

Primljen / Received: 19.1.2021.

Ispravljen / Corrected: 6.7.2021.

Prihvaćen / Accepted: 20.7.2021.

Dostupno online / Available online: 10.9.2021.

# Tlačna čvrstoća cementnih stabilizacija koje sadržavaju reciklirani i otpadni materijal

## Autori:



<sup>1</sup>Mr.sc. **Milija Stojanović**  
[milijastojanovic@gmail.com](mailto:milijastojanovic@gmail.com)



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Vlastimir Radonjanin**  
[radonv@uns.ac.rs](mailto:radonv@uns.ac.rs)  
Autor za korespondenciju



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Mirjana Malešev**  
[miram@uns.ac.rs](mailto:miram@uns.ac.rs)



<sup>1</sup>Mr.sc. **Tiana Milović**  
[tiana.tatomirovic@gmail.com](mailto:tiana.tatomirovic@gmail.com)



<sup>1</sup>Mr.sc. **Saeeda Furgan**  
[saeedaomran.1980@gmail.com](mailto:saeedaomran.1980@gmail.com)

<sup>1</sup>Sveučilište u Novom Sadu  
Fakultet tehničkih znanosti  
Zavod građevinarstvo i geodeziju

Prethodno priopćenje

**Milija Stojanović, Vlastimir Radonjanin, Mirjana Malešev, Tiana Milović, Saeeda Furgan**

## Tlačna čvrstoća cementnih stabilizacija koje sadržavaju reciklirani i otpadni materijal

U ovom radu analizirane su mogućnosti upotrebe recikliranog asfaltnog kolnika za zamjenu prirodnog agregata do 30 %, zajedno s primjenom letećeg pepela za zamjenu 20 % ili 40 % portland cementa u cementnim stabilizacijama sa 4 % i 6 % veziva. Proktorov pokus je upotrebljen za određivanje maksimalne suhe zapreminske mase i optimalnog udjela vlage u stabilizacijama na bazi cementa. Tlačna čvrstoća je ispitana nakon 7, 28 i 90 dana. Utjecajni parametri na 28-dnevnu tlačnu čvrstoću vrednovani su faktoriskim eksperimentom i svrstavanjem u razrede čvrstoće. Dobiveni rezultati opravdavaju upotrebu otpadnih i recikliranih materijala u kolničkim konstrukcijama.

### Ključne riječi:

cementna stabilizacija, leteći pepeo, reciklirani asfaltni kolnik, tlačna čvrstoća

Research Paper

**Milija Stojanović, Vlastimir Radonjanin, Mirjana Malešev, Tiana Milović, Saeeda Furgan**

## Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials

This study analyses the possibilities of using up to 30% of reclaimed asphalt pavement as a substitute material for natural aggregate, along with fly ash replacing 20% or 40% of Portland cement in cement stabilizations with 4% and 6% of binder. The Proctor test was used to determine maximum dry density and optimal moisture content of cement-based stabilizations. The compressive strength was tested after 7, 28, and 90 days. Parameters influencing 28-day compressive strength were evaluated by full factorial design and by classification in strength classes. The results obtained justify the utilisation of waste and recycled materials in pavement structures.

### Key words:

cement stabilization, fly ash, reclaimed asphalt pavement, compressive strength

## 1. Uvod

Prirodni kameni agregat i cement godinama su se koristili kao nosivi sloj polukrute kolničke konstrukcije. Polukrute kolničke konstrukcije primjenjuju se s ciljem da se poveća nosivost kolničkih konstrukcija [1, 2]. Cementne stabilizacije mogu se jednako uspješno postaviti ispod asfaltnog kolnika kao i ispod cementnog betonskog kolnika, a utječu na smanjenje gibanja finih čestica iz donjih slojeva prema površini. Svojstva stabiliziranog sloja izravno ovise o vrsti i količini veziva u mješavini. Veći udio veziva znači veći udio vode, a zajedno utječu na smanjenje volumena šupljina unutar stabiliziranih mješavina (slika 1.) [3]. To osigurava bolju realizaciju guste strukture u procesu zbijanja stabilizacijske mješavine koja određuje fizikalna i mehanička svojstva cementne stabilizacije. Materijali cementne stabilizacije predstavljaju posebnu vrstu betonskih kompozita koji moraju osigurati adekvatnu tlačnu čvrstoću i biti savitljivi u isto vrijeme, što je samo po sebi kontradiktorno. Iz tog je razloga potrebno ograničiti količinu cementa te točno odrediti razred cementa u mješavinama [4]. U mješavinama cementne stabilizacije ne preporučuju se razredi cementa veći od 32.5, upravo zbog ograničenja krutosti materijala cementne stabilizacije.

Osim što je važna u procesu hidratacije cementa, glavni je cilj dodavanja vode u mješavine stabilizacije to da se omogući dobra ugradnja u kolničku konstrukciju. U usporedbi s konvencionalnim betonskim mješavinama, taj se postupak provodi intenzivnim procesima zbijanja cementne stabilizacije.

Zbog globalne potrebe za zaštitom okoliša kroz smanjenje odlagališta otpada te čuvanje prirodnih sirovina, u posljednje vrijeme široko je rasprostranjena upotreba brojnih zamjenskih materijala u industriji cestovnih konstrukcija. U odnosu na sve te materijale, posebnu pozornost privlači mogućnost upotrebe letećeg pepela iz termoelektrana (eng. *fly ash* - FA) te agregat recikliranog asfaltnog kolnika (eng. *reclaimed asphalt pavement* - RAP). Leteći pepeo

može uspješno zamijeniti dio cementa, a RAP služi kao zamjenski materijal za prirodni agregat u cementnoj stabilizaciji.

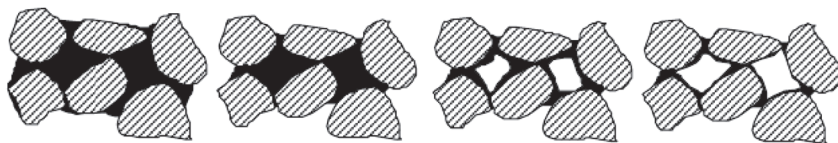
Velike količine letećeg pepela koje se nalaze na odlagalištima diljem svijeta nisu neka novost, a to je vidljivo otkad se struja počela proizvoditi u termoelektranama. Prema statistici ECOBA-e (Europska udruga za proizvode nastale izgaranjem ugljena) koja se tiče proizvodnje i upotrebe proizvoda nastalih izgaranjem ugljena (CCP) za 2016. godinu ukupna je količina CCP-a u elektranama bila 40 milijuna tona u državama članicama [5]. Procjene o CCP-u u Europi prikazane su u tablici 1. Udio različitih vrsta CCP-a grafički je prikazan također u toj tablici.

Najveći svjetski proizvođači CCP-a su Kina, Indija i SAD. Kina je najveći potrošač ugljena na svijetu. Leteći pepeo ugljena (eng. *coal fly ash* - CFA) zasad je jedan od najvećih krutih otpada u Kini. Godišnja proizvodnja CFA u Kini 2018. godine premašila je 500 milijuna tona, a zbog nedovoljnog iskorištavanja, ukupna nagomilana količina CFA premašuje 3 milijarde tona [6]. Indija je proizvela približno 180 milijuna tona letećeg pepela 2017. godine [7]. Na temelju podataka Američkog udruženja za ugljeni pepeo, godišnja proizvodnja CCP-a 2018. iznosila je više od 100 milijuna tona, a ukupna proizvodnja FA-a bila je veća od 35 milijuna tona [8].

Statistički podaci pokazuju da se godišnje otprilike 7 milijuna tona letećeg pepela i zgure proizvodi u termoelektranama u Srbiji, i to u omjeru proizvodnje 9:1. Samo 3 % te količine koristi se u proizvodnji cementa [9]. Procjenjuje se da je ukupna količina letećeg pepela na odlagalištima iznosi oko 300 milijuna tona na površini od 1700 ha. Velika količina letećeg pepela te razne mogućnosti njegove upotrebe čine ga otpadnim materijalom koji se najčešće upotrebljava u građevinarstvu Srbije [10].

Prema izvoru IEA (2019.) *World Energy Outlook (All rights reserved)* [11], postoje tri scenarija globalne potražnje ugljena u sljedećem razdoblju do 2040. Scenarij trenutnih politika (eng. *Current Policies Scenario* - CPS) temelji se na tekućoj svjetskoj potražnji električne struje, posebice u azijskim zemljama u razvoju. Scenarij iskazanih politika (eng. *Stated Policies Scenario* - STEPS) pokazuje

namjeru "pridržavanja zrcala" za planove i ambicije koje su objavili zakonodavci bez pokušaja da se predvidi kako se ti planovi mogu promijeniti u budućnosti. Scenarij održivog razvoja (eng. *Sustainable Development Scenario* - SDS) nudi strateški put kako bi u potpunosti išao u susret ciljevima poput globalne klime, kvalitete zraka i pristupa energije. Slika 2. prikazuje procjene globalne potražnje ugljena za razdoblje 2018.-2040. prema tri spomenuta scenarija. Ako CPS ili STEPS prevladaju, globalna potražnja ugljena ostat će na istoj razini ili će čak rasti. U tom slučaju količina proizvedenog letećeg pepela ugljena (CFA) će rasti. Budućnost ugljena u velikoj mjeri ovisi o širini i strogosti okolišnih politika diljem svijeta.



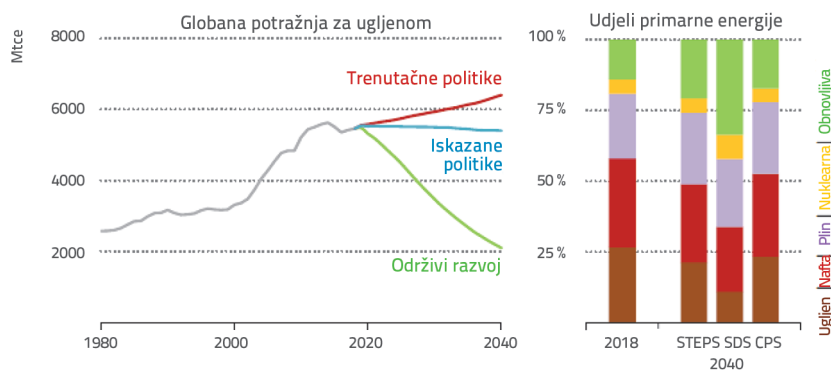
Slika 1. Šupljine u mješavinama stabilizacije zbog smanjenja udjela cementne paste [3]

Tablica 1. Procjene o proizvodnji CCP-a u 2016. u Europi [4]

	EU 15 zemalja - ECOBA	EU 28 zemalja	Europa
Proizvodnja	(miliona tona)		
Ukupno CCP-a	40,33	> 105	> 145
Pepeo	30,42	> 88	> 124
Disulfatni proizvodi	9,92	> 21	> 21

Proizvodnja CCPs u Europi (EU 15), 2016. godine



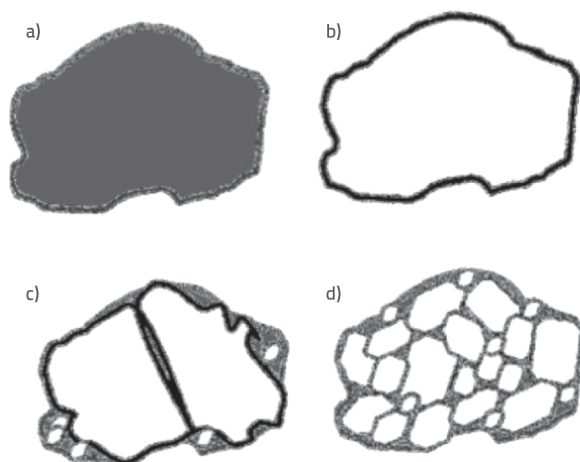
Slika 2. Globalna potražnja ugljena po scenariju prema izvoru: IEA (2019) World Energy Outlook (Sva prava zadržana) [11]

Leteći pepeo s prikladnim pucolanskim svojstvima [4] i mogućnostima za povećanje čvrstoće tijekom vremena može se uspješno primijeniti kao vezivni materijal u različitim betonskim kompozitima [12]. Leteći pepeo pronašao je svoje mjesto u građenju cementnostabilizirajućih kolničkih konstrukcija gdje se može koristiti kao stabilizator [13]. Vapnenački leteći pepeo, klasificiran prema EN 14227-4, može se i sam koristiti kao vezivo, a silikatni leteći pepeo zahtijeva upotrebu aktivatora (kako bi potaknuo pucolansku reakciju) poput cementa ili vapna. Njegova se primjena opravdava činjenicom da je leteći pepeo materijal koji se u svojem izvornom obliku i bez ikakve obrade može koristiti u stabilizacijama kolničkih konstrukcija. U sljedećim radovima [14-16] istražuje se mogućnost i opravdanost upotrebe letećeg pepela (FA) kao industrijskog nusproizvoda u stabilizacijskom sloju kolničkih konstrukcija. Autori [14] su ispitali mogućnosti zamjene cementnog veziva sa 25, 50 i 75 % letećeg pepela (FA) za stabilizaciju nevezanih slojeva kamenog materijala. Analiza dobivenih tlačnih čvrstoća pokazala je da su se najbolji rezultati postigli za mješavine koje sadržavaju 25 % FA, te se ta količina preporučila kao optimalna zamjena za cement. Uočilo se smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 28 dana s većim udjelom FA (50 % i 75 %). Stoga je potrebno nadzirati promjene čvrstoće nakon 28 dana jer se mehanička svojstva značajno poboljšavaju s povećanjem starosti stabilizacije. Jednako tako, pri oblikovanju takvih kolničkih konstrukcija u obzir se trebaju uzeti i čvrstoće cementnih stabilizacija koje sadržavaju leteći pepeo u ranoj fazi jer one mogu premašivati određena ograničenja specifikacije [16]. Zbog činjenice da su čvrstoće materijala s letećim pepelom u ranoj fazi manje nego one u slučaju cementnih stabilizacija, koristi se portland cement s većom čvrstoćom u ranoj fazi kako bi se to nadoknadilo (R cementi). To je vrlo važno na gradilištu budući da je vrijeme stvrdnjavanja stabilizirajućeg materijala u cestogradnji vrlo značajno te utječe na ukupnu dinamiku radova.

FA se jednako tako uspješno može primijeniti u stabilizaciji pijeska [15] i sitnozrnatih materijala tla [9]. U ovim ispitivanjima potvrdilo se da se FA može koristiti samostalno ili u kombinaciji s cementom kao aktivatorom. Uz prethodno spomenuto, neke od dodatnih koristi upotrebe letećeg pepela u kolnicima s cementnom stabilizacijom jesu [17]:

- upotreba lokalno dostupnih materijala
- bolja otpornost na sulfate i alkalno-silikatnu reakciju
- niži troškovi
- samozacjeljivanje betona autogenim postupkom
- manja potrošnja energije
- smanjenje emisije  $\text{CO}_2$  u usporedbi s proizvodnjom cementa
- prikladnost upotrebe s recikliranim materijalima
- mogućnost da se postavi s konvencionalnom opremom.

Tijekom uporabe ceste njezina se kvaliteta smanjuje zbog različitih vrsta oštećenja koja se pojavljuju u asfaltnoj konstrukciji kolnika [18]. Jedna od boljih opcija poboljšanja kvalitete ceste jest gradnja nove koristeći materijale iz postojeće kolničke konstrukcije. Reciklirani asfaltni kolnik (RAP) materijal je koji se oblikuje tijekom procesa drobljenja oštećenog i starog asfaltnog kolnika. Taj se proces može izvesti u postrojenju ili na gradilištu. Druge primjene RAP-a uključuju gradnju cementne stabilizacije za kolničke konstrukcije [19]. Kada je u pitanju reciklaža na gradilištu, uglavnom se primjenjuje hladna reciklaža na gradilištu. Svi se asfaltni slojevi mogu uspješno reciklirati. Po svom sastavu to je karakterističan i heterogen materijal s različitim udioima prirodnog kamenog agregata i starog oksidiranog bitumena (slika 3.) [20]. Fizikalna i mehanička svojstva cementne stabilizacije ovise o udjelu tih dvaju materijala u recikliranom agregatu. Smatra se da čestice agregata koje sadržavaju više kamenog materijala imaju bolja svojstva.



Slika 3. Nehomogenost sastava čestice RAP-a: a) čestica bitumenskog agregata, b) čestica kamenog agregata, c) čestica s većim udjelom kamenog materijala, d) čestica koja sadržava fini agregat i veću količinu bitumenskog veziva [20]

Na globalnoj razini RAP se uglavnom koristi za proizvodnju novih asfaltnih mješavina i gradnju stabilizirajućih slojeva kolničkih konstrukcija [21]. Tijekom procesa stabilizacije, stari se asfaltni kolnik drobi i miješa s hidrauličnim vezivom na gradilištu (slika 4.) koristeći specijalne reciklažne strojeve [22]. Novonastala mješavina zdrobljenog agregata i hidrauličnog veziva čini stabilizirajući sloj kolničke konstrukcije procesom intenzivnog sabijanja te predstavlja osnovu za nove asfaltno slojeve. Spomenuta primjena RAP-a najopravdaniji je postupak rekonstrukcije ceste kada se analizira iz ekonomskog aspekta, aspekta potrošnje energije ili smanjenja emisije CO<sub>2</sub> [23, 24].



Slika 4. Cementna stabilizacija RAP-a koja koristi tehnologiju hladne reciklaže na mjestu gradnje

Karakteristike cementnih stabilizacija (CS) koje sadržavaju reciklirani asfaltni kolnik (RAP) koji je nastao procesom hladne reciklaže asfalta detaljno su istražene u radovima [25-33]. Zamjena prirodnog ili zdrobljenog kamenog agregata s RAP-om varirala je u širokom rasponu (0-100 %). Obično se koristila količina cementa koja je iznosila do 6 % težine [25-27, 29-32]. Autori [25-28] otkrili su da je optimalan udio vlage (OMC) u cementnoj stabilizaciji varirao između 5 i 9 %. Uočeno je da s povećanjem udjela RAP-a dolazi do smanjenja maksimalne suhe gustoće (eng. *maximum dry density* - MDD) i tlačne čvrstoće cementnih stabilizacija [25-32]. Autori [26, 28, 30, 32] suglasno su zaključili da potpuna zamjena kamenog agregata RAP-om vodi do nezadovoljavajuće tlačne čvrstoće cementne stabilizacije, osim u slučajevima stabilizacije lokalnih cesta [29]. Kameni agregat mogao bi se uspješno zamijeniti s RAP-om i to do 60 % [31, 32]. Upotreba RAP-a omogućava značajne dobiti iz ekonomske [25], ekološke, tehničke i tehnološke perspektive [26].

Neki su autori istražili mogućnost stabilizacije RAP-a i kamenog agregata s FA (letećim pepelom) kao jedinim vezivom [34, 38]. Udio FA u mješavinama stabilizacije bio je u rasponu od 10 do 18 % [34-36], dok se u [37] količina FA podigla za 30 %, odnosno u [38] do 40 %. Uočilo se da se optimalna količina vlage (eng. *optimum moisture content* - OMC) stabilizirajućih mješavina povećava s većim udjelom RAP-a i Fa-a [34, 35]. Autori [34-36] tvrdili su da tlačna čvrstoća raste s porastom udjela FA. Najveća tlačna čvrstoća postignuta je s približno 15 % FA [34, 37]. U radu [38] se zaključilo da stabilizacije sa 100 % RAP-a imaju nezadovoljavajuće mehaničke karakteristike jer RAP ima slabu čvrstoću na spoju između ostarjelog bitumena i kamenog agregata. Iz tog razloga

savjetovali su ograničenu zamjenu kamenog agregata s RAP-om ili kombiniranje FA s cementom. Većina dostupnih istraživanja u literaturi bavila se zamjenom prirodnog agregata s RAP-om i to u različitim omjerima kao što su 90:10, 80:20 pa sve do 50:50 posto po težini. Veće zamjene RAP-a nije poduprlo nekoliko državnih odjela za prijevoz (DOTs) u Sjedinjenim Američkim Državama zbog nedostatka istraživanja koja se bave većim udjelima RAP-a [38]. Analizom troškova izgrađenih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija u [36], zaključilo se da su troškovi tih slojeva s nevezanim prirodnim agregatom (slike 10. i 11.) približno isti kao oni RAP stabilizacije s letećim pepelom, uzimajući u obzir da oni potonji imaju bolje karakteristike.

Budući da su RAP i leteći pepeo gotovo besplatni, ekonomske koristi njihove primjene još su naglašenije. Njihova primjena jednako tako omogućila bi ukupno smanjenje troškova gradnje, a u isto vrijeme postizanje glavnog cilja: da se ne kompromitira zahtjev za kvalitetu kolničke konstrukcije i prometni uvjeti. Upotreba letećeg pepela i RAP-a u mjeri većoj nego danas omogućila bi ispunjenje brojnih ekoloških zahtjeva, nadalje unapređujući održivu gradnju i gospodarenje otpadom. Štoviše, ukupni troškovi još su manji ako je stari asfaltni kolnik recikliran na gradilištu te ugrađen u novu kolničku konstrukciju postupkom hladne reciklaže.

Analizirajući prethodno spomenute rezultate istraživanja opaža se da nedostaje istraživanje simultane potrebe kombiniranih materijala u cementnim stabilizacijama poput FA + cement te RAP + prirodni agregat. Iz tog razloga odlučili smo ispitati mogućnost primjene spomenutih otpadnih materijala u cementno stabilizirajućim kolničkim konstrukcijama na temelju rezultata tlačne čvrstoće dobivenih laboratorijskim eksperimentom.

Istraživanje izloženo u ovom radu prikazuje utjecaj letećeg pepela (FA) i RAP-a kao suplemenata cementu i prirodnom agregatu na tlačnu čvrstoću cementno stabilizirajućeg kolnika. Cjelovitim faktorskim oblikovanjem procijenio se utjecaj različitih količina FA-a i RAP-a koji se koriste u cementnim stabilizacijama na vrijednosti tlačne čvrstoće nakon 28 dana.

Upotreba recikliranih i otpadnih materijala u cementnim stabilizacijama je blagotvorna i opravdana uzimajući u obzir činjenicu da gradnja i rekonstrukcija cesta zahtijevaju značajne količine prirodnih sirovina.

## 2. Eksperimentalno ispitivanje

Laboratorijska eksperimentalna ispitivanja provedena su na 12 različitih mješavina kemijski stabilizirajućeg miješanog agregata. To se ispitivanje provelo u četiri etape:

- karakterizacija upotrijebljenih sastavnih materijala
- određivanje optimalnog udjela vlage (OMC) i maksimalne suhe gustoće prema proctorovom testu zbijanja (MDD)
- pripremanje i stvrdnjavanje uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće
- ispitivanje neograničene tlačne čvrstoće (eng. *unconfined compressive strength* - UCS) različite starosti.

Pripremljeno je ukupno 108 cilindričnih uzoraka za ispitivanje tlačne čvrstoće.



Slika 5. Prirodni agregat (0/16 mm)



Slika 6. Agregat RAP-a (0/16 mm)



Slika 7. Mješavina koja sadržava prirodni agregat i RAP sa sljedećim udjelom sastava: 70 %SG : 30 %RAP

Tablica 2. Geometrijska, fizikalna, mehanička i kemijska svojstva prirodnih i recikliranih agregata

Svojstvo	Metoda ispitivanja	Prirodni agregat	Agregat rekonstruiranog asfaltnog kolnika	Kategorija (EN 13242)
Oblik čestice - pokazatelj oblika [%]	EN 933-4	10	11	SI <sub>15</sub>
Procjena finoće - Test ekvivalentnosti na pijesku [%]	EN 933-8	81	85	SE <sub>65</sub>
Labava nasipna gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	EN 1097-3	1770	1430	-
Zbijena nasipna gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	EN 1097-3	1870	1540	-
Upijanje vode [%]	EN 1097-6	1,0	0,77	WA <sub>24</sub> 1
Otpornost fragmentaciji - Los Angeles [%]	EN 1097-2	27	-	LA <sub>30</sub>
Laki zagađivači [%]	EN 1744-1	0,0	0,3	-
Prisutnost humusa []	EN 1744-1	0,0	0,0	0 %

## 2.1. Sastavni materijali

Sastavni materijali u eksperimentalnom ispitivanju bili su:

- prirodni riječni agregat - agregat koji ima sve, pješčani šljunak (SG), (slika 5.)
- rekonstruirani asfaltni kolnik - reciklirani agregat koji ima sve (RAP), (slika 6.)
- portland cement (PC)
- ugljeni leteći pepeo (FA)
- voda.

Prirodni agregat potječe iz dunavskoga sliva. RAP se dobio struganjem oštećene površine grubog asfalta na lokaciji Irski Venac, i to na državnoj cesti klase IB Novi Sad - Ruma. Nakon struganja i drobljenja RAP se uklonio na odlagalište. Prosijavanjem RAP-a s odlagališta, utvrdilo se da 100 % recikliranog agregata prolazi kroz sito od 16mm. Maksimalna veličina zrna obaju agregata bila je  $D = 16$  mm.

Tablica 2. prikazuje osnovna svojstva koja imaju SG i RAP. Tijekom sušenja RAP-a važno je obratiti pozornost na temperaturu. Naime, pri visokim temperaturama (približno 105 °C na kojoj se suše materijali kamena), bitumen se topi, a čestice agregata drže se zajedno mijenjajući granulometrijski sastav agregata. Zato se proces sušenja provodio tijekom duljega razdoblja (> 24 h) na nižim temperaturama (približno 50 °C).

Postotak bitumena u RAP-u iznosio je 3,8 % (kategorija Ra<sub>5</sub> prema EN 13242). Zaključeno je iz tablice 2. da obje vrste agregata zadovoljavaju iste kriterije kad je u pitanju oblik čestice, procjena finoće, upijanje vode i prisutnost humusa. RAP ima manju labavu nasipnu gustoću zbog prisutnosti pridodanog asfaltnog veziva.

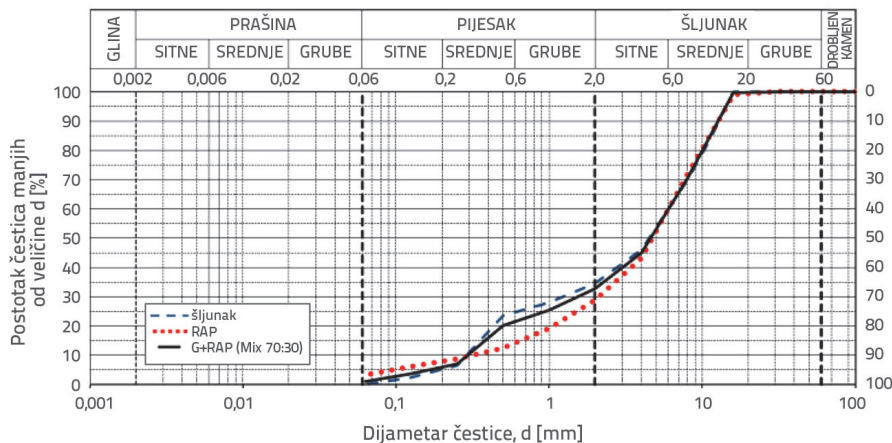
Raspodjela veličine čestice obaju agregata i njihova mješavina u omjeru 70 %G : 30 %RAP (slika 7.) određena je prema EN 933-1 i prikazana je na slici 8. Granulometrijska krivulja prirodnog agregata (SG) pokazuje određenu nepravilnost u sredini pijeska što je tipično za "dunavski" agregat. Količina zrna promjera manjeg od 4 mm ( $\approx 45$  % mase) u ukupnoj količini agregata prikladna je za adekvatno zbijanje stabilizirajuće mješavine.

Cement koji se koristio u ispitivanju (slika 9.) proizveden je u tvornici Lafarge, Beočin (Srbija) i nosio je oznaku CEM II/B-M (V-L) 32.5R. Kemijski sastav izabranoga cementa prikazan je u tablici 3. Poželjno je upotrijebiti cement velike čvrstoće u ranoj fazi cementnih stabilizirajućih materijala jer je potrebno njihovo brzo stvrdnjavanje zato što taj materijal mora postići potrebnu čvrstoću i nosivost prije nego što su asfaltni slojevi postavljeni u kolničku konstrukciju.

Ugljeni leteći pepeo iz termoelektrane "Nikola Tesla B" iz Obrenovca u Srbiji (slika 10.) koristio se kao dodatni vezivni materijal u ispitivanju. Kemijski sastav toga letećeg pepela prikazan je u tablici 3. Na temelju tih podataka može se klasificirati kao vapnenački leteći pepeo prema EN 14227-4.

Tablica 3. Kemijski sastav CEM II/B-M (V-L) 32.5R i FA

Vezivo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO, slobodan	LOI
PC	25,04	7,93	2,83	50,19	2,73	2,18	0,39	0,48	0,89	8,24
FA	50,08	18,55	5,84	11,29	1,34	2,63	0,74	1,78	-	7,16



Slika 8. Raspodjela veličine čestice prirodnog agregata, recikliranog agregata i mješavine SG : RAP = 70 : 30



Slika 9. Cement CEM II/B-M (V-L) 32.5R Slika 10. Ugljeni leteći pepeo

Kada se analizira njegova primjena, potrebno je obratiti pozornost na radioaktivna ograničenja jer leteći pepeo obično sadrži

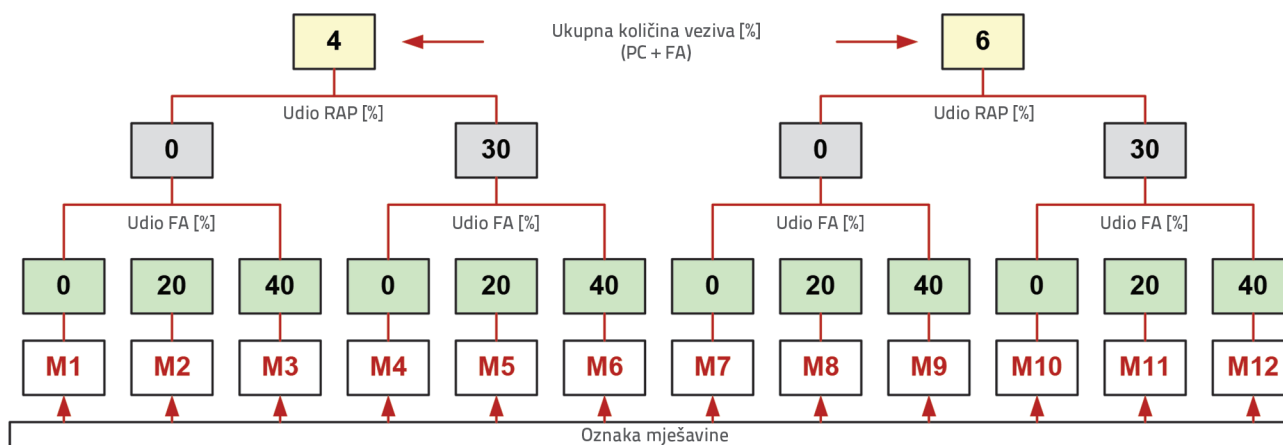
radioaktivne elemente (poput uranija, radija, torija, i dr.). Skupina autora [39] ispitala je radioaktivnost letećeg pepela (istog porijekla kao taj koji se koristi u ovom ispitivanju) te analizirala mogućnosti njegove primjene u građevinarstvu iz te perspektive. Njihova otkrića pokazuju da je radioaktivnost tog letećeg pepela unutar granica te da njegova primjena (za cestogradnju i visokogradnju) nije štetna za ljudsko zdravlje i okoliš. Voda iz slavine koja se koristila u eksperimentalnom ispitivanju bila je u skladu s EN 1008.

## 2.2. Sastav stabilizirajućih mješavina

Projektiranje sastava temeljilo se na sljedećim omjerima:

- ukupna količina veziva (PC+FA): 4 % ili 6 %
- zamjena SG-a s RAP-om: 0 % ili 30 %
- zamjena PC-a s FA-om: 0 %, 20 % i 40 %

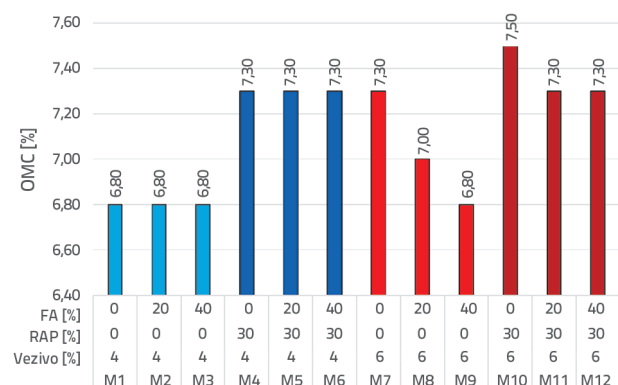
Ti su omjeri određeni na temelju analize dostupne literature iz tog područja te prema podacima iz prakse dobivenim s gradilišta. Projektiralo se ukupno 12 različitih stabilizirajućih mješavina (slika 11.) izmjenama vrste i količine sastavnih materijala.



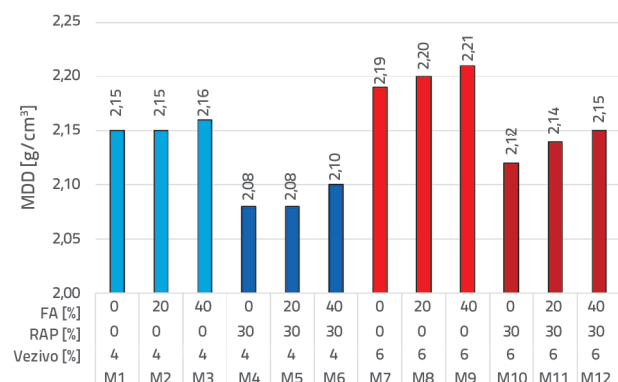
Slika 11. Sastav i oznake stabilizirajućih mješavina

### 3. Maksimalna suha gustoća i optimalni udio vlage

Proctorov test zbijanja proces je u kojem se stabilizirajuće mješavine intenzivno zbijaju, te se određuju njihova maksimalna suha gustoća (MDD) i optimalni udjeli vlage (OMC). Taj je test kategoriziran kao preliminarni test za stabilizirajuće mješavine. U ovom eksperimentalnom istraživanju testovi su provedeni uporabom metalnih cilindričnih kalupa i Proctorovog nabijača prema EN 13286-2. Na temelju veličine čestice agregata standardni je Proctorov test proveden uporabom kalupa tipa A u dimenzijama  $d = 10 \text{ cm}$  i  $h = 12 \text{ cm}$  te nabijača koji teži 2,5 kg. Energija zbijanja iznosila je  $0,6 \text{ MJ/m}^3$ . Slika 12. prikazuje rezultate zbijanja po Proctoru za OMC, a slika 13. prikazuje rezultate za MDD.



Slika 12. Optimalni udio vlage (OMC) za testirane stabilizirajuće mješavine



Slika 13. Maksimalna suha gustoća (MDD) testiranih stabilizirajućih mješavina

Optimalni udio vlage za testirane stabilizirajuće mješavine raspona je između 6,8 % i 7,5 %, a maksimalna suha gustoća je između  $2,08 \text{ g/cm}^3$  i  $2,21 \text{ g/cm}^3$ . Na dobivene rezultate OMC-a i MDD-a može se gledati s tri aspekta: upotreba RAP-a, ukupna količina veziva te udio FA-a u vezivu.

Vrijednosti OMC-a povećavale su se u mješavinama koje sadržavaju RAP zbog većeg specifičnog površinskog područja te većeg udjela finih čestica u agregatu RAP-a. Manje povećanje tih vrijednosti uočeno je kad se ukupna količina veziva povećala s 4 % na 6 % što se

može pripisati većem udjelu finoće u stabilizirajućim mješavinama. Leteći pepeo nije utjecao na vrijednosti OMC-a u stabilizirajućim mješavinama s 4 % veziva, neovisno o količini RAP-a. S druge strane, u mješavinama sa 6 % veziva, veći udio letječeg pepela i njegovo svojstvo da poboljša rad izazvalo je smanjenje vrijednosti OMC-a.

Prisutnost RAP-a u stabilizirajućim mješavinama smanjila je vrijednosti MDD-a zbog manje gustoće RAP-a. Povećanjem ukupne količine veziva, vrijednost se MDD-a povećala zato što se je smanjila međuzrnata poroznost stabilizirajuće mješavine. Utjecaj udjela letječeg pepela na vrijednosti MDD-a bio je zanemariv u slučaju stabilizirajućih mješavina s 4 % od ukupnog veziva, a njegov udio izazvao je neznatno povećanje vrijednosti MDD-a u stabilizirajućim mješavinama sa 6 % ukupnog veziva. To se može povezati s činjenicom da leteći pepeo zahtijeva manje vode nego PC te ima bolji učinak brtvljenja.

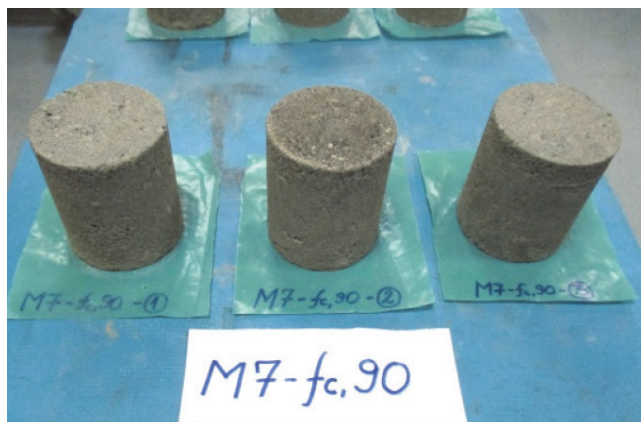
Tijekom Proctorova testa zbijanja curenje vode uočeno je na spoju kalupa i metalne osnovne ploče. To je izazvalo nedostatak najfinijih čestica agregata tijekom intenzivnog zbijanja stabilizirajućih mješavina, a pojavilo se prije no što se postigao OMC (optimalni udio vlage) u slučaju testiranih mješavina (slika 14.). Curenje vode iz svih mješavina bilo je  $< 0,3 \%$ . To je bio razlog daljnje uporabe kalupa i nabijača (A) u Proctorovom testu zbijanja u slučaju stabilizirajućih mješavina, a u skladu s EN 13286-2.



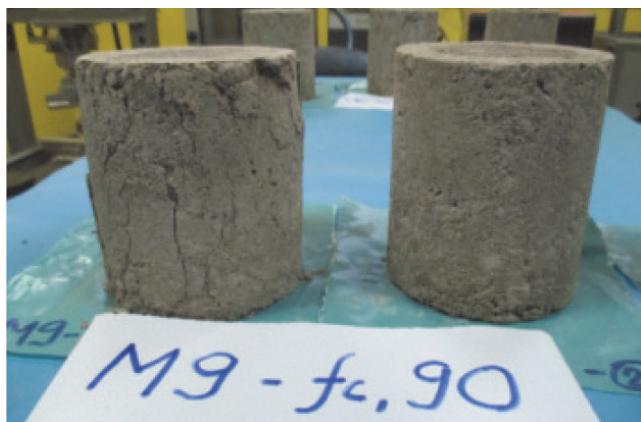
Slika 14. Curenje vode na dnu kalupa tijekom procesa zbijanja

### 4. Tlačna čvrstoća

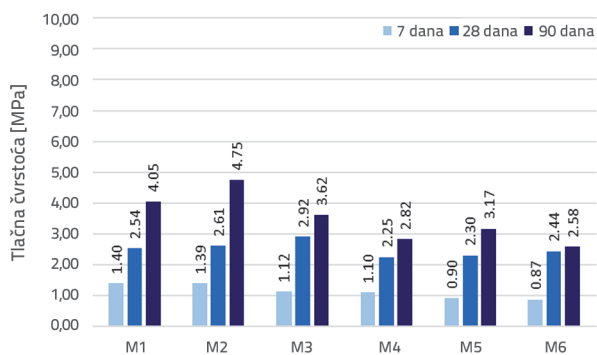
Nakon što se odredila vrijednost OMC-a za svaku vrstu stabilizirajuće mješavine, a prema testu zbijanja po Proctoru (slika 12.), uzorci čvrstoće pripremljeni su se s određenom količinom vode prema EN 13286-50. Uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće bili su cilindri promjera 100 mm i visine 120 mm, a pripremljeni su upotrebom Proctorovih kalupa i postupkom zbijanja prema EN 13286-2 (slika 15.). Nakon skidanja kalupa uzorci su se sušili u klimatskoj komori pri temperaturi  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  i relativnoj vlažnosti od 90 % pa sve dok se nije postigla željena starost za testiranje. Tlačna čvrstoća postignuta je jednoosnim nezatvorenim testom zbijanja u skladu s EN 13286-41, i to nakon 7, 28 i 90 dana. Prema tipičnim vrstama loma u skladu s EN 13286-41, svi testirani uzorci imali su zadovoljavajući način loma, tj. način 4 koji ima vertikalne paralelne pukotine (slika 16.).



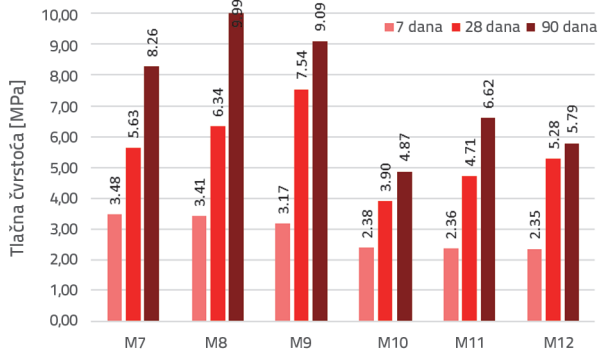
Slika 15. Pojava stvrdnjenih stabilizirajućih uzoraka nakon 90 dana sušenja



Slika 16. Pojava stvrdnjenih stabilizirajućih uzoraka prije (desno) i poslije (lijevo) ispitivanja tlačne čvrstoće



Slika 17. Tlačna čvrstoća stabilizirajućih mješavina s 4 % veziva koja ovisi o starosti



Slika 18. Tlačna čvrstoća stabilizirajućih mješavina sa 6 % veziva koja ovisi o starosti

Grafikoni (slike 17. i 18.) prikazuju dobivene rezultate tlačne čvrstoće kao srednje vrijednosti triju pojedinačnih rezultata za svaku od 12 stabilizirajućih mješavina.

Uspoređujući povećanje tlačne čvrstoće za razdoblja od 7 do 28 dana, može se uočiti da je ono najnaglašenije u mješavinama s najvećim udjelom letećeg pepela (M3, M6, M9, M12), a dosegalo je između 125 % za M12 do 180 % za M6. To je još važnije kad se uzme u obzir da je povećanje količine FA utjecalo na smanjenje tlