

Primljen / Received: 14.7.2021.

Ispravljen / Corrected: 5.12.2021.

Prihvaćen / Accepted: 18.12.2021.

Dostupno online / Available online: 10.2.2022.

Svojstva poroznih asfaltnih mješavina s etilen propilen-dienskim monomerom

Autor:



Izv.prof.dr.sc. **Altan Çetin**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Bartin, Turska
Fakultet inženjerske arhitekture i dizajna
Odjel za građevinarstvo
acetin@bartin.edu.tr
Autor za korespondenciju

Izvorni znanstveni rad

Altan Çetin

Svojstva poroznih asfaltnih mješavina s etilen propilen-dienskim monomerom

Porozne asfaltnje mješavine upotrebljavaju se za izvedbu ekološki prihvatljivih propusnih habajućih slojeva kolničkih konstrukcija. Dosadašnje iskustvo upotrebe tih mješavina pokazuje da postoji potreba za poboljšanjem njihovih svojstava u pogledu trajnosti. U ovom istraživanju ispitana je modifikacija poroznih asfaltnih mješavina otpadnom etilen propilen-dienskom monomernom (EPDM) gumom. Asfaltna mješavina je prvotno projektirana za odabranu granulometriju agregata. Otpadna EPDM guma se koristila kao zamjena za punilo u udjelu od 2 % i 4 % ukupne mase agregata. Ispitivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava provedeno je na ispitnim uzorcima. Dodatkom otpadne EPDM gume poboljšana su svojstva elastičnosti i čvrstoće poroznih asfaltnih mješavina.

Ključne riječi:

porozni asfalt, etilen propilen-dienski monomer-EPDM, recikliranje, propusnost, Cantabro metoda, otpornost na vlagu

Original scientific paper

Altan Çetin

Laboratory performance of porous asphalt mixtures containing Ethylene Propylene Diene Monomer - EPDM

Porous asphalt pavements are environmentally friendly permeable road pavements. There is a need to improve the strength performance of porous asphalt mixtures. Waste Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) rubber modification of porous asphalt mixtures is investigated in this study. The mixture was initially designed for the selected mix aggregate gradation. Waste EPDM rubber scraps were replaced with filler materials at the rate of 2 % and 4 % of the total aggregate weight. Performance tests were conducted on test specimens. The EPDM rubber scraps improved the elasticity and strength properties of PA mixtures.

Key words:

porous asphalt, ethylene propylene diene monomer (EPDM), recycling, hydraulic conductivity, cantabro particle loss, moisture susceptibility

1. Uvod

Diseminacija proizvoda i usluga usmjerenih na zaštitu prirodnih izvora i smanjenje onečišćenja okoliša dobiva na važnosti iz dana u dan. Primjena poroznog asfalta na kolniku prihvatljiva je za okoliš, posebno u stambenim područjima gdje doprinosi smanjenju buke cestovnog prometa te filtriranju oborinske vode koja se potom može skupljati za ponovnu upotrebu ili ispuštati u podzemne izvore [1-4].

Porozni asfaltni kolnici značajno doprinose povećanju sigurnosti i udobnosti vožnje. Smanjuju rizik od nesreća zbog akvaplaninga koji je posljedica zadržavanja vodenog filma na površini kolnika, zasljepljenja vozača uslijed reflektiranja svjetala vozila na površini kolnika tijekom vožnje noću, ili smanjenja vidljivosti uslijed prskanja vodom. Osim toga, u gradovima nudi rješenje za neugodnosti koje prskanje vodom može uzrokovati pješacima [5, 6]. Ipak, istraživanja su pokazala da je potrebno produžiti trajanje poroznih asfaltnih kolnika primjenom različitih modifikacijskih postupaka.

Dosada provedena istraživanja odnose se na poboljšanje svojstava i granulometrijskog sastava agregata, modifikaciju bitumena te poboljšanje svojstava mješavine primjenom aditiva. Na smanjenje uporabljivosti poroznih asfaltnih kolnika najviše utječe ispadanje zrna agregata, što je osobito izraženo pri niskim temperaturama. Kako bi se smanjilo oštećenje kolnika uslijed ispadanja zrna agregata, primjenjuju se različiti postupci modifikacije veziva i mješavina [7, 8].

Koncepti održivosti i recikliranje otpada prisutni su u svim područjima života. Polimerni otpad koji predstavlja opasnost za okoliš, posljednjih godina u fokusu je istraživanja cestovnih inženjera i tehnologa koji se bave asfaltnim mješavinama. U skupinu polimernih otpada ubraja se i etilen propilen dienski monomer (EPDM). Etilen propilen dienski monomer ima primjenu u raznim područjima, a posebno u automobilskoj industriji. U 2010. godini svjetska potrošnja prirodnih i sintetičkih vrsta guma je iznosila 24.845.000 tona [9]. Otpadna EPDM guma nastaje u raznim industrijama, proizvodnim jedinicama i automobilskim servisnim stanicama. Osim toga, nastaje i kao nusprodukt u industrijama gume koje se bave proizvodnjom membrana za pokrivanja krovova, profila guma, gumenih britvi i sl. Oko 1 % do 5 % proizvodnje EPDM-a čini preostali otpad koji se obično odlaze na odlagalište [10]. Može se istražiti upotreba tog otpada kao modifikatora asfaltnih mješavina s ciljem da zamijeni konvencionalne polimere. Primjenom kao modifikatora asfaltnih mješavina osigurati će se odgovarajući način odlaganja ovog otpadnog materijala i gospodarenje njime.

