

Primljen / Received: 22.2.2016.

Ispravljen / Corrected: 4.8.2016.

Prihvaćen / Accepted: 2.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.4.2017.

Utjecaj recikliranog punila na svojstva asfaltnih mješavina

Autori:



Dr.sc. **Ivica Androjić**, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
ivica.androjic@gmail.com



Gordana Kaluđer, mag.ing.aedif.
GFK Consulting, Belišće, Hrvatska
gfkconsulting@net.hr

Pregledni rad

Ivica Androjić, Gordana Kaluđer

Utjecaj recikliranog punila na svojstva asfaltnih mješavina

U radu se daje prikaz provedenih dosadašnjih istraživanja s primjenom različitih recikliranih materijala koji se koriste kao zamjena za kameno punilo u asfaltnim mješavinama. Rad obuhvaća prikaz provedenih istraživanja o utjecaju otpadnog stakla, otpada cementne industrije, betona, opeke, keramike, letećeg pepela i drugih na fizikalno mehanička svojstva bitumenskih mješavina. Kao konačan rezultat donose se zaključci o mogućoj primjeni pojedinih recikliranih materijala kao zamjeni za standardno kameno brašno u asfaltnim mješavinama.

Ključne riječi:

reciklirani materijali, kameno punilo, asfaltna mješavina

Subject review

Ivica Androjić, Gordana Kaluđer

Influence of recycled filler on asphalt mix properties

An overview of research conducted so far on the use of various recycled materials as replacement for stone filler in asphalt mixes is presented in the paper. The paper comprises an overview of research on the influence exerted by the waste glass, waste materials from cement industry, concrete, brick, ceramics, fly ash and other materials, on physicomechanical properties of bitumen mixes. As a final result, conclusions are given on the possible use of individual recycled materials as replacements for standard rock flour in asphalt mixes.

Key words:

recycled materials, stone filler, asphalt mix

Übersichtsarbeit

Ivica Androjić, Gordana Kaluđer

Einfluss recycelten Füllmaterials auf die Eigenschaften von Asphaltmischungen

In dieser Arbeit werden bisher durchgeführte Untersuchungen zur Anwendung verschiedener recycelter Materiale, die als Ersatz für Gesteinskörnungen in Asphaltmischungen verwendet werden, dargestellt. Die Arbeit umfasst eine Übersicht der Untersuchungen zum Einfluss von Abfallglas, Abfällen der Zementindustrie, Abfällen aus Beton, Mauerwerk, Keramik, Flugasche und anderen Materialien auf physikalisch-mechanische Eigenschaften von Bitumenmischungen. Als Resultat werden Schlussfolgerungen zur möglichen Anwendung einzelner recycelter Materiale als Ersatz für herkömmliches Gesteinsmehl in Asphaltmischungen gegeben.

Schlüsselwörter:

recyceltes Material, Gesteinskörnung, Asphaltmischung

1. Uvod

Primjena alternativnih materijala u cestogradnji posebno je značajna zbog velikih potreba za materijalima koje iziskuju takve vrste građevina. Prema Barišić i dr. [1], pod alternativnim materijalima podrazumijevaju se svi materijali dobiveni kao građevni i razni industrijski otpadi. Slijedom nalogu Direktive 2008/98/EC, do 2020. godine potrebno je ostvariti minimalno 50-postotno iskorištavanje otpada iz kućanstva i 70% recikliranja i ponovnog korištenja raznog građevnog i industrijskog otpada [2].

Asfaltna mješavina u svom sastavu sadrže mineralnu mješavinu, punilo, vezivo i razne dodatke koji se miješaju pri zadanoj temperaturi. Prosječna godišnja proizvodnja asfaltnih mješavina u Europi za period od 2008. do 2014. iznosila je značajnih 302,51 milijun tona, što je za 38,35 milijuna tona niža proizvodnja u odnosu na zemlje SAD-a [3]. Prema tome udio raspoložive količine reciklirane mješavine u 2014. godini za zemlje EU-a iznosio 38 997,41 milijun tona (prema poznatim podacima), što je za 29 702,59 milijuna tona niža vrijednost proizvodnje u odnosu na zemlje SAD-a. Istodobno je u Republici Hrvatskoj raspoloživa količina reciklirane asfaltna mješavine iznosila 170 000 tona [3]. Mnoga istraživanja u današnje vrijeme bave se primjenom različitih alternativnih materijala u asfaltnim mješavinama. McDonald (2004.) u svojem radu navodi moguću primjenu plastike, pepela iz spalionica, otpadnih guma, šindre, letećeg pepela, zgre, cementne prašine, recikliranog asfalta, stakla i dr. u asfaltnim mješavinama [4]. Tako se određeni autori [5-9] bave istraživanjem moguće primjene recikliranog asfalta u proizvodnji novih asfaltnih mješavina, otpadne plastike [10-13], otpadnog stakla [14-15], letećeg pepela [16-17] i dr. Primjena alternativnih materijala u proizvodnji asfaltnih mješavina načelno dovodi do ostvarivanja ekonomskih ušteda uz smanjenje negativnih učinaka proizvodnje na okoliš, sve u skladu s propisanim uvjetima kvalitete.

