

Primljen / Received: 24.6.2016.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2017.

Prihvaćen / Accepted: 28.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.11.2017.

# Mehanička svojstva morta s dodatkom recikliranog asfalta

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Özlem Çelik Sola**, dipl.ing. građ.  
Sveučilište u Istanbulu, Turska  
Građevinski fakultet  
[celik@istanbul.edu.tr](mailto:celik@istanbul.edu.tr)



Doc.dr.sc. **Cemil Ozyazgan**, dipl.ing. građ.  
Affairs – Sveučilište u Istanbulu, Turska  
Odjel za građevinarstvo  
[cemil.ozyazgan@kirkklareli.edu.tr](mailto:cemil.ozyazgan@kirkklareli.edu.tr)

Stručni rad

**Özlem Çelik Sola, Cemil Ozyazgan**

## Mehanička svojstva morta s dodatkom recikliranog asfalta

U radu je korišten reciklirani asfalt kao zamjena dijela cementa za pripremu cementnog kompozita. Dio cementa je zamijenjen prosijanim prahom od recikliranog asfalta u omjeru od 5 do 15 % na masu cementa. Ispitivanje je obuhvatilo analizu gustoće, Blainove specifične ploštine, vrijeme vezivanja, granulometrijski sastav, tlačnu čvrstoću, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, apsorpciju vode te SEM-EDS i XRD analize. Rezultati su pokazali da se dodatkom recikliranog asfalta u cementnom kompozitu smanjuje gustoća, tlačna čvrstoća i Blainova specifična ploština, a povećava se žilavost mješavina.

### Ključne riječi:

reciklirani asfalt, mehanička svojstva, trajnosna svojstva, mikrostruktura, mineraloška struktura

Professional paper

**Özlem Çelik Sola, Cemil Ozyazgan**

## Mechanical properties of mortar containing recycled asphalt

Recycled asphalt is used in this paper as replacement for a part of cement in the production of cement composite. A part of cement was replaced with a sieved recycled asphalt powder in the proportion of 5 to 15 % of the cement weight. The testing comprised the analysis of density, Blaine specific surface area, setting time, particle size distribution, compressive strength, resistance to freezing and thawing, water absorption, and the SEM-EDS and XRD analyses. The results show that the density, compressive strength, and Blaine surface area decrease, and that toughness increases, with an addition of recycled asphalt into cement composite.

### Key words:

recycled asphalt, mechanical properties, durability properties, microstructure, mineralogical structure

Fachbericht

**Özlem Çelik Sola, Cemil Ozyazgan**

## Mechanische Eigenschaften von Mörtel mit Zugabe von wiederverwertetem Asphalt

In der Untersuchung wurde wiederverwertetes Asphalt als Ersatz für Zementanteile bei der Herstellung von Kompositzement verwendet. Ein Teil des Zements wurde durch Pulver aus wiederverwerteten Asphalt im Verhältnis von 5 bis 15% der Zementmasse ersetzt. Die Untersuchung umfasste eine Auswertung der Dichte, der massebezogenen Fläche nach Blaine, Bindezeit, granulometrischen Zusammensetzung, Druckfestigkeit, Frost- und Auftaufestigkeit, Wasserabsorption sowie eine SEM-EDS und XRD Analyse. Die Ergebnisse zeigten, dass durch Zugabe von wiederverwertetem Asphalt im Zementkomposit die Dichte, Druckfestigkeit und die massebezogene Fläche nach Blaine verringert werden, während die Zähigkeit der Mischungen ansteigt.

### Schlüsselwörter:

wiederverwertetes Asphalt, mechanische Eigenschaften, Beständigkeit der Eigenschaften, Mikrostruktur, mineralogische Struktur

## 1. Uvod

Posljednjih nekoliko godina postupak recikliranja se smatra najprihvatljivijom opcijom za obnavljanje kolnika. S obzirom na redovito prikupljanje podataka, terenskih i laboratorijskih rezultata u recikliranim mješavinama, može se reći da će postupak recikliranja i dalje biti najtraženija metoda. Prilikom izbora tehnike za obnavljanje kolnika, treba voditi računa o uštedi energije, ekonomskim razlozima, inženjerskim komponentama i utjecaju na okoliš [1]. Trajni cestovni kolnici trebaju biti izgrađeni od čvrstih konstrukcija, koje su jednostavne za održavanje s obzirom na to da troškovi potrebni za gradnju i održavanje prometnica imaju značajan utjecaj na nacionalno gospodarstvo. Projektiranje prometnica danas se uglavnom odnosi na inovativne pristupe koji ne štete okolišu. Primjena otpadnih materijala, recikliranje kolnika i različite tehnike u postupku vrućih asfaltnih mješavina može dovesti do emisije štetnih plinova u okoliš, ali za to se koriste specifične ekološke tehnike. S obzirom na to, reciklirani materijali se češće koriste u kolnicima od betona s portland cementom (engl. *Portland Cement Concrete* - PCC) u posljednjih nekoliko godina [2]. Reciklirani asfalt sadrži bitumen te se klasificira kao opasan otpad, ali njegovi štetni učinci se mogu eliminirati zbog postizanja cilja projekta. Recikliranje otpadnih materijala, poput recikliranog asfalta, poželjan je pristup u projektiranju, koji je prihvaćen u mnogim državama diljem svijeta. Izraz "nove mješavine" koristi se u Europi za definiranje asfaltnih mješavina koje sadrže manje od 20 posto recikliranih otpadnih materijala. Podaci iz SAD-a pokazuju da asfalt čini 99 posto svih recikliranih materijala u toj zemlji. S druge strane, prosječna količina recikliranog asfalta koji se primjenjuje u bilo kojoj mješavini iznosi tek 10 do 20 posto. Može se zaključiti da se omjer recikliranog asfalta može koristiti u većim količinama u slučaju kada je točno određen utjecaj recikliranih i neobrađenih materijala, a time je moguće ostvariti i bolje rezultate [3]. Istraživanje prikazano u ovom radu usmjereno je na određivanje

