	EA	184574	200000	
10.4	2	10845	4.0352	4.0434	11050	0.0081	0.0001	1.1129	1.4140	25.9394	8.0E+00	3.86	7269.78	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	5378	3.7306	3.7343	5424	0.0037	0.0000	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.48	3022.97				
20	2.51	4571	3.6600	3.6474	4441	-0.0126	0.0002	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.19	1541.66				
20	2	3980	3.5999	3.6049	4026	0.0050	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	3.07	1184				
30.8	3.98	1896	3.2778	3.2880	1941	0.0101	0.0001	-1.1680	-0.5681	0.2703	1.0E-03	3.04	1093.78				
30.8	2.51	1744	3.2415	3.2367	1725	-0.0048	0.0000	-1.1680	-0.7684	0.1705	1.0E-04	3.03	1070.2				
30.8	2	1650	3.2175	3.2146	1639	-0.0029	0.0000	-1.1680	-0.8670	0.1358	1.0E-05	3.03	1063.95				
					SUM		0.0006	Se		0.0062							

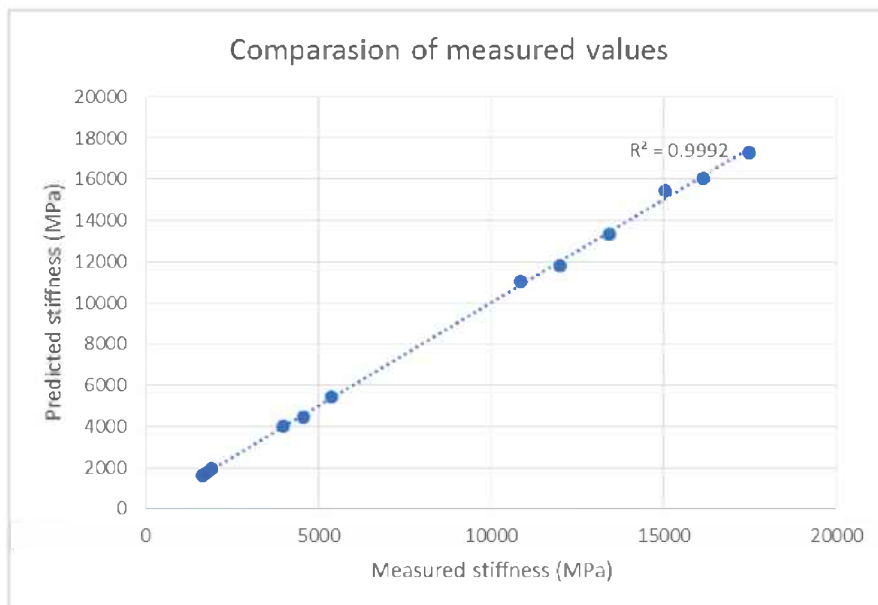


Stika C.2 Numerički podaci –K₂₅

Stika C.3 Master kriva za K₂₅ na 20 °C



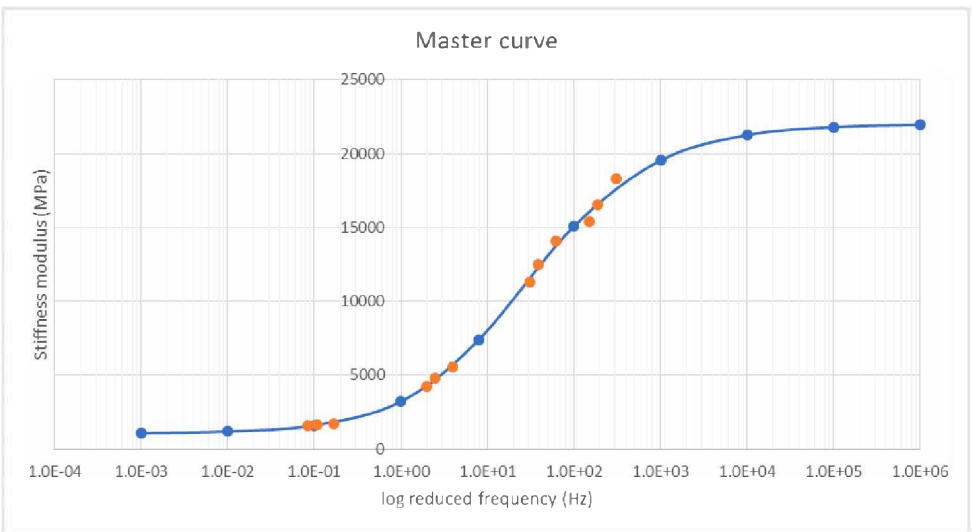
Slika C.4 Faktori pomijeraja - K_{25}



Slika C.5 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – K_{25}

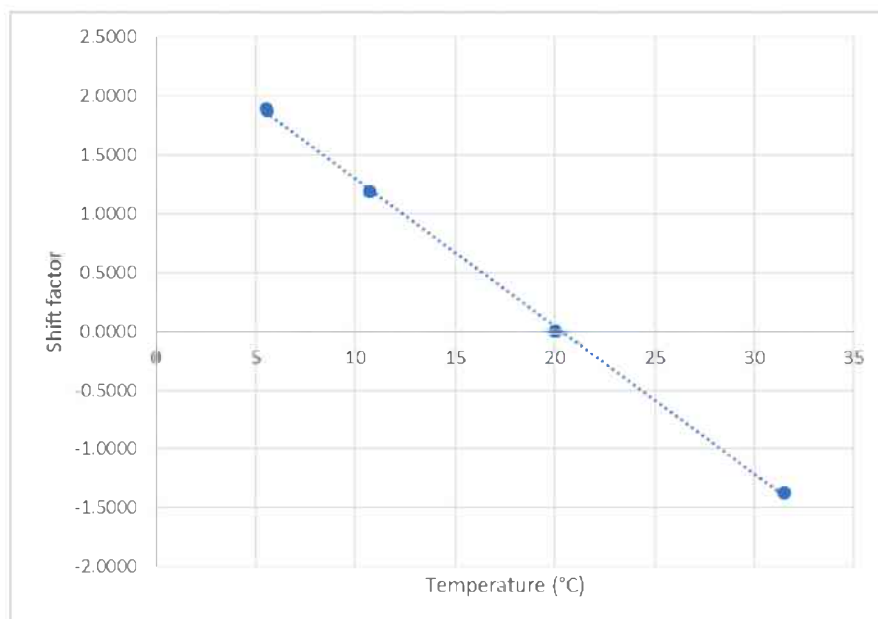
Stike C.6 – C.9 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije serije 3 - Kosovo B 50%

Series_3 - KOSOVO B 25%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	log(a(t))	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.5	3.98	18318	4.2629	4.2482	17709	-0.0147	0.0002	1.8907	2.4906	309.4721	1.0E+06	4.34	21953.8	log(Emax)	4.342807	4.342807	
5.6	2.51	16514	4.2179	4.2220	16672	0.0041	0.0000	1.8770	2.2767	189.1033	1.0E+05	4.34	21793.1	log(Emin)	3.013576	0.5	
5.6	2	15422	4.1881	4.2078	16138	0.0197	0.0004	1.8770	2.1781	150.6799	1.0E+04	4.33	21250.9	β	0.528187	-1	
10.7	3.98	14099	4.1492	4.1371	13713	-0.0121	0.0001	1.1905	1.7904	61.7095	1.0E+03	4.29	19534.7	γ	-1.24313	-0.5	
10.7	2.51	12508	4.0972	4.0901	12304	-0.0071	0.0001	1.1905	1.5901	38.9173	1.0E+02	4.18	15080.5	EA	204017.9	200000	
10.7	2	11288	4.0526	4.0640	11588	0.0114	0.0001	1.1905	1.4915	31.0098	8.0E+00	3.87	7415.16	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	5530	3.7427	3.7502	5626	0.0075	0.0001	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.51	3211				
20	2.51	4818	3.6829	3.6678	4653	-0.0151	0.0002	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.21	1609.97				
20	2	4213	3.6246	3.6271	4238	0.0025	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	3.08	1190.57				
31.5	3.98	1745	3.2418	3.2584	1813	0.0166	0.0003	-1.3716	-0.7717	0.1692	1.0E-03	3.03	1076.79				
31.5	2.51	1659	3.2198	3.2126	1631	-0.0073	0.0001	-1.3716	-0.9719	0.1067	1.0E-04	3.02	1044.68				
31.5	2	1579	3.1984	3.1927	1558	-0.0057	0.0000	-1.3716	-1.0706	0.0850	1.0E-05	3.02	1035.48				
					SUM	0.0016		Se	0.0100								

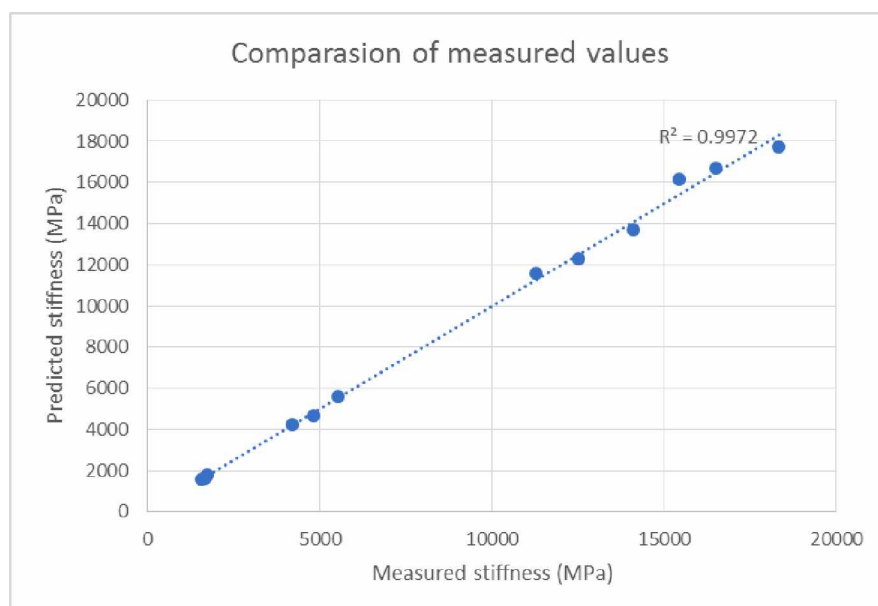


Stika C.6 Numerički podaci – K₅₀

Stika C.7 Master kriva za K₅₀ na 20 °C



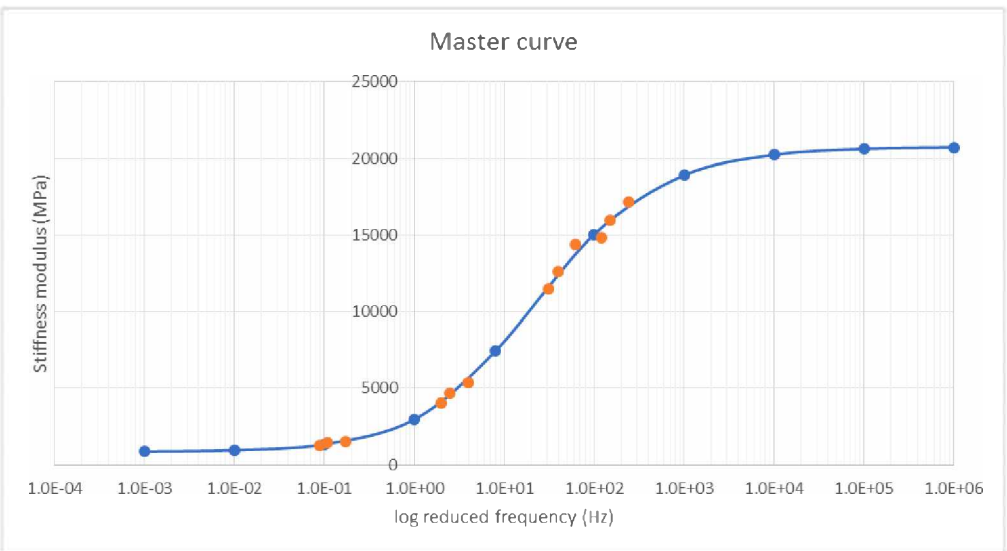
Slika C.8 Faktori pomijeraja – K_{50}



Slika C.9 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – K_{50}

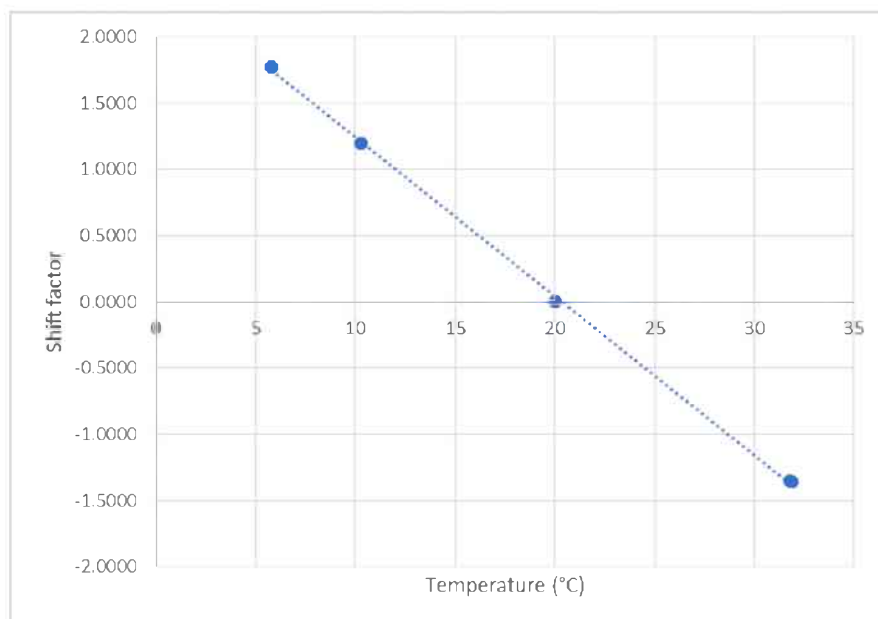
Slike C.10 – C.13 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije serije 4 – Kosovo B 75%