Prethodna istraživanja pokazuju da se kemijski tretiran EPDM može koristiti kao održiv modifikator u asfaltnim mješavinama te može doprinijeti

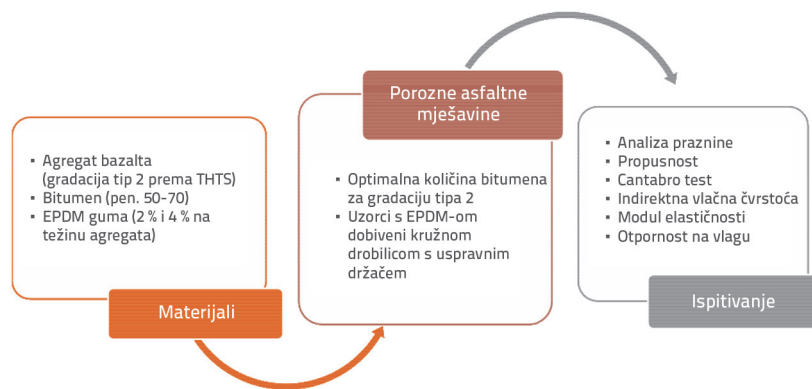
poboljšanju svojstva krutosti i puzanja [11, 12]. Vruće asfaltna mješavine koje sadrže bitumen modificiran EPDM-om imaju bolja svojstva vlačne čvrstoće i osjetljivosti na vlagu [10]. Istraživanjem kojim je ocijenjeno ponašanje bitumenskog veziva i mješavina modificiranih otpadnim EPDM-om utvrđeno je poboljšanje svojstva kolotraženja i zamora materijala. Mješavine modificirane EPDM-om su pokazale bolju krutost, otpornost na kolotraženje i vlačnu čvrstoću u usporedbi s kontrolnim mješavinama [13]. Ghoreishi i sur. [14] istraživali su modifikaciju veziva kombinacijom EPDM-a i hibridnih nanočestica (ugljične nanocijevi i nanoopeka). U ispitivanju se koristio EPDM u udjelu 3 % mase veziva. U usporedbi s kontrolnim vezivom, vezivo modificirano EPDM-om pokazalo je poboljšana fizikalna i reološka svojstva u smislu više točke razmekšanja, niže penetracije, više vrijednosti kompleksnog modula te niže vrijednosti faznog kuta.

Iako je modifikacija bitumenskog veziva istraživana, postoje ograničeni podaci o utjecaju otpadne EPDM gume na svojstva bitumenskih veziva i mješavina. Pregledom literature nije utvrđeno je li se ispitao utjecaj modifikacije mješavine suhom metodom posebno u poroznim asfaltnim mješavinama.

U ovom istraživanju ispitani su projektni parametri porozne asfaltna mješavine modificirane etilen propilen dienskim monomerom. Određena je optimalna količina bitumena za odabranu granulometriju agregata. EPDM je dodan u mješavinu kao zamjena za punilo u udjelu 2 % i 4 % ukupne mase agregata. Ispitivanje udjela šupljina provedeno je na uzorcima pripremljenima uz pomoć okretnog zbjiača (Gratory compactor). Na uzorcima su provedena ispitivanja propusnosti, trajnosti Cantabro metodom, indirektna vlačna čvrstoća, rezilijentnog modula i otpornosti na vlagu. Procjenom rezultata ispitivanja određena su projektni parametri poroznih asfaltnih (eng. *Porous asphalt* - PA) mješavina i utjecaj EPDM-a na njihova svojstva.

2. Eksperimentalno ispitivanje

Turske tehničke specifikacije za autoceste (THTS) uzete su u obzir kao projektni kriterij u istraživanju kojim se ispitao utjecaj EPDM-a na ponašanje PA mješavina. Detalji eksperimentalnog istraživanja prikazani su na dijagramu toka na slici 1.



Slika 1. Dijagram toka koji prikazuje detalje eksperimentalnog istraživanja

2.1. Materijali

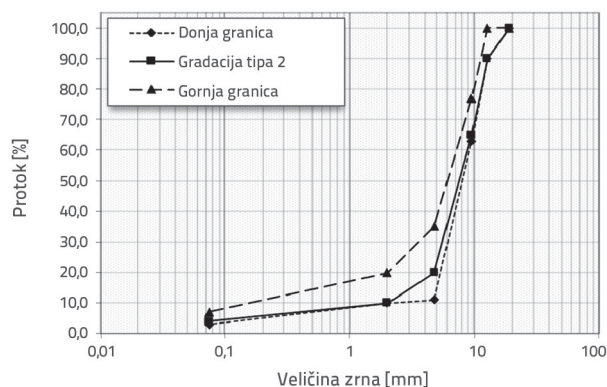
U ovom ispitivanju kao krupni agregat, sitni agregat i punilo koristio se bazaltni agregat dobiven iz kamenoloma na području Eskişehir-Kızılınler-Eşenkara. Tablica 1. prikazuje fizikalna svojstva bazalnog agregata. Otpornost bazalnog agregata na drobljenje poprilično je dobra. Granulometrija tipa 2 je odabrana kao granulometrija mješavine za porozni asfalt u THTS-u (slika 2.). Tablica 2. prikazuje vrijednosti gustoće agregata i upijanje vode prema TS EN 1097-6.