utjecaja recikliranog asfalta na mikrostrukturu i mehanička svojstva cementnog materijala. Detaljnije ispitivanje mehaničkih svojstava zahtijeva i analizu agregata i matrice. Iz tog razloga, posebna je pažnja usmjerena na usku vezu mikrostrukture i mehaničkih svojstava kako bi se poboljšala svojstva ispitivanih materijala. U radu je prikazana primjena asfaltnog praha u različitim granulometrijskom sastavu, koji je zastupljen u cementnom mortu u različitim omjerima. Također su analizirani pouzdanost i svojstva mikrostrukture recikliranog asfalta u cementnom mortu.

## 2. Eksperimentalno ispitivanje

### 2.1. Materijali korišteni u ispitivanju

Za potrebe ispitivanja upotrijebljen je portland cement (CEM II/AL-LL 42,5 N) prema normi ASTM C150. Reciklirani asfaltni prah je proizveden u tvornici *Isfalt Company*. Čestice recikliranog asfaltnog praha odgovaraju razredima A (otvor sita 0,425-2 mm), B (otvor sita 0,18-0,425 mm) i C (otvor sita 0,075-0,18 mm). Za pripremu cementnog morta korišten je standardni pijesak Rilem, jedinične težine 1,352 kg/m<sup>3</sup> i specifične težine 2,563g/cm<sup>3</sup>.

### 2.2. Priprema mješavine i metode ispitivanja

Za proizvodnju svih mješavina cementnog morta primijenjen je omjer pijeska, cementa i vode 3/1/0,5. S obzirom na to, u pripremi mješavine korišteno je 1350 g standardnog Rilem pijeska, 225 g vode i 450 g recikliranog cementnog praha. U mješavinama je 5, 10 i 15 posto mase cementa zamijenjeno recikliranim asfaltom, a potom su pripremljeni uzorci dimenzija 4 x 4 x 16 cm. Tablica 1. prikazuje mješavine cementnog morta koje su korištene u ispitivanju.

Za određivanje gustoće mješavina cementnog morta korišten je piknometar (model AccuPyc 1330). Prema toj metodi, izmjereni

Tablica 1. Ispitivane mješavine

Oznaka mješavine	Sastav mješavine	Udio recikliranog asfalta [%]	Udio cementa [%]	Udio cementa [g]	Udio pijeska [g]	Udio recikliranog asfalta [g]	Udio vode [ml]	Raspon veličina čestica recikliranog asfalta (otvor sita) [mm]
Kontrolna mješavina		-	100	450	1350	-	225	-
%5 A		5	95	382,5	1350	67,5	225	0,425 - 2
%5 B		5	95	382,5	1350	67,5	225	0,180 - 0,425
%5 C		5	95	382,5	1350	67,5	225	0,075 - 0,180
%10 A		10	90	315	1350	135	225	0,425 - 2
%10 B		10	90	315	1350	135	225	0,180 - 0,425
%10 C		10	90	315	1350	135	225	0,075 - 0,180
%15 A		15	85	247,5	1350	202,5	225	0,425 - 2
%15 B		15	85	247,5	1350	205,5	225	0,180 - 0,425
%15 C		15	85	247,5	1350	202,5	225	0,075 - 0,180

Tablica 2.a Kemijska svojstva mješavina

Mješavine Kemijski spoj	Cement [%]	%5A [%]	%5B [%]	%5C [%]	%10A [%]	%10B [%]	%10C [%]	%15A [%]	%15B [%]	%15C [%]
SiO <sub>2</sub>	17,53	16,8	17,16	17,19	16,56	17,38	17,02	16,12	16,72	16,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,73	4,53	4,55	4,58	4,42	4,55	4,52	4,31	4,4	4,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,08	1,99	2,04	2,04	1,96	1,99	2,02	1,92	1,97	1,97
CaO	61,87	60,84	60,99	60,87	60,26	59,15	59,83	59,61	58,94	58,53
MgO	1,16	1,35	1,24	1,25	1,32	1,37	1,35	1,38	1,42	1,46
SO <sub>3</sub>	3,42	3,07	3,12	3,3	2,77	2,49	2,79	2,21	2,48	2,85
K <sub>2</sub> O	0,75	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77	0,75	0,77	0,78
Na <sub>2</sub> O	0,35	0,33	0,39	0,32	0,31	0,33	0,32	0,38	0,39	0,4
LOI	8,38	10,44	9,83	9,8	11,42	11,43	11,24	13,18	12,78	12,67

