

V.prof. dr Goran Mladenović, dipl.građ.inž.<sup>1</sup>  
Jelena Dorđević, dipl.građ.inž.<sup>2</sup>  
Nikola Milovanović, mast.inž.građ.<sup>3</sup>

## PRIMENA BIO-VEZIVA ZA ASFALTNE SLOJEVE KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA

0352-2733, 55 (2023), p. 112-140  
doi: 10.5937/GK23055112M

UDK: 691.16:502.131.1  
625.878.7  
PREGLEDNI RAD

### Rezime

Bitumen, kao osnovno vezivo koje se primenjuje za izradu asfaltnih slojeva kolovoznih konstrukcija, se dobija destilacijom sirove nafte, koja će kao fosilno gorivo, imati ograničenu dostupnost u budućnosti i čija eksploatacija ima značajan negativan uticaj na okolinu. Koncept bio-veziva je nedavno razvijen i odnosi se na veziva za asfaltne mešavine koja sadrže bio-obnovljive materijale. U okviru rada su prikazana tipovi bio-veziva, njihova primena, osnovni zahtevi da bi mogli da budu primenjena u asfaltnim slojevima, kao i postupci proizvodnje. Prikazane su osnovne fizičke i hemijske karakteristike bio-ulja, kao i značajne karakteristike bio-veziva i njihov uticaj na otpornost na starenje modifikovanih bitumena. Konačno, dat je prikaz uticaja primene bio-veziva na ponašanje asfaltnih mešavina, koji u znatnoj meri zavisi od porekla biomase korišćene za dobijanje bio-veziva. Bio-veziva generalno utiču povoljno na poboljšanje karakteristika asfaltnih mešavina na niskim temperaturama, ali dovode do smanjenja otpornosti mešavina na kolotrage na visokim temperaturama. Pored ovoga, dat je i prikaz primene bio veziva za regeneraciju ostarelog bitumena iz struganog asfalta koji se u velikoj meri priemnjuje prilikom recikliranja asfaltnih mešavina.

**Ključne reči:** bitumen, bio-ulje, bio-vezivo, strugani asfalt, osveživači

---

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

<sup>2</sup> Institut za rudarstvo i metalurgiju u Boru, Srbija, djordjevic.jelena030@gmail.com

<sup>3</sup> Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija, nmilovanovic@imk.grf.bg.ac.rs

# USE OF BIO-BINDERS FOR ASPHALT LAYERS OF PAVEMENT STRUCTURES

## Summary

Bitumen, as the main binder used for the production of asphalt layers of road constructions, is obtained by distilling crude oil, which, as a fossil fuel, will have limited availability in the future and whose exploitation has a significant negative impact on the environment. The concept of bio-binders has recently been developed and refers to binders for asphalt mixtures containing bio-renewable materials. The paper presents the types of bio-binders, their application, the basic requirements so that they can be used in asphalt layers, as well as the production procedures. The basic physical and chemical characteristics of bio-oil, as well as the significant characteristics of bio-binders and their influence on the aging resistance of modified bitumens are presented. Finally, the impact of the application of bio-binder on the performance of asphalt mixtures is presented, which depends to a considerable extent on the origin of the biomass used for production of bio-binder. Bio-binders generally have a favorable effect on improving the characteristics of asphalt mixtures at low temperatures, but lead to a decrease in the rutting resistance of the mixtures at high temperatures. In addition to this, a description of the application of bio-binders for the rejuvenation of aged bitumen from reclaimed asphalt pavement, which is widely used in the recycling of asphalt mixtures, is presented.

**Key words:** bitumen, bio-oil, bio-binder, reclaimed asphalt pavement, rejuvenator

## 1. UVOD

Globalnu putnu mrežu čini preko 21 milion km puteva [1], od kojih se oko 5 miliona km nalazi u Evropskoj uniji (EU) [2]. Ova mreža čini osnovu ekonomskih aktivnosti u većini zemalja sveta omogućavajući transport ljudi i robe i dalji ekonomski razvoj [3]. Pored približno 16430 km državnih puteva [4], putna mreža Srbije uključuje i oko 31500 km lokalnih puteva za čije održavanje su zadužene lokalne samouprave [5].

Preko 90% puteva u svetu je izgrađeno sa fleksibilnim kolovoznim konstrukcijama, u kojima su zastor i gornja podloga dominantno urađeni sa asfaltnim slojevima. U Srbiji je taj procenat i veći imajući u vidu nivo saobraćajnog opterećenja i prednosti fleksibilnih kolovoza u pogledu mogućnosti fazne izgradnje, prilagođavanja nosivosti saobraćajnom opterećenju i raspoloživih tretmana periodičnog održavanja.

Svake godine u svetu se proizvede više od 1,6 biliona tona asfalta [6], od čega se preko 290 miliona tona proizvodi u Evropi [7]. Prema podacima Republičkog zavoda za statistiku [5], u Srbiji se poslednjih godina proizvodi oko 2.4 miliona tona asfalta, izuzev 2020. godine, kada je proizvodnja bila nešto manja zbog pandemije COVID-19.

Za izgradnju i održavanje puteva se sve više primenjuju rešenja koja su usmerena ka smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu u smislu emisije gasova staklene bašte i potrošnje energije, kao i očuvanju prirodnih resursa kroz maksimalnu upotrebu recikliranih i alternativnih materijala uz uslov da se očuva trajnost i zadovoljavajuće karakteristike objekata tokom eksploatacije.

Primena struganog asfalta u određenom procentu je u svetu, za razliku od Srbije, postala standardna praksa za proizvodnju asfaltnih mešavina i po toplom i po hladnom postupku, a u novije vreme se sve više istražuju i koriste asfaltna mešavina sa visokim procentom struganog asfalta [8].

Bitumen, kao osnovno vezivo koje se primenjuje za izradu asfaltnih slojeva kolovoznih konstrukcija, se dobija destilacijom sirove nafte, koja će kao fosilno gorivo, imati ograničenu dostupnost u budućnosti i čija eksploatacija ima značajan negativan uticaj na okolinu. U skladu sa principima održivog razvoja i cirkularne ekonomije, u prethodnom periodu je izvršen značajan napredak u pogledu komercijalne proizvodnje biogoriva iz obnovljivih izvora, kao što je biomasa koja može imati poreklo od poljoprivrednih kultura, komunalnog otpada ili nusproizvoda obrade drveta.

Koncept bio-veziva je nedavno razvijen i odnosi se na veziva za asfaltna mešavina koja sadrže bio-obnovljive materijale. U tom smislu, postoje različite vrste bio-veziva i njihova upotreba još uvek nije široko rasprostranjena, pre svega zbog nepoznavanja njihovog dugoročnog ponašanja u fazi eksploatacije.

Cilj ovog rada je da prikaže trenutno stanje u pogledu mogućnosti primene alternativnih veziva na bio-bazi koja se mogu koristiti za proizvodnju i regeneraciju asfaltnih slojeva kolovoznih konstrukcija.

## **2. TIPOVI BIO-VEZIVA**

Postoji više alternativnih materijala koji se potencijalno mogu koristiti u izgradnji puteva, u nevezanim slojevima kao delimična ili potpuna zamena za kameni agregat, a u vezanim slojevima se pored toga ovi materijali mogu koristiti i za modifikaciju veziva, uz uslov da ispune određene zahteve u pogledu kompatibilnosti, mogućnosti proizvodnje i ponašanja u fazi eksploatacije.

Postoji nekoliko mogućih podela alternativnih bio-veziva u zavisnosti od njihovog porekla, agregatnog stanja, načina dobijanja ili funkcije koju mogu da imaju u asfaltnim slojevima kolovoznih konstrukcija.

U pogledu porekla, bio-materijali generalno mogu biti biljnog i životinjskog porekla, dok se u pogledu agregatnog stanja mogu podeliti na čvrste bio-materijale, kao što su prirodna vlakna [9], lignin [10] ili mlevena ili kafa u zrnu [11], i na bio-materijale u tečnom stanju, koji se najčešće nazivaju bio-ulja.

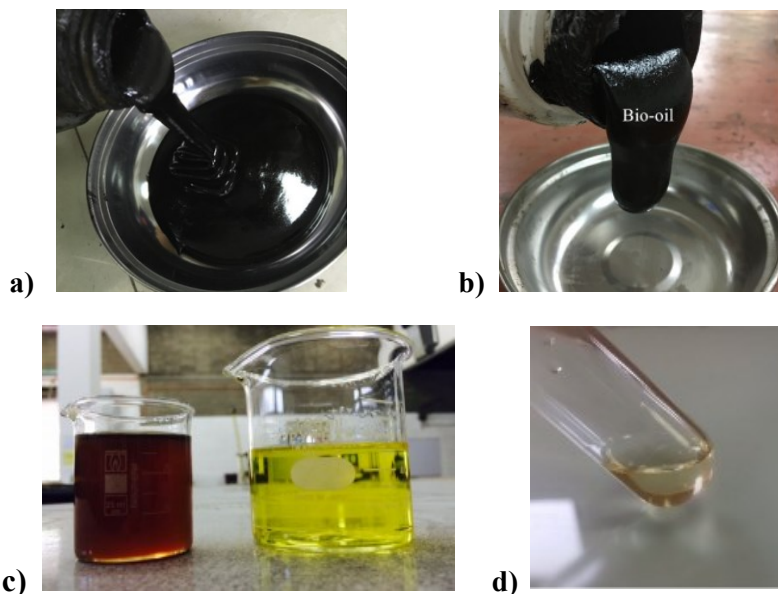
U zavisnosti od porekla, bio-ulja se mogu grupisati u pet osnovnih grupa. Veliku grupu čine materijali koji se dobijaju kao nusproizvodi drvene industrije, koji nastaju pri proizvodnji celuloze ili papira, u šta spadaju lignin, kao i razne vrste smola i ulja, poput onih dobijenih iz borova [12,13,14].