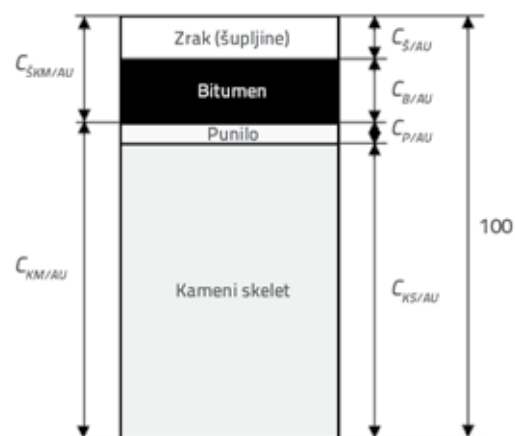
Punila u asfaltnim mješavinama služe za ispunjavanje šupljina, za zadovoljavanje zahtjeva glede granulometrijskog sastava, za povećanje stabilnosti, za poboljšanje veze između bitumena i agregata [18]. U takva se punila ubraja mineralna prašina nastala drobljenjem i prosijavanjem agregata (uključujući povratno punilo), cement, vapno i dr. Punilo utječe na ponašanje bitumenskog veziva i mješavina čiji rast udjela dovodi do ukrućenja ili očvršćenja asfaltna mješavine. U određenim specifikacijama definirano je da maseni odnos udjela prašine i bitumenskog veziva u asfaltnim mješavinama treba biti u rasponu od 0,6 do 1,2 [18]. Kao punilo u asfaltnim mješavinama može se primjenjivati kameno brašno, vapno, portland cement, leteći pepeo, otpadno staklo, otpad cementne industrije, otpadni beton, opeka, keramika, leteći pepeo i dr. U Razradi (2013.) je punilo definirano kao agregat koji sadrži većinu čestica manjih od 0,063 mm pri čemu sve čestice prolaze kroz sito otvora 2 mm [19]. Dopuštena je primjena mineralnog punila (vapnenačkog ili dolomitnog), miješanog punila (smjesa

mineralnog punila i kalcijevog hidroksida), hidratiziranog vapna, cementa i letećeg pepela nastalog uslijed izgaranja ugljena. Također se navodi zabrana primjene povratnog punila u asfaltnim mješavinama SMA, BBTM i PA.

Cilj istraživanja je izrada pregleda moguće primjene različitih recikliranih materijala koji služe kao zamjena za standardno punilo u asfaltnim mješavinama. Analiza pojedinačne zamjene standardnog punila u asfaltnim mješavinama s recikliranim materijalima određena je zbog znatnog utjecaja punila na fizikalno-mehanička svojstva standardnih bitumenskih mješavina. Kao konačan cilj provedenog istraživanja jest upućivati na moguće prednosti i nedostatke radi primjene određenih otpadnih zamjenskih materijala.

2. Pregled stanja

Punilo je jedna od sastavnih komponenti asfaltnih mješavina čiji udio značajno utječe na mehanička svojstva asfaltnih mješavina. Prevelika količina punila može znatno oslabjeti bitumensku mješavinu jer utječe na optimalni udio bitumena, na ugradljivost te mijenja viskoelastična svojstva bitumenskog morta. Na slici 1. dan je prikaz udjela sastavnih komponenti asfaltnog uzorka.



Slika 1. Model asfaltnog uzorka [20]

Iz slike 1. vidljivo je da se asfaltni uzorak sastoji od kamenog skeleta, punila, bitumena i zračnih šupljina. Na svojstva kvalitete punila značajno utječe njegov granulometrijski sastav. Prema Santos-Burdini i dr. [21], prolazak mineralnog punila na situ otvora 0,075 mm minimalno je 65 %. Razradom [19] je između ostalog definirano da prolazak punila na situ otvora 0,063 mm mora biti minimalno 70 %, pri čemu stopostotno prolaženje mora biti ostvareno na situ otvora 2 mm.

2.1. Primjena otpadnog stakla

Staklo je jedini materijal koji se može u cjelosti reciklirati više puta [22]. Dobiva se taljenjem kvarcnog pijeska, sode i vapnenca, pri čemu se koristi i stakleni krš. Udio proizvodnje staklenog otpada u 27 zemalja EU-a iznosi 32 kg po stanovniku

[23] u 2011. godini. Udio recikliranja za pojedine zemlje EU-a doseže značajnih 60 %, što je mnogo više u odnosu na Republiku Hrvatsku gdje je tijekom 2012. godine prikupljeno i separirano 33 747 t otpadnog stakla [24]. Na slici 2. prikazano je ručno drobljeno otpadno staklo koje je upotrijebljeno kao zamjena za dio punila u provedenom ispitivanju [25].



Slika 2. Otpadno staklo kao zamjena za dio kamenog brašna [25]

U istraživanju koje je proveo Hassan i dr. [26] koristi se stakleni prah kao alternativa za mineralno punilo (kamenno brašno) u vrućoj asfaltnoj mješavini. Ispitano je ukupno 9 mješavina s tri vrste punila (po 3 su vapno i kamenno brašno, 3 su portland cement i 3 su stakleni prah). Ispitane su 3 mješavine u kojima je udio staklenog praha 4, 7 i 10 % od ukupne mase agregata. Autori zaključuju da je optimalan udio staklenog praha onaj koji zamjenjuje 7 % ukupne mase agregata. Prema tome ostvarena je 13 % veća stabilnost u odnosu na ostalih 6 mješavina, za 39 % smanjena je deformacija, a za 10 % je niža gustoća asfaltna mješavine.

Jony i dr. [27] u svojem radu analiziraju utjecaj primjene različitih vrsta punila između kojih i stakleni prah. Autori predlažu primjenu staklenog praha jer to dovodi do veće Marshallove stabilnosti u odnosu na punila od portland cementa i vapna.

Shaopeng i dr. [28] u svojem istraživanju dokazuju da se stakleni prah može upotrijebiti kao zamjena za mineralno punilo i agregat do najveće veličine zrna od 4,75 mm. Najveći udio u odnosu na ukupnu masu agregata je 10 %.