Tablica 2.b Fizikalna svojstva mješavina

Mješavine Ispitano svojstvo	Cement [%]	%5A [%]	%5B [%]	%5C [%]	%10A [%]	%10B [%]	%10C [%]	%15A [%]	%15B [%]	%15C [%]
Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	4634	4226	4111	4435	3873	4080	4157	3793	3851	3937
Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	3,16	2,99	2,95	3,02	2,96	2,96	2,96	2,93	2,93	2,93

pomak plina koji prolazi kroz kruti uzorak određuje gustoću krutine. U toj metodi treba primijeniti idealni plin, poput helija ili nitrogena. Ispitivanje Blainovom metodom svih cementnih mješavina provedeno je u skladu s normom ASTM C204-11 primjenom zrakopropusne metode. Prije početka ispitivanja Blainovom metodom, izmjerena je specifična gustoća uzoraka. Vrijeme je mjereno tijekom prolaska konstantne količina zraka kroz zbijenu posteljicu uzorka pri konstantnoj poroznosti i određenim dimenzijama. Na kraju, određena je specifična ploština Blaineovom metodom. Fizikalna svojstva i gustoća svih mješavina prikazane su u tablici 2. Početno i konačno vrijeme vezanja morta mjereno je pomoću automatskog Vicatovog uređaja. Granulometrijski sastav mješavina je određen primjenom Mastersizer laserskog uređaja (Malvern model).

Tlačna čvrstoća svih mješavina morta je određena pri starosti uzoraka od 2, 7, 28, 57 i 98 dana, a dimenzije uzoraka su bile 4 x 4 x 16 cm. Da bi se dobile vrijednosti tlačnih opterećenja, primijenjeno je konstantno opterećenje od 0,5 MPa/s. Uzorci su njegovani u trima različitim uvjetima. Serija X se odnosi na 98-dnevno njegovanje uzoraka u vodi. Kod ispitivanja otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje korišteno je 13 % MgSO<sub>4</sub> po masi uzorka, a provedeno je u skladu s normom ASTM C-666. U seriji Y, uzorci su nakon 98 dana njegovanja uronjeni u otopini tjedan dana, a potom još tjedan dana izloženi su temperaturi od 105 °C u peći. Ti procesi

su bili ciklični, a svaka mješavina je ispitivana 4 puta. U seriji Z, uzorci su ispitivani metodom vlaženja i sušenja. Mješavine su uronjene u spremnik s vodom tjedan dana, nakon čega su njegovane na suhom mjestu još tjedan dana. Opisani postupak predstavlja jedan ciklus, a svaka mješavina je prošla četiri ciklusa. Gubitak mase u svim mješavinama u serijama X, Y i Z određen je za svaki ciklus ispitivanja pomoću izraza (1):

$$W_D = (W_t - W_0) / W_0 \times 100 \quad (1)$$

gdje je:

$W_D$  - promjena mase [g]

$W_t$  - masa u vremenu t

$W_0$  - početna masa.



Slika 1. a) SEM-EDS uređaj; b) XRD uređaj

Za određivanje mikrostrukture uzoraka korišten je elektronski mikroskop SEM EDS, model Zeiss i Supra 50 V (slika 1.a). Dok su se pripremale mješavine, uzorak je uzet iz homogene mješavine. Uzorak je prekriven zlatnom plohom, kako bi se spriječilo raspršivanje elektrona.

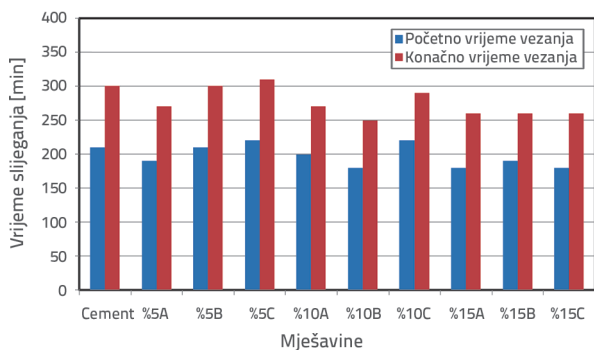
Rendgenska difraksijska analiza, XRD metoda, (engl. *X-ray diffraction method* - XRD) uobičajena je metoda kojom se određuju karakteristična svojstva kristalnih materijala difrakcijom zraka u različitim smjerovima prema Braggovom zakonu. Rezultati dobiveni tom metodom su poput otisaka pojedine faze. Korišteni su kako bi se otkrile faze u uzorcima. XRD analiza mješavina je provedena pomoću uređaja XRD Bruker, model Advance D8 slika 1.b.