Tablica 1. Fizikalna svojstva bazalnog agregata

Karakteristike	Metoda ispitivanja	Vrijednosti	Granična vrijednost
Los Angeles otpornost prema drobljenju [%]	TS EN 1097-2	13,5	≥25
Otpornost prema smrzavanju natrijevim sulfatom [%]	TS EN 1367-1	0,64	≥10
Udio drobljenih zrna [%]	TS EN 933-5	100	100
Indeks plosnatosti [%]	BS 812	17	<25
Upijanje vode [%]	TS EN 1097-2	1,59	<2,0

Tablica 2. Gustoća agregata i upijanje vode

Karakteristike	Grubi agregat	Fini agregat	Punilo
Prividna gustoća	2,735	2,758	2,774
Gustoća s porama (suha)	2,586	2,637	-
Upijanje vode [%]	1,59	1,67	-



Slika 2. Granulometrijska krivulja bazalnog agregata

Budući da je predmet istraživanja utjecaj modifikacije EPDM-om, korišten je jedan tip standardnog bitumenskog veziva. Tablica 3. prikazuje svojstva bitumena B 50/70 proizvedenog u rafineriji Kirikkale.

Tablica 3. Svojstva bitumena

Karakteristike	Metoda ispitivanja	Vrijednosti
Penetracija, 25 °C, 100 g, 5s (0,1 mm)	TS EN 1426	63
Točka razmekšanja [°C]	TS EN 1427	48
Točka paljenja [°C]	EN 2592 2592	326
Gustoća	TS EN 15326	1,011

Na slici 3. prikazane su reciklirane čestice EPDM-a koje su korištene u modifikaciji mješavine.



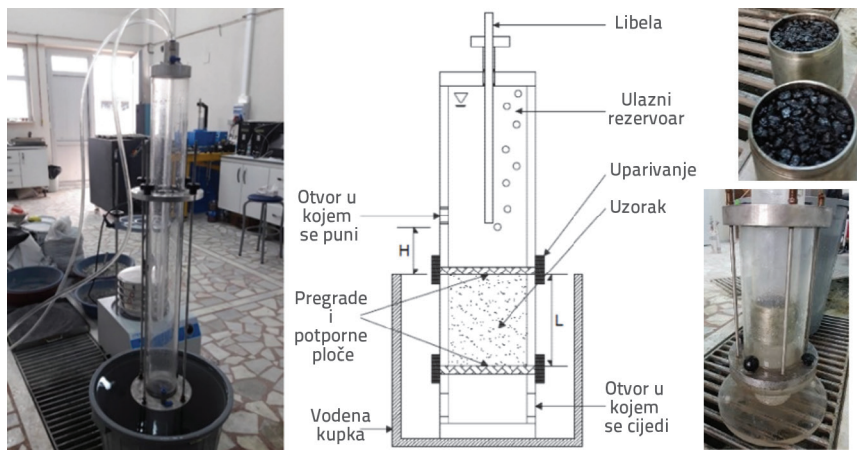
Slika 3. Reciklirani otpaci gume etilen propilen dienskog monomera - EPDM-a

EPDM guma vrsta je polimera koji se proizvodi polymerizacijom propilena i nezasićenog diena. Zbog prirodnih svojstava elastomernih materijala, etilen propilen-dienske gume odlično pružaju otpor vanjskim utjecajima poput topline, oksidacije te niskih temperatura. Zbog svojstva zasićenosti EPDM je otporan na utjecaj topline, kisika, ozona i vremenskih uvjeta [14, 15]. Radi se o visoko funkcionalnoj posebnoj vrsti gume koja se upotrebljava u proizvodnji automobilskih dijelova, gumenih cijevi i kabela. Približno 50 % gume korištene u proizvodnji automobilskih dijelova je EPDM guma [16]. EPDM ima nisku gustoću i prikladan je za mješavine s visokim udjelom punila. EPDM guma koja se koristila u ovom istraživanju dobivena je od tvrtke koja prikuplja otpadnu gumu za proizvodnju podnih obloga. Korišten je dio zrnatog materijala dobiven mljevenjem otpadne EPDM gume koji prolazi kroz sito br. 40. Tablica 4. prikazuje svojstva EPDM-a.

Tablica 4. Svojstva EPDM-a

Karakteristike	Vrijednosti
Vlačna čvrstoća [MPa]	7- 20
Radna temperatura [°C]	-40 ~+150
Koeficijent toplinske ekspanzije [μm/mK]	160
Deformacija pri lomu [%]	150 ~700
Gustoća [g/cm ³]	1,18

Taj je materijal zamijenio punilo u udjelu od 2 % i 4 % ukupne mase agregata. Radi dobivanja homogene mješavine, provedeno je suho miješanje EPDM gume i agregata u trajanju od 2 minute. Dodatno, celulozna vlakna zasićena bitumenom u udjelu od 0,3 % ukupne mase mješavine korištena su za stabilizaciju bitumena u PA mješavinama. Kako bi se osigurala homogena raspodjela granularnog materijala (peleti promjera 7 mm i duljine 20 mm) u mješavini, provedeno je suho miješanje s agregatom tijekom dvije minute prije dodavanja bitumena.



Slika 5. Postavke ispitivanja propusnosti permeametri sa stalnim potencijalom

2.2. Metode ispitivanja

Određeni su optimalni projektni parametri za odabranu granulometriju (tip 2) asfaltne mješavine, a uzorci za ispitivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava pripremljeni su s optimalnim udjelom bitumena. Kako bi se osigurala homogena raspodjela celuloznog vlakna i EPDM-a u mješavinama, provedeno je suho miješanje s agregatom u trajanju dvije minute uz pomoć miksera. Asfaltne mješavine dobivene dvominutnim miješanjem na 175 do 180 °C ugrađene su u kalup i zagrijane na 115-120 °C. Zbijanje je provedeno Marshallovim nabijačem s 50 udaraca na svakoj strani uzorka. Uzorci su se ohladili do sobne temperature i potom izvadili iz kalupa.