Pereira i dr. [29] analiziraju učinak otpadnog stakla kao zamjene punila u asfaltnoj mješavini. Pritom zaključuju da ne dolazi do značajne razlike od učinka koji se ostvaruje primjenom kamenog brašna, odnosno ostvaruju se približno iste vrijednosti ispitane Marshallovim testom, što znači da je taj otpadni materijal prihvatljiv za primjenu u asfaltnim mješavinama.

2.2. Otpad cementne industrije

Cement predstavlja složeni vezivni kompozitni materijal čija godišnja svjetska proizvodnja iznosi oko 3 milijarde tona te zbog svojih karakterističnih svojstava značajno utječe na okoliš [30]. Dobiva se usitnjavanjem i pečenjem vapnenca i lapora u sitni prah. U cementnoj industriji postoje mnogi izvori emisija prašina u proizvodnji. Prašina može biti iz peći, hladnjaka klinkera, mlinova za sirovine i dr.

Hassan i dr. [31] u svojem radu proučavaju mogućnost zamjene punila otpadnom cementnom prašinom masenog udjela u postotnom iznosu 0, 25, 50, 75 i 100. Ispitana su mehanička svojstva Marshallovim testom, indirektna vlačna čvrstoća i tlačna čvrstoća. Dobiveni rezultati pokazuju da se povećanjem udjela otpadne cementne prašine povećava stabilnost i smanjuje deformacija. Optimalni udio otpadnog cementa kojim se zamjenjuje kamenno brašno je 100 %, odnosno u potpunosti zamjenjuje kamenno brašno.

Khaled i Ahmed [32] istražuju mogućnost upotrebe otpadne prašine bijelog cementa iz cementne industrije kao zamjene za punilo u asfaltnim mješavinama. Marshallovim testiranjem ispitano je 5 uzoraka u kojima je udio kamenog brašna zamijenjen sa 2, 4, 6 i 8 % udjela prašine bijelog cementa. Optimalni udio bitumena u kontrolnoj mješavini iznosio je 5,5 %. Rezultati pokazuju da supstitucija 2 % prašine za kamenno brašno daje gotovo isti optimalni udio bitumena kao i kontrolna mješavina. Supstitucija 4 % prašine blago povećava optimalni udio bitumena na 5,7 % bez značajnog negativnog utjecaja na asfaltnu mješavinu (stabilnost, šupljine i dr.). Međutim, daljnje povećanje prašine (6 i 8 %) uzrokuje povećanje optimalnog udjela bitumena na 6,1 i 6,2 %, što utječe na ekonomičnost primjene. Autori zaključuju da je 4 % prašine optimalna zamjena za kamenno brašno.

Taha i dr. [33] u svojem istraživanju izrađuju tri različite asfaltna mješavine, od kojih je jedna kontrolna (s kamenim brašnom kao punilom) i dvije u kojima je cementna prašina zamijenila 5 i 13 % punila. Mješavina s 5 % cementne prašine imala je isti optimalni udio veziva kao i kontrolna mješavina, dok je mješavina s 13 % cementne prašine trebala veći udio veziva i stoga je neekonomična mješavina.

2.3. Otpadni beton, opeka i keramika

Građevni otpad nastaje prilikom izgradnje građevina, rekonstrukcija, uklanjanja i održavanja građevina. U tu se grupu ubrajaju betoni, opeke, pločice i drugi materijali.

U svojem radu Sutradhar i dr. [34] zaključuju da je kao zamjena za punilo prihvatljiva uporaba čestica otpadnog betona i opeke do veličine čestice 0,075 mm. Asfaltna mješavina u kojoj se koristi prah recikliranog betona i reciklirane opeke kao zamjena za punilo ima gotovo ista svojstva ispitana po Marshallu kao i mješavine kod kojih je konvencionalno punilo kamenno brašno. Povećanjem udjela bitumena, stabilnost mješavine se povećava. Bitumenske mješavine koje su kao punilo imale

prašinu reciklirane opeke postigle su najveću stabilnost u iznosu od 11,18 kN sa 5,5 % bitumena. Mješavine koje su kao punilo imale prašinu recikliranog betona (11 kN s 5,5 % bitumena), a mješavine koje su kao punilo imale kameno brašno postigle su nižu vrijednost stabilnosti u iznosu 9,68 kN s jednakim udjelom bitumena.

U svojem radu autori Taherkani i Golzari [35] analiziraju moguću primjenu praha recikliranog betona i čeličanske zgure kao zamjene za kameno brašno u asfaltnim mješavinama. Kontrolna mješavina u svom sastavu sadrži 100 % kamenog brašna. Ostale mješavine umjesto kamenog brašna sadrže 25, 50, 75 i 100 % praha recikliranog betona i/ili čeličanske zgure (po 4 mješavine s betonom i 4 mješavine s čeličanskom zgurom). Istraživanje dokazuje da je stabilnost mješavine (beton i zgura) po Marshallu veća od stabilnosti kontrolne mješavine. Također se zaključuje da je deformacija smjese s betonom veća od kontrolne mješavine, ali je manja od zgure u odnosu na kontrolnu mješavinu. Najveća vrijednost krutosti po Marshallu za mješavine (beton, zgura) dobije se kod masene zamjene od 25 i 75 % kamenog brašna. Rezultati pokazuju da zamjena kamenog brašna ovim otpadnim materijalima ne utječe na ostvarena volumetrijska svojstva mješavine. Indirektna vlačna čvrstoća mješavina (beton, zgura), kod kojih je udio ovih materijala u punilu 25 % i 50 %, veća je u odnosu na kontrolne mješavine. Također dolazi do rasta vodootpornosti mješavina s otpadnim materijalima i veće krutosti mješavina s otpadnim materijalima u odnosu na kontrolnu mješavinu.

Chen i dr. [36] u laboratorijskim uvjetima provode ispitivanja X-zrakama. Skenirajućom elektronskom mikroskopijom i rendgenskom fluorescentnom spektroskopijom analiziraju mogućnost primjene prašine recikliranog betona. Utvrđuju da se prašina otpadnog betona sastoji uglavnom od kvarca (SiO_2) i kalcita (CaCO_3), odnosno da je udio silicija veći u odnosu na konvencionalno kameno brašno, a da je udio kalcija manji. zaključuju da taj materijal može poboljšati otpornost mješavine na djelovanje vode, utjecaj temperature i zamora materijala. Autori također zaključuju da taj materijal kao punilo može smanjiti temperaturu asfaltna mješavine, ali je i dalje prikladan kao materijal za područja u klimatskim uvjetima s visokim temperaturama.

2.4. Leteći pepeo i drugo

Ovdje se razmatra primjena letećeg pepela i drugih recikliranih materijala kao zamjena za klasično punilo. Na slici 3. prikazani su asfaltni uzorci izrađeni s udjelom letećeg pepela u svom sastavu [37].

Autori Muniandy i Aburbaka [38] u svojem su radu ispitali asfaltnu mješavinu SMA (eng. *Stone Mastic Asphalt*) u kojoj se kao punilo koristilo kameno brašno, keramička prašina, leteći pepeo od ugljena te čeličanska zgura. Ispitali su kako vrsta otpadnog materijala i veličina čestice, odnosno zrna punila utječe na indirektnu vlačnu krutost i svojstva zamora materijala. Udio punila u asfaltnoj mješavini iznosio je 10 % m/m, veličina

čestica svih vrsta punila je do najviše 0,075 mm i punilo je uvijek sadržavalo samo jednu vrstu materijala. Za sve vrste otpadnog materijala kombinirani su omjeri 100 % čestica veličine do 0,075 mm; 100 % čestica veličine do 0,02 mm te s 50 % čestica do 0,02 mm i 50 % čestica od 0,02 mm do 0,075 mm. Opaženo je da različite vrste otpada pri svim omjerima djeluju različito na zamor materijala, ali i da je za sve vrste otpadnog materijala najveći modul elastičnosti postignut kod omjera 50/50, pri čemu je mješavina kod koje je punilo od keramičke prašine postigla najbolji modul elastičnosti. Mješavina s punilom od čeličanske zgure pokazala je najmanju otpornost na zamor.



Slika 3. Asfaltni uzorci sa 6,2 % udjela letećeg pepela [37]

Electricwala i dr. [39] u svojem istraživanju mijenjaju dio punila keramičkom prašinom i vapnom (3-5 %) u asfaltnoj mješavini. Uslijed toga mješavina s keramičkom prašinom ostvaruje veću stabilnost za 14,29 % u odnosu na mješavinu u kojoj je vapno istog postotnog udjela, a koja je ostvarila veću stabilnost za 3,96 % u odnosu na konvencionalno punilo. Nadalje, asfaltna mješavina kod koje je 5 % punila zamijenjeno keramičkom prašinom ostvarila je veću Marshallovu stabilnost za 10,32 % u odnosu na zamjenu vapnom. Zaključuje se da je bitumenska mješavina s keramičkom prašinom fleksibilnija te da će se deformirati prilikom djelovanja prometnog opterećenja.

Tapkin [40] ispituje mehanička svojstva mješavina spravljenih na način da su za punilo korištene tri vrste letećeg pepela (svaki uzorak od posebnog letećeg pepela), vapnenački materijal, vapno i portland cement. Koristio je šest vrsta uzoraka i ispitao je za svaki uzorak mehanička svojstva i modul elastičnosti. Isti autor u svojem radu zaključuje da je zamor materijala, odnosno vijek trajanja uzorka u kojem je korišten leteći pepeo, dulji od uzorka u kojem je korišteno punilo od vapnenačkog materijala. Također zaključuje da je leteći pepeo naročito primjenjiv kao punilo u mješavinama namijenjenima ugradnji u habajuće slojeve.

Rahman i Sobhan [41] istražuju mogućnost upotrebe nekonvencionalnih materijala kao punila u asfaltnim mješavinama. Nekonvencionalna punila su neplastični pijesak, opekarski prah i pepeo. Uspoređivali su dobivene zadržane stabilnost na uzorcima u kojima su punila izrađena od kamenog brašna (zadržana stabilnost) 96,98 %, cementa 95,39 %, neplastičnog pijeska 88,92 %, opekarskog praha 87,22 % i

pepela u iznosu od 83,59 %. Provedenim istraživanjem autori zaključuju da su zamjenski materijali prihvatljivi za primjenu jer zadovoljavaju graničnu vrijednost od 75 % zadržane stabilnosti. Muniandy i dr. [42] istražuju primjenu dostupnog industrijskog otpada i nusproizvoda kao što su čeličanska zgura, leteći pepeo, otpad iz keramičke industrije i vapnenački otpad za uporabu kao punila. Autori dolaze do zaključka da je udio kalcijevog oksida kritičan čimbenik u donošenju odluke o mogućoj primjeni praćenih otpadnih materijala ili nusproizvoda kao punila.

Kar i dr. [43] proveli su istraživanje na tri vrste mješavina u kojima su kao punilo upotrijebljeni cement, kameno brašno i leteći pepeo. Utvrdili su da je optimalni udio bitumena gotovo jednak za mješavine u kojima je punilo cement ili kameno brašno, a za mješavine s letećim pepelom optimalni je udio bitumena veći. Autori su također utvrdili da je ostvarena zadržana stabilnost za uzorak u kojem je punilo cement gotovo 89 %, za uzorak u kojem je kameno brašno gotovo 87 %, dok je za uzorak s letećim pepelom kao punilom na nešto više od 85 %, što je opet više od granične dopuštene vrijednosti koja iznosi 75 %.

Pradhan i Roy [44] u svojem radu istražuju prihvatljivost primjene nekonvencionalnih punila kao što su cigleni prah i leteći pepeo u asfaltnim mješavinama. Rezultati pokazuju da su ostvarena zadovoljavajuća svojstva po Marshallu. Mješavine s letećim pepelom postižu maksimalnu stabilnost uz optimalni udio bitumena od 6 %. Bitumenske mješavine s ciglenim prahom postižu maksimalnu stabilnost uz optimalni udio bitumena od 7 %.

Sato i dr. [45] ispituju mogućnost upotrebe pepela kanalizacijskog mulja u asfaltnoj mješavini kao zamjenu za kameno brašno u masenim udjelima 15, 30, 45 i 100 %. Tijekom toga zaključuju da se kanalizacijski mulj može koristiti kao zamjenski materijal do omjera 45 %. Kada se koristi kao punilo u asfaltnoj mješavini, rezidualna stabilnost opada, ali ukupna svojstva asfaltna mješavine uvelike su poboljšana. Ispitivanje također uključuje i spravljanja svježeg betona s kanalizacijskim muljem te recikliranje dobivenog materijala i njegove upotrebe u nosivim slojevima.

Akbulut i dr. [46] u svojem istraživanju upotrebljavaju mulj dobiven pročišćavanjem vode koja služi za čišćenje granita tijekom rezanja i poliranja, a koji se sastoji uglavnom od kvarca. Ispitivanjima se nastojala utvrditi njegova moguća primjena u bitumenskim mješavinama kao punilo. Prosijani mulj na situ otvora 0,074 mm dodavao se kao punilo u omjeru od 0, 2, 4, 6 i 8 %. Za svaku mješavinu Marshallovim postupkom projektiran je optimalni udio u mješavini. Mehanička svojstva i neizravna vlačna čvrstoća najbolje su rezultate dale u mješavini u kojoj je udio ovog punila u iznosu od 7,3 %. Projektirani optimalni udio bitumena za mješavine je 5,11, 4,76, 4,10, 4,04 i 3,83 %, što znači da uslijed rasta udjela punila dolazi do pada udjela bitumena. Budući da je to punilo dodatno popunilo mikrošupljine u mješavini te se time povećavala gustoća i stabilnost, zaključeno je da je mješavina s 8 % mulja kao punilom postigla najveću gustoću.

U radu autora Ahmedzade i Geckil [47] rađena su ispitivanja u kojima su za pripremu uzoraka (Marshallov postupak) za

kamenu mješavinu korišteni kameni agregat, a za punilo kameno brašno (kontrolna mješavina). U drugoj mješavini je agregat kameni, a punilo prašina crnog ugljena. Asfaltna mješavine (AC-10 i AC-5) zagrijavane su na temperaturu od 165 °C. Ispitivanjem je utvrđeno da su u mješavinama s ugljenom prašinom postignute bolje indirektno vlačne čvrstoće i stabilnost. Vrijednosti modula krutosti veće su pri nižim temperaturama (40 °C), ali na temperaturi od 20 °C vrijednosti se izjednačuju s kontrolnom mješavinom. Nadalje, ugljena prašina poboljšava vezivanje bitumena i agregata i povećava krutost i gustoću mješavine te smanjuje osjetljivost asfalta na vodu. Električna vodljivost mješavine s ugljenom prašinom veća je od one u kontrolnoj mješavini, pa je taj otpadni materijal pogodan u asfaltnim mješavinama za termoelektrične asfaltna zastore koji omogućuju brže topljenje snijega.

Sargin i dr. [48] istražuju mogućnost primjene pepela rižine ljuske kao punila za asfaltna mješavine. Projektirane su četiri mješavine sa 4, 5, 6 i 7 % težinskog udjela punila s optimalnim udjelom bitumena. Tada je dobivena najveća vrijednost po Marshallovom testu (stabilnost) mješavine koja je projektirana s 5 % punila. Optimalni udio bitumena za mješavinu s 4 % punila iznosio je 5,18 %, za mješavinu s 5 % je 4,73 %, za mješavinu sa 6 % je 5 % optimalni udio bitumena, a za mješavinu sa 7 % optimalni je udio bitumena 4,65 %. Nakon toga je u toj mješavini zamijenjeno kameno brašno sa 25, 50, 75 i 100 % rižinim pepelom. Rezultati ispitivanja pokazuju da je najbolji udio rižinog pepela u mješavini u kojoj je 2,5 % kamenog brašna i 2,5 % rižinog pepela (odnosno, u kojoj je kameno brašno zamijenjeno s 50 % rižinog pepela). Stabilnost mješavine po Marshallu se smanjuje s povećanjem udjela rižinog pepela.

Karashin i Terzi [49] primjenjuju u svojem istraživanju mramorni prah, tj. otpad nastao rezanjem, brušenjem i poliranjem mramora, kao punilo u asfaltnoj mješavini. Kontrolna mješavina izrađena je sa kamenim brašnom. Test Marshallove krutosti pokazao je da su obje mješavine dale gotovo jednake vrijednosti, pri čemu je mješavina s mramornom prašinom imala više vrijednosti plastične deformacije. Autori preporučuju da se taj otpadni materijal koristi za spravljanje asfaltnih mješavina za zastore manje prometnih cesta.

Borhan i dr. [50] u istraživanju provedenom u Maleziji analiziraju moguću primjenu letećeg pepela iz proizvodnje palminog ulja u asfaltnim mješavinama. Istraživao se optimalni udio zamjene konvencionalnog punila asfaltna mješavine tim otpadnim materijalom. Udio zamjene iznosio je 0, 1, 3, 5 i 7 %. Dobiveni rezultati pokazali su da je optimalan udio 5 % pepela jer ne utječe na mehanička i ostala svojstva asfaltnih mješavina.

3. Rasprava

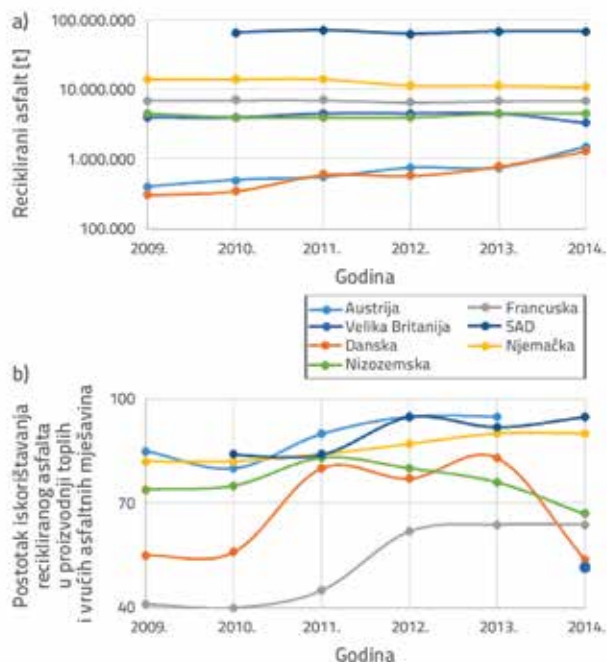
Analiza provedenih istraživanja pokazuje da je moguće koristiti različite vrste recikliranog punila kao zamjenu za standardno punilo. Tako određeni autori u svojim istraživanjima zaključuju da primjena otpadnog stakla u asfaltnim mješavinama dovodi do rasta stabilnosti, pada

deformacije i očekivanog ostvarivanja nižih gustoća asfaltnih mješavina. Zaključuje se da prilikom primjene otpadnog stakla ne dolazi do značajne razlike u ostvarenim svojstvima u odnosu na standardne mješavine. Daljnja istraživanja pokazuju da primjena otpada cementne industrije u asfaltnim mješavinama dovodi do povećanja stabilnosti i smanjenja deformacije. Također određeni autori navode da rast udjela otpadne cementne prašine u mješavini dovodi do rasta optimalnog udjela bitumena i neekonomične mješavine. Daljnja istraživanja pokazuju da je moguće čestice otpadnog betona i opeke koristiti u asfaltnim mješavinama kao zamjenu za klasično punilo. Navodi se da su takve čestice otpadnog betona i opeke pogodne za upotrebu do veličine zrna od 0,075 mm, da upotreba prašine reciklirane opeke dovodi do rasta stabilnosti te da primjena prašine recikliranog betona dovodi do pada stabilnosti. Daljnja moguća primjena recikliranih materijala kao punila je leteći pepeo, zgura i dr. Istraživanja pokazuju da različite vrste punila osciliraju sa svojim utjecajem na zamor materijala. Dodavanje keramičke prašine u mješavini dovodi do rasta stabilnosti u odnosu na konvencionalno punilo i stvaranja fleksibilnije mješavine. Upotrebom letećeg pepela dolazi do produžavanja vijeka trajanja asfaltnih slojeva u odnosu na vapnenački materijal te do povećanog optimalnog udjela bitumena mješavine. Određena istraživanja pokazuju da nekonvencionalna punila kao što su neplastični pijesak, opekarski prah i pepeo također mogu biti pogodna u asfaltnim mješavinama kao zamjena za klasično punilo.

Jedan od najraširenih primjera primjene recikliranog punila svakako je ono koje podrazumijeva upotrebu otpadnog asfalta u postupku proizvodnje asfaltnih mješavina. Na taj se način između ostalih sastavnih komponenti ponovno iskorištava i mineralno punilo iz starog asfalta u proizvodnji novih bitumenskih mješavina. Reciklirani asfalt dobiva se trganjem, drobljenjem ili frezanjem postojećeg asfaltnog kolnika [51] koji u sebi sadrži oko 95 % agregata obavijenog bitumenom. Na slici 4.a prikazane su raspoložive količine otpadnog asfalta u pojedinim zemljama tijekom 2009. do 2014. godine, a na 4.b postotak recikliranja u tim zemljama (za Veliku Britaniju dostupni su podaci samo za 2014. godinu).

Iz slike 4.a vidljivo je da količina recikliranog asfalta kojom raspoložu promatrane zemlje u rasponu je od 307 000 t do 71,4 milijuna t. Pritom se daleko najveća prosječna četverogodišnja količina otpadnog asfalta bilježi u SAD-u, tj. iznosi 67,92 milijuna tona. Iz slike 4.b može se također zaključiti da se najviše otpadnog asfalta iskorištava u SAD-u, tj. u iznosu od 90 % u proizvodnji vrućih i toplih asfaltnih mješavina. Pretpostavi li se prosječni udio punila u bitumenskim mješavinama u iznosu od 5 %, dolazi se do zaključka da se samo u SAD-u godišnje iz otpadnog asfalta iskorištava 3,396 milijuna tona punila. U Republici Hrvatskoj je taj trend tek u početnoj fazi, što upućuje

na malu (zabilježenu) raspoloživu količinu otpadnog asfalta (170 000 t) u 2014. godini [3], od čega se samo 24 % iskorištava u proizvodnji vrućih i toplih asfaltnih mješavina.



Slika 4. Reciklirani asfalt i njegova primjena u pojedinim zemljama: a) raspoložive količine recikliranog asfalta [52-55, 3]; b) postotak iskorištavanja recikliranog asfalta u proizvodnji toplih i vrućih asfaltnih mješavina [52-55, 3]

4. Zaključak

Iz svakodnevnih nastojanja da se smanjuje negativan utjecaj na okoliš i ostvaruje održiva gradnja proistekli su i sve veći zahtjevi za primjenom otpadnih materijala u proizvodnji asfaltnih mješavina. Kao osnovni cilj ovog istraživanja bila je analiza dosadašnjih istraživanja moguće primjene različitih otpadnih materijala kao zamjene za klasično punilo u asfaltnim mješavinama. Analiza pojedinačne zamjene punila u asfaltnim mješavinama odabrana je zbog znatnog utjecaja punila na kvalitetu asfalta. Prema mnogim autorima može se zaključiti da je moguća primjena otpadnog stakla, otpada cementne industrije, betona, opeke, keramike, letećeg pepela i drugih sirovina kao zamjena za standardno punilo u bitumenskim mješavinama. Također se može zaključiti da bi primjena različitih nekonvencionalnih punila trebala biti obuhvaćena i izvedbom različitih pokusnih dionica radi bolje analize ponašanja takvih asfaltnih slojeva tijekom upotrebe. Primjena različitih otpadnih punila u proizvodnji asfaltnih mješavina dovodi do pojeftinjenja mješavine i povoljnijega utjecaja asfaltne industrije na okoliš.

LITERATURA

- [2] Barišić, I., Zagvozda, M., Dimter, S.: Usage of Alternative, environmentally Acceptable Materials-Experience from Eastern Croatia, 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures-and Technologies, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 96, 2015.
- [3] Direktiva 2008/98/EC on Waste (Waste Framework Directive), online: ec.europa.eu/environment/waste/framework/
- [4] Asphalt.in.figures.2014.,EAPA,online: http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/2014/AIF_2014_v10.pdf.
- [5] McDonald, M.R.: Recycled materials relational database: Design and implementation aspects, Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, University of South Florida, 2004.
- [6] Dimter, S., Androjić, I.: Primjena recikliranog asfalta u proizvodnji asfaltnih mješavina, *EU fondovi i projekti prometne infrastrukture Zagreb* (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2014., pp. 237-268.
- [7] Androjić, I., Dimter, S.: Prilog istraživanju mješavina s recikliranim agregatom, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 1, pp. 37-43.
- [8] Androjić, I., Kaluđer, G., Komljen, M.: Primjena recikliranog asfalta u bitumeniziranom nosivom sloju, *GRAĐEVINAR*, 64 (2012) 5, pp. 395-401.
- [9] Hoon-Moon, K., Cannone-Falchetto, A., Marasteanu, M., Turos, M.: Using Recycled Asphalt Materials as an Alternative Material Source in Asphalt Pavement, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (2014) 1, pp. 149-159.
- [10] Jitendra, K., Thakur, J.H.: Development of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Treated for Roadway Applications, *Transp. Infrast. Geotech.*, (2015) 2, pp. 68-86.
- [11] Hassani, A., Ganjidoust, H., Maghanaki, A.A.: Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Manag. RES.*, 23 (2005) 4, pp. 322-327.
- [12] Jafar, J.J.: Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of roads, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (2016) 1, pp. 243-249.
- [13] Khan, S.T., Sharma, S.D.K., Sharma, B.M.: Performance evaluation of waste plastic polymer modified bituminous concrete mixes, *Journal of Scientific&Industrial Research*, 68 (2009), pp. 975-979.
- [14] Su N., Chen, J.S.: Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass, *Resour Conserv Recycl*, 35 (2002) 4, pp. 259-274.
- [15] Jasim, A.A.: By using waste glass as secondary aggregates in asphalt mixtures, *International Journal of Advanced Research*, 2 (2014) 1, pp. 41-46.
- [16] Celik, O.: Influence of fly ash on the Properties of Asphalt, *Petroleum Science And Technology*, 13 (2008), pp. 1571-1582, <https://doi.org/10.1080/10916460701287474>
- [17] Kar, D., Panda, M., Giri, J.P.: Influence of fly ash as filler in bituminous mixes, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9 (2014) 6, pp. 895-900.
- [18] Roberts, L.F., Kandhal, S.P., Brown, R.E., Lee, Y.D., Kennedy, W.T.: Hot Mix Asphalt materials, mixture design, and construction. NAPA Education Foundation, Lanham Maryland, 1996.
- [19] Razrada tehničkih svojstava i zahtjeva za građevne proizvode za proizvodnju asfaltnih mješavina i za asfaltnu slojeve kolnika, Hrvatske ceste d.o.o., Zagreb, lipanj 2013. (ispravljena verzija).
- [20] Ramljak, Z., Strineka, A., Šafran, K.: Ovisnost vlačne čvrstoće asfaltnog uzorka o njegovom sastavu, *GRAĐEVINAR*, 57 (2005) 3, pp. 141-150.
- [21] Santos-Bardini, V.S., Fernandez-Junior, J.L., Gutierrez-Klinsky, L.M.: Influence of mineral filler on volumetric properties of hot mix asphalt, *International journal of pavements conference*, Sao Paolo, 2013.
- [22] Hriberski-Leskovar, A.: Staklena ambalaza i okoliš, 2005, online: www.ambalaza.hr
- [23] Eurostat (2013) Packaging waste statistics http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Packaging_waste_statistics. (pristup 06.08.2014).
- [24] Report for 2012 (2014) Agencija za zaštitu okoliša, online: www.azo.hr/Otpad01.
- [25] Androjić, I., Dimter, S.: Properties of hot mix asphalt with substituted waste glass, *Materials and Structures*, 1 (2016) 1, pp. 249-259.
- [26] Hassan, H.J., Mays, F.A., Israa, Y.J.: The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties, *Eng. & Tsch. Journal*, 29 (2011) 1, pp. 44-57.
- [27] Jony, H., Al-Rubaie, M., Jahad, I.: The effect of using glass powder filler on hot asphalt concrete mixtures properties. *Eng. and Technology Journal*, 29 (2011) 1, pp. 58-67.
- [28] Shaopeng, W., Wenfeng, Y., Yongjie, X.: Preparation and Properties of Glass-asphalt Concrete, Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, 2003, Wuhan.
- [29] Pereira, V., Morais, C., Silva, E., Tavares: Residue Flat Glass: Recycling In the Form of Filler in Asphalt Mixtures, XXII International Congress on Glass, Bahia, Brazil, pp. 124-129, 2010.
- [30] Utjecaj cementne industrije na održivi razvoj i zbrinjavanje štetnih otpada, Zaštita okoliša u Hrvatskoj u procesu pristupanja EU, online: www.hdki.hr/_news/33337/Plakat%20-%20krolo2pdf.
- [31] Hassan, Y.A., Ayman, M.O., Afaf, A.M.: Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt, *ASS. Univ. Bull. Environ. Res.*, 9 (2006) 1, pp. 51-60.
- [32] Khaled, Z.R., Ahmed, M.A.: Utilization of white cement bypass dust as filler in asphalt concrete mixtures, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36 (2009), pp. 191-195, <https://doi.org/10.1139/L08-124>
- [33] Taha, R., Al-Rawas, A., Al-Harthy, A.S.: Use of Cement Bypass Dust as Filler in Asphalt Concrete Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (2002) 4, pp. 338-343.
- [34] Sutradhar, D., Mintu, M., Golam, J.C., Mohd, A.S.: Effect of Using Waste Material as Filler in Bituminous Mix Design, *American Journal of Civil Engineering*, 3 (2015) 3, pp. 88-94.
- [35] Taherkhani, H., Golzari, A.: An investigation on the viability of using recycled concrete and steel slag powder as filler in asphalt concrete, *International Journal of Current Life Sciences*, 4 (2014) 2, pp. 709-716.
- [36] Chen, M., Lin, J., Wu, S.: Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 3909-3914, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- [37] Androjić, I., Kaluđer, G., Komljen, M.: Usage of fly ash in Hot Asphalt Mixes, XXVIII International Baltic Road Conferences, 2013.

- [38] Muniandy, R., Aburkaba, E.: The effect of type and particle size of industrial wastes filler on Indirect Tensile Stiffness and Fatigue performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5 (2011) 11, pp. 297-308.
- [39] Electricwala, F., Sadanand, S., Ankit, J., Rakesh, K.: Use of Ceramic Waste as Filler in Semi-Dense Bituminous Concrete, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2 (2014) 3, pp. 102-106.
- [40] Tapkin, T.: Mechanical evaluation of asphalt-aggregate mixtures prepared with fly ash as a filler replacement, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (2008) 1, pp. 27-40.
- [41] Rahman, M.N., Sobhan, M. A.: Use of Non-Conventional Fillers on Asphalt-Concrete Mixture, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 3 (2013) 4, pp. 1101-1109.
- [42] Muniandy, R., Aburkaba, E.E., Hamid, H.B., Robiah, B.T.Y.: An initial investigation of the use of local industrial wastes and by-products as mineral fillers in stone mastic asphalt pavements, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4 (2009) 3, pp. 54-63.
- [43] Kar, D., Panda, M., Giri, J.P.: Influence of fly-ash as a filler in bituminous mixes, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9 (2014) 6, pp. 895-900.
- [44] Pradhan, S., Roy, P.: Effect of fillers on Bituminous Paving Mixes, NIT, Rourkela, 2008.
- [45] Sato, Y., Oyamada, T., Hanehara, S.: Applicability of sewage sludge ash (SSA) for paving materials: A study on using SSA as filler for asphalt mixture and base course material, *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 18-21 August 2013, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan
- [46] Akbulut, H., Güreer, C., Çetin, S., Elmacı, A.: Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures, *Construction and Building Materials*, 36 (2012), pp. 430-436, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.069>
- [47] Ahmedzade, P., Geckil, T.: Influence of carbon black on the mechanical and electrical properties of asphalt mixtures, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 14 (2007), pp. 358-364.
- [48] Sargin, S., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., Terzi, S.: Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 390-397, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029>
- [49] Karashin, M., Terzi, S.: Evolution of marble dust in mixture of asphaltic concrete, *Construction Building Materials*, 21 (2007) 3, pp. 616-620.
- [50] Borhan, M.N., Ismail, A., Rahmat, R.A.: Evaluation of Palm Oil Fuel Ash (POFA) on Asphalt Mixtures, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (2010) 10, pp. 5456-5463.
- [51] Schwabe, Ž.: *Recikliranje asfaltnih kolničkih konstrukcija, Gospodarenje prometnom infrastrukturom* (ur. Lakusic, S.), Dani prometnica 2009, Zagreb, rujan 2009. pp. 189-239.
- [52] Asphalt.in.figures.2013.,EAPA,.online.:<http://C:/Users/Ivica/Downloads/EAPA++Asphalt+in+Figures+2013.pdf>.
- [53] Asphalt.in.figures.2012.,EAPA,.online.:<http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/Asphalt%20in%20figures%2022-11-2013.pdf>.
- [54] Asphalt.in.figures.2011.,EAPA,.online.:<http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/Asphalt%20in%20figures%2029-11-2012.pdf>.
- [55] Asphalt.in.figures.2010.,EAPA,.online.:http://www.eapa.org/usr_img/Asphalt%20in%20figures%20Version%2022-12-2011.pdf.