### 3. Rezultati ispitivanja i rasprava

#### 3.1. Fizikalna svojstva

Budući da se dodatkom recikliranog asfalta utječe na gustoću mješavina, u tablici 2. su prikazane gustoće mješavina s različitim udjelom i granulometrijskim sastavom recikliranog asfalta. Gustoće mješavina se smanjuju s povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavini. To se može objasniti činjenicom da reciklirani asfalt ima malu jediničnu težinu, stoga mješavine s dodatkom recikliranog asfalta imaju manju gustoću. Specifična ploština mješavina se smanjuje s povećanjem udjela recikliranog asfalta. Najveća vrijednost je zabilježena u mješavini % 5C (4634 cm<sup>2</sup>/g). S druge strane, najniža je vrijednost zabilježena u mješavini %15A (mješavina s 15 % udjela recikliranog asfalta i otvora sita 0,425-2 mm, specifična ploština 3793 cm<sup>2</sup>/g). Sve su vrijednosti mješavina prikazane u tablici 2.

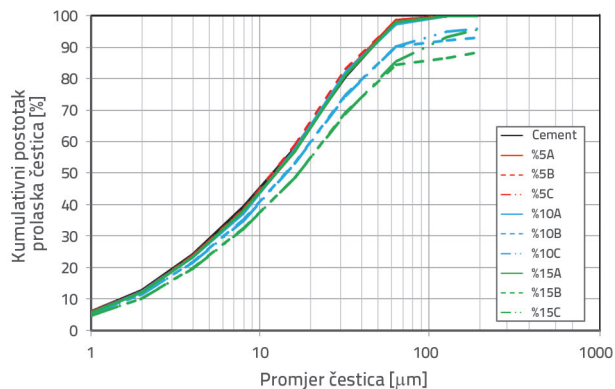
Početno i konačno vrijeme vezanja mješavina prikazano je na slici 2. Početno vrijeme vezanja kontrolnog uzorka iznosi 210 min, dok konačno vrijeme vezanja istog uzorka iznosi 300 min. Najkraće vrijeme vezanja je zabilježeno u mješavinama %10B, %15A i %15C (180 min). S druge strane, najduže vrijeme početnog vezanja je zabilježeno u mješavinama %5C i %10C (220 min).



Slika 2. Početno i konačno vrijeme vezanja

Granulometrijski sastav ispitivanih mješavina prikazan je na slici 3. Cement koji se koristio za ispitivanja ima sitnije čestice

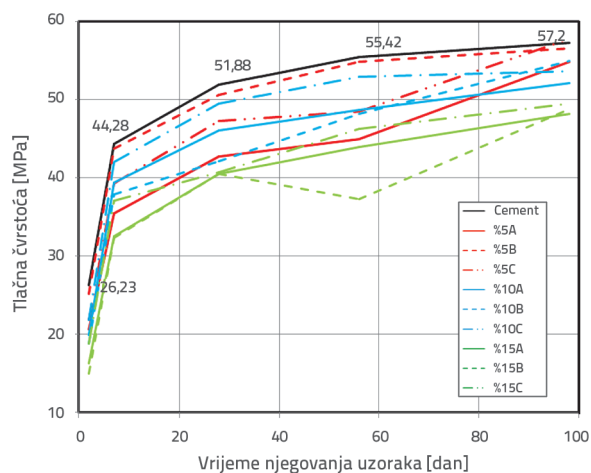
od ostalih mješavina. Udio sitnih čestica mješavine je različit u mješavinama A (otvor sita 0,425-2 mm), do C (0,075-0,180 mm). Kao što se može vidjeti na slici 3., povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavini smanjuje se finoća mješavine. Budući da su čestice cementa sitnije od čestica recikliranog asfalta, dodavanje recikliranog asfalta mješavini mijenja udio sitnih čestica u kompozitu.



Slika 3. Granulometrijski sastav ispitivanih mješavina

#### 3.2. Rezultati tlačne čvrstoće

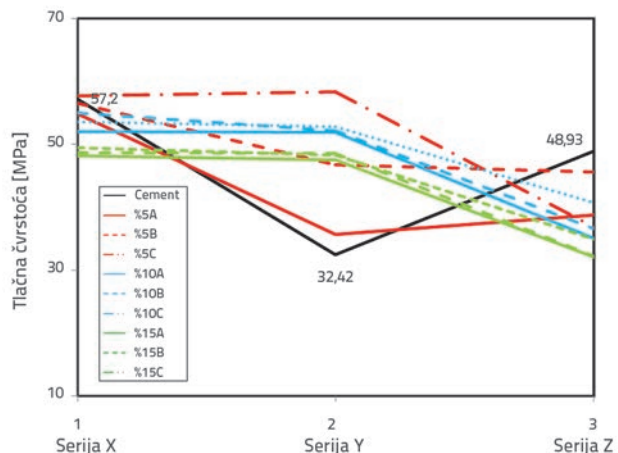
Na slici 4. prikazane su vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 2, 7, 28, 56 i 98 dana starosti uzoraka. Serija X pokazuje da su vrijednosti tlačne čvrstoće svih mješavina s dodatkom recikliranog asfalta manje od tlačne čvrstoće kontrolnog uzorka. To pokazuje da se povećanjem udjela recikliranog asfalta u kompozitu smanjuje čvrstoća mješavina. Granulometrijski sastav recikliranog asfalta utječe na tlačnu čvrstoću mješavina.