Drugu značajnu grupu čine bio-ulja koja se dobijaju iz biomase biljnog porekla, koja se najčešće dobija kao nusproizvod poljoprivredne proizvodnje [15,16,17] i koja čini oko 60% svih izvora biomase [18].

Više istraživačkih timova je koristilo otpadno jestivo ulje, posebno za regeneraciju mešavina sa struganim asfaltom [19].

Poslednje dve grupe čine bio-ulja dobijena iz životinjskog stajnjaka [20] i bio-ulja dobijena iz mikroalgi [21].

Na slici 1 prikazana su neka bio-ulja različitog porekla.



**Slika 1.** Bio-ulja različitog porekla (a) otpadno drvo [22], (b)kukuruzna stočna hrana [23], (c) otpadno jestivo ulje [24], (d) ulje od semena urme [25]

### 3. PRIMENA BIO-VEZIVA

Bio-veziva se mogu koristiti na tri različita načina u asfaltnim mešavinama kako bi se smanjio udeo bitumena na bazi fosilnih goriva:

(1) kao modifikator bitumena (u količini do 10% u odnosu na količinu bitumena),

(2) kao delimična zamena bitumena (25% do 75% bitumena) i

(3) kao direktno alternativno vezivo (potpuna zamena) [26].

Pri tome su do sada istraživane dominantno prve dve kategorije koje suštinski podrazumevaju delimičnu zamenu bitumena. Većina radova u kojima je prikazana primena bio-veziva kao potpune zamene bitumena došla je do zaključka da je neophodno izvršiti modifikaciju ovog veziva značajnom količinom polimera, čime se onda dezavuišu prednosti primene bio-veziva u pogledu smanjenog uticaja na okolinu.

Alternativni način upotrebe bio-veziva u asfaltnim mešavinama odnosi se na njihovu upotrebu za osvežavanje (regeneraciju) ostarelog bitumena kod primene struganog asfalta. Ostareo bitumen u struganom asfaltu je tipično krt i krut, kao posledica starenja tokom eksploatacije, i kao takav mnogo podložniji nastanku pukotina, posebno termičkih pukotina na niskim temperaturama, što ograničava sadržaj struganog asfalta u novim asfaltnim mešavinama i slojevima. Kod manjih sadržaja struganog asfalta primenjuje se konvencionalni mekši bitumen, kako bi se povratila neka od svojstava originalnog bitumena i smanjili njegova krutost i viskozitet. Međutim, pri primeni većeg sadržaja struganog asfalta potrebno je primeniti tzv. osveživače ili regeneratore (eng. »rejuvenators«) kako bi se povratila hemijska struktura i postigla veća aktivacija ostarelog bitumena iz struganog asfalta. Primena bio-veziva kao alternativnih sredstava za osvežavanje ostarelog bitumena u ovom trenutku predstavlja verovatno najznačajniju i najrealniju mogućnost za veće korišćenje ovog materijala u asfaltnim slojevima kolovoznih konstrukcija.

### 4. ZAHTEVI KOJE BIO-VEZIVA TREBA DA ISPUNE

Primena bio-veziva nije do sada široko rasprostranjena iz više razloga:

1. Još uvek ne postoji dovoljno podataka o dugoročnom ponašanju ovih materijala u fazi eksploatacije
2. Mogućnost recikliranja asfaltnih mešavina sa bio-vezivima nije u dovoljnoj meri istražena, dok se klasične asfaltne mešavine mogu reciklirati i do 100%, i dodatak bilo kog materijala ne sme negativno da utiče na mogućnost recikliranja

3. Uticaji na zdravlje, bezbednost na radu i okolinu treba da budu dodatno istraženi pre nego što ovi materijali mogu biti široko primenjeni, i
4. Nema dovoljno informacija o potencijalnim troškovima pripreme i upotrebe ovih materijala.

Stoga, u cilju primene bio-veziva u asfaltnim mešavinama, prvo treba istražiti da li ona predstavljaju realnu alternativu za klasični bitumen, čijom primenom bi mogao da se smanji negativan uticaj na okolinu i da se redukuju troškovi izgradnje puteva, a da se ne ugrozi njihova trajnost i funkcionalnost.

U tom smislu može se postaviti nekoliko ključnih zahteva koje bi bio-veziva morala da ispune kako bi se mogla koristiti za proizvodnju asfaltnih mešavina.

U pogledu same proizvodnje, ova veziva ne bi smela da dovedu do povećanja rizika i ugrožavanja bezbednosti prilikom proizvodnje asfaltnih mešavina [27]. Međutim, imajući u vidu njihovu organsku prirodu, ona mogu imati znatno nižu tačku paljenja u odnosu na konvencionalni bitumen, što može biti zabrinjavajuće imajući u vidu temperature proizvodnje i ugrađivanja asfaltnih mešavina.

Drugi značajan zahtev je da asfaltne mešavine sa bio-vezivima moraju biti reciklabilne na kraju eksploatacionog perioda.

Konačno, troškovi pripreme, spravljanja i ugrađivanja asfaltnih mešavina sa bio-vezivima moraju biti uporedivi sa troškovima mešavina sa klasičnim bitumenom, uz uslov da obezbede isto ili bolje ponašanje u fazi eksploatacije.

Pored toga, da bi upotreba bio-veziva bila realna opcija za njihovu komercijalnu primenu, ona moraju biti dostupna u velikim količinama, i transport asfaltnih mešavina sa ovim vezivom mora biti moguć bez nekih dodatnih mera i troškova. To znači da akcenat treba da bude na lokalno dostupnim materijalima, što onda ima pozitivne efekte i u pogledu troškova i u pogledu uticaja na okolinu samog transporta [27,28].

Generalno, što su manje potrebne izmene u tehnološkim postupcima i opremi imajući u vidu uslove skladištenja, mešanja, transporta, ugrađivanja i zbijanja, to je veća mogućnost primene bio-veziva u asfaltnim mešavinama.

Slično kao i u slučaju modifikovanog bitumena, bio-vezivo treba da bude stabilno, kako ne bi došlo do razdvajanja faza i/ili hemijskih promena tokom normalnog skladištenja, niti tokom umešavanja asfaltnih mešavina. Takođe, ne treba da dođe do segregacije tokom transporta, mešavine sa bio-vezivima

treba da se ugrađuju standardnim tehnologijama zbijanja i treba da budu otporne na dejstvo naftnih derivata.

## 5. POSTUPCI DOBIJANJA BIO-ULJA

Bio-ulja se dobijaju od biomase različitog porekla. Zbog sadržaja značajne količine vode i isparljivih materija, bio-ulja se po pravilu ne mogu koristiti kao bio-veziva bez prethodnog termičkog tretmana ili određene nadogradnje. Postupak toplotne obrade/nadogradnje za dobijanje bio-veziva primarno zavisi od vrste bio-ulja i treba da bude određen za svaku vrstu posebno zbog značajne razlike u pogledu hemijskog sastava, procesa i vrste bioobnovljivog resursa iz kojeg su dobijena bio-ulja.

Dva najčešće korišćena postupka za dobijanje bio-ulja su piroliza i hidrotermalna likvefakcija, pri čemu se piroliza najčešće koristi za dobijanje bio-ulja biljnog porekla, dok se hidrotermalna likvefakcija koristi za bio-ulja životinjskog porekla.

Najčešće primenjivani tehnološki postupak za dobijanje bio-veziva iz biomase podrazumeva termičko-hemijsku preradu koja se naziva piroliza. Postoji nekoliko tipova pirolize u zavisnosti od temperature i vremena zadržavanja, kao što su brza ili spora piroliza, karbonizacija ili gasifikacija. Za dobijanje bio-ulja se najčešće koristi brza piroliza zbog visoke efikasnosti, jednostavnosti i malih troškova [18].

U brzom pirolizi, materijali biomase se brzo zagrevaju na temperaturu od 450–600°C u odsustvu kiseonika, a zatim se pare naglo hlade (<2 s). Tom prilikom se formiraju ugljevi i isparenja, od kojih se dobijaju tečnosti i gasovi. Ugljevi i gasovi koji se ovom prilikom formiraju se mogu ponovo koristiti kao energenti u samom procesu. Temperatura pirolize takođe može uticati na prinos i svojstva bioveziva. Formiranje bioveziva uključuje depolimerizaciju i fragmentaciju celuloze, hemiceluloze i lignina, što rezultira velikom količinom različitih jedinjenja, uključujući karboksilne kiseline, ketone, fenole, aldehide, alkohole i estre [29].

Fini i ostali [20] su za proizvodnju bio-ulja iz svinjskog đubriva koristili proces hidrotermalne likvefakcije, primenom reaktora pod visokim pritiskom i na temperaturi od 500 °C. Nakon razdvajanja na frakcije, laki ugljovodonici se mogu koristiti kao bio-gorivo, a teški ostatak predstavlja bio-vezivo koje se može koristiti za modifikaciju bitumena.