Budući da PA mješavine imaju velik udio šupljina, uzorci se moraju pokriti parafinskom trakom kako bi se izračunala njihova gustoća i udio šupljina (slika 4).



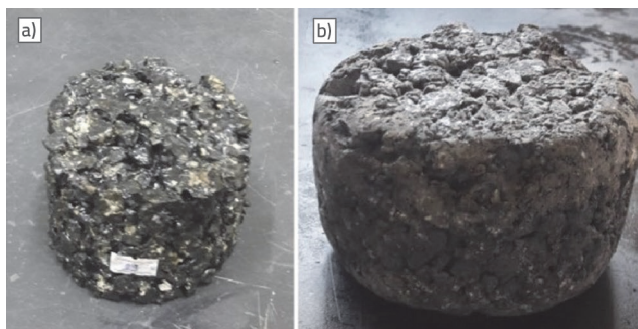
Slika 4. Zbijeni uzorci prekriveni parafinskom trakom

Prilikom određivanja udjela šupljina potrebno je odrediti gustoću zbijenih uzoraka (AASHTO T275) i gustoću asfaltne mješavine (ASTM D2041).

Metodom ispitivanja propusnosti određena je hidraulična provodljivost krupnozrnatih visokopropusnih uzoraka određene površine presjeka i visine. Cilindrični uzorci promjera 100 mm smještaju se u uređaj za ispitivanje koji se zove permeametar sa stalnim potencijalom, a prikazan je na slici 5. Permeametar se stavlja u spremnik s vodom koji se puni pomoću vakuumske pumpe. Bilježi se početna razina vode (H_s) koja se stabilizira u spremniku i konačna razina vode (H_f) na kojoj voda postaje stabilna nakon ispitivanja. Gornja razina vode u napunjenom komori zabilježena je kao (H_2), a visina vode donje razine u permeametri kao (H_1). Zabilježeni su visina uzorka (L), vrijeme (t) potrebno za prolazak vode kroz uzorak kao razlika između razine (H_s) i (H_f) te brzina prolaska vode (Q) tijekom tog vremena. Primijenjen je Darcyjev zakon kako bi se pronašao koeficijent propusnosti [17]. Prema tom zakonu, koeficijent propusnosti (k) definiran je izrazom (1):

$$k = \frac{(H_s - H_f)}{\frac{(H_2 - H_1)}{L} \cdot t} \quad (1)$$

U PA mješavinama veze se formiraju na kontaktnim točkama krupnog agregata, a s vremenom dolazi do otvrdnjavanja bitumenskog veziva pa veza između bitumena i agregata može oslabiti. Iz tog razloga često dolazi do trošenja i ispadanja zrna. Trajnost poroznih asfaltnih mješavina s obzirom na pojavu gubitka zrna agregata određuje se Cantabro metodom. Ispitivanje se provodi prema normi TS EN 12697-17. Prilikom ispitivanja koristi se uređaj za određivanje Los Angeles koeficijenta, ali bez čeličnih kugla. Ispitivanje se provodi u čeličnom bubnju koji se okreće brzinom oko 33 okretaja u minuti. Određuje se koliki je gubitak mase pojedinog uzorka stavljenog u bubanj nakon 300 okretaja (Cantabro gubitak). Slika 6. prikazuje uzorak prije i nakon ispitivanja. U ovom ispitivanju poželjno je da gubitak mase ne bude veći od 20 %.



Slika 6. Uzorci za ispitivanje Cantabro metodom: a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja

Indirektno vlačno ispitivanje široko je rasprostranjena metoda za određivanje vlačne čvrstoće. U toj metodi, a zbog činjenice da je teško primijeniti direktno vlačno opterećenje, na uzorak se nanosi tlačno opterećenje na vertikalnu ravninu. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom ASTM D6931, pri brzini deformacije od 50 mm/min i na temperaturi od 25 °C. Vlačno naprezanje (s_t) koje nastaje u smjeru poprečnom na smjer nanošenja opterećenja određuje se uzimajući u obzir krajnje opterećenje loma (P), visinu uzorka (h) i promjer uzorka (d).

Modul elastičnosti se koristi u radi određivanja odnosa naprezanja-deformacije te elastičnih svojstava asfaltnih mješavina. To je parametar kojim se koristi pri projektiranju kolničkih konstrukcija i ocjenjivanju njihova ponašanja. Slika 7. prikazuje uređaj kojim je provedeno ispitivanje. Rezilijentni modul je određen u skladu s TS EN 12697-26. Ispitivanja su provedena pri temperaturama od 10 i 20 °C te pri frekvenciji opterećenja od 40 ms. Pri ocjenjivanju trajnosti bitno je odrediti gubitak čvrstoće koji se javlja u asfaltnim mješavinama uslijed starenja pod utjecajem klimatskih promjena i vlage. Kod poroznih asfaltnih mješavina osobito je izražen štetan utjecaj vode. Kako bi se odredila osjetljivost mješavina na vlagu, proveden je modificiran Lottmanov pokus u skladu s AASHTO T-283. Ispitivanjem se određuju vlačna naprezanja dviju skupina (kondicioniranih i nekondicioniranih) uzoraka. Tijekom kondicioniranja, skupina uzoraka drži se 16 sati u zamrzivaču na -18 °C, a potom 24 sata u vodi na 60 °C. Indirektna vlačna čvrstoća se određuje na uzorcima koji se drže 2 sata u vodenoj kupelji na 25 °C. Omjer indirektna vlačna čvrstoće (zadržana vlačna čvrstoća) određuje se dijeljenjem prosjeka vlačnog naprezanja kondicioniranih uzoraka s prosjekom vlačnog naprezanja nekondicioniranih



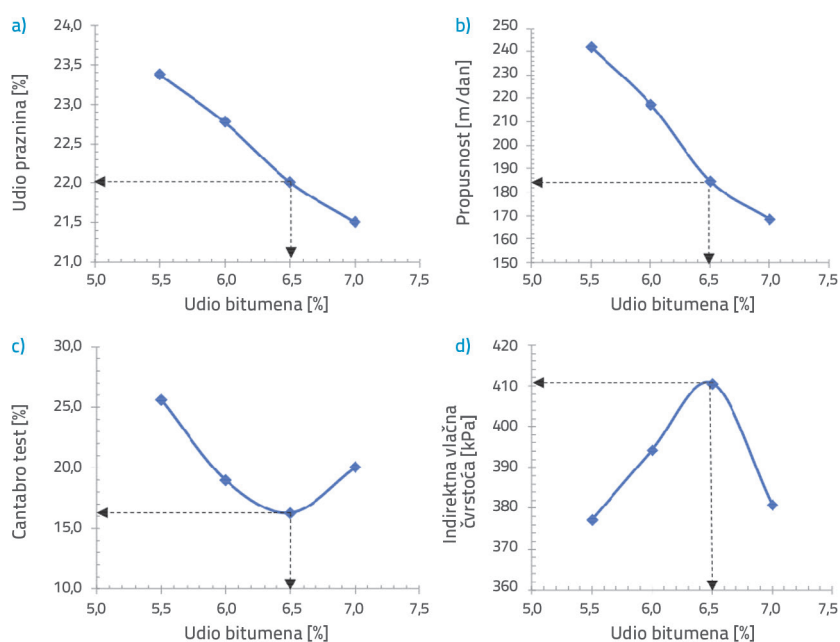
Slika 7. Ispitivanje rezilijentnog modula (Asphalt Tester)

uzoraka. Ta vrijednost govori o otpornosti asfaltnih mješavina na vlagu. Omjer indirektna vlačna čvrstoće trebao bi biti najmanje 80 %.

3. Rezultati

3.1. Određivanje optimalne količine bitumena u PA mješavinama

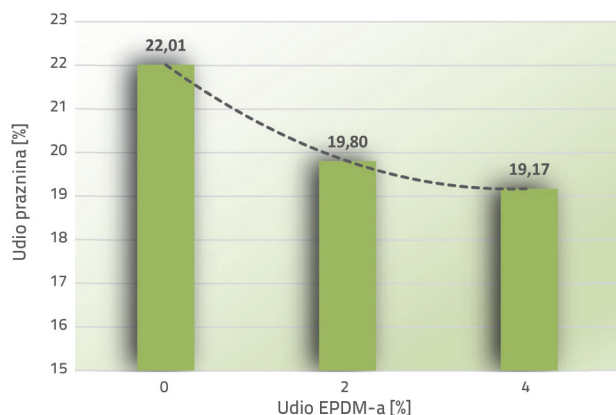
Slika 8. prikazuje rezultate ispitivanja projektnih parametara mješavine za odabranu granulometriju tipa 2. Najbolji rezultati ispitivanja Cantabro metodom i ispitivanja indirektna vlačna čvrstoće postignuti su na mješavinama sa 6,5 % bitumena. Mješavina sa 6,5 % bitumena ima vrijednosti udjela šupljina i propusnosti veće od propisanih minimalnih graničnih vrijednosti. Na osnovi dobivenih rezultata udio bitumena od 6,5 % odabran je kao optimalni udio bitumena u mješavini. Tablica 5. prikazuje svojstva optimalne projektne mješavine.



Slika 8. Rezultati ispitivanja projektnih parametara PA mješavine

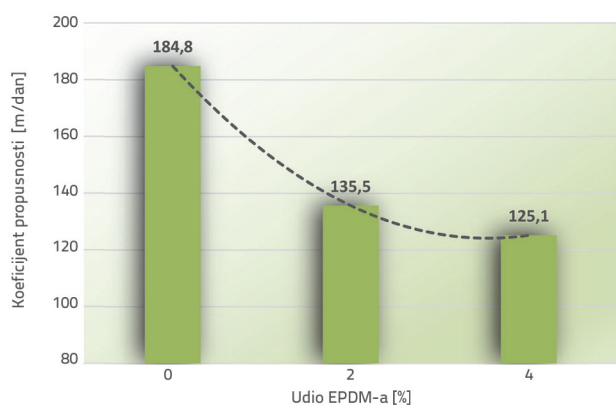
3.2. Rezultati ispitivanja udjela šupljina i propusnosti

Slika 9. prikazuje da povećanjem udjela EPDM-a u mješavini dolazi do smanjenja udjela šupljina u uzorku. To se može pripisati većem volumenu EPDM-a, kojim u mješavini u masenom udjelu zamjenjuje punilo. Udio šupljina za oba udjela EPDM-a je veći od propisane minimalne granične vrijednosti od 18 %.