Slika 4. Tlačna čvrstoća mješavina s obzirom na vrijeme njegevanja uzoraka

Rezultati tlačne čvrstoće dobiveni u serijama X, Y i Z u mješavinama s različitim udjelom recikliranog asfalta prikazani su na slici 5. Vrijednosti tlačnih čvrstoća mješavina koje su dobivene u seriji Y manje su od vrijednosti u serijama X i Z za mješavine %5A,

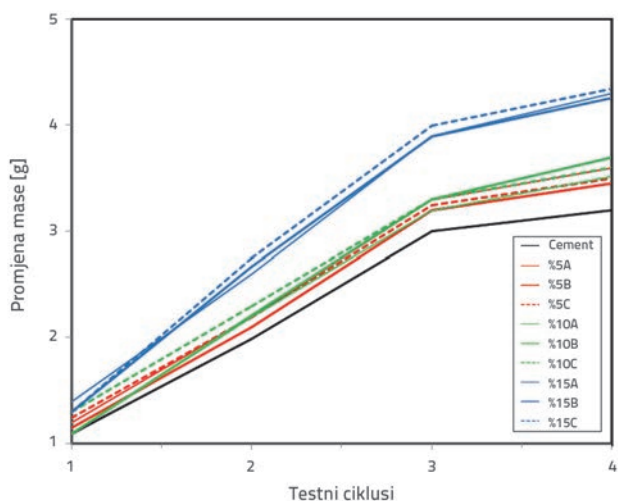
%5B te u kontrolnoj mješavini. Međutim, tlačna čvrstoća morta pripremljenog u seriji Y je veća od čvrstoće mortova pripremljenih u serijama X i Z. Najveća tlačna čvrstoća morta dobivena je u kontrolnoj mješavini. Tlačna čvrstoća uzoraka dobivena metodom vlaženja i sušenja (serija Y) ima slične rezultate kao kod uzoraka dobivenih uobičajenom metodom njegovanja uzoraka (serija X), s izuzetkom kontrolne mješavine.



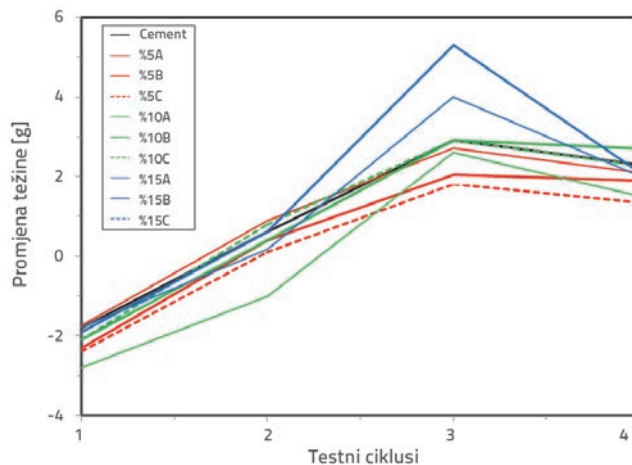
Slika 5. Rezultati tlačne čvrstoće mješavine u serijama X, Y i Z.

### 3.3. Rezultati ispitivanja trajnosnih svojstava

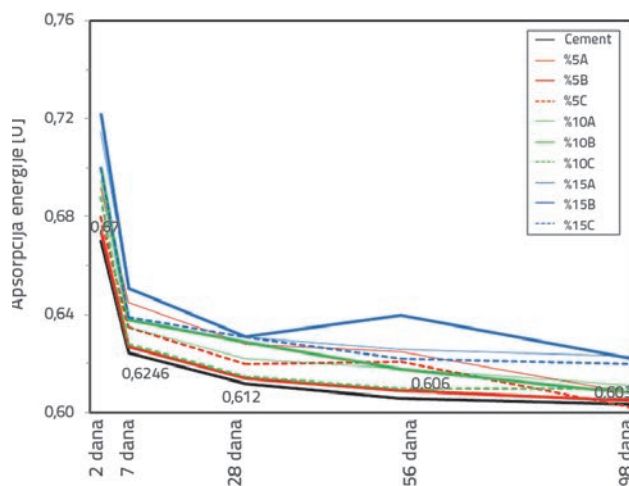
Rezultati promjene mase uzoraka dobiveni su tijekom ispitivanja trajnosti uzoraka u serijama Y i Z, a prikazani su na slikama 6. i 7. Promjene masa za mješavine u seriji Y bile su veće nego u kontrolnoj mješavini. Drugim riječima, te mješavine imaju svojstvo apsorpcije vode. To se može objasniti činjenicom da reciklirani asfalt nema mogućnost ispunjenja šupljina kao što je to slučaj kod mineralnog aditiva. Reciklirani asfalt je materijal naftnog porijekla, pa se teže veže za cement.