## 6. KARAKTERISTIKE BIO-ULJA

Fizičke i hemijske karakteristike bitumena su posledica njegovog hemijskog sastava. Bitumen predstavlja mešavinu ugljovodonika umerene molekulske mase, pretežno alifatičnih i aromatičnih, koji sadrže određenu količinu sumpora, male količine kiseonika i azota, i druge elemente u tragovima uključujući prelazne metale [28].

Ukoliko se bitumenu dodaju bio-ulja, potrebno je sagledati i njihove fizičke i hemijske karakteristike zbog mogućeg uticaja na karakteristike i ponašanje bio-veziva.

### 6.1 Fizičke karakteristike bio-ulja

Na sobnoj temperaturi bio-ulja su tipično u tečnom stanju i njihove karakteristike zavise od biomase koja je korišćena za njihovo dobijanje. Kako bio-ulja sadrže organske kiseline, njihova pH vrednost se tipično kreće između 2.5 i 3.5. Sadržaj vode se kreće između 15 i 30%, dok viskozitet varira u širokom rasponu u zavisnosti od biomase i uslova u procesu pirolize prilikom proizvodnje bio-ulja. U tabeli 1 su date osnovne fizičke karakteristike bio-ulja dobijenog iz mekog ili otpadnog drveta i drugih izvora biomase.

*Tabela 1. Fizičke karakteristike bio-ulja [18]*

<i>Karakteristika</i>	<i>Raspon vrednosti</i>
pH vrednost	2.5 - 3.5
Sadržaj vode (% m/m)	15 - 30
Viskozitet (40 °C, cP)	0.035 – 1
Viskozitet (500 °C, cP)	0.004 – 0.1
Sadržaj pepela ((% m/m)	0 – 0.2

### 6.2 Hemijske karakteristike bio-ulja

Ulja biljnog porekla, kao što su suncokretovo, sojino, kukuruzno, ricinusovo, palmino i ulje repice i lana predstavljaju mešavine masnih kiselina i estara. U tabeli 2 su data neka od biljnih ulja i njihov sadržaj [30].

U pogledu hemijskog sastava, odnosno sadržaja osnovnih hemijskih elemenata, bio-ulja sadrže iste elemente kao i bitumen, samo u različitim procentima, što zavisi od bio-resursa korišćenog za njihovo dobijanje. U



tabeli 3 dato je upoređenje hemijskog sastava tipičnog bitumena i više tipova bio-ulja [29].

Sadržaj kiseonika u bitumenu je relativno mali (ispod 2%), dok se u bio-ulju kreće i do 50%, u zavisnosti od porekla biomase. To je jedan od najvažnijih uzroka osetljivosti na starenje bio-ulja.

Sadržaj pojedinih elemenata u bio-uljima značajno varira, kao posledica porekla biomase od koje su dobijena. Razlika je posebno uočljiva ako se poredi bio-ulja životinjskog i biljnog porekla, a to dovodi i do razlike u funkcionalnim i polarnim grupama u vezivu, što rezultuje različitim fizičkim i hemijskim karakteristikama bio-ulja.

**Tabela 2.** Ulja biljnog porekla i njihov sadržaj [30]

<i>Tip</i>	<i>Sadržaj</i>
Ulje od suncokreta	palmitin, stearin, olein i linolna kiselina
Ulje od soje	Nezasićene masti (trigliceridi su polinezasićene alfa-linolenske kiseline i linolna kiselina), zasićene masti (oleinska kiselina), mononezasićene masti (stearinska kiselina i palmitinska kiselina)
Ulje od palme	palmitin i olein
Ricinusovo ulje	triglicerid ricinoleinske kiseline
Ulje indijskog oraha	derivati fenola sa dugim bočnim lancima (anakardne kiseline, kardol i kardanol)
Ulje semena pamuka	linolna kiselina i olein
Laneno ulje	linolna i linolenska kiselina i, u manjoj meri olein

**Tabela 3.** Upoređenje hemijskog sastava bio-veziva i bitumena [prilagođeno i dopunjeno na osnovu 18, 29]

<i>Bio-resurs korišćen za dobijanje bio-ulja</i>	<i>Sadržaj hemijskog elementa (% m/m)</i>			
	<i>Ugljenik C</i>	<i>Vodonik H</i>	<i>Azot N</i>	<i>Kiseonik O</i>
Bitumen	81.6 - 85.2	10.28 - 10.8	0.45 - 0.77	0.9 - 1.25
Svinjsko đubrivo	72.58	9.76	4.47	13.19
Otpadno drvo	54 - 56.4	5.5 - 7.2	0 - 0.2	35 - 45
Trava	47.53	6.81	0.51	45.19
Lucerka	53.88 - 56.84	7.86 - 8.47	3.73 - 4.59	31.3 - 32.73
Stočna hrana od kukuruza	46.5	5.9	-	46.2
Hrastovo drvo	60.5	6.5	-	34.6
Ostaci kafe	32.38	10.13	2.08	-
Lovor	49.65	8.1	5.0	41.63
Otpad od čaja	69.26	8.97	6.19	15.58
Uljana repica	72.8	10.8	3.3	13.1
Soja	67.89	7.77	10.84	-

Ljuska od palme	47.6	8.1	0.6	43.7
Slama od pirinča	49.19	5.55	0.13	49.55
Delonix regia	50.62 – 58.32	6.97 - 7.65	1.06 – 1.28	32.75 – 41.34
Otpadna slama	59.27	12.68	0.80	27.25
Piljevina	68.55	7.18	0.11	22.22

Vrlo često se molekularni sastav bitumena definiše u zavisnosti od sadržaja asfaltena i maltena. Molekuli asfaltena, koji imaju veću molekulsku masu, su dispergovani u maltenima, koje čine smole i aromatični i zasićeni ugljovodonici i koji imaju manju zapreminsku masu [31].

Interakcija između molekula asfaltena i maltena u okviru koloidnog sistema u bitumenu je odgovorna za njegove fizičko-mehaničke karakteristike. Ova interakcija je posledica prisustva polarnih i nepolarnih komponenti, pri čemu polarne komponente imaju najveći uticaj na adheziju i viskozitet bitumena. Asfalteni imaju najveći polaritet, pa zatim, smole, aromatični i zasićeni ugljovodonici [32].

Primenom SARA (Saturates, Aromatics, Resins, Asphaltenes) analize se utvrđuje sadržaj zasićenih i aromatičnih ugljovodonika, smola i asfaltena u bitumenu.

U tabeli 4 dato je upoređenje strukture SARA komponenti bio-veziva dobijenog iz svinjskog đubriva sa dva ekstremna tipa bitumena u pogledu krutosti. Bio-vezivo ima znatno viši sadržaj asfaltena i smola u odnosu na bitumen, dok je sadržaj nezasićenih i aromatičnih ugljovodonika znatno manji.

**Tabela 4.** Upoređenje strukture u pogledu SARA komponenti bio-veziva i bitumena [20]

Komponenta	SARA komponenta (% m/m)			
	Zasićeni ugljovodonici	Aromatični ugljovodonici	Smole	Asfalteni
Bio-vezivo od svinjskog đubriva	2.48	1.67	45.87	43.39
Bitumen oksidisan vazduhom (najkrtiji bitumen)	10.4	52.7	28.4	7.0
AAD-1, najmekši bitumen	8.6	41.3	25.1	20.5

Kako sve komponente SARA analize egzistiraju i u bio-vezivu i u bitumenu, može se očekivati da su ova dva veziva kompatibilna.

## 7. KARAKTERISTIKE BIO-VEZIVA

Na osnovu do sada sprovedenih istraživanja, bio-ulja pokazuju visoku kompatibilnost sa bitumenom, što olakšava spravljanje bio-veziva, koja se najčešće dobijaju umešavanjem bio-ulja u bitumen. Pri tome se ovaj proces može ostvariti na različitim temperaturama, u toku različitih vremenskih perioda, pri različitim brzinama smicanja i drugim parametrima, što ima posledicu na karakteristike dobijenog bio-veziva.

Istraživanja raznih autora uključuju ispitivanje empirijskih karakteristika bitumena modifikovanih dodatkom bio-ulja ili drugih bio-materijala, poput penetracije, tačke razmekšanja po metodi prstena i kuglice ( $T_{PK}$ ) i duktiliteta, ispitivanje reoloških karakteristika, kao što su viskozitet, krutost i deformabilnost na visokim, srednjim i niskim temperaturama, i ispitivanje starenja bio-veziva.

Ova ispitivanja su značajna, jer ukazuju na mogućnost primene bio-veziva u asfaltnim slojevima kolovoznih konstrukcija, uključujući njihove pozitivne i negativne strane.

### 7.1 Konvencionalne empirijske karakteristike bio-veziva

Što je vezivo mekše, to je njegova penetracija veća, a  $T_{PK}$  manja. Promena penetracije i  $T_{PK}$  suštinski zavisi od viskoziteta bio-ulja. Po pravilu, sa povećanjem sadržaja bio-ulja niskog viskoziteta, biljnog porekla ili otpadnog jestivog ulja u bio-vezivu, povećava se penetracija i smanjuje  $T_{PK}$  veziva.