Slika 9. Udio šupljina u PA mješavinama ovisno udjelu EPDM-a

Slika 10. prikazuje rezultate ispitivanja propusnosti. Koeficijent propusnosti se smanjuje s povećanjem udjela EPDM-a u mješavini. Vrijednost koeficijenta propusnosti smanjila se za 27 % kad je udio EPDM-a bio 2 %, odnosno za 32 % kad je udio EPDM-a bio 4 %. Dobiveni rezultati su veći od minimalne propisane granične vrijednosti od 100 m/danu. Iako se dodavanjem EPDM-om smanjuje propusnost, rezultati su prihvatljivi.

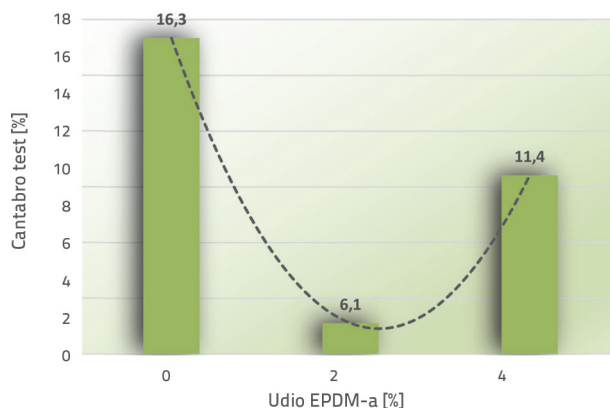


Slika 10. Koeficijenti propusnosti PA mješavina ovisno o udjelu EPDM-a

3.3. Rezultati ispitivanja Cantabro metodom

Uzorci s 2 % EPDM-a imali su najmanji gubitak mase, a vrijednost Cantabro gubitka iznosi 6,1 % (slika 11.). Kod uzoraka s 4 % EPDM-a, Cantabro gubitak se povećao na 11,4 %. Kako su mješavine s EPDM-om elastičnije strukture, prilikom ispitivanja

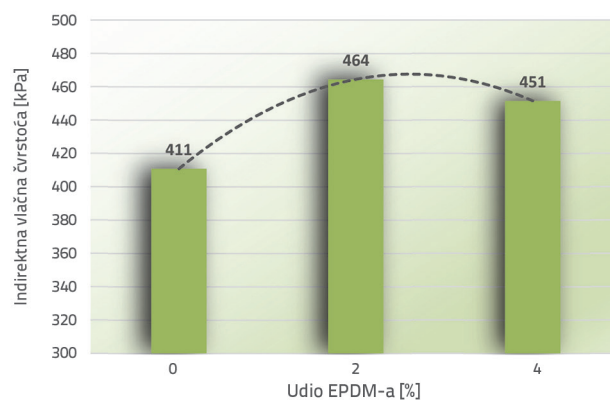
je došlo do prigušenja udaraca. Rezultati ispitivanja pokazuju da svi uzorci imaju prihvatljivu vrijednost Cantabro gubitka, a ocjena se temelji na graničnoj vrijednosti od 20 %. S obzirom na dobivene rezultate ispitivanja Cantabro metodom, optimalni udio EPDM bio bi 2 %.



Slika 11. Cantabro gubitak PA mješavina ovisno o udjelu EPDM-a

3.4. Rezultati ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće

Slika 12. prikazuje rezultate ispitivanja indirektno vlačne čvrstoće. Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da se indirektna vlačna čvrstoća povećava s dodatkom EPDM-a, a najviša vrijednost je dobivena za udio od 2 %. U usporedbi s kontrolnim uzorcima indirektna vlačna čvrstoća povećala se za 13 % na uzorcima s 2 % EPDM-a, odnosno 10 % na uzorcima s 4 % EPDM-a. Rezultati pokazuju da EPDM doprinosi čvrstoći i podupiru rezultate ispitivanja Cantabro metodom.

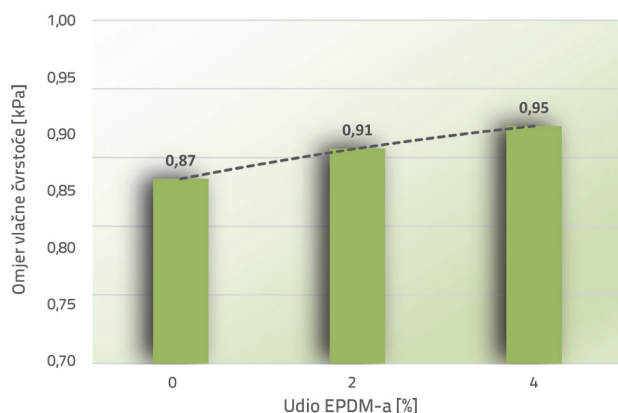


Slika 12. Indirektna vlačna čvrstoća PA mješavina ovisno o udjelu EPDM-a

3.5. Rezultati ispitivanja osjetljivosti na vlagu

Prema slici 13., rezultati zadržane vlačne čvrstoće (TSR) kontrolnog uzorka i uzoraka s EPDM-om su iznad 80 % (granična vrijednost). EPDM poboljšava osjetljivost na vlagu. U usporedbi

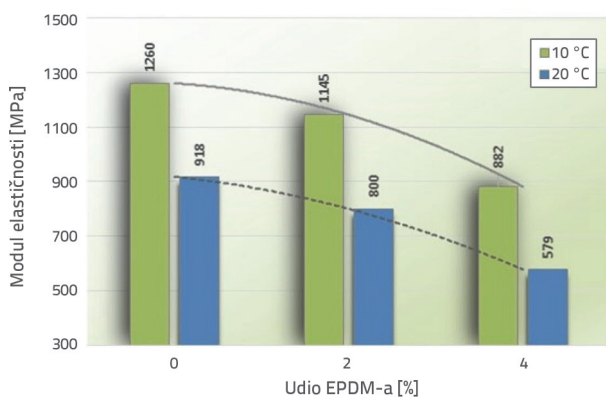
s kontrolnim uzorkom dodatkom 2 % EPDM-a, vrijednost TSR povećala se za 4.44 %, a dodatkom 4 % EPDM-a za 7.7 %. EPDM guma poboljšava kohezijska i adhezijska svojstva u odnosu na negativne učinke vode.



Slika 13. Zadržana vlačna čvrstoća (TSR) PA mješavina ovisno o udjelu EPDM-a

3.6. Rezultati ispitivanja rezilijentnog modula

Slika 14. prikazuje rezultate ispitivanja rezilijentnog modula dobivene ispitivanjem indirektno vlačne čvrstoće pri opterećenju u pet ciklusa.



Slika 14. Rezilijentni modul PA mješavina ovisno o udjelu EPDM-a

Rezilijentni modul (MR) omjer je primijenjenog naprezanja i povratne deformacije na određenoj temperaturi i pod određenim opterećenjem. Rezilijentni modul smanjuje se povećanjem udjela EPDM-a pri obje temperature ispitivanja (10 °C i 20 °C). Mješavine koje imaju određeni udio EPDM imaju veće vrijednosti povratne deformacije, što upućuje na elastičnije ponašanje mješavina te se može zaključiti da se u tom pogledu zamjena punila EPDM-a pokazala učinkovitom. Elastičnije ponašanje mješavina se pozitivno odrazilo i na rezultatima ispitivanja Cantabro metodom. Očekivano, veće vrijednosti rezilijentnog modula su dobivene pri 10 °C. Rezultati ispitivanja

pri 20 °C pokazali su da se modul elastičnosti smanjio za 27 % na kontrolnom uzorku, 30 % na uzorcima s 2 % EPDM-a i 34 % na uzorcima s 4 % EPDM-a. Stoga se može zaključiti da EPDM povećava elastičnost mješavina pri niskim temperaturama.

3.7. Optimalna projektna mješavina

Optimalna projektna mješavina određena je uzimajući u obzir rezultate ispitivanja fizikalnih i mehaničkih svojstava. Najveće vlačne čvrstoće dobivene su na uzorcima s 2 % EPDM-a, a ta mješavina ima i najnižu vrijednost habanja prema ispitivanju Cantabro metodom. Rezultati ispitivanja udjela šupljina i propusnosti u mješavini s 2 % EPDM-a veći su od minimalnih propisanih graničnih vrijednosti. S obzirom na to, mješavina s 2 % EPDM-a je odabrana kao optimalna projektna mješavina. Svojstva optimalne projektne mješavine prikazana su u tablici 5.

Tablica 5. Svojstva optimalne projektne mješavine

Projektni parametri	Kontrolna mješavina	Mješavina s EPDM-om	Granična vrijednost
Optimalni udio bitumena [%]	6,5	6,5	-
Optimalni udio EPDM-a [%]	-	2,0	-
Udio šupljina [%]	22,01	19,80	Min. 18
Cantabro gubitak [%]	16,33	6,10	Max. 20
Koeficijent propusnosti [m/dan]	184,76	135,54	Min. 100
Ind. vlačna čvrstoća [kPa]	410,68	464,35	-
Zadržana vlačna čvrstoća, TSR	0,87	0,91	Min. 80

4. Zaključak

U ovom istraživanju ispitan je utjecaj čestica otpadne EPDM-a gume na svojstva porozne asfaltno mješavine. Na temelju rezultata ispitivanja udjela šupljina, Cantabro gubitka, propusnosti, indirektno vlačne čvrstoće i osjetljivosti na vlagu doneseni su sljedeći zaključci:

- Iako se udio šupljina i propusnost uzorka smanjio s povećanjem EPDM-a u mješavini, dobiveni rezultati za oba udjela EPDM-a su veći od minimalnih propisanih graničnih vrijednosti. Smanjenje udjela šupljina i propusnosti može se pripisati većem volumenu otpadne EPDM gume koja u mješavinama zamjenjuje punilo u masenom postotku.
- Uzorci koji sadrže EPDM pokazuju bolje rezultate pri ispitivanju Cantabro metodom. Najniže vrijednosti Cantabro gubitka dobivene su na uzorcima s 2 % EPDM-a, a s povećanjem udjela EPDM-a na 4 % vrijednost Cantabro gubitka se neznatno povećala. Iako se gustoća mješavine s EPDM-om povećala u usporedbi s gustoćama kontrolne mješavine, pokazalo se da EPDM pridonosi poboljšanju stabilnosti mješavine pri istom udjelu bitumena. Može se stoga reći da dodatak EPDM-a poboljšava elastičnost mješavine.

- Rezultati indirektne vlačne čvrstoće također pokazuju pozitivni učinak EPDM-a. Mješavine su pokazale svojstva koja su u skladu s rezultatima ispitivanja Cantabro metodom. Maksimalna indirektna vlačna čvrstoća dobivena je na uzorku s 2 % EPDM-a. Provedeno ispitivanje pokazuje da dodatak otpadne EPDM gume doprinosi povećanju vlačne čvrstoće mješavine.
- Dodatak otpadne EPDM gume poboljšava svojstva mješavine s obzirom na osjetljivost na vlagu, a dobivene vrijednosti TSR-a veće su od minimalne propisane granične vrijednosti. Rezultati ispitivanja pokazuju da EPDM guma poboljšava kohezijska i adhezijska svojstva mješavina u odnosu na negativne učinke vode.
- Vrijednosti rezilijentnog modula smanjuju se povećanjem udjela EPDM-a pri obje temperature ispitivanja. Navedeno je rezultat elastičnog ponašanja mješavine s EPDM-om te

povećanja povratne deformacije. Stoga se može zaključiti da EPDM povećava elastičnost mješavina pri niskim temperaturama.

- Upotrebom otpadne EPDM gume kao aditiva u poroznim asfaltnim mješavinama poboljšavaju se svojstva čvrstoće poroznih asfaltnih mješavina. Time se proširuje područje njihove upotrebe i povećava vijek trajanja što doprinosi njihovoj ekonomičnosti.
- U ovom su istraživanju prikazani pozitivni učinci metode suhog miješanja otpadne EPDM gume na ponašanje kolnika s poroznim asfaltnim mješavinama.
- Istraživanja o modifikaciji bitumena EPDM-om, odnosno modifikacija mokrom metodom, mogu se provesti s ciljem poboljšanja svojstva PA mješavina. Mogao bi se ispitati utjecaj različitih veličina i koncentracija otpadne EPDM gume na svojstva modificiranih mješavina.

LITERATURA

- [1] Practical review of pervious pavement designs, *Clean Soil Air Water*, 42 (2014) 2, pp. 111–124, <https://doi.org/10.1002/clen.201300118>
- [2] Ndon, U.J., Al-Manaseer, A.: Permeable pavement as a sustainable management option for highway stormwater and safe use of roadways, *Mineta Trans. Inst. Final Report, WP REPORT 12–13*, San José, CA, 2017.
- [3] Raaberg, J., Schmidt, B., Bendtsen, H.: Technical performance and long-term noise reduction of porous asphalt pavements, *Danish Road Inst. Report 112*, Roskilde, Denmark, 2001.
- [4] Vaitkus, A., Andriejauskas, T., Vorobjovas, V., Jagniatinskis, A., Fiks, B., Zofka, E.: Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction, *Const. and Build. Mater.*, 152 (2017), pp. 345–356, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.130
- [5] Afonso, M.L., Dinis-Almeida, M., Fael, C.S.: Characterization of the skid resistance and mean texture depth in a permeable asphalt pavement, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471 (2019) 2, 022029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/2/022029>
- [6] Pancic, I., Ilic, V., Oreskovic, M., Gavran, D.: The use of porous asphalt for the improvement of the grading plan geometry and drainage of pavement surfaces on urban roads, *Inter. Cong. on Trans. Infrastr. and Sys. – TIS*, Rome, Italy, 2017.
- [7] Cooley, L.A., Brumfield, J., Wogawer, R.M., Partl, M., Poulidakos, L., Hicks, G.: Construction and maintenance practices for permeable friction courses, *NCHRP Report 640*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009.
- [8] Jacobson, T., Sandberg, U., Viman, L.: How do we improve the durability of porous asphalt?, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic. 2017, <https://doi.org/10.14311/ee.2016.147>
- [9] Mandal, S.K., Alam, M.N., Roy, K., Debnath, S.C.: Reclaiming of ground rubber tire by safe multifunctional rubber additives: II. Virgin natural rubber/ reclaimed ground rubber tire vulcanizates, *Rubber Chemistry and Technology*, 87 (2014) 1, pp. 152–167, <https://doi.org/10.5254/rct.13.87899>
- [10] Metcalf, J.B., Gopalakrishnan, K., Waters, M.D.: An initial investigation of the use of a rubber waste (EPDM) in asphalt concrete mixtures. *Waste Management Series*, 1 (2000), pp. 940–952, [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(00\)80102-6](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(00)80102-6)
- [11] Gopalakrishnan, K., Metcalf, J.B.: A study on moisture susceptibility of asphalt concrete mixtures modified with ethylene-propylene residual, *Inter. J. of Pavement Eng.*, 2 (2001) 3, pp. 157–167, <https://doi.org/10.1080/10298430108901724>
- [12] Ait-Kadi, A., Brahimi, B., Bousmina, M.: Polymer blends for enhanced asphalt binders. *Polymer Eng. and Science*, 36 (1996) 12 pp. 1724–1733, <https://doi.org/10.1002/pen.10568>
- [13] Kumar, A., Choudhary, R., Kumar, A.: Characterisation of asphalt binder modified with ethylene-propylene-diene-monomer (EPDM) rubber waste from automobile industry, *Road Materials and Pavement Design*, (2020), <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1740772>
- [14] Ghoreishi, A., Koosha, M., & Nasirizadeh, N.: Modification of bitumen by EPDM blended with hybrid nanoparticles: Physical, thermal, and rheological properties, *J. of Thermoplastic Composite Materials*, 33 (2018)), pp. 1–14, <https://doi.org/10.1177/0892705718805536>
- [15] Ginic-Markovic, M., Choudhury, N.R., Dimopoulos, M., Matisons, J., Kumudinie, C.: Macromolecular modification of EPDM: Wettability, miscibility, and morphology study, *Journal of Applied Polymer Science*, 80 (2001) 14 , pp. 2647–2661, <https://doi.org/10.1002/app.1378>
- [16] Fukumori, K., Matsushita, M.: Material recycling technology of crosslinked rubber waste. *R&D Review of Toyota CRDL*, 38 (2003) 1, pp. 39–47.
- [17] Mallick, R.B., Kandhal, P.S., Cooley, L.A., Watson, D.E.: Design construction and performance of new generation open-graded friction courses, *Tech. Report*, National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL, 2000.