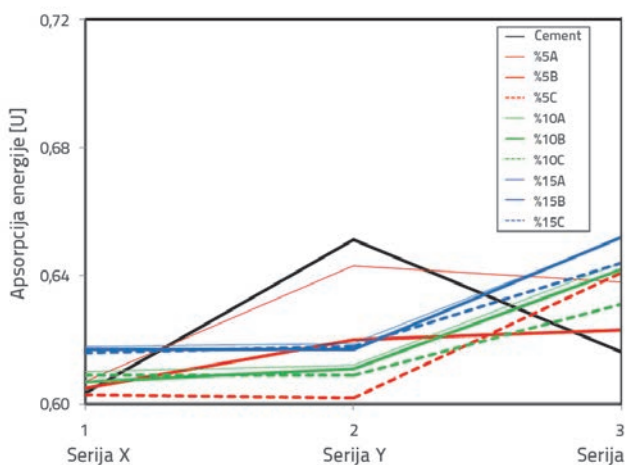
Slika 6. Promjene mase mješavina u odnosu na testne cikluse za serije Y



Slika 7. Promjene mase mješavina u odnosu na testne cikluse za serije Z



Slika 8. Kapacitet apsorpcije energije mješavina s obzirom na vrijeme njegovanja

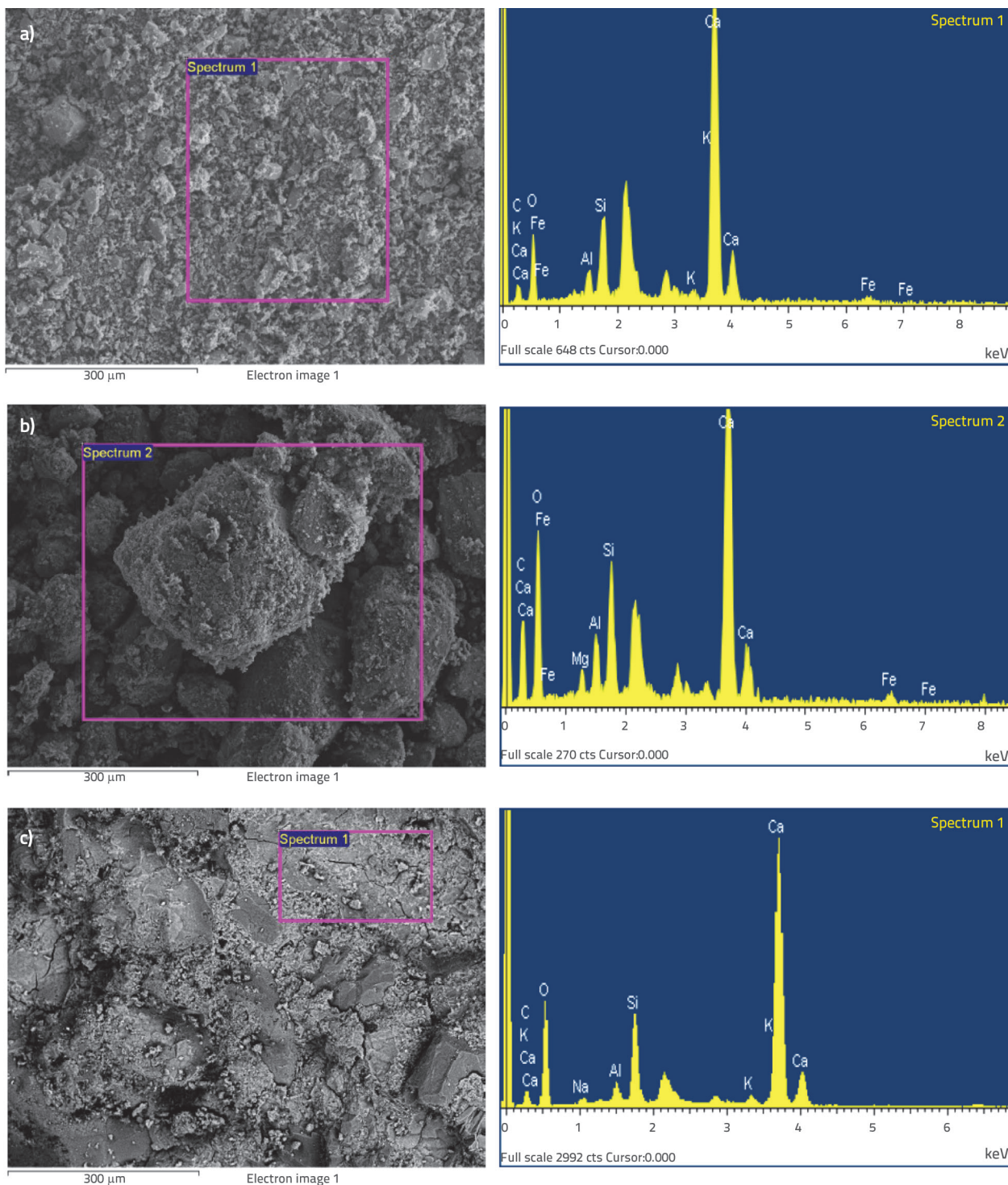


Slika 9. Kapacitet apsorpcije energije mješavina u odnosu na X, Y i Z serije



S druge strane, magnezijev sulfat ( $MgSO_4$ ) razara cementni mort nakon 6 mjeseci, iako to još nije dokazano. Nije zabilježeno smanjenje masa mješavina, a ubrzanje promjene mase se mijenja nakon trećeg ciklusa serije Y. Međutim, promjena mase se događa nakon trećeg ciklusa serije Z. Zbog toga se izvodi hidratacije tope, te se pojavljuje gubitak

mase. Gubitak mase je veći u seriji Z nego u seriji Y. Žilavost, poznata kao kapacitet apsorpcije energije, općenito se definira kao površina ispod krivulje dijagrama napreznja i deformacija uzorka opterećenog na savijanje [4]. Vrijednosti žilavosti svih mješavina su izračunane i predstavljene na slikama 8. i 9. Prema slici 8., žilavost uzoraka s dodatkom

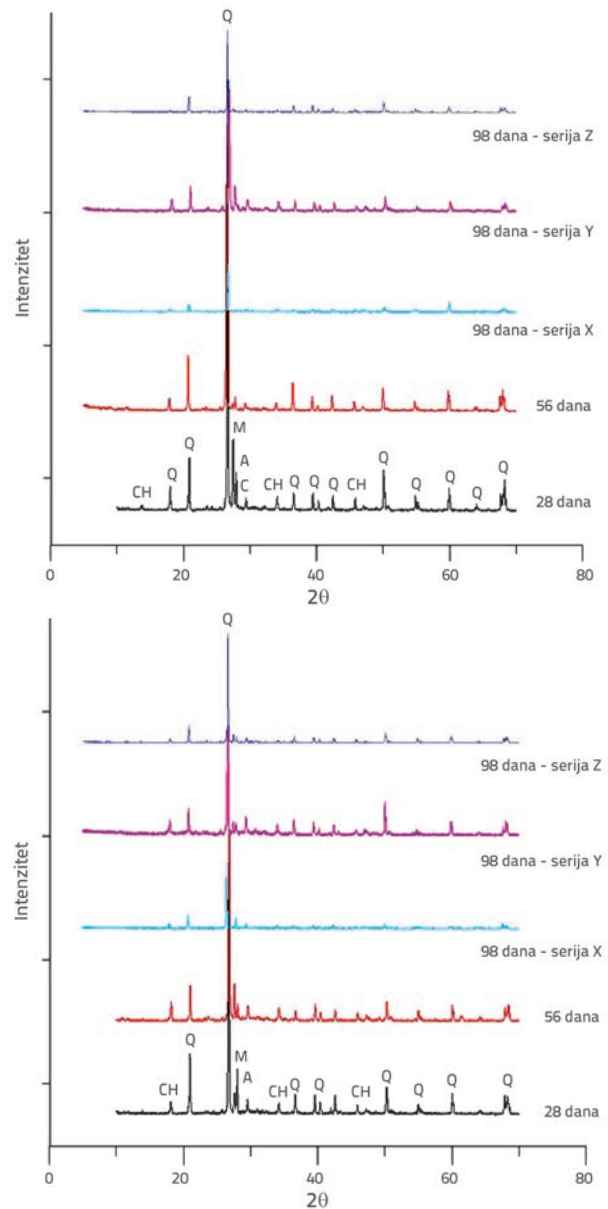


Slika 10. SEM – EDS analiza uzoraka: a) cement, b) reciklirani asfalt, c) mješavina %10C nakon 28 dana starosti uzoraka

recikliranog asfalta su veće od žilavosti kontrolnog uzorka. Povećanjem udjela recikliranog asfalta u cementnoj pasti, povećava se njena žilavost. Kao što se vidi na slici 9., žilavost uzoraka %5A i %5B je slična kao u kontrolnom uzorku. Međutim, vrijednosti žilavosti drugih uzoraka se razlikuju. Žilavost uzoraka %5A i %5B dobivenih postupkom smrzavanja- odmrzavanja (serija Y) veća je nego kod uzoraka u serijama X i Z. S druge strane, žilavost drugih uzoraka dobivenih postupkom smrzavanja i odmrzavanja (serija Y) manja je nego kod uzoraka u serijama X i Z. Stoga se može zaključiti da je dodavanje %5A i %5B recikliranog cementa kritična točka za cikluse smrzavanja i odmrzavanja (serija Y).

### 3.4. Mikrostruktura i mineraloška analiza mješavina

Mikrostruktura i mineraloška analiza cementa, recikliranog asfalta i mješavina (pripremljenih u grupi C) provedena su primjenom SEM i XRD metoda. Grupa C je odabrana zbog tlačne čvrstoće mješavina. Mikrostruktura cementa, recikliranog asfalta i mješavine %10C nakon 28 dana njegovanja prikazana je na slici 10. Kada se rezultati cementa i recikliranog asfalta uvećaju 150 X, tada se promatraju kao homogeni slučaj. S druge strane, kada povećanje iznosi 2000 X, sferne i nesferične strukture u uzorcima postaju vidljive. Kalcij (Ca), kao najzastupljeniji element u cementu, ima maksimalnu vrijednost na različitim točkama s obzirom na ostale elemente (slika 10.a). Mikrostruktura recikliranog asfalta pokazuje različite vrste strukture. Reciklirani asfalt s nepravilnim oblikom i veličinom usprkos vlaknastoj strukturi može se vidjeti na slici 10.b. Ti se rezultati ponavljaju u kemijskoj analizi. Mikrostruktura mješavine %10C je prikazana na slici 10.c. Na temelju slike se može zaključiti da se kvarc nalazi u sivom području. Na slici se jasno vidi struktura kalcijevog silikata. Međutim, C-S-H gel u uzorcima s %10C za 28 dana starosti nije zabilježen na slikama. Analizom EDS identificirane su dvije značajne vrijednosti kalcija i silikata na slici 10. To je zbog asfaltnog morta koji sadrži  $\text{CaCO}_3$ . Difrakcija X zraka pokazuje kvantitativno stanje proizvoda hidratacije i mogućnost da se odredi mineralni sastav kemijskog materijala [5]. XRD rezultati kontrolne i %10C mješavine su dobiveni rendgenskom difrakcijskom analizom X zraka, a prikazani su na slici 11. Dobiveni su rezultati nakon 28, 56 i 98 dana starosti uzoraka (u serijama X, Y i Z). Kao što se prema rezultatima vidi, C-H veza uzoraka je kompatibilna s vrijednostima tlačne čvrstoće uzoraka. Povećanjem C-H povećava se i tlačna čvrstoća. Uzorci praha morta, dobiveni metodom X zračenja s česticama recikliranog asfalta upućuju na prisutnost kalcijevog karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) i kvarca. Zapravo, karbonat je dodan u nekim proizvodima hidratacije. Prema tome, faza  $\text{CaCO}_3$  je određena kao zaključak sekundarnih reakcija u mortu s dodatkom recikliranog asfalta [5].



Slika 11. XRS analiza uzoraka: a) kontrolni uzorak, b) mješavina %10C

### 4. Zaključak

Dodavanje recikliranog asfalta u mortu utječe na njegovu gustoću. Gustoća mješavine se smanjuje s povećanjem udjela recikliranog asfalta. Blainove vrijednosti mješavina se smanjuju s povećanjem količine recikliranog asfalta. Njegova najveća vrijednost zabilježena je u uzorku %5C (4634  $\text{cm}^2/\text{g}$ ). S druge strane najmanja je vrijednost zabilježena u mješavini %15A (15 posto udjela recikliranog asfalta, otvor sita 0,425-2 mm), Blaine: 3793  $\text{cm}^2/\text{g}$ ). Povećanje udjela recikliranog asfalta u mješavini mijenja početno i konačno vrijeme vezivanja morta. Povećanjem količine recikliranog asfalta u mješavini smanjuje se njena finoća. Finoća mješavine se mijenja od

razreda A (otvor sita 0,425–2 mm), do C (otvor sita 0,075–0,180 mm). Vrijednosti tlačnih čvrstoća mortova s dodatkom recikliranog asfalta su niže od tlačne čvrstoće kontrolnog morta. Povećana količina recikliranog asfalta u kompozitima smanjuje tlačnu čvrstoću morta. Granulometrijski sastav recikliranog asfalta mijenja vrijednosti čvrstoće morta. Tlačna čvrstoća morta pripremljena u seriji Y je niža od onih dobivenih u serijama X i Z za mješavine %5A, %5B i za kontrolni mort. Vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka dobivena metodom vlaženja - sušenja (serija Z) najbliže su uzorcima dobivenima metodom uobičajenog njegovanja uzoraka (serija

X). Smanjenja težine mješavina nisu zabilježena, a ubrzanje promjene težine se smanjuje nakon 3. ciklusa serije Y. Žilavost uzoraka s dodatkom recikliranog asfalta je veća nego žilavost kontrolnog uzorka. Povećanjem udjela recikliranog asfalta u cementnoj pasti povećava se i njegova žilavost. Mikrostruktura recikliranog asfalta se sastoji od različitih vrsta strukture. Reciklirani asfalt ima nepravilan oblik i veličinu usprkos vlaknastoj strukturi. C-S-H gel nije zabilježen u uzorku %10C za starost od 28 dana. C-H struktura uzoraka je kompatibilna s rezultatima tlačne čvrstoće uzoraka. Povećanjem C-H povećava se tlačna čvrstoća uzoraka.

## LITERATURA

- [1] Sengoz, B., Oylumluoglu, J.: Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen, *Construction and Building Materials*, 45 (2013), pp.173–183, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.097>
- [2] Modarres, A., Hosseini, Z.: Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material, *Materials and Design*, 64 (2014), pp.227–236, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.072>
- [3] Rinaldini, E., Schuetz, P., Partl, M.N., Tebaldi, G., Poulidakos, L.D.: Investigating the blending of reclaimed asphalt with virgin materials using rheology, electron microscopy and computer tomography, *Composites: Part B*, 67 (2014), pp.579–587, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.025>
- [4] Tantala, M.W., Lepore, J.A., Zandi, I.: Quasi-elastic behavior of rubber included concrete. In: Ronald Mersky (Ed.), *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, PA, 1996.
- [5] Turkin, M., Bretagne, E., Rouis, M.J., Quéneudec, M.: Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), pp.2715–2722, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.019>