Series_4 - KOSOVO B 75%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	log α (t)	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.8	3.98	17161	4.2345	4.2286	16928	-0.0059	0.0000	1.7779	2.3778	238.6635	1.0E+06	4.32	20728.8	log(E _{max})	4 317402		
5.8	2.51	15969	4.2033	4.2042	16002	0.0009	0.0000	1.7779	2.1776	150.5139	1.0E+05	4.31	20622.6	log(E _{min})	2.922337	0.5	
5.8	2	14834	4.1713	4.1900	15488	0.0187	0.0004	1.7779	2.0789	119.9314	1.0E+04	4.31	20237	β	0.425025	-1	
10.3	3.98	14414	4.1588	4.1399	13801	-0.0189	0.0004	1.1952	1.7951	62.3862	1.0E+03	4.28	18906.4	γ	-1.30917	-0.5	
10.3	2.51	12632	4.1015	4.0952	12450	-0.0063	0.0000	1.1952	1.5949	39.3441	1.0E+02	4.18	15045.4	EA	196106.4	200000	
10.3	2	11473	4.0597	4.0700	11748	0.0103	0.0001	1.1952	1.4962	31.3499	8.0E+00	3.87	7448.08	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	5395	3.7320	3.7442	5549	0.0122	0.0001	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.47	2977.33				
20	2.51	4663	3.6687	3.6541	4509	-0.0146	0.0002	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.13	1354.16				
20	2	4049	3.6073	3.6091	4065	0.0017	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.99	967.874				
31.9	3.98	1512	3.1796	3.1930	1560	0.0135	0.0002	-1.3625	-0.7626	0.1727	1.0E-03	2.94	871.102				
31.9	2.51	1469	3.1670	3.1404	1382	-0.0266	0.0007	-1.3625	-0.9628	0.1089	1.0E-04	2.93	845.61				
31.8	2	1274	3.1052	3.1201	1319	0.0149	0.0002	-1.3515	-1.0504	0.0890	1.0E-05	2.92	838.775				
					SUM	0.0024		Se	0.0122								

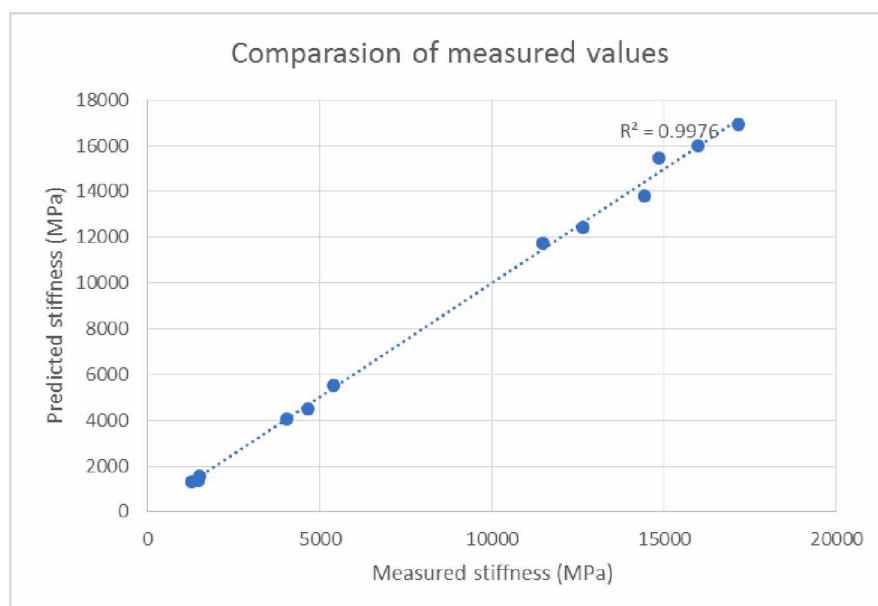


Slika C.10 Numerički podaci K₇₅

Slika C.11 Master kriva za K₇₅ na 20 °C



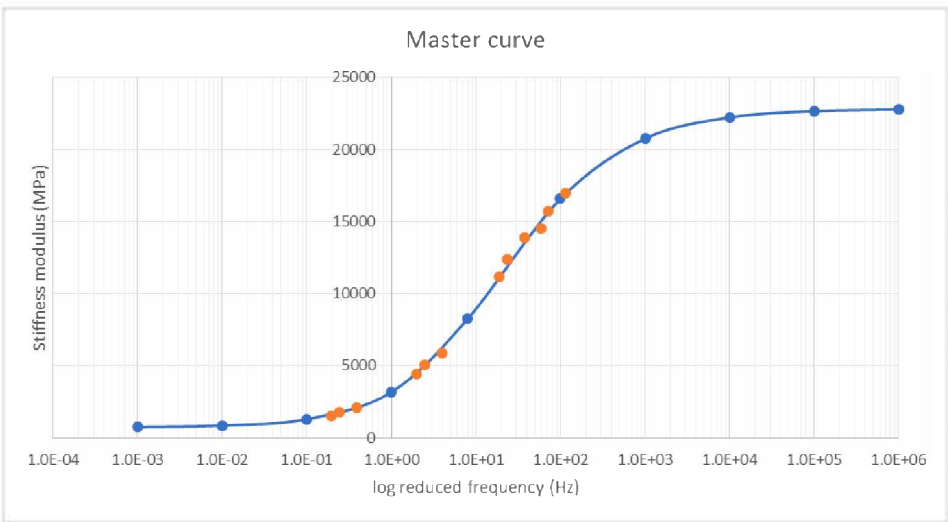
Slika C.12 Faktori pomijeraja – K_{75}



Slika C.13 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – K_{75}

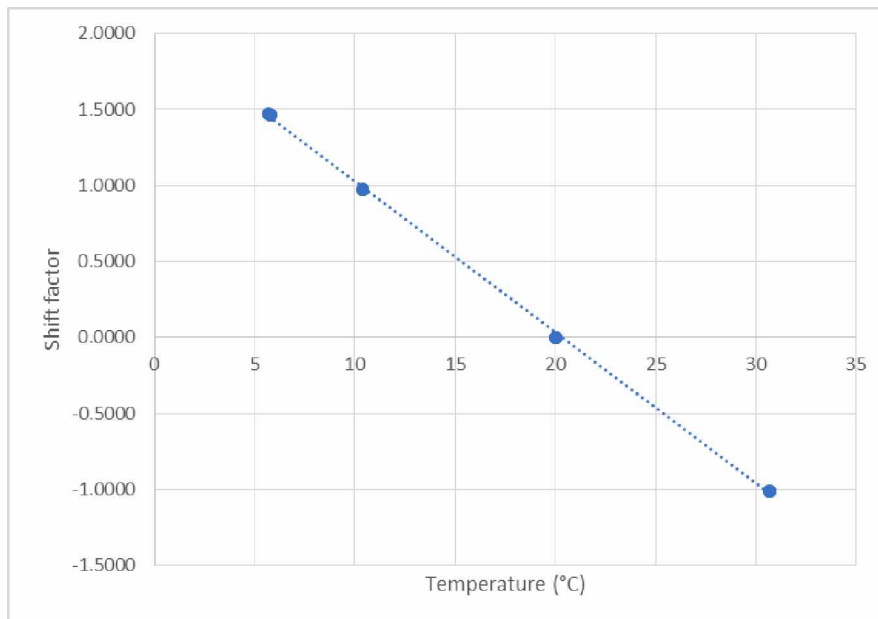
Slike C.14 – C.17. Rezultati ispitivanja modula krutosti serije serije 5 – Kosovo B 100%

Series_5 - KOSOVO B 100%																
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve				Solver variables	
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	log(a(t))	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values
5.8	3.98	16994	4.2303	4.2291	16946	-0.0012	0.0000	1.4618	2.0617	115.2629	1.0E+06	4.36	22773.1	log(E _{max})	4 35833	
5.8	2.51	15746	4.1972	4.1953	15679	-0.0018	0.0000	1.4618	1.8615	72.6909	1.0E+05	4.36	22649.7	log(E _{min})	2.849242	0.5
5.7	2	14493	4.1612	4.1782	15074	0.0171	0.0003	1.4726	1.7737	59.3825	1.0E+04	4.35	22213.9	β	0.27531	-1
10.4	3.98	13875	4.1422	4.1330	13584	-0.0092	0.0001	0.9722	1.5721	37.3351	1.0E+03	4.32	20748.8	γ	-1.28168	-0.5
10.4	2.51	12348	4.0916	4.0793	12003	-0.0123	0.0002	0.9722	1.3719	23.5455	1.0E+02	4.22	16569.8	EA	161240.3	200000
10.4	2	11174	4.0482	4.0494	11204	0.0012	0.0000	0.9722	1.2733	18.7613	8.0E+00	3.92	8252.28	Reference temperature [°C]	20	
20	3.98	5896	3.7706	3.7863	6114	0.0157	0.0002	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.50	3166.43			
20	2.51	5030	3.7016	3.6928	4929	-0.0088	0.0001	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.11	1294.03			
20	2	4408	3.6442	3.6454	4420	0.0012	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.93	856.347			
30.7	3.98	2073	3.3166	3.3161	2071	-0.0005	0.0000	-1.0113	-0.4114	0.3878	1.0E-03	2.87	747.062			
30.7	2.51	1789	3.2526	3.2377	1728	-0.0149	0.0002	-1.0113	-0.6116	0.2446	1.0E-04	2.86	717.817			
30.7	2	1544	3.1886	3.2023	1593	0.0137	0.0002	-1.0113	-0.7102	0.1949	1.0E-05	2.85	709.787			
SUM						0.0013		Se		0.0089						

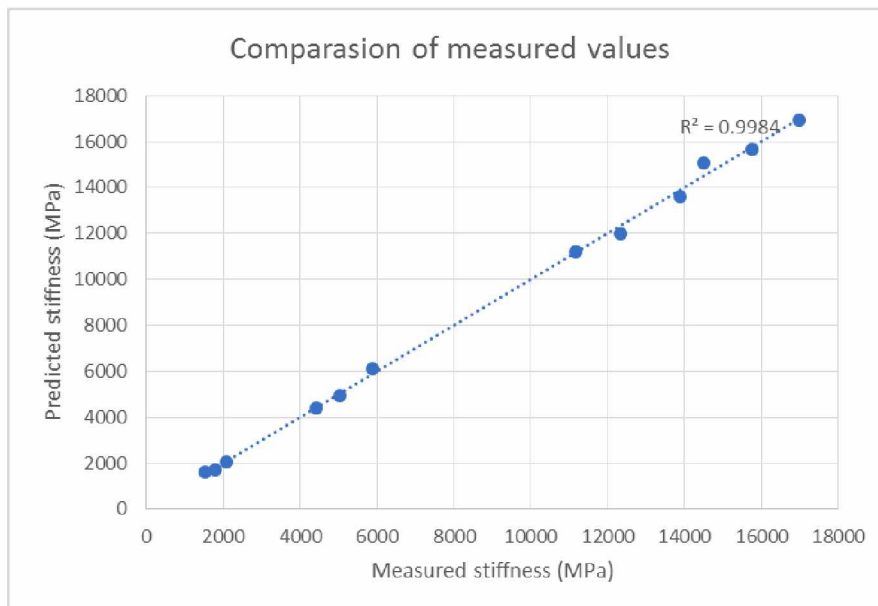


Slika C.14 Numerički podaci – K₁₀₀

Slika C.15 Master kriva za K₁₀₀ na 20°C



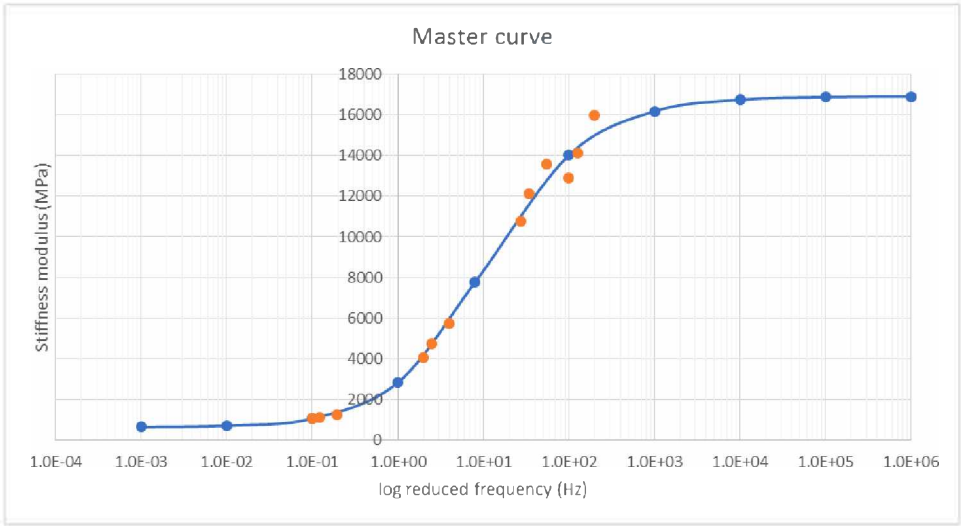
Slika C.16 Faktori pomijeraja – K_{100}



Slika C.17 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – K_{100}

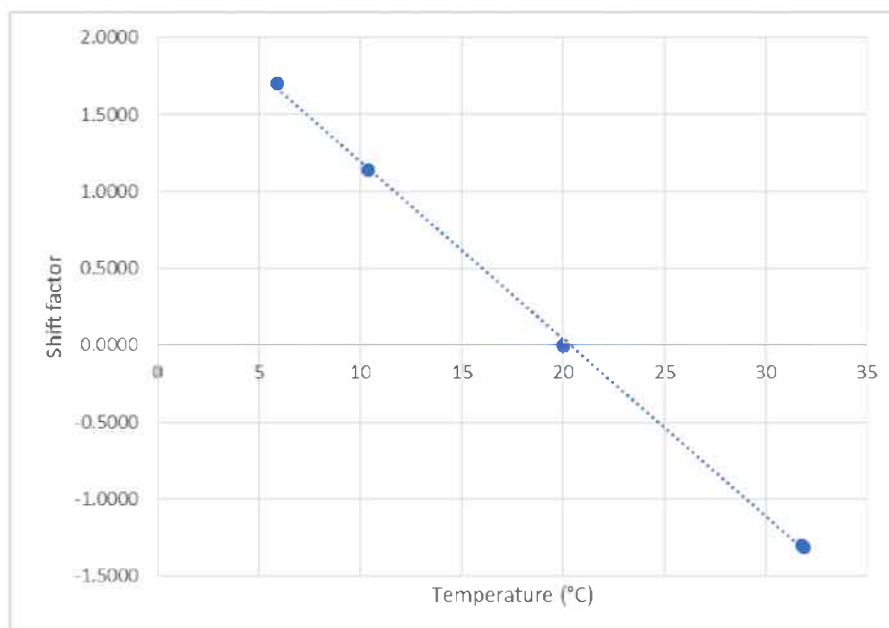
Slike C.18 – C.21 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije 6 – Gacko 25%

Series_6 - GACKO 25%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	logα(t)	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.9	3.98	15987	4.2038	4.1751	14967	-0.0286	0.0008	1.6992	2.2991	199.1045	1.0E+06	4.23	16920.7	log(Emax)	4 228648		
5.9	2.51	14148	4.1507	4.1575	14372	0.0068	0.0000	1.6992	2.0989	125.5659	1.0E+05	4.23	16890.4	log(Emin)	2.783925	0.5	
5.9	2	12899	4.1106	4.1469	14026	0.0364	0.0013	1.6992	2.0002	100.0525	1.0E+04	4.22	16757.5	β	0.156271	-1	
10.4	3.98	13590	4.1332	4.1112	12919	-0.0220	0.0005	1.1385	1.7384	54.7554	1.0E+03	4.21	16190.5	γ	-1.48458	-0.5	
10.4	2.51	12113	4.0833	4.0749	11883	-0.0083	0.0001	1.1385	1.5382	34.5317	1.0E+02	4.15	14022.7	FA	188822	200000	
10.4	2	10788	4.0329	4.0536	11314	0.0207	0.0004	1.1385	1.4396	27.5153	8.0E+00	3.89	7766.31	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	5707	3.7564	3.7602	5757	0.0038	0.0000	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.45	2818.12				
20	2.51	4750	3.6767	3.6617	4589	-0.0150	0.0002	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.02	1043.46				
20	2	4065	3.6091	3.6105	4079	0.0015	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.84	699.367				
31.9	3.98	1247	3.0959	3.1148	1303	0.0189	0.0004	-1.3119	-0.7120	0.1941	1.0E-03	2.80	628.291				
31.9	2.51	1118	3.0484	3.0451	1109	-0.0034	0.0000	-1.3119	-0.9122	0.1224	1.0E-04	2.79	612.598				
31.8	2	1069	3.0290	3.0183	1043	-0.0107	0.0001	-1.3013	-1.0002	0.0999	1.0E-05	2.78	609.064				
					SUM	0.0039		Se		0.0156							

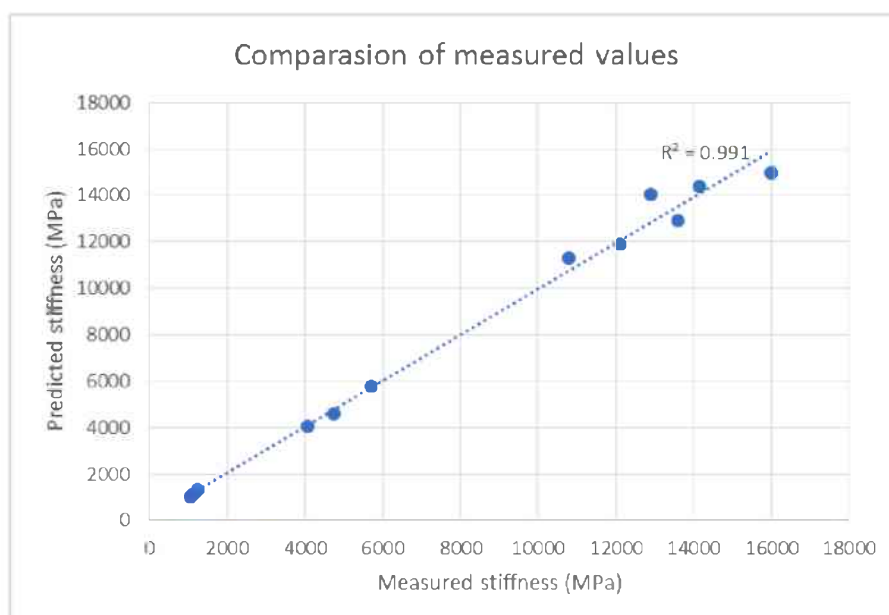


Slika C.18 Numerički podaci - G25

Slika C.19 Master kriva za G25 na 20°C



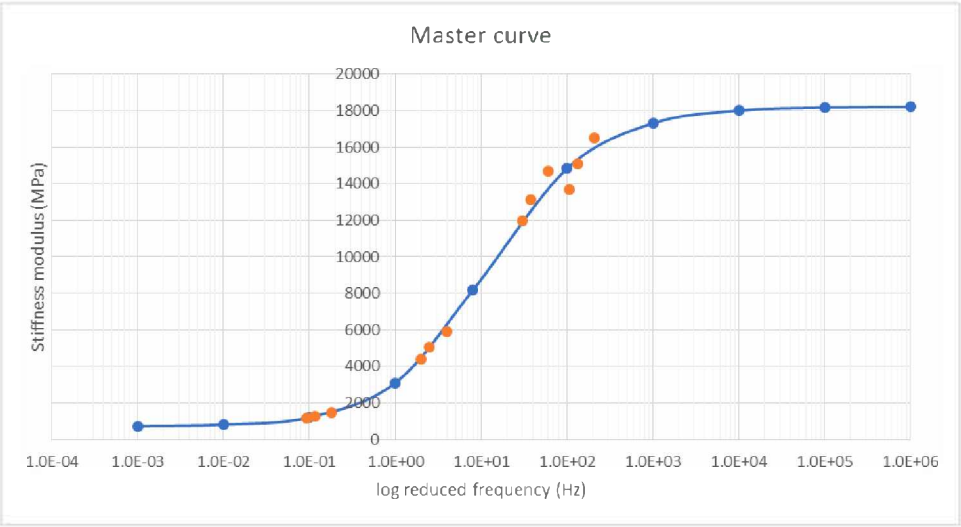
Slika C.20 Faktori pomijeraja - G_{25}



Slika C.21 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – G_{25}

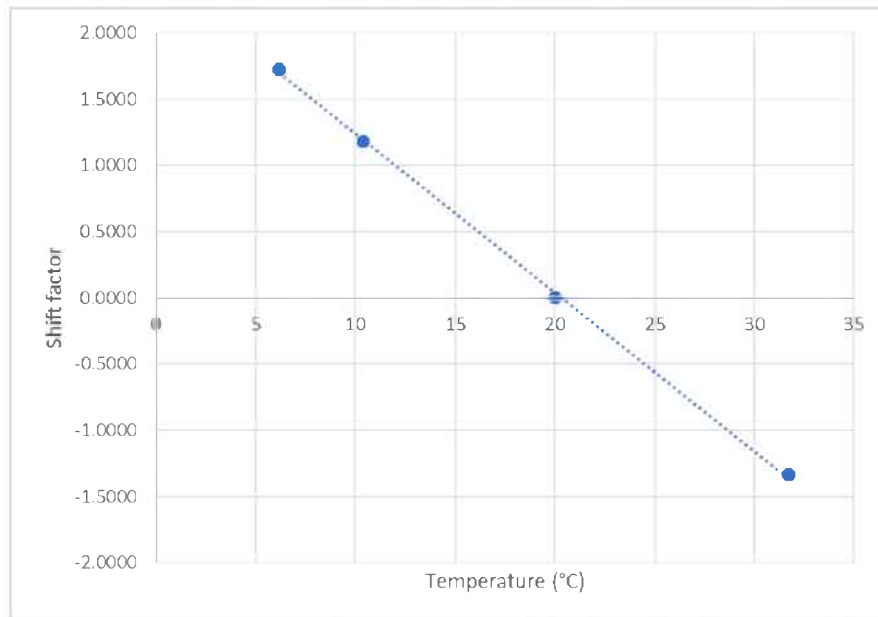
Sljka C.22 – C.25 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije 7 – Gacko 50%

Series_7 - GACKO 50%																
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables		
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	loga(t)	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values
6.2	3.98	16497	4.2174	4.2030	15959	-0.0144	0.0002	1.7222	2.3221	209.9380	1.0E+06	4.26	18210.8	log(Emax)	4.260632	
6.2	2.51	15120	4.1796	4.1848	15305	0.0053	0.0000	1.7222	2.1219	132.3981	1.0E+05	4.26	18170	log(Emin)	2.851922	0.5
6.2	2	13697	4.1366	4.1740	14928	0.0374	0.0014	1.7222	2.0232	105.4965	1.0E+04	4.26	17999.7	β	0.184412	-1
10.4	3.98	14680	4.1667	4.1408	13830	-0.0259	0.0007	1.1803	1.7802	60.2834	1.0E+03	4.24	17310.3	γ	-1.43768	-0.5
10.4	2.51	13129	4.1182	4.1053	12742	-0.0130	0.0002	1.1803	1.5800	38.0180	1.0E+02	4.17	14830.9	EA	195749.6	200000
10.4	2	11982	4.0785	4.0845	12149	0.0060	0.0000	1.1803	1.4813	30.2932	8.0E+00	3.91	8175.03	Reference temperature [°C]	20	
20	3.98	5893	3.7703	3.7863	6114	0.0160	0.0003	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.49	3101.09			
20	2.51	5031	3.7017	3.6920	4920	-0.0097	0.0001	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.08	1214.06			
20	2	4421	3.6455	3.6433	4398	-0.0022	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.92	822.296			
31.7	3.98	1457	3.1635	3.1666	1467	0.0031	0.0000	-1.3380	-0.7381	0.1828	1.0E-03	2.87	736.951			
31.7	2.51	1290	3.1106	3.1018	1264	-0.0088	0.0001	-1.3380	-0.9383	0.1153	1.0E-04	2.86	717.196			
31.7	2	1169	3.0678	3.0740	1186	0.0062	0.0000	-1.3380	-1.0370	0.0918	1.0E-05	2.85	712.535			
						SUM	0.0030	Se		0.0137						

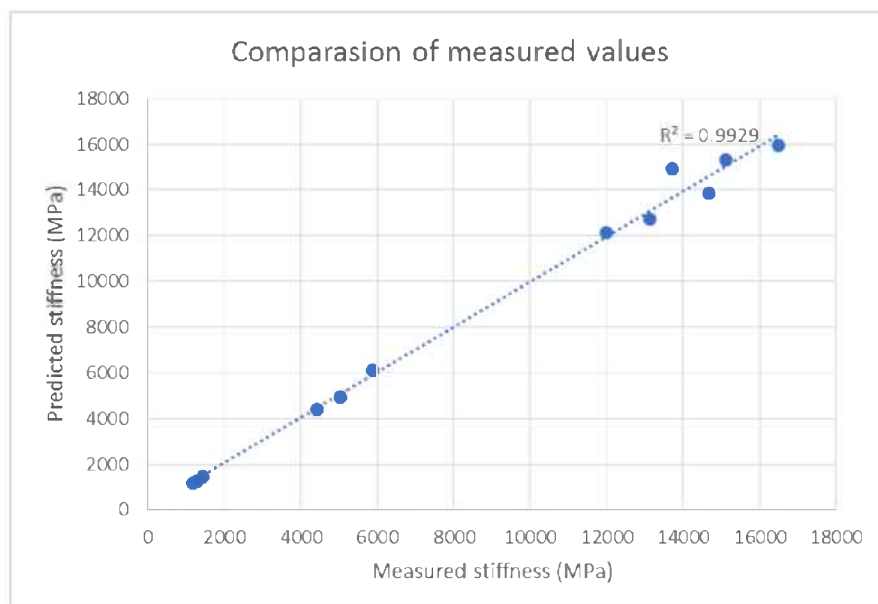


Sljka C.22 Numeri~ki podaci –G50

Sljka C.23 Master kriva za G50 na 20°C



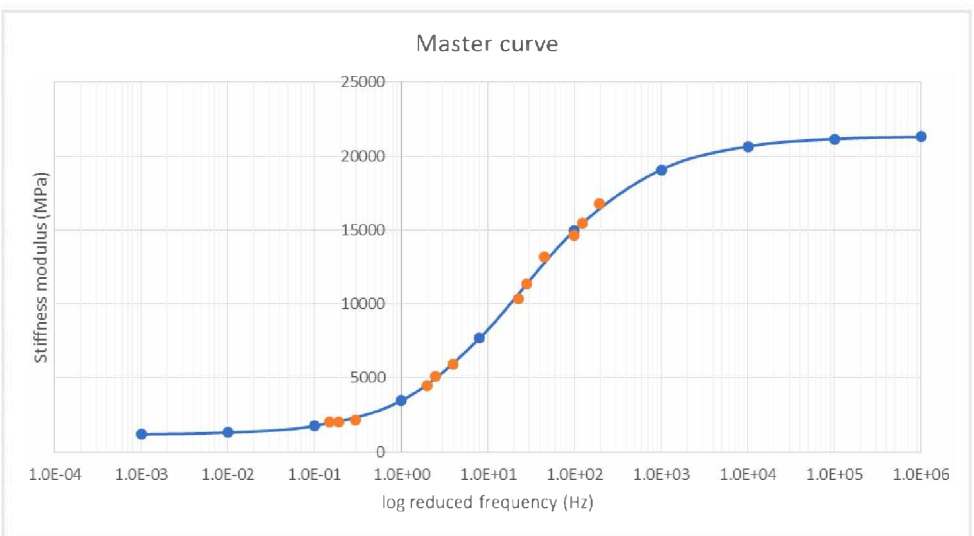
Slika C.24 Faktori pomijeraja – G_{50}



Slika C.25 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – G_{50}

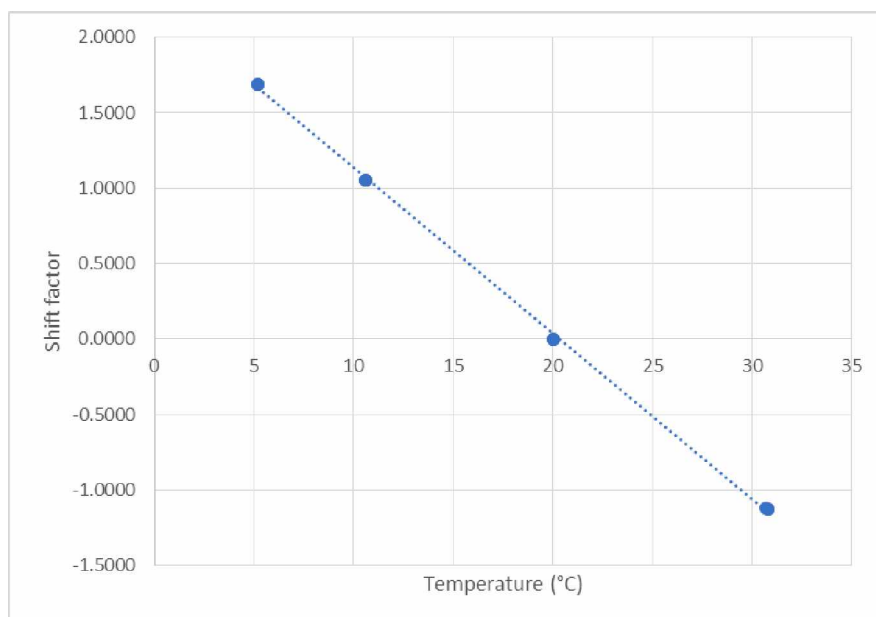
Slike C.26 – C.29 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije 8 – Gacko 75%

Series_8 - GACKO 75%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	loga(t)	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.2	3.98	16767	4.2245	4.2180	16521	-0.0064	0.0000	1.6908	2.2907	195.2961	1.0E+06	4.33	21301.9	log(Emax)	4.329659		
5.2	2.51	15479	4.1897	4.1901	15491	0.0003	0.0000	1.6908	2.0905	123.1642	1.0E+05	4.33	21153.9	log(Emin)	3.055863	0.5	
5.2	2	14663	4.1662	4.1742	14934	0.0080	0.0001	1.6908	1.9918	98.1388	1.0E+04	4.32	20656.8	β	0.49262	-1	
10.6	3.98	13196	4.1204	4.1073	12804	-0.0131	0.0002	1.0535	1.6533	45.0135	1.0E+03	4.28	19086	γ	-1.23751	-0.5	
10.6	2.51	11387	4.0564	4.0582	11433	0.0018	0.0000	1.0535	1.4531	28.3879	1.0E+02	4.18	14977.8	FA	178554.3	200000	
10.6	2	10334	4.0143	4.0312	10744	0.0169	0.0003	1.0535	1.3545	22.6199	8.0E+00	3.89	7683.26	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	5945	3.7742	3.7719	5914	-0.0023	0.0000	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.54	3459.27				
20	2.51	5120	3.7093	3.6934	4936	-0.0159	0.0003	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.25	1768.72				
20	2	4480	3.6513	3.6546	4514	0.0033	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	3.12	1312.69				
30.8	3.98	2187	3.3398	3.3624	2304	0.0226	0.0005	-1.1299	-0.5300	0.2951	1.0E-03	3.07	1187.37				
30.7	2.51	2043	3.3103	3.3110	2047	0.0008	0.0000	-1.1198	-0.7202	0.1905	1.0E-04	3.06	1151.73				
30.8	2	1998	3.3006	3.2847	1926	-0.0159	0.0003	-1.1299	-0.8289	0.1483	1.0E-05	3.06	1141.46				
						SUM	0.0016	Se		0.0100							

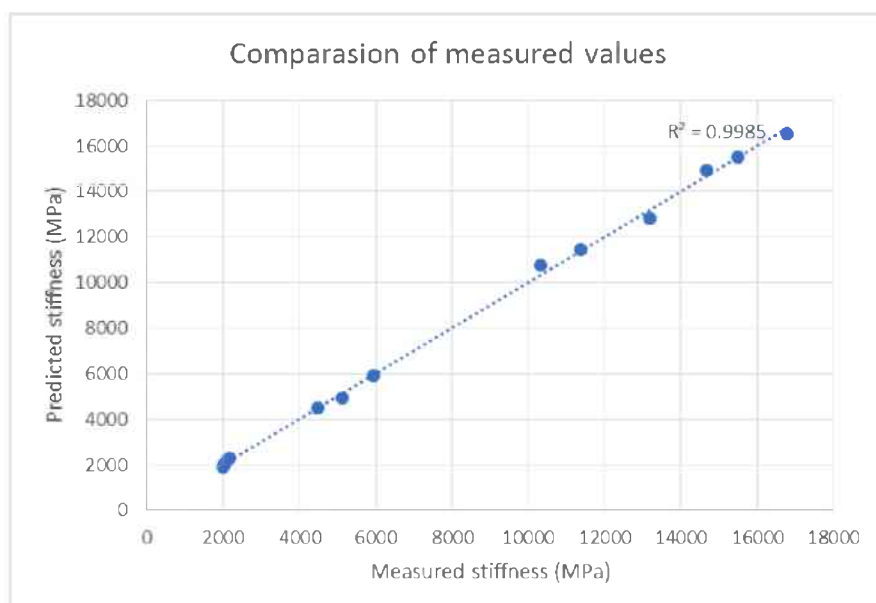


Slika C.26 Numerički podaci G_{75}

Slika C.27 Master kriva za G_{75} na 20°C



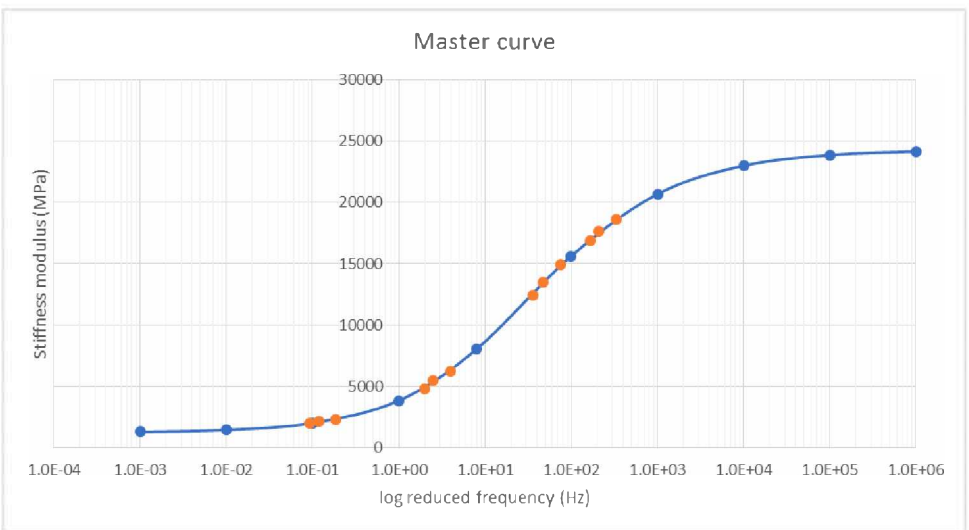
Slika C.28 Faktori pomijeraja – G_{75}



Slika C.29 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – G_{75}

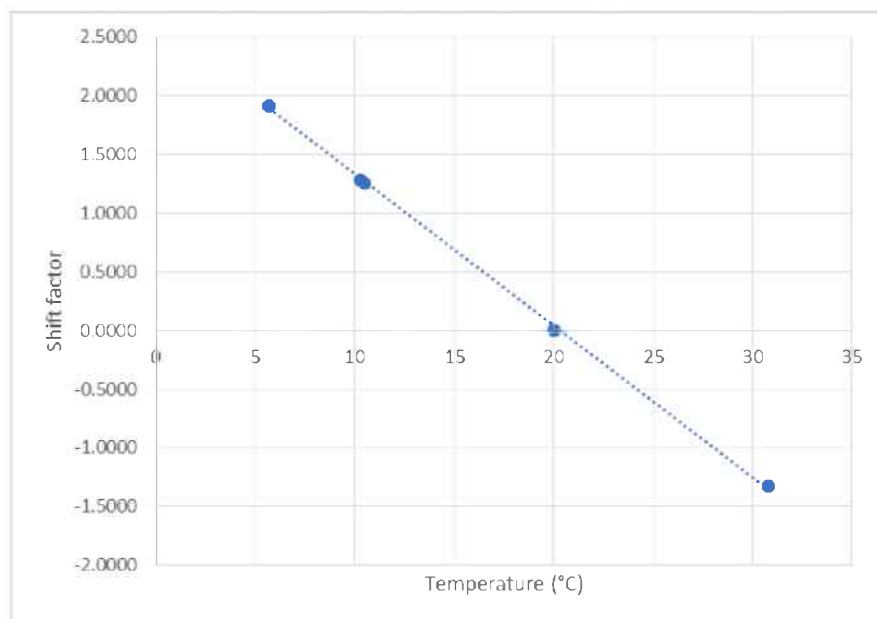
Stike C.30 – C.33 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije 9 – Gacko 100%

Series_9 - GACKO 100%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	loga(t)	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.7	3.98	18641	4.2705	4.2704	18639	0.0000	0.0000	1.9167	2.5166	328.5433	1.0E+06	4.38	24172.2	log(Emax)	4 385976		
5.7	2.51	17659	4.2470	4.2448	17571	-0.0022	0.0000	1.9167	2.3164	207.1969	1.0E+05	4.38	23875.3	log(Emin)	3.072523	0.5	
5.7	2	16874	4.2272	4.2304	16999	0.0032	0.0000	1.9167	2.2177	165.0971	1.0E+04	4.36	23011.6	β	0.452287	-1	
10.3	3.98	14896	4.1731	4.1711	14827	-0.0020	0.0000	1.2790	1.8789	75.6716	1.0E+03	4.32	20690	γ	-1.10873	-0.5	
10.3	2.51	13479	4.1297	4.1281	13431	-0.0015	0.0000	1.2790	1.6787	47.7225	1.0E+02	4.19	15632.4	EA	209863.4	200000	
10.5	2	12447	4.0951	4.0980	12530	0.0029	0.0000	1.2518	1.5528	35.7129	8.0E+00	3.91	8037.58	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	6231	3.7946	3.7989	6293	0.0043	0.0000	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.58	3830.15				
20	2.51	5481	3.7389	3.7262	5324	-0.0126	0.0002	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.30	1997.13				
20	2	4819	3.6830	3.6904	4902	0.0074	0.0001	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	3.16	1437.51				
30.8	3.98	2284	3.3587	3.3627	2305	0.0040	0.0000	-1.3281	-0.7282	0.1870	1.0E-03	3.10	1264.37				
30.8	2.51	2096	3.3214	3.3157	2068	-0.0057	0.0000	-1.3281	-0.9284	0.1179	1.0E-04	3.08	1208.8				
30.8	2	1961	3.2925	3.2947	1971	0.0022	0.0000	-1.3281	-1.0270	0.0940	1.0E-05	3.08	1190.65				
						SUM	0.0003	Se		0.0044							

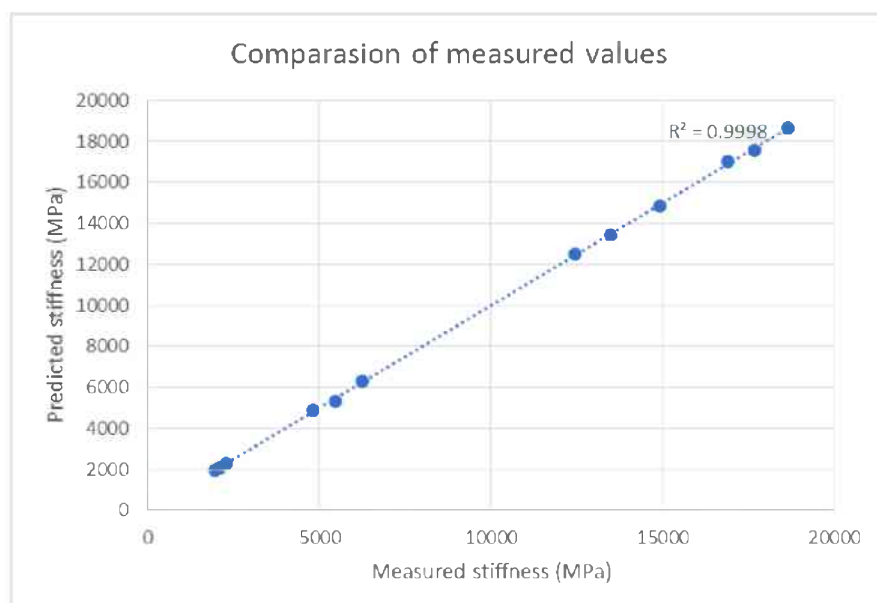


Stika C.30 Numerički podaci – G₁₀₀

Stika C.31 Master kriva za G₁₀₀ na 20°C



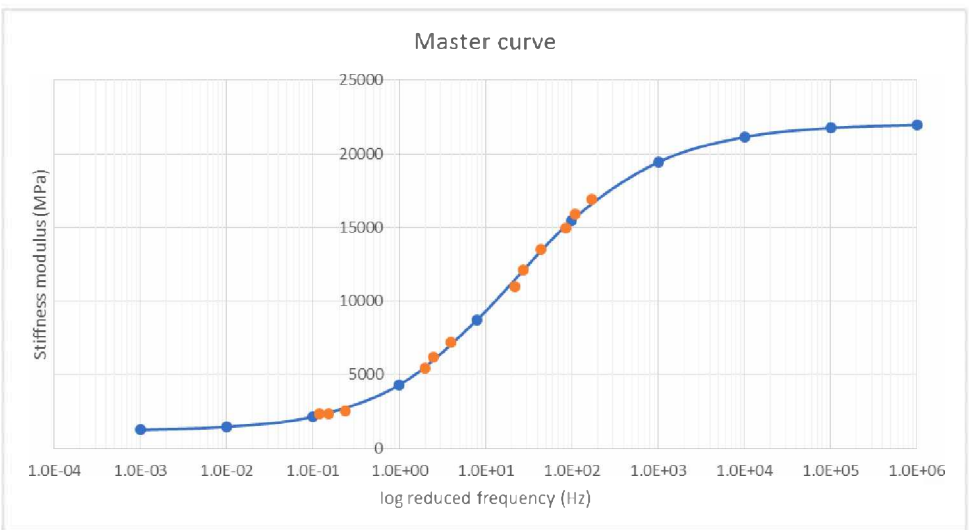
Slika C.32 Faktori pomijeraja – G_{100}

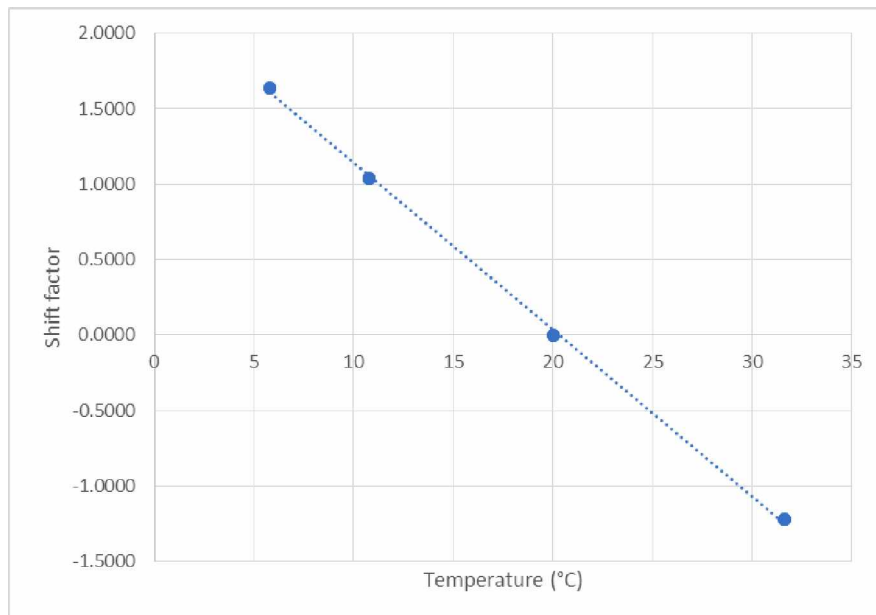


Slika C.33 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – G_{100}

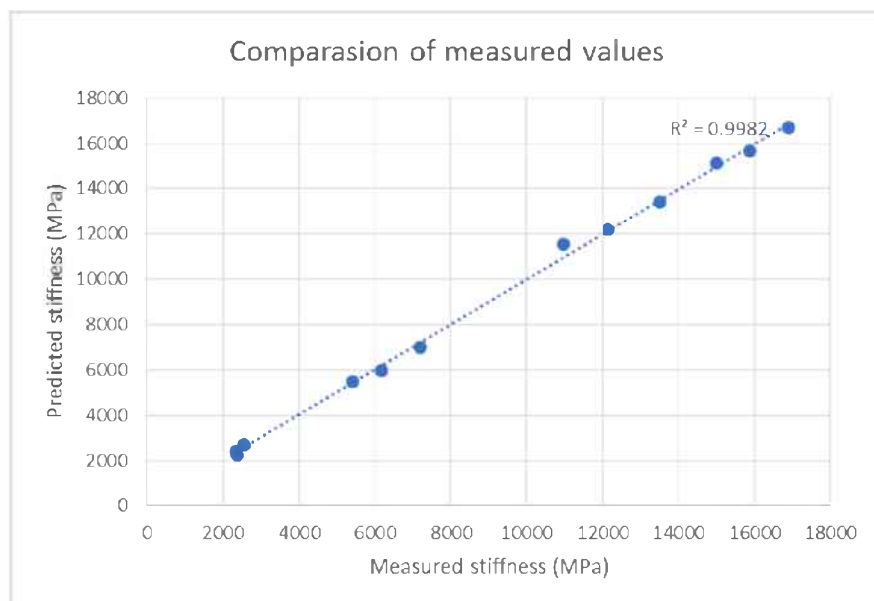
Slike C.34 – C.37 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije 10 – Pljevlja 25%

Series_10 - PLJEVLJA 25%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	loga(t)	log(wr)	wr	wr	log E *	E *	Parameters	Obtained values	Initial values	
5.8	3.98	16897	4.2278	4.2218	16666	-0.0060	0.0000	1.6345	2.2344	171.5559	1.0E+06	4.34	21964.4	log(Emax)	4 343825		
5.8	2.51	15877	4.2008	4.1951	15673	-0.0056	0.0000	1.6345	2.0342	108.1923	1.0E+05	4.34	21751.7	log(Emin)	3.06239	0.5	
5.8	2	14984	4.1756	4.1802	15143	0.0046	0.0000	1.6345	1.9356	86.2090	1.0E+04	4.32	21130.5	β	0.216491	-1	
10.8	3.98	13500	4.1303	4.1277	13419	-0.0026	0.0000	1.0403	1.6402	43.6742	1.0E+03	4.29	19426.9	γ	-1.10435	-0.5	
10.8	2.51	12125	4.0837	4.0850	12163	0.0014	0.0000	1.0403	1.4400	27.5433	1.0E+02	4.19	15488.9	EA	180291.2	200000	
10.8	2	10967	4.0401	4.0618	11530	0.0217	0.0005	1.0403	1.3414	21.9469	8.0E+00	3.94	8735.23	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	7183	3.8563	3.8437	6977	-0.0126	0.0002	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.63	4305.49				
20	2.51	6187	3.7915	3.7748	5955	-0.0166	0.0003	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.33	2149.62				
20	2	5406	3.7329	3.7402	5498	0.0073	0.0001	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	3.17	1467.36				
31.6	3.98	2558	3.4079	3.4317	2702	0.0238	0.0006	-1.2222	-0.6223	0.2386	1.0E-03	3.10	1255.71				
31.6	2.51	2336	3.3685	3.3764	2379	0.0079	0.0001	-1.2222	-0.8225	0.1505	1.0E-04	3.07	1187.74				
31.6	2	2369	3.3746	3.3513	2245	-0.0233	0.0005	-1.2222	-0.9212	0.1199	1.0E-05	3.07	1165.48				
						SUM	0.0022	Se		0.0118							

Slika C.34 Numerički podaci – P_{25} Slika C.35 Master kriva za P_{25} na 20°C



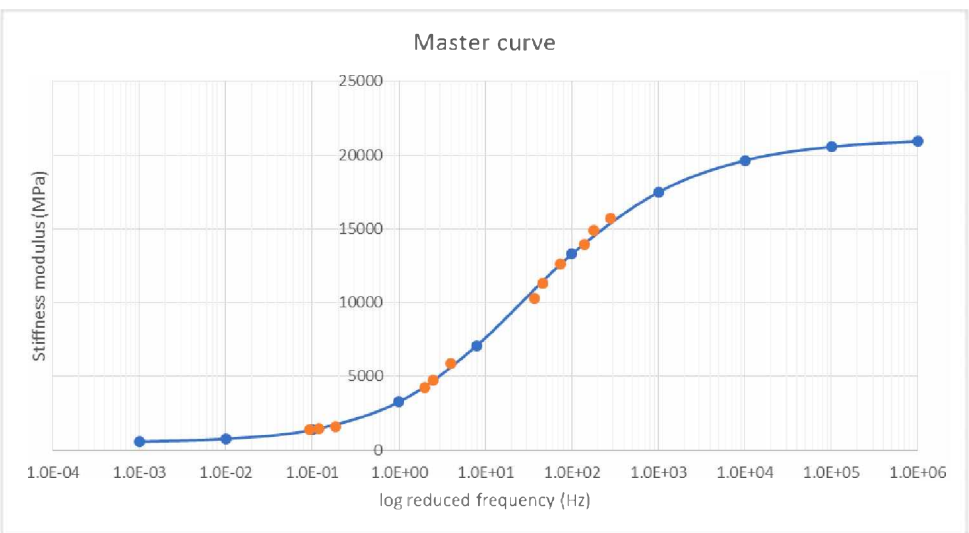
Slika C.36 Faktori pomijeraja - P_{25}

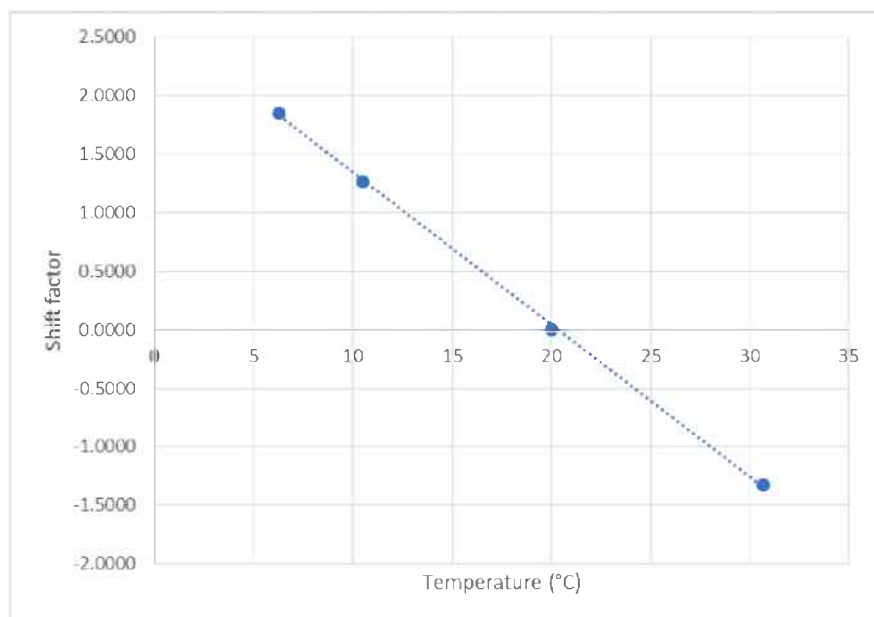


Slika C.37 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – P_{25}

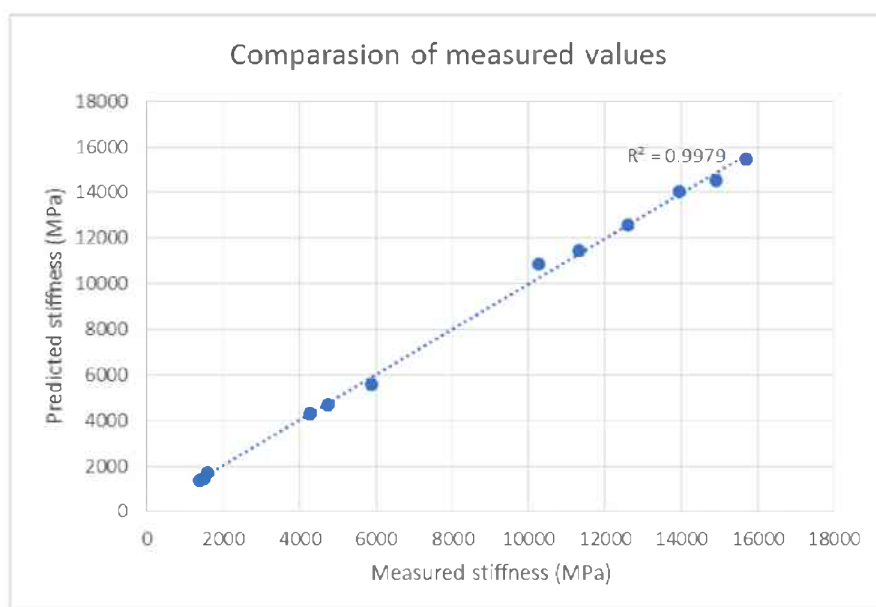
Slike C.38 – C.41 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije 11 – Pjevlja 50%

Series_11 - PUJEVLJA 50%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	log $\alpha(t)$	log(ωr)	ωr	ωr	log E *	E *	Parameters	Obtained values	Initial values	
6.3	3.98	15687	4.1955	4.1891	15454	-0.0065	0.0000	1.8488	2.4487	280.9687	1.0E+06	4.32	20936.5	log(E _{max})	4 325692		
6.3	2.51	14896	4.1731	4.1627	14546	-0.0103	0.0001	1.8488	2.2484	177.1939	1.0E+05	4.31	20566.2	log(E _{min})	2.671101	0.5	
6.3	2	13954	4.1447	4.1482	14066	0.0035	0.0000	1.8488	2.1498	141.1903	1.0E+04	4.29	19638.6	β	-0.03872	-1	
10.5	3.98	12594	4.1002	4.0991	12564	-0.0010	0.0000	1.2630	1.8629	72.9291	1.0E+03	4.24	17484.3	γ	-0.96724	-0.5	
10.5	2.51	11320	4.0538	4.0585	11443	0.0047	0.0000	1.2630	1.6627	45.9930	1.0E+02	4.12	13297.1	EA	211745	200000	
10.5	2	10267	4.0114	4.0365	10876	0.0250	0.0006	1.2630	1.5640	36.6478	8.0E+00	3.85	7105.23	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	5894	3.7704	3.7466	5579	-0.0239	0.0006	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.51	3268.98				
20	2.51	4741	3.6759	3.6717	4696	-0.0042	0.0000	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.14	1379.51				
20	2	4263	3.6297	3.6336	4302	0.0039	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.89	771.211				
30.7	3.98	1588	3.2009	3.2327	1709	0.0318	0.0010	-1.3280	-0.7281	0.1870	1.0E-03	2.76	576.064				
30.7	2.51	1489	3.1729	3.1632	1456	-0.0097	0.0001	-1.3280	-0.9283	0.1179	1.0E-04	2.71	508.452				
30.7	2	1394	3.1443	3.1309	1352	-0.0134	0.0002	-1.3280	-1.0270	0.0940	1.0E-05	2.68	483.772				
					SUM	0.0027		Se		0.0130							

Slika C.38 Numerički podaci – P₅₀Slika C.39 Master kriva za P₅₀ na 20°C



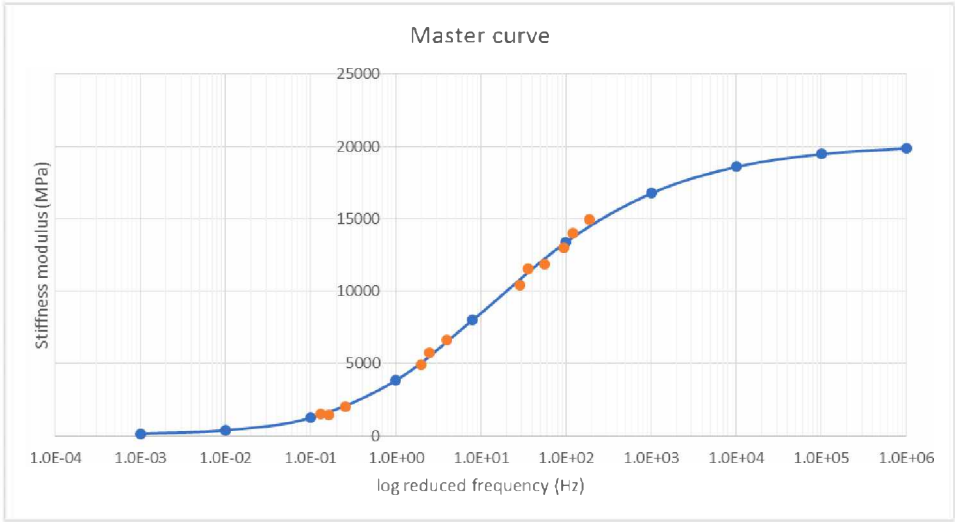
Slika C.40 Faktori pomijeraja – P_{50}



Slika C.41 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – G_{50}

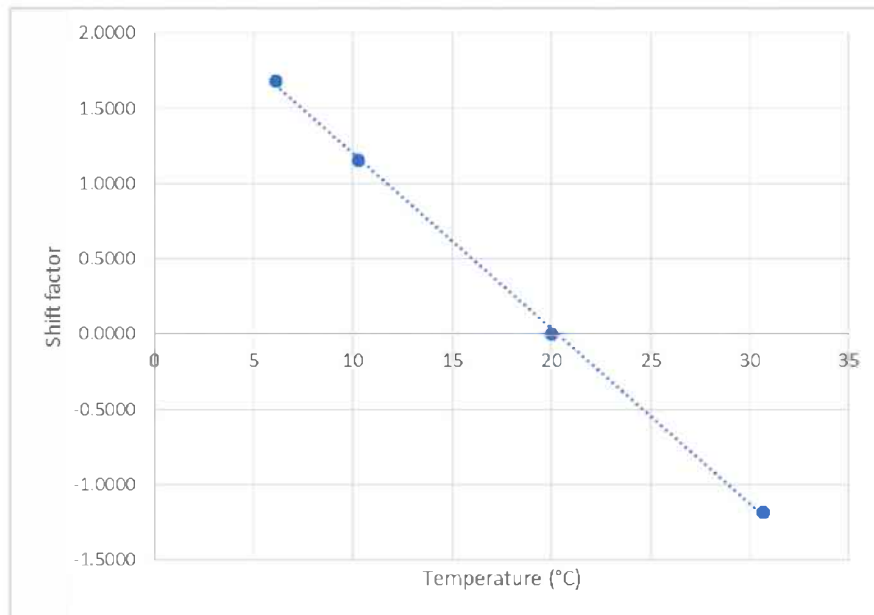
Stike C.42 – C.45 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije I2 – Pjevlja 75%

Series_12 - PIJEVLJA 75%																
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve				Solver variables	
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	loga(t)	log(wr)	wr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values
6.1	3.98	14987	4.1757	4.1614	14501	-0.0143	0.0002	1.6772	2.2771	189.2885	1.0E+06	4.30	19873	log(Emax)	4.305154	
6.1	2.51	14001	4.1462	4.1371	13712	-0.0091	0.0001	1.6772	2.0769	119.3754	1.0E+05	4.29	19471	log(Emin)	1.794599	0.5
6.1	2	12978	4.1132	4.1238	13298	0.0106	0.0001	1.6772	1.9783	95.1198	1.0E+04	4.27	18588.4	β	-0.9078	-1
10.3	3.98	11841	4.0734	4.0896	12292	0.0162	0.0003	1.1531	1.7530	56.6229	1.0E+03	4.22	16757	γ	-0.83125	-0.5
10.3	2.51	11545	4.0624	4.0545	11336	-0.0079	0.0001	1.1531	1.5528	35.7094	1.0E+02	4.13	13388.1	EA	189199.3	200000
10.3	2	10440	4.0187	4.0354	10848	0.0167	0.0003	1.1531	1.4541	28.4537	8.0E+00	3.90	8008.58	Reference temperature [°C]	20	
20	3.98	6649	3.8228	3.8111	6473	-0.0117	0.0001	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.58	3832.6			
20	2.51	5732	3.7583	3.7417	5517	-0.0166	0.0003	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.10	1252.84			
20	2	4944	3.6941	3.7051	5071	0.0110	0.0001	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.60	395.79			
30.7	3.98	2054	3.3126	3.3095	2040	-0.0031	0.0000	-1.1866	-0.5867	0.2590	1.0E-03	2.22	166.447			
30.7	2.51	1464	3.1655	3.2080	1614	0.0425	0.0018	-1.1866	-0.7869	0.1633	1.0E-04	2.00	100.031			
30.7	2	1554	3.1915	3.1572	1436	-0.0343	0.0012	-1.1866	-0.8856	0.1301	1.0E-05	1.89	77.3479			
					SUM		0.0045		Se		0.0168					

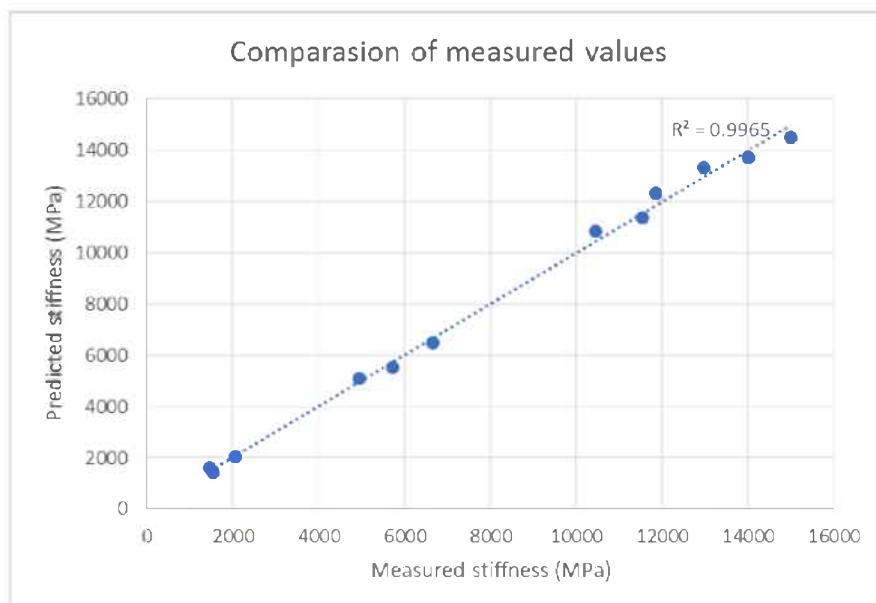


Stika C.42 Numerički podaci – P₇₅

Stika C.43 Master kriva za P₇₅ na 20°C



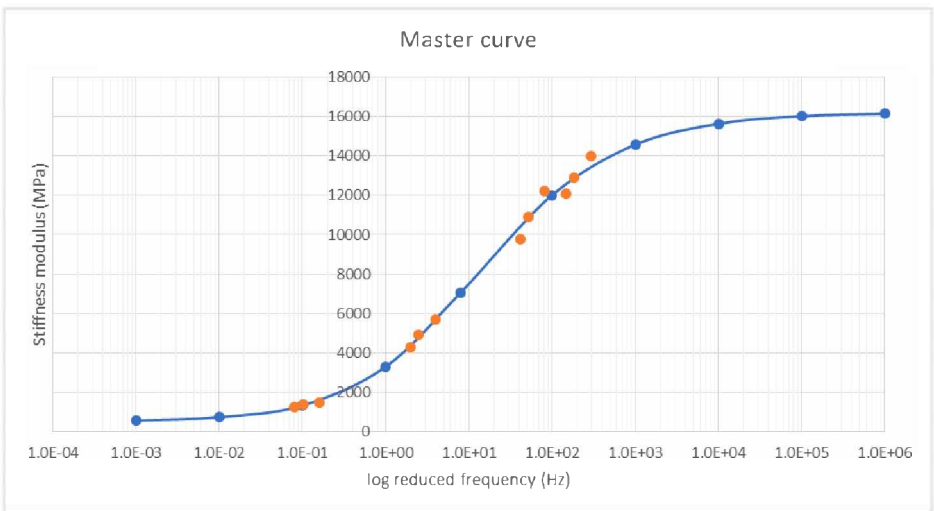
Slika C.44 Faktori pomijeraja – P_{75}



Slika C.45 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – G_{75}

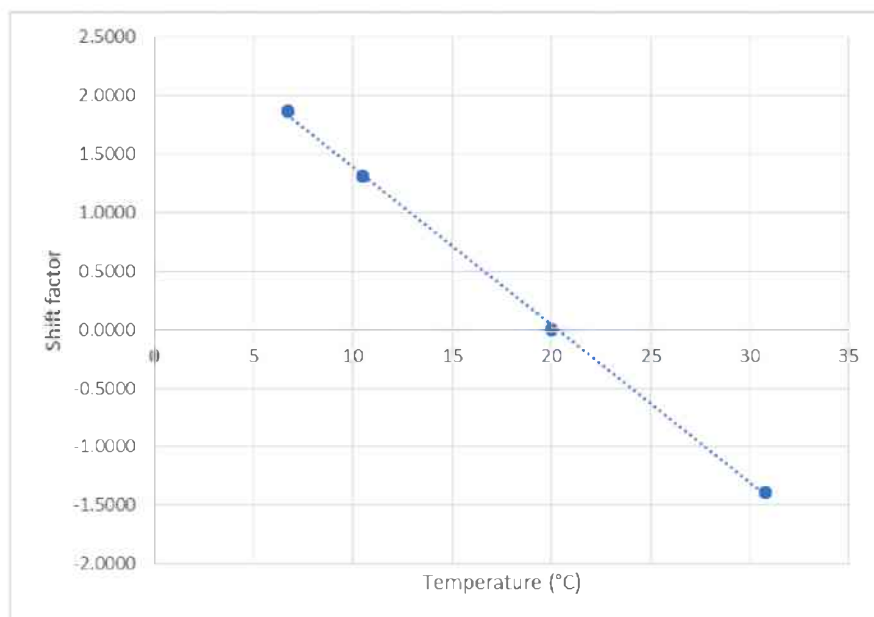
Stike C.46 – C.49 Rezultati ispitivanja modula krutosti serije I3 – Pijevlja 100%

Series_13 - PIJEVLJA 100%																	
Measured Values (Input data)			Predicted Values					Shift Factors			Obtained data - Master curve			Solver variables			
Average temperature [°C]	Frequency [Hz]	Average dynamic modulus	Log average modulus	Log predicted modulus	Predicted modulus [MPa]	Error	Error^2	loga(t)	log(wr)	ωr	wr	log E*	E*	Parameters	Obtained values	Initial values	
6.7	3.98	13990	4.1458	4.1288	13452	-0.0170	0.0003	1.8643	2.4642	291.2271	1.0E+06	4.21	16163.7	log(E _{max})	4.21037		
6.7	2.51	12888	4.1102	4.1102	12888	0.0000	0.0000	1.8643	2.2640	183.6633	1.0E+05	4.20	16030.4	log(E _{min})	2.672274	0.5	
6.7	2	12100	4.0828	4.0996	12579	0.0169	0.0003	1.8643	2.1654	146.3453	1.0E+04	4.19	15644.3	β	-0.19677	-1	
10.5	3.98	12222	4.0871	4.0679	11693	-0.0192	0.0004	1.3138	1.9137	81.9830	1.0E+03	4.16	14579	γ	-1.08941	-0.5	
10.5	2.51	10905	4.0376	4.0371	10892	-0.0005	0.0000	1.3138	1.7135	51.7028	1.0E+02	4.08	12010.2	EA	220265.4	200000	
10.5	2	9749	3.9890	4.0199	10469	0.0309	0.0010	1.3138	1.6149	41.1975	8.0E+00	3.85	7063.24	Reference temperature [°C]	20		
20	3.98	5706	3.7563	3.7499	5622	-0.0064	0.0000	0.0000	0.5999	3.9800	1.0E+00	3.52	3286.55				
20	2.51	4935	3.6933	3.6766	4749	-0.0167	0.0003	0.0000	0.3997	2.5100	1.0E-01	3.12	1315.8				
20	2	4299	3.6334	3.6386	4351	0.0052	0.0000	0.0000	0.3010	2.0000	1.0E-02	2.86	721.999				
30.8	3.98	1470	3.1673	3.1933	1561	0.0260	0.0007	-1.3939	-0.7940	0.1607	1.0E-03	2.74	550.061				
30.8	2.51	1355	3.1319	3.1210	1321	-0.0109	0.0001	-1.3939	-0.9942	0.1013	1.0E-04	2.70	496.467				
30.8	2	1247	3.0959	3.0877	1224	-0.0082	0.0001	-1.3939	-1.0929	0.0807	1.0E-05	2.68	478.961				
						SUM	0.0031	Se	0.0139								

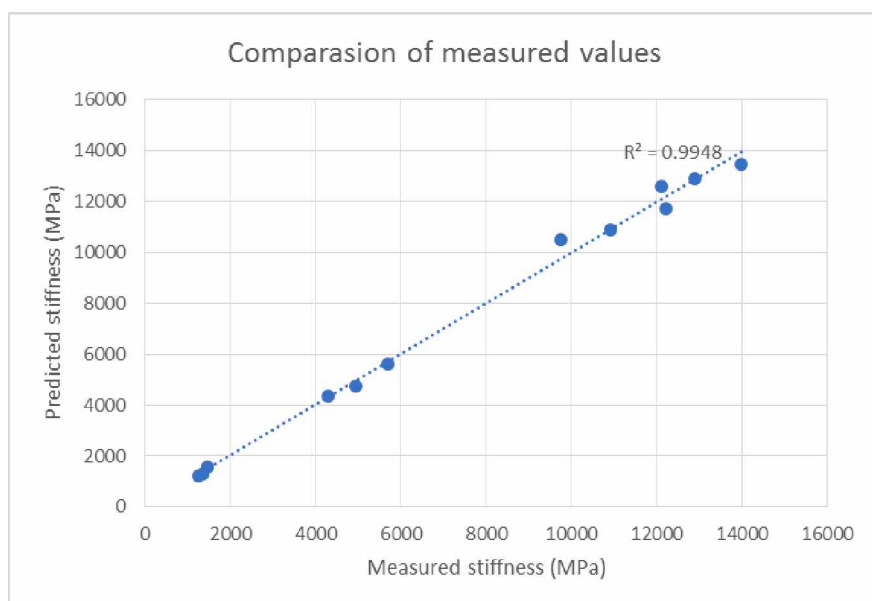


Stika C.46 Numerički podaci P₁₀₀

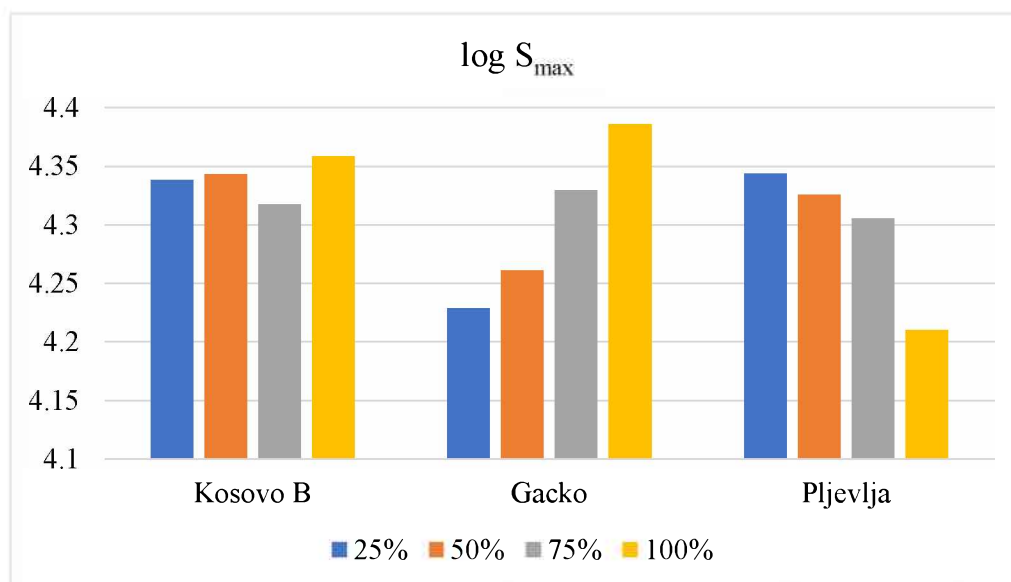
Stika C.47 Master kriva za P₁₀₀ na 20°C



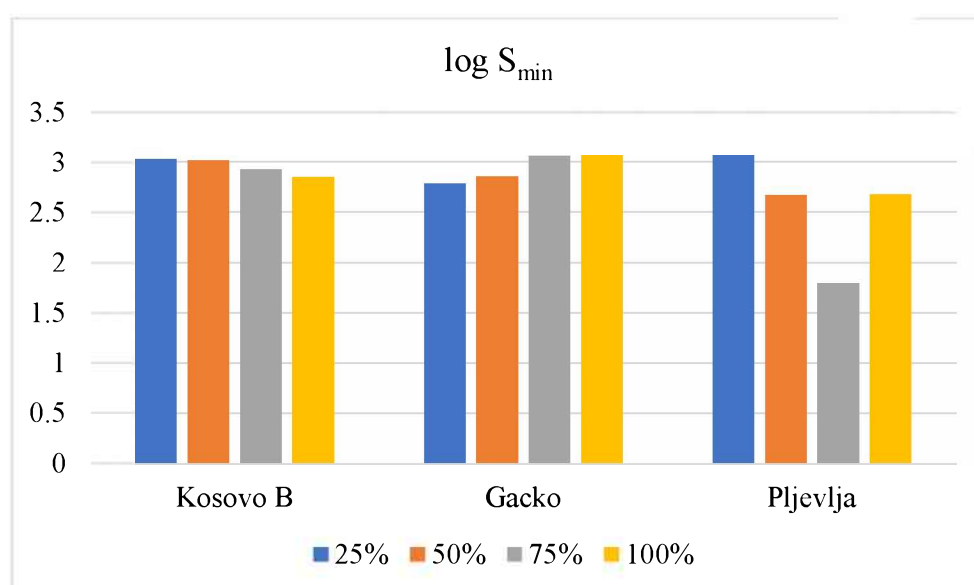
Slika C.48 Faktori pomijeraja – P_{100}



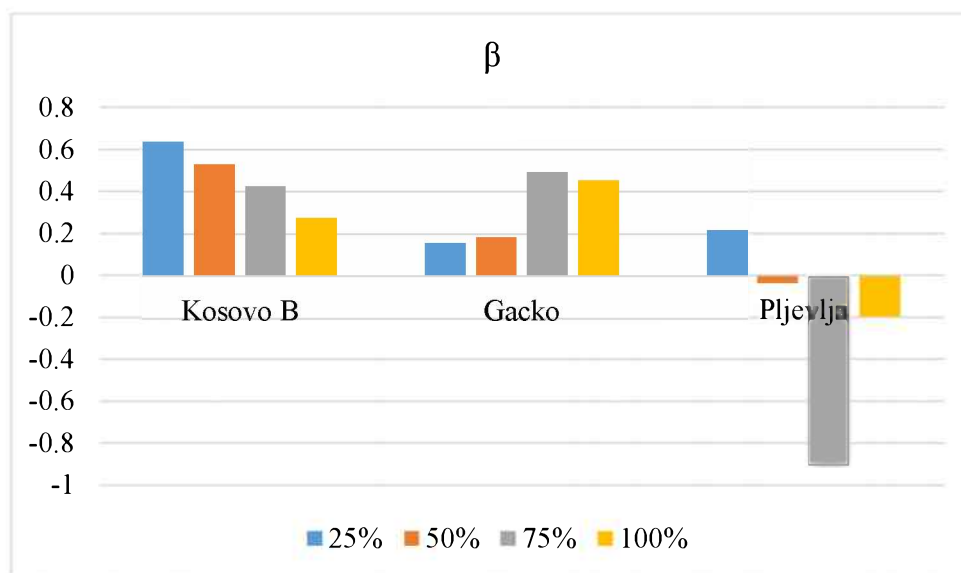
Slika C.49 Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti – G_{25}



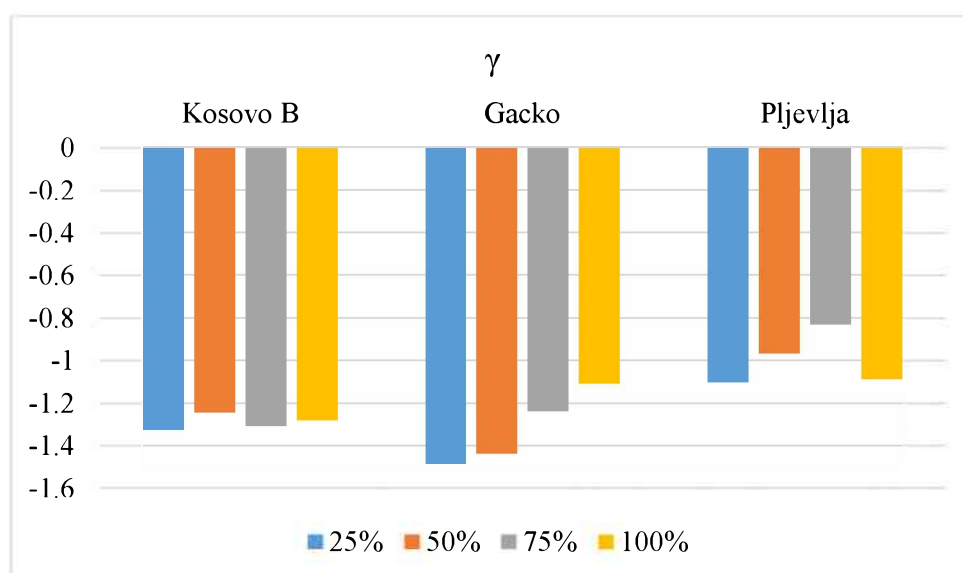
Slika C.50 Vrijednosti S_{\max}



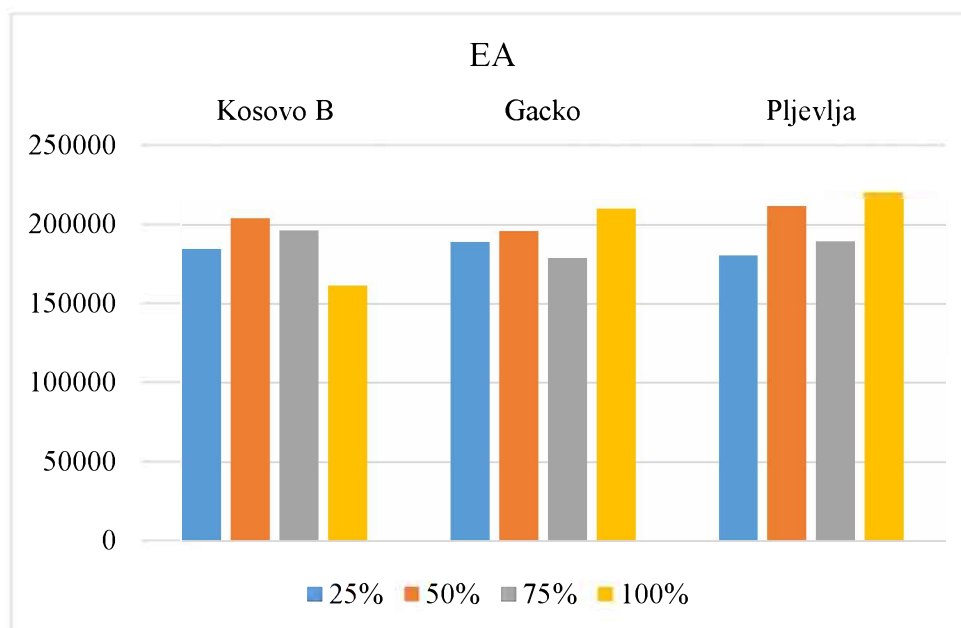
Slika C.51 Vrijednosti S_{\min}



Slika C.52 β - parametar oblikovanja sigmoidalne krive



Slika C.53 γ - parametar oblikovanja sigmoidalne krive



Slika C.54 Aktivaciona energija

PRILOG D

Spisak slika

Drugo poglavlje

Slika 2.1	Distribucija šljake i pepela u tipičnom termo-energetskom postrojenju (Despotović, 2016.)	11
Slika 2.2	Različite klasifikacije elektrofilterskog pepela	19
Slika 2.3	Model zapreminske strukture asfaltnog uzorka	21
Slika 2.4	Vremensko-temperaturna zavisnost bitumena	22
Slika 2.5	Tri perioda starenja bitumena (Barić, 2015.)	23
Slika 2.6	Ponašanje agregata nepravilnog oblika i agregata zaobljenog oblika	24
Slika 2.7	Maseni i zapreminski odnosi komponentnih materijala u asfaltnoj mješavini	27
Slika 2.8	Šematski prikaz komponenti asfaltne mješavine (Žmavc, 2007.)	29
Slika 2.9	Zapreminske karakteristike asfaltne mješavine u funkciji procenta zamjene filera pepelom (Faleh Al-Ani, 2017.)	31
Slika 2.10	Zapreminska masa, VA, VMA i VFB mješavina sa različitim filerima (Kar i sar., 2014.)	32
Slika 2.11	Zapreminska masa, AV i VFB (Adorjányi & Széchenyi 2006.)	33
Slika 2.12	Stabilnost i tečenje mješavina sa različitim filerima za različite sadržaje bitumena od 4% do 7% (Kar i sar., 2014.)	35
Slika 2.13	Stabilnost i tečenje u funkciji procenta zamjene filera pepelom (Faleh Al-Ani, 2017.)	36
Slika 2.14	Maršalova stabilnost, tečenje i Maršalov koeficijent (Adorjányi & Széchenyi 2006.)	36
Slika 2.15	Asfaltni uzorak bez oštećenja (lijevo) i sa oštećenjem usled dejstva vode (desno)	37
Slika 2.16	Temperaturna osjetljivost bitumena (Pellinen i Xiao, 2006.)	38
Slika 2.17	Promjena viskoznosti tokom vremena (mjeseci) na 60°C (Kandhal i sar. 1973.)	39
Slika 2.18	Trajne deformacije asfaltnih slojeva, kolotrazi	45
Slika 2.19	Ilustracija mehanizama pojave kolotruga (Garba 2002.)	45
Slika 2.20	Dispozicije kolotruga u odnosu na opterećenje točkova (izvor: Strineka i sar. 2010)	46

Slika 2.21	Klasičan oblik dijagrama trajnih deformacija u funkciji broja ciklusa opterećenja (izvor: NCHRP RPT 580).....	47
Slika 2.22	Uticaj sezonskih efekata na kolotrage (izvor: NCHRP RPT 468-a)	48
Slika 2.23	Funkcije idealizovane zavisnosti krutosti (napon/deformacija) od vremena opterećenja bitumena podvrgnutog aksijalnom naponu zatezanja (Žmavc, 2007.).....	52
Slika 2.24	Dispozicije ispitivanja modula krutosti prema standardu EN 12697-26...	54
Slika 2.25	Komponente kompleksnog modula E^*	55
Slika 2.26	Dijagram napona i dilatacija u vremenu, pri dinamičkom opterećenju (Stiffness of Asphalt Mix, 2006.).....	56
Slika 2.27	Osjetljivost krutosti asfaltne mješavine na promjenu temperature i starenje bitumena	58
Slika 2.28	Međuzavisnost osobina asfaltnog sloja (Pellinen, 2004.)	58
Slika 2.29	Primjer master krive kompleksnog modula (izvor: MnDOT 2003.).....	60

Treće poglavlje

Slika 3.1	Matrica ispitivanja komponentnih materijala.....	71
Slika 3.2	Matrica ispitivanja asfaltnih mješavina	73
Slika 3.3	Frakcije kamenog agregata iz kamenoloma Okruglički krš, Štitarica	74
Slika 3.4	Bitumen BIT 50/70.....	74
Slika 3.5	Kameno brašno „Šišković“	75
Slika 3.6	Elektrofilterski pepeli upotrijebljeni u eksperimentu	76
Slika 3.7	Granulometrijski sastav mineralne mješavine.....	79
Slika 3.8	Laboratorijska mješalica	80
Slika 3.9	Maršalov nabijač i Maršalovi uzorci	82
Slika 3.10	Segmentni nabijač i oprema za opit kolotražnja.....	83

Četvrto poglavlje

Slika 4.1	Granulometrijski sastav frakcija kamenog agregata	86
Slika 4.2	SEM snimci uzoraka EFP	89
Slika 4.3	Krive granlometrijskog sastava kamenog brašna i tri EFP	91
Slika 4.4	EDS spektrogrami čestica elektrofilterskih pepela	93

Slika 4.5	Uporedni prikaz sadržaja oksida	94
Slika 4.6	Klasifikacija pepela prema ASTM C 618-05	95
Slika 4.7	Sadržaj organskih materija	98
Slika 4.8	XRD snimci uzoraka elektrofilterskog pepela	103

Peto poglavlje

Slika 5.1	Prividna zapreminska masa	109
Slika 5.2	Zapreminska masa	109
Slika 5.3	Granulometrijske krive prosijavanja pepela i mineralnog filera	110
Slika 5.4	Šupljine u mineralnoj mješavini	111
Slika 5.5	Šupljine u asfaltnom uzorku	111
Slika 5.6	Stabilnost	113
Slika 5.7	Tečenje	114
Slika 5.8	Maršalov koeficijent	115
Slika 5.9	Kondicioniranje Maršalovih uzoraka u vodi na temperaturi od 40°C	116
Slika 5.10	Položaj uzorka prilikom ispitivanja čvrstoće na indirektno zatezanje (ITS)...	116
Slika 5.11	ITSR - Rezultati ispitivanja otpornosti na dejstvo vode	118
Slika 5.12	Uređaj za ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju	119
Slika 5.13	Dispozicija opterećenja uzorka prilikom ispitivanja asfaltne mješavine na trajnu deformaciju	119
Slika 5.14	Izgled ploča poslije opita kolotražnja	120
Slika 5.15	Trajna deformacija asfaltnih mješavina P grupe i KM	120
Slika 5.16	Trajna deformacija asfaltnih mješavina G grupe i KM	121
Slika 5.17	Trajna deformacija asfaltnih mješavina K grupe i KM	121
Slika 5.18	Proporcionalna dubina kolotraga	125
Slika 5.19	Nagib krive tečenja	126
Slika 5.20	Dispozicija ispitivanja modula krutosti	128
Slika 5.21	Ispitivanje modula krutosti	129
Slika 5.22	Oblik signala opterećenja prilikom ispitivanja modula krutosti	130
Slika 5.23	Dispozicija sile i deformacije u odnosu na opterećeni uzorak	131
Slika 5.24	Formiranje master krive u zavisnosti od β i γ parametara	132
Slika 5.25	Faktori pomijeraja za kontrolnu mješavinu	133

Slika 5.26	Master kriva za kontrolnu mješavinu na 20°C	134
Slika 5.27	Upoređenje ispitanih i modeliranih vrijednosti modula krutosti za kontrolnu mješavinu	134
Slika 5.28	Master krive za mješavine P grupe	135
Slika 5.29	Master krive za mješavine G grupe.....	135
Slika 5.30	Master krive za mješavine K grupe.....	136
Slika 5.31	Zavisnost PRD od S_{min}	138

PRILOG E

Spisak tabela

Drugo poglavlje

Tabela 2.1	Podjela EFP prema međunarodnom sistemu klasifikacije (Knežević 2015)....	14
Tabela 2.2	Podjela EFP prema Ph klasifikacija pepela.....	15
Tabela 2.3	Podjela EFP prema Američkom standardu ASTM C 618-05	16
Tabela 2.4	Podjela EFP prema McCarthy	16
Tabela 2.5	Klasifikacija pepela prema UralVTI “F.E.Džeržinski”	17
Tabela 2.6	Poljska klasifikacija na bazi hemijskog sastava	17
Tabela 2.7	Poljska klasifikacija na bazi granulometrijskog sastava	18
Tabela 2.8	Poljska klasifikacija na bazi gubitka žarenjem	18
Tabela 2.9	Tehnički uslovi za asfaltne mešavine u odnosu na ITSR (izvor: Chomicz-Kowalska i sar. 2016 i Radević, 2017.).....	43
Tabela 2.10	Otpornost na trajnu deformaciju asfaltnih mješavina – faktori uticaja (Sousa i sar. 1994.,Kandhal & Cooley 2003.).....	49
Tabela 2.11	Faktori koji utiču na krutost asfaltne mješavine (Tangella i sar. 1990.)..	62

Treće poglavlje

Tabela 3.1	Kodovi mješavina u skladu sa procentom zamjene kamenog brašna elektrofilterskim pepelom	72
Tabela 3.2	Pregled sprovedenih ispitivanja uzorkovanih pepela	76
Tabela 3.3	Učešće komponentnih materijala u projektovanom sastavu asfaltne mješavine.....	81

Četvrto poglavlje

Tabela 4.1	Granulometrijski sastav frakcija kamenog agregata i kriterijumi prema JUS U.E4.014.....	86
Tabela 4.2	Fizičke karakteristike frakcija kamenog agregata i kriterijumi prema JUS U.E4.014.....	87
Tabela 4.3	Karakteristike bitumena - kriterijum: MEST EN 12591	87
Tabela 4.4	Karakteristike kamenog brašna – kriterijum: JUS B.B3.045:1982	88
Tabela 4.5	Fizičke karakteristike elektrofilterskog pepela i kamenog brašna	88

Tabela 4.6	Mehaničke karakteristike uzoraka elektrofilterskog pepela i kamenog brašna	90
Tabela 4.7	Prosječni hemijski sastav elektrofilterskog pepela - SEM metoda	94
Tabela 4.8	Klasifikacija pepela prema Ph klasifikaciji	97
Tabela 4.9	Klasifikacija ispitanih pepela prema hemijskom sastavu.....	97
Tabela 4.10	Sadržaj teških metala u uzorcima elektrofilterskog pepela	99
Tabela 4.11	Sadržaj parametara izlučevine u uzorcima elektrofilterskog pepela	100
Tabela 4.12	Aktivnost radionuklida u uzorcima elektrofilterskog pepela	101
Tabela 4.13	Sadržaj amorfne i kristalne faze u elektrofilterskim pepelima.....	104

Peto poglavlje

Tabela 5.1	Zapreminske karakteristike Maršalovih uzoraka	108
Tabela 5.2	Prosječne vrijednosti ITS i vrijednosti ITSr	117
Tabela 5.3	Rezultati opita točkom	122
Tabela 5.4	Rezultati ispitivanja modula krutosti.....	133

BIOGRAFIJA AUTORA

Katarina Mirković rođena je 20.08.1964. god. u Podgorici, gdje je završila osnovnu i srednju školu. Na Građevinski fakultet Univerziteta Crne Gore upisala se studijske 1983./1984.god. Diplomski rad sa temom *Idejno rješenje glavne saobraćajnice u Rijeci Crnojevića* odbranila je septembra 1993. god. sa ocjenom „10“, pod mentorstvom prof. dr Mihaila Maletina. Stručni ispit za diplomiranog inženjera građevinarstva, saobraćajnog smjera, položila je u junu 2005. god. pred komisijom Inženjerske komore Crne Gore.

Poslije niza godina sticanja iskustva u inženjerskoj praksi, od kojih se izdvaja obavljanje stručnog nadzora na izgradnji Tunela Sozina i pristupnih saobraćajnica, studijske 2006./2007. god. upisala je Postdiplomske magistarske akademske studije Građevinskog fakulteta UCG. Poslije položenih ispita sa prosječnom ocjenom „A“, pod mentorstvom doc. dr Vlada Kapora, u junu 2010. god. odbranila je magistarski rad pod nazivom *Metode projektovanja vrućih asfaltnih mješavina za fleksibilne kolovozne konstrukcije* sa ocjenom „A“.

Studijske 2010./2011. god. upisala se na Postdiplomske doktorske studije Građevinskog fakulteta UCG, naučna oblast Građevinarstvo, smjer saobraćajno-urbanistički, gdje je sa prosječnom ocjenom „A“ položila sve ispite i u avgustu 2014. god., pred komisijom odbranila rezultate Polaznih istraživanja.

Od septembra 2009. god. angažovana je na Građevinskom fakultetu UCG kao honorarni saradnik, a radni odnos na Građevinskom fakultetu zasnovala je u oktobru 2011. god. u svojstvu saradnika u nastavi u izvođenju nastave (vježbanja) na Odsjeku za saobraćajnice i to: na Osnovnim studijama Studijskog programa Menadžment u građevinarstvu na predmetima Gradske saobraćajnice i Putevi i željezničke pruge, na Specijalističkim studijama Studijskog programa Građevinarstvo, smjer saobraćajni, na predmetima: Kolovozne konstrukcije, Projektovanje i građenje željezničkih pruga, Željezničke stanice i Gornji stroj željeznica. Od studijske 2018./2019. god. u svojstvu stručnog saradnika izvodi nastavu i na Osnovnim studijama Studijskog programa

Građevinarstvo iz predmeta Osnove saobraćajnica, kao i na Mašinskom fakultetu UCG na Studijskom programu Drumski saobraćaj, iz predmeta Osnove saobraćajne infrastrukture.

Kao projektant saradnik, a kasnije kao odgovorni projektant, učestvovala je u izradi projektne dokumentacije, stručnom nadzoru i reviziji projektne dokumentacije većeg broja projekata. Tokom izrade doktorske disertacije, iz oblasti istraživanja objavila je rad u međunarodnom časopisu indeksiranom na SCI listi, kao i tri rada na međunarodnim i regionalnim skupovima i časopisima.

Čita, piše i govori engleski jezik. Udata je za supruga Milana i majka je troje djece, Luke, Alekse i Maše.

Izjava o autorstvu

Potpisana Katarina Mirković

Broj indeksa/upisa 5/10

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Primjena elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedila autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 19. 09. 2019. godine

Potpis doktoranda



Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Katarina Mirković

Broj indeksa/upisa 5/10

Studijski program Građevinarstvo

Naslov rada Primjena elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama

Mentor prof. Dr Goran Mladenović

Potpisana Katarina Mirković

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naziv disertacije i datum odbrane rada.

U Podgorici, 19. 09. 2019. godine

Potpis doktoranda



Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom: *Primjena elektrofilterskog pepela u asfaltnim mješavinama*

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim prilogima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo

2. Autorstvo – nekomercijalno

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade

4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerade

6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

U Podgorici, 19. 09. 2019. godine

Potpis doktoranda