Na osnovu pregleda ispitivanja prikazanog u [18], može se zaključiti da sa povećanjem sadržaja bio-ulja na bazi semena palme, od soje, i otpadnog jestivog ulja, dolazi do povećanja penetracije i duktiliteta i smanjenja tačka razmekšavanja bio-veziva.

U tabeli 5 su date karakteristike osnovnih materijala, a u tabeli 6 procentualno učešće bio-ulja u 4 ispitivane mešavine bio-veziva, sa karakteristikama tih mešavina.

Na osnovu promene penetracije i  $T_{PK}$  može se odrediti i promena indeksa penetracije u funkciji od sadržaja bio-ulja u modifikovanom bio-vezivu. Indeks penetracije je indikator temperaturene osetljivosti bitumena, i što je indeks penetracije veći, to je temperaturna osetljivost bitumena manja.

**Tabela 5.** Karakteristike bitumena i bio-ulja na bazi soje [33]

<i>Materijal</i>	<i>Penetracija [0.1 mm]</i>	<i>Tačka razmekšavanja po metodi prstena i kuglice [°C]</i>	<i>Indeks penetracije</i>	<i>Duktilitet na 5 °C [mm]</i>
Bitumen	62	48.5	-1.08	0
Bio-ulje na bazi soje	345.5	27.3	-6.64	8.33

**Tabela 6.** Karakteristike bio-veziva sa bio-uljem na bazi soje [33]

<i>Mešavina</i>	<i>Sadržaj bio-ulja [%]</i>	<i>Penetracija [0.1 mm]</i>	<i>Tačka razmekšavanja po metodi prstena i kuglice [°C]</i>	<i>Indeks penetracije</i>	<i>Duktilitet na 5 °C [mm]</i>
1	15	64.1	50	-0.60	6.8
2	22.5	83.1	48.9	-0.19	6.1
3	30	108.6	46.3	-0.12	9.7
4	45	172.8	45.4	1.40	10.7

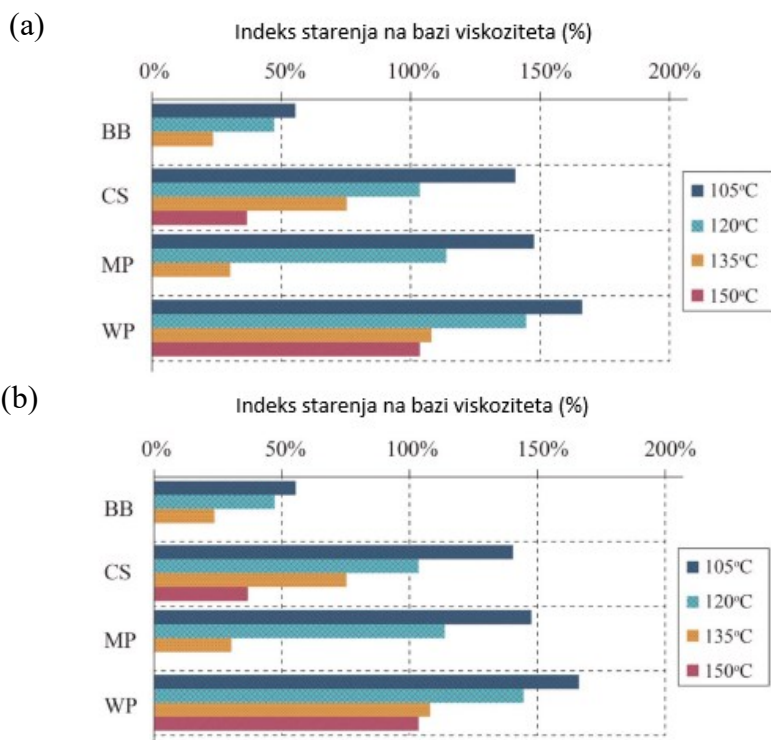
Dodatak bio-ulja u bitumen ima pozitivan efekat na indeks penetracije, koji se povećava sa dodatkom bio-ulja, što znači da dobijena bio-veziva imaju manju osetljivost na temperaturu.

Obrnuti procesi se dešavaju u slučaju dodatka bio-ulja visokog viskoziteta, poput bio-ulja iz bora [34] ili na bazi otpadnog drveta [35], gde se povećava tačka razmekšavanja, što znači da se povećava i krutost bio-veziva sa dodatkom bio-ulja. Autori su dobili da se sa dodatkom bio-ulja,  $T_{PK}$  poveća i zatim stabilizuje na određenoj vrednosti. Ovo potvrđuje zavisnost karakteristika bio-veziva od porekla biomase korišćene za dobijanje bio-ulja.

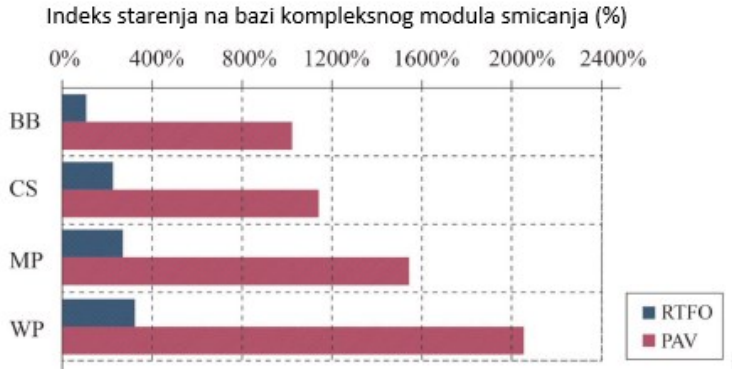
## 7.2 Otpornost na starenje

Hemijska struktura bitumena se menja tokom eksploatacionog perioda pod kumulativnim uticajem faktora okoline koji uključuju povišene temperature, kiseonik, vlažnost i ultravioletno zračenje. Kao rezultat, menjaju se i njegove fizičke karakteristike i dolazi do otvrdnjavanja i povećanja krutosti i krtosti.

Više istraživača se bavilo istraživanjem uticaja dodatka bio-ulja na starenje bitumena. Fini i saradnici [36] su istraživali uticaj više vrsta biljnih ulja na biljnoj i životinjskoj bazi i u okviru svog istraživanja razvili indekse starenja na bazi promene viskoziteta i promene kompleksnog modula smicanja, pri čemu veće vrednosti indeksa podrazumevaju smanjenje otpornosti na starenje. Autori su zaključili da bio-asfalt na bazi stajskog đubriva ima niže vrednosti indeksa starenja u odnosu na bio-asfalte biljnog porekla. Najveće vrednosti indeksa starenja je imalo bio vezivo na bazi peleta od drveta. Na slikama 2 i 3 su prikazane vrednosti indeksa starenja nakon kratkotrajnog (RTFO – Rolling Thin Film Oven Test) i dugotrajnog (PAV – Pressure Ageing Vessel) starenja za ispitivane vrste veziva.



**Slika 2.** Indeks starenja bio-veziva na bazi viskoziteta nakon (a) kratkotrajnog i (b) dugotrajnog starenja (Legenda: BB – stajsko đubrivo, CS – stočna hrana na bazi kukuruza, MP – peleti od trave, WP – peleti od drveta) [36]



**Slika 3.** Indeks starenja bio-veziva na bazi kompleksnog modula smicanja nakon kratkotrajnog i dugotrajnog starenja (Legenda: BB – stajsko đubrivo, CS – stočna hrana na bazi kukuruza, MP – peleti od trave, WP – peleti od drveta) [36]

Više autora je istraživalo i uticaj otpadnog kuhinjskog ulja na starenje i došlo do zaključka da sa njegovim dodatkom dolazi do povećanja gubitka mase nakon starenja bitumena [37,38].

## 8. PONAŠANJE ASFALJNIH MEŠAVINA SA BITUMENOM MODIFIKOVANIM SA BIO-ULJIMA U FAZI EKSPLOATACIJE

Bio-ulja u znatnoj meri utiču na karakteristike bitumena, a s obzirom da je ponašanje asfaltnih mešavina u fazi eksploatacije zavisno od karakteristika bitumena, postavlja se pitanje uticaja bitumena modifikovanih sa bio-uljem na ponašanje asfaltnih mešavina i ovaj problem je bio predmet više istraživanja.

Primena bio-ulja od bora čiji je sadržaj variran od 20 do 50% poboljšava otpornost na dejstvo vode i otpornost na termičke pukotine, a zbog srazmerno visokog sadržaja smola, ne utiče negativno na ponašanje na visokim temperaturama, odnosno otpornost na kolotrage asfaltnih mešavina [39].

Yang i saradnici [40] su došli do zaključka da primena 5 do 10% bio-ulja na bazi otpadnog drveta značajno poboljšava otpornost asfaltnih mešavina na zamor, nema značajnog uticaja na otpornost na kolotrage, ali je donekle umanjila indirektnu zateznu čvrstoću asfaltnih mešavina, što je ograničilo predloženi sadržaj bio-ulja na 10%.

S druge strane, Zhang i saradnici [41] su ispitivali modifikaciju bitumena B50 bio-uljem takođe na bazi otpadnog drveta, ali modifikovanog SBS-om,

i zaključili da ako je sadržaj bio-ulja manji od 15%, modifikovani bitumen generalno zadovoljava specifikacije za B50, pri čemu je ponašanje na visokim temperaturama lošije, a otpornost na termičke pukotine i dejstvo vode su bolji u odnosu na originalni bitumen.

Zhang i ost. [42] su proučavali uticaj bio-ulja od drvenastih biljaka i rafinisanog otpadnog ulja na ponašanje bitumena i asfaltnih mešavina na niskim temperaturama. Ispitivanje uzoraka na niskim temperaturama pri sprečenom skupljanju, TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test) opitom, je pokazalo da su temperature pucanja uzoraka sa bitumenom modifikovanim bio-uljima znatno niže u odnosu na mešavine sa nemodifikovanim bitumenom, što ukazuje na poboljšanje ponašanja na niskim temperaturama.

Ispitivanje otpornosti na kolotrage na visokim temperaturama i otpornosti na dejstvo vode asfaltnih mešavina sa bitumenom modifikovanim uljem od ricinusa je ukazalo da dodatak ovog ulja negativno utiče na obe karakteristike [43].


















Gaudenzi i ost. [44] su ispitivali uticaj dodatka drvene pulpe, kao nusproizvoda pri proizvodnji papira, za modifikaciju bitumena, na mehaničke karakteristike, uključujući čvrstoću i modul pri opitu indirektnog zatezanja, otpornost na zamor, otpornost na trajne deformacije, kao i otpornost na propagaciju pukotina primenom polu-cilindričnog (SCB – semi-circular test) opita. Osnovni zaključak je da su mehaničke karakteristike neostarelih i ostarelih mešavina sa originalnim i sa modifikovanim bitumenom uporedive. Otpornost na zamor i otpornost na pukotine kod uzoraka sa bio-vezivom su bili nešto bolji u odnosu na uzorke sa nemodifikovanim bitumenom pre starenja, ali nakon starenja, su generalno bili uporedivi.

Mirhosseini i saradnici [45] su istraživali uticaj ulja od semena urmi na ponašanje asfaltnih mešavina sa 20% i 40% struganog asfalta (RAP-a). Za asfaltne mešavine sa 20% RAP-a su zaključili da modifikacija bitumena neznatno utiče na otpornost na dejstvo vode, da poboljšava otpornost na zamor, ali negativno utiče na otpornost na trajnu deformaciju. Takođe, ukoliko je sadržaj RAP-a veći od 20%, zaključak je da ova modifikacija ne omogućava zadovoljavajuće ponašanje asfaltnih mešavina.

Dong i saradnici [46] su istraživali uticaj bio-ulja dobijenog od kukuruza i došli do zaključka da ovo bio-ulje povećava viskozitet bitumena na visokim temperaturama, pa samim tim i otpornost asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju. Međutim, zbog visokog viskoziteta na niskim temperaturama, blago opada otpornost na termičke pukotine, a značajno je manja i otpornost na dejstvo vode.

Na bazi prethodno iznetih rezultata istraživanja, uticaj različitih bio-ulja na ponašanje asfaltnih mešavina sumiran je u tabeli 7.

**Tabela 7. Uticaj bio-ulja na ponašanje asfaltnih mešavina**

Poreklo biomase	Ponašanje na			Otpornost na dejstvo vode	Izvor
	Visokim temperaturama	Eksploatacionim temperaturama	Niskim temperaturama		
Drvo od bora	~ ili 				[39]
Otpadno drvo			-	-	[40]
Otpadno drvo		-			[41]
Ulje od drvenastih biljaka	-	-		-	[42]
Ulje od ricinusa		-	-		[43]
Pulpa od drveta – nusproizvod proizv. papira	-	~	-	~	[44]
Ulje od semena urmi			-	Mali uticaj	[45]
Kukuruz		-			[46]

Ukratko, uticaji bio-ulja na efikasnost asfaltnih mešavina su pokazali razlike sa različitim izvorima biomase, posebno u performansama srednje temperature i osetljivosti na vlagu. Međutim, većina bio-ulja je imala nepovoljan uticaj na performanse smeša pri visokim temperaturama, ali je pokazala povoljan uticaj na njihove performanse na niskim temperaturama. Ovaj odbitak je u skladu sa gore navedenim rezultatima o svojstvima bio-asfaltnih veziva.

## 9. PRIMENA BIO-VEZIVA ZA REGENERACIJU ASFALTNIH MEŠAVINA SA STRUGANIM ASFALTOM

Materijali na bazi bio-veziva se vrlo često koriste kao osveživači (regeneratori) prilikom primene struganog asfalta, kako bi se aktivirao što veći procenat ostarelog bitumena. Međutim, tu treba napraviti jasnu podelu



između supstanci koje dovode do smanjenja viskoziteta ostarelog bitumena i njegovog omekšavanja (tzv. softening agents) i supstanci koje su u stanju da povrate prvobitnu mikrostrukturu bitumena, koji su po svojoj suštini pravi regeneratori (rejuvenators) [47].

Bocci i ost. [48, 49] i Grilli i ost. [50] su istraživali fizičko-mehaničke karakteristike asfaltnih mešavina sa velikim sadržajem struganog asfalta (RAP-a) i sa primenom regeneratora na bio-bazi. Oni su utvrdili da se primenom odgovarajuće doze bio-regeneratora mogu postići karakteristike mešavina uporedive sa onima koje se dobijaju primenom neostarelog bitumena. Stoga, određivanje tačne doze regeneratora ima ključnu ulogu u dobijanju asfaltnih mešavina koje zadovoljavaju specifikacije.

Jedan od postupaka da se proceni promena strukture bitumena sa starenjem i uticaj regeneratora jeste primena SARA analize. Sa starenjem usled oksidacije dolazi do isparenja maltenskih frakcija i povećanja koncentracije asfaltena, što dovodi do jačanja veza između molekula asfaltena i povećanja krutosti bitumena. Cilj primene regeneratora/osveživača je da se poveća sadržaj maltena i na taj način povрати originalna struktura bitumena i stabilnost koloidnog sistema. Indeks nestabilnosti koloidnog sistema se definiše kao [50]:

$$I_c = \frac{\text{asfalteni} + \text{zasićeni ugljovodonici}}{\text{smole} + \text{aromatični ugljovodonici}}$$

Svako smanjenje vrednosti  $I_c$  ukazuje na smanjenje koloidne nestabilnosti sistema. Treba takođe imati u vidu da se asfalteni u bio-uljima razlikuju od asfaltena u naftnim derivatima, jer imaju manji broj policikličnih aromatičnih molekula [51].

Zadshir i ost. [52] su ispitivali ostareli bitumen, koji je bio podvrgnut jednom ciklusu kratkotrajnog starenja u Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) i dva ciklusa dugotrajnog starenja u Pressure Ageing Vessel (PAV), a za regeneraciju/osvežavanje bitumena su koristili tri aditiva različitog porekla. Prvi aditiv je bio baziran na organskom ulju dobijenom iz svinjskog đubriva (BB), drugi je bio dobijen od biljnih ulja (VB), a treći na bazi ugljovodonika (PB).

Aditiv na bazi svinjskog đubriva ima visok sadržaj asfaltena i smola i nizak sadržaj zasićenih i aromatičnih ugljovodonika (slika 4). Visok sadržaj smola utiče na stabilizaciju sistema, međutim, visok sadržaj asfaltena, i pored toga što imaju drugačiju strukturu u odnosu na asfaltene na bazi ugljovodonika, kao i mali sadržaja aromatičnih ugljovodonika, onemogućavaju da se uspostavi struktura veziva slična strukturi neostarelog bitumena.

Suprotno tome, aditiv na bazi biljnog ulja (VB) ima visok sadržaj smola i aromatičnih ugljovodonika, a nizak sadržaj zasićenih ugljovodonika i asfaltena. Visok sadržaj aromatičnih ugljovodonika omogućava da se podigne sadržaj maltena i nadoknadi deo koji je izgubljen tokom starenja, što povećava koloidnu stabilnost sistema.

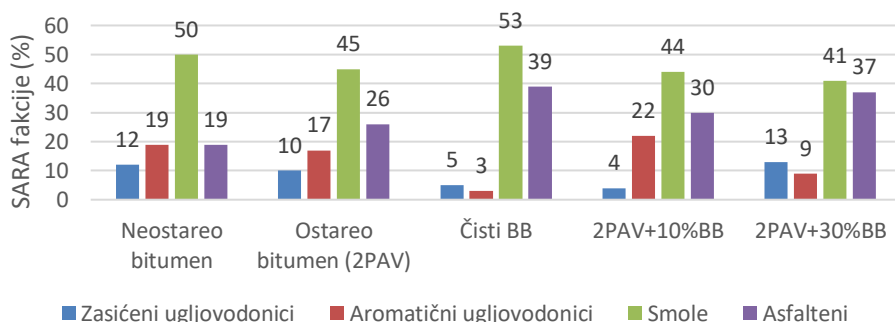
Aditiv na bazi ugljovodonika (PB) karakteriše veliki procenat aromatičnih ugljovodonika i manji procenat asfaltena u poređenju sa aditivom na bazi stajskog đubriva (BB). Na slici 4 je prikazana struktura neostarelog i ostarelog bitumena, aditiva, kao i struktura osveženog bitumena sa 10% i 30% aditiva.

Struktura SARA frakcija se može analizirati i primenom koloidnog indeksa  $I_c$  (slika 5).

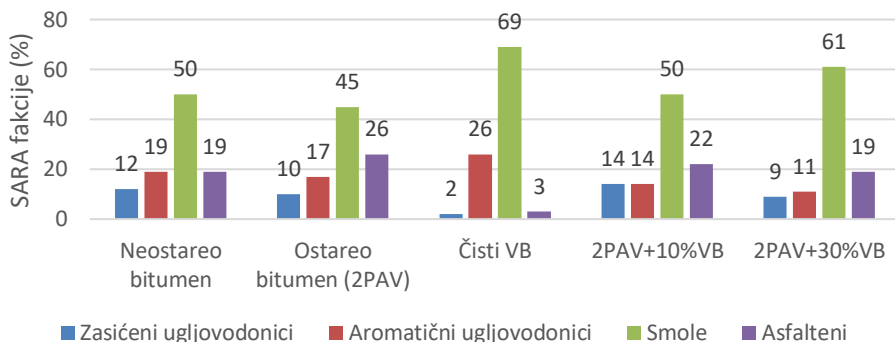
Dodatak 10% aditiva na bazi stajskog đubriva (BB) dovodi do smanjenja  $I_c$  ostarelog sa 0.61 na 0.51, što je blisko vrednosti neostalog bitumena od 0.45. Međutim, dalje povećanje sadržaja ovog aditiva na 30% dovodi do povećanja indeksa  $I_c$  na 1.0, što je nepovoljnije nego kod samog ostarelog veziva.

Primena aditiva na bazi biljnog ulja (VB) progresivno poboljšava stabilnost bitumena, tako da se sa 30% aditiva dobija vrednost indeksa  $I_c$  niža od neostarelog bitumena.

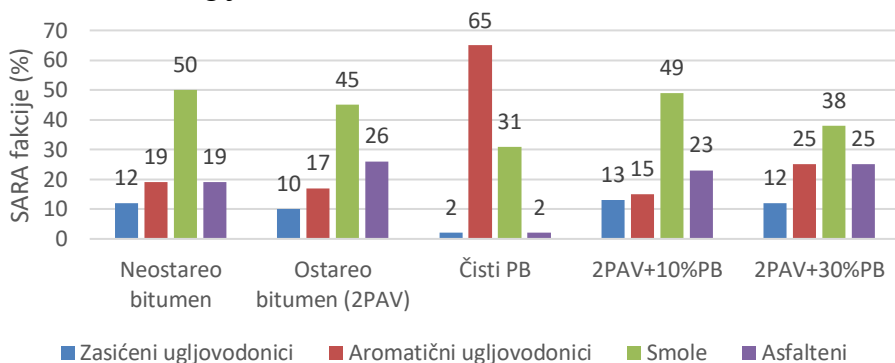
Dodavanjem aditiva na bazi ugljovodonika, procenat asfaltena se smanjuje što dovodi do smanjenja indeksa  $I_c$ . Međutim, dalje dalje povećanje sadržaja aditiva sa 10% na 30% ne dovodi do značajnijeg smanjenja indeksa  $I_c$ .



a) aditiv na bazi biljnog ulja

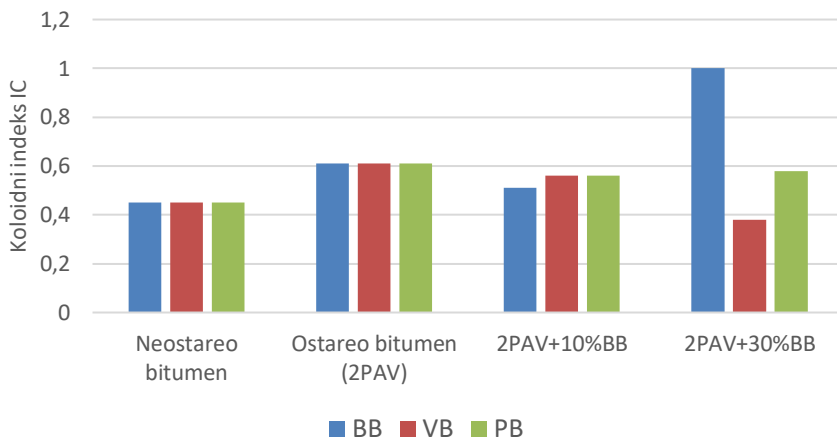


#### b) aditiv na bazi ugljovodnika



**Slika 4.** SARA frakcije neostarelog veziva, ostarelog veziva, aditiva i osveženog veziva sa 10% i 30% aditiva [52]

Na osnovu poređenja ova tri aditiva može se zaključiti da struktura aditiva u pogledu sadržaja SARA frakcija, odnosno sadržaj smola i aromatičnih ugljovodonika igra značajnu ulogu u procesu regeneracije bitumena. Takođe se može zaključiti da su aditivi sa većim sadržajem smola efikasniji od onih sa aromatičnim ugljovodonicima, jer se smole zbog visokog polariteta bolje vezuju sa molekulima asfaltena u maltenskoj fazi i posledično stabilizuju koloidni sistem. [52]



**Slika 5.** Koloidni indeks neostarelog veziva, ostarelog veziva, aditiva i osveženog veziva sa 10% i 30% aditiva [52]

Otpadno jestivo ulje (Waste Cooking Oil – WCO) se takođe može primeniti kao alternativa za regeneraciju ostarelog bitumena [53, 54] i lako je dostupno.

U svetu se godišnje proizvede više od 18 miliona tona WCO. Kada se nađe u vodenoj sredini, WCO formira nepropusni sloj na površini vode i time smanjuje nivo kiseonika u vodi, a tokom razgradnje WCO oslobađaju se toksična jedinjenja koja mogu progutati vodene životinje i time ući ponovo u ljudski lanac ishrane. Primena WCO kao regeneratora ostarelog bitumena predstavlja racionalno rešenje, kako u pogledu troškova, tako i u pogledu smanjenja potencijalno štetnog uticaja na okolinu.

Orešković i Mladenović [55] su istraživali uticaj WCO na karakteristike mešavina novog i ostarelog bitumena. Novom bitumenu (NB) klase penetracije B50/70 je dodavano 15%, 30% i 45% ostarelog bitumena (OB). Mešavinama sa 30% OB je dodavano 3%, 5% i 7% otpadnog jestivog ulja palminog porekla, dok je mešavinama sa 45% OB dodavano 4%, 6% i 9% istog ulja.

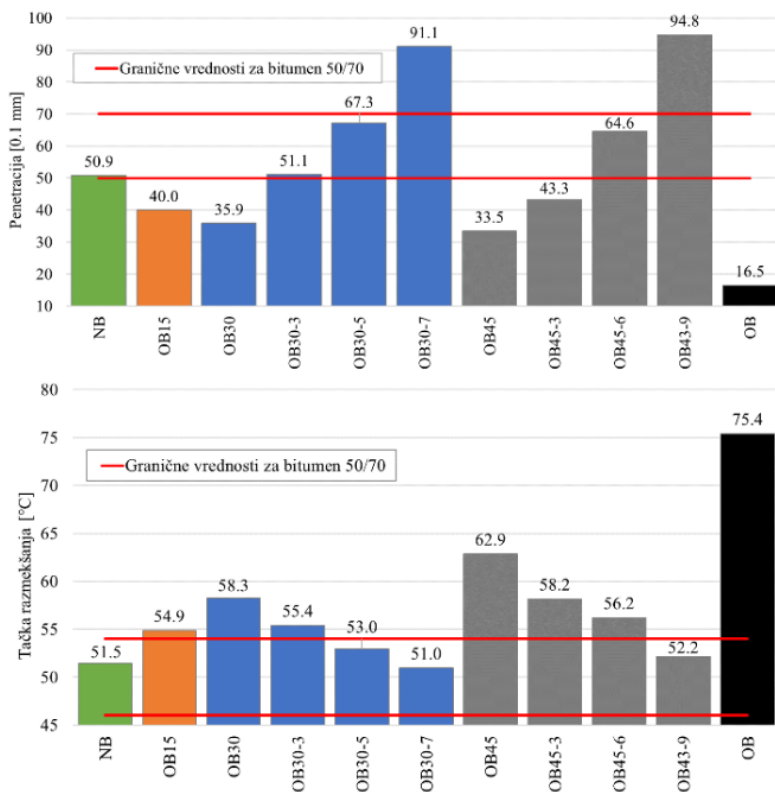
Na slici 6 je prikazan uticaj otpadnog jestivog ulja na penetraciju i tačku razmekšavanja, a na slici 7 uticaj na viskozitet mešavine novog i ostarelog bitumena.

Sun i ostali [19] su koristili ulje koje je dobijeno kao nuspoizvod proizvodnje bio-dizela iz otpadnog jestivog ulja. Oni su dodavali od 2% do 8% bio-ulja ostarelom bitumenu, koji je bio klase penetracije B40/60.

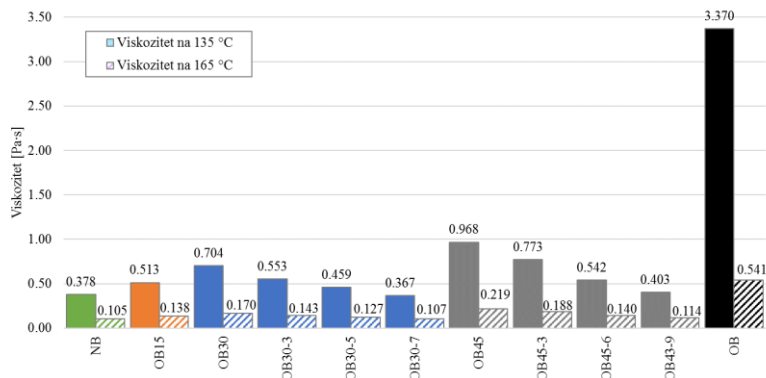
Nakon analize strukture autori su utvrdili da je sadržaj asfaltena u WCO manji od 1% i da je sadržaj aromatičnih ugljovodonika znatno manji u

odnosu bitumen, dok je sadržaj zasićenih ugljovodonika i smola veći (slika 8).

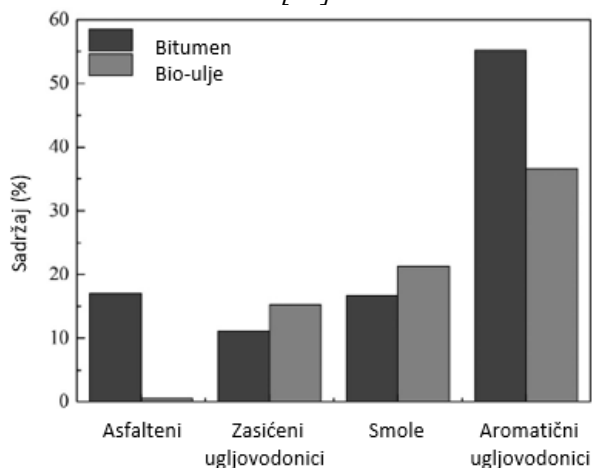
Dodatak bio-ulja utiče na povećanje penetracije i duktiliteta i smanjenje tačke razmekšavanja i viskoziteta. Ispitivanje separacije bio-ulja od bitumena je pokazalo da bio—ulje i bitumen imaju visok stepen kompatibilnosti, u uslovima lagerovanja. Dodatak bio-ulja smanjuje kompleksni moduo i povećava fazni ugao bitumena na srednjim i visokim temperaturama, što znači da se sa dodatkom bio-ulja smanjuje otpornost na deformaciju i elastična (povratna) deformacija, a povećava viskozna komponenta deformacije. Na niskim temperaturama, dodatak bio-ulja smanjuje krutost i povećava m-vrednost, što ukazuje na poboljšane osobine veziva u pogledu relaksacije naprezanja i otpornosti na nastanak termičkih pukotina.



**Slika 6.** Uticaj otpadnog jestivog ulja na (a) penetraciju i (b) tačku razmekšanja mešavine novog i ostarelog bitumena [53]



**Slika 7.** Uticaj otpadnog jestivog ulja na viskozitet bitumenskih mešavina sa OB [53]



**Slika 8.** Rezultati separacije na četiri komponente bio-ulja i bitumena [19]

Pogodnost regeneratora na bazi biljnih ulja je dovela do njihove komercijalne primene, tako da na tržištu već postoje komercijalno dostupni proizvodi, prikazani u tabeli 8.

**Tabela 8.** Komercijalno dostupni regeneratori na bazi biljnih ulja [30]

Naziv proizvoda	Proizvođač
Rheofalt HP-AM	Ventraco Chemie
ReJUVN8	Sripath Technologies, LLC
RePLAY 18	BioSpan Technologies Inc.
Hydrogreen S™	PVS Meridian Technologies Inc.
Anova 1817 Rejuvenator	Cargill Industrial Specialities
Biorestor	BioBased Spray Systems LLC

## 10. ZAKLJUČAK

U radu dat je pregled porekla, načina dobijanja i karakteristika bio-ulja i mogućnosti njihove primene za modifikaciju putnog bitumena, kao i uticaj koji ta modifikacija može imati na ponašanje asfaltnih mešavina u eksploataciji. Na bazi izloženog mogu se izvesti sledeći zaključci:

- (1) Bio-ulja se ne mogu koristiti ni kao modifikator, ni kao vezivo bez prethodnog termičkog tretmana koji zavisi od bio-obnovljivog resursa koji se koristi za proizvodnju bio-ulja. Hemijski sastav bio-ulja je takođe posledica korišćene biomase, kao i samog procesa dobijanja bio-ulja.
- (2) Karakteristike bio-ulja značajno zavise od njegovog hemijskog sastava. Bio-ulja su izuzetno kompleksni materijali koji sadrže različita jedinjenja. U poređenju sa bitumenima koji se dobijaju iz nafte, bio-ulja imaju znatno veći sadržaj kiseonika, što uzrokuje njihovu veću podložnost starenju u odnosu na klasični bitumen.
- (3) Dodatkom bio-veziva konvencionalnom putnom bitumenu se može smanjiti njegov viskozitet, a značajno poboljšati njegova obradivost. Samim tim, mogu se smanjiti temperature spravljanja i ugrađivanja asfaltnih mešavina, što znači da se bio-veziva mogu koristiti i kao dodaci za nisko-temperaturni asfalt (warm mix asphalt – WMA). Samim tim, pozitivni efekti njihove primene bi bili smanjenje potrošnje energije za proizvodnju asfaltnih mešavina i smanjenje emisija zagađivača.
- (4) Modifikacija bitumena sa bio-uljima najčešće doprinosi unapređenju njihovog ponašanja na niskim temperaturama, odnosno povećanoj otpornosti na termičke pukotine, i većoj otpornosti na zamor, čime se produžava vek asfaltnih slojeva u pogledu zamora. Međutim, bio-ulja, zbog svog viskoziteta, koji je tipično manji nego viskozitet bitumena, smanjuju otpornost asfaltnih mešavina na trajnu deformaciju/kolotrage na visokim temperaturama. Pored toga, bio-veziva su tipično osetljivija na starenje u odnosu na konvencionalni bitumen. U tom smislu je bio-asfalt životinjskog porekla, na bazi stajskog đubriva, pokazao bolje osobine, odnosno manju osetljivost na starenje od bio-ulja dobijenih iz biomase biljnog porekla.
- (5) Ponašanje asfaltnih mešavina sa modifikovanim bio-vezivima takođe značajno zavisi od porekla biomase korišćene za dobijanje bio-ulja, posebno u domenu eksploatacionih temperatura (osetljivost na zamor) i otpornosti na dejstvo vode.

- (6) Kako bi se poboljšalo ponašanje asfaltnih mešavina sa bitumenom modifikovanim bio-uljem, mogu se primeniti polimeri koji se inače koriste za modifikaciju konvencionalnih bitumena, pomoću SBS polimera, ali se onda, pored povećanja troškova, zbog njihovog značajnog negativnog uticaja na okolinu, može postaviti pitanje opravdanosti primene bio-ulja. Alternativno se mogu primeniti nanomaterijali, poput nanogline, ali ova oblast će svakako biti u fokusu daljih istraživanja sa ciljem da se unapredi ponašanje asfaltnih mešavina sa bio-vezivima u čitavom rasponu eksploatacionih temperatura kojima su one izložene.
- (7) Bio-ulja se mogu uspešno koristiti za regeneraciju/osvežavanje asfaltnih mešavina sa dodatkom struganog asfalta, a sa ciljem da se aktivira što veći procenat ostarelog bitumena, čime se u značajnoj meri mogu smanjiti troškovi proizvodnje novih asfaltnih mešavina.

## 11. LITERATURA

- [1] Meijer, J.R., Huijbregts, M.A.J., Schotten, K.C.G.J. & Schipper, A.M. Global patterns of current and future road infrastructure, *Environmental Research Letters* 13, 064006, 2018.
- [2] OECD. Road Traffic, Vehicles and Networks. 2015 in Environment at a Glance 2015: OECD Indicators; OECD Publishing: Paris, France, 2015.
- [3] Vita, L., Marolda, M.C. Road Infrastructure—the Backbone of Transport System; EU Directorate General for Research and Sustainable Surface Transport: Brussels, Belgium, 2008.
- [4] Internet sajt JP “Putevi Srbije”, <https://www.putevi-srbije.rs/index.php/sr/o-nama>, pristupljeno 04.01.2024.
- [5] Statistički godišnjak Republike Srbije 2023, Republički zavod za statistiku, Beograd, 2023.
- [6] EAPA. The Asphalt Paving Industry, A Global Perspective; EAPA: Brussels, Belgium, 2011. EAPA. Key Figures of the European Asphalt Industry in 2014, in *Asphalt in Figures*; EAPA: Brussels, Belgium, 2016.
- [7] *Asphalt in Figures 2021*, European Asphalt Pavement Association (EAPA), Brussels, Belgium, 2016.
- [8] Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R. 100% recycled hot mix asphalt: a review and analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 92, 2014, pp. 230–245.



- [9] Oda, S., Fernandes Jr., J.L., Ildefonso, J.S. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials* 26 (1), 2012.
- [10] Xu, G., Wang, H., Zhu, H. Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. *Construction and Building Materials* 151, 2017.
- [11] Zofka, A., Yut, I. Investigation of Rheology and Aging Properties of Asphalt Binder Modified with Coffee Berries, *Transportation Research Circular E-C165*, Transportation Research Board, 2012. pp. 61 –72.
- [12] Bearsley, S.R., Haverkamp, R.G. Age hardening potential of tall oil pitch modified bitumen. *Road Materials and Pavement Design* 8 (3), 2007.
- [13] Peralta, J., Williams, R.C., Rover, M., Hugo M. R. D. S. Development of rubber-modified fractionated bio-oil for use as noncrude petroleum binder in flexible pavements. *Transportation Research Circular E-C165*, 2012. pp. 23-36.
- [14] Yang, X., You, Z., Mills-Beale, J., Asphalt binders blended with a high percentage of biobinders: aging mechanism using FTIR and rheology. *Journal of Materials in Civil Engineering* 27 (4), 2015.
- [15] Kowalski, K.J., Krol, J., Radziszewski, P., Casado, R., Blanco, V., et al., Pérez, D., Brijse, Z., Frosch, M., Michael Le. D., Wayman, M. Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement. *Transportation Research Procedia* 14, 2016.
- [16] Raouf, M.A., Williams, C.R., General rheological properties of fractionated switchgrass bio-oil as a pavement material. *Road Materials and Pavement Design* 11, 2010.
- [17] Seidel, J.C., Haddock, J.E., Soy fatty acids as sustainable modifier for asphalt binders. *Transportation Research Circular E-C165*, 2012.
- [18] Zhang, R., You, Z. Ji, J., Shi, Q., Suo, Z. A Review of characteristics of Bio-Oils and Their Utilization as Additives in Asphalts. *Molecules*, 2021, 26, 5049.
- [19] Sun, Z., Yi, J., Huang, Z., Feng, D. Guo, C. Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil, *Construction and Building Materials*, No 102, 2016, pp. 496-504
- [20] Fini, E.H., Al-Qadi, I.L., You, Y., Zada, B., Mills-Beale, J. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterization and modification, *International Journal of Pavement Engineering*, 13:6, 2012.

- [21] Chailleux, E., Audo, M., Bujoli, B., Queffelec, C., Legrand, J., Lépine O. Alternative Binder from Microalgae: Algoroute Project, Transportation Research Circular E-C165, Transportation Research Board, 2012. pp. 7 – 14.
- [22] Zhang, R., Wang, H., You, Z., Jiang, X., Yang, X. Optimization of bio-asphalt using bio-oil and distilled water. *J. Clean. Prod.* 2017, 165, 281–289.
- [23] Lei, Y., Wang, H., Fini, E.H., You, Z., Yang, X., Gao, J., Dong, S., Jiang, G. Evaluation of the effect of bio-oil on the high-temperature performance of rubber modified asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2018, 191, 692–701.
- [24] Azahar, W.N.A.W., Jaya, R.P., Hainin, M.R., Bujang, M., Ngadi, N. Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder. *Constr. Build. Mater.* 2016, 126, 218–226.
- [25] Mirhosseini, A.F., Tahami, S.A., Hoff, I., Dessouky, S., Ho, C.-H. Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator. *Constr. Build. Mater.* 2019, 227, 116465.
- [26] Airey, G.D., Mohammed M.H., Fichter, C. Rheological characteristics of synthetic road binders, *Fuel*, No.87, 2008., pp. 1763–1775.
- [27] Seidel, J.C., Haddock, J.E. Soy Fatty Acids as a sustainable modifier for asphalt binders. *Transp. Res. Circ. E-C165*, 2012., pp. 15-22.
- [28] Kluttz, R. Considerations for use of alternative binders in asphalt pavements material characteristics. *Transp. Res. Circ. E-C165*, 2012., pp. 2-6.
- [29] Yang, X., You, Z., Mills-Beale, J. Asphalt binders blended with a high percentage of biobinders: aging mechanism using FTIR and rheology. *Journal of Materials in Civil Engineering* 27 (4), 2015.
- [30] De Bock, L., Piérard, N., Vansteenkiste, S., Vanelstraete, A. Categorisation and analysis of rejuvenators for asphalt recycling. A. De Swaef, Woluwedal 42 - 1200 Brussels, 2020.
- [31] Ouyang, C.F., Wang, S.F., Zhang, Z., Zhang Z.X. Improving the aging resistance of styrene-butadiene-styrene tri-block copolymer modified asphalt by addition of antioxidants, *Polym. Degrad. Stabil.* 91, 2006.
- [32] Hofko, B., Eberhardsteiner, L., Füssl, J., Grothe, H., Handle, F., Hospodka, M., Scarpas, A. Impact of maltene and asphaltene fraction on mechanical behavior and microstructure of bitumen, *Mater. Struct.* 49 (3), 2016.

- [33] Li, J., Zhang, F., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z., Meng, F., Chen, X. Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2019., 201, 268–277.
- [34] Tu, C., Chen, Y.J., Cao, D.W., He, M. Thermal storage stability of bio-asphalt blended with petroleum asphalt. *Highw. Traffic Technol. (Appl. Technol. Ed.)* 2016., 2, 22.
- [35] Zhang, R., Wang, H., Jiang, X., You, Z., Yang, X., Ye, M. Thermal Storage Stability of Bio-Oil Modified Asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 2018., 30.
- [36] Fini, E.H., Oldham, D., Buabeng, F.S., Nezhad, S.H. Investing the aging susceptibility of bio-modified asphalts. In *Airfield and Highway Pavements*; American Society of Civil Engineers: Miami, FL, USA, 2015., pp. 62–73.
- [37] Wen, H., Bhusal, S., Wen, B. Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013., 25, 1432–1437.
- [38] Wang, C., Xie, T., Cao, W. Performance of bio-oil modified paving asphalt: Chemical and rheological characterization. *Mater.Struct.* 2019., 52, 98.
- [39] Mohammad, L.N., Elseifi, M.A., Cooper, S.B., Challa, H., Naidoo, P. Laboratory Evaluation of Asphalt Mixtures that Contain Biobinder Technologies. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2013., 2371, 58–65.
- [40] Yang, X.; You, Z.; Dai, Q.; Mills-Beale, J. Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources. *Constr. Build. Mater.* 2014., 51, 424–431.
- [41] Zhang, R., Wang, H., Gao, J., Yang, X., You, Z. Comprehensive Performance Evaluation and Cost Analysis of SBS-Modified Bioasphalt Binders and Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 2017., 29, 04017232.
- [42] Zhang, L., Bahia, H., Tan, Y. Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders. *Constr. Build. Mater.* 2015., 86, 95–100.
- [43] Zeng, M., Tian, W., Zhu, Y., Li, J. Study on Performance of Castor Oil-based Bioasphalt Blended Asphalt Mixture. *J. Hunan Univ. (Nat. Sci.)* 2017., 11, 177–182.
- [44] Gaudenzi, E., Canestrari, F., Lu, X., Cardone, F. Performance Assessment of Asphalt Mixture Produced with a Bio-Based Binder. *Materials* 2021., 14, 918.

- [45] Mirhosseini, A.F., Tahami, S.A., Hoff, I., Dessouky, S., Ho, C.-H. Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator. *Constr. Build. Mater.* 2019., 227, 116465.
- [46] Dong, Z., Zhou, T., Luan, H., Wang, H., Xie, N., Xiao, G.-Q. Performance evaluation of bio-based asphalt and asphalt mixture and effects of physical and chemical modification. *Road Mater. Pavement Des.* 2018., 21, 1470–1489.
- [47] Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., Rossi, C.O. A Review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, Materials, Methods and Perspectives, *Appl. Sci.* 2019., 9, 4316; Bocci, E.; Grilli, A.; Bocci, M.; Gomes, V. Recycling of high percentages of reclaimed asphalt using a bio-rejuvenator—A case study. In *Proceedings of the 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic, 1–3 June 2016.*
- [48] Bocci, E.; Cardone, F.; Grilli, A. Mix design and volumetric analysis of hot recycled bituminous mixtures using a bio-additive. In *Proceedings of the AIIT International Congress on Transport Infrastructure and Systems, Rome, Italy, 10–12 April 2017; pp. 267–274.*
- [49] Grilli, A.; Bocci, E.; Bocci, M. Hot recycling of reclaimed asphalt using a bio-based additive. In *Proceedings of the 8th International RILEM-SIB Symposium, Ancona, Italy, 7–9 October 2015.*
- [50] Gaestel, C., Smadja, R., Lamminan, K.A., Contribution à la connaissance des propriétés des bitumes routiers, *Revue Générale des Routes et Aéroports.* 466 (1971) 85–97
- [51] Xu, Q., Zhang, Z., Zhang, S., Wang, F., Yan, Y. Molecular structure models of asphaltene in crude and upgraded bio-oil, *Chem. Eng. Technol.* 37 (7), 2014. 1198–1204.
- [52] Zadshir, M.; Oldham, D.J.; Hosseinneshad, S.; Fini, E.H. Investigating bio-rejuvenation mechanisms in asphalt binder via laboratory experiments and molecular dynamics simulation. *Constr. Build. Mater.* 2018., 190, 392–402.
- [53] Saha, R. Melaku, R.S., Karki, B., Berg, A., Gedafa, D.S. Effect of Bio-Oils on Binder and Mix Properties with High RAP Binder Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020. 32(3)
- [54] C. Rodrigues, Capitão, S., Picado-Santos, L., Aleida, A. Full Recycling of Asphalt Concrete with Waste Cooking Oil as Rejuvenator and LDPE from Urban Waste as Binder Modifier. *Sustainability*, 2020. 12(19):

- [55] Orešković, M., Mladenović, G.. Uticaj otpadnog jestivog ulja na karakteristike mešavina novog i ostarelog bitumena, Peti naučno-stručni skup „Put i životna sredina“, Zbornik radova, Vršac, 28-29. septembar 2017., ISBN: 978-86-88541-08-4, pp.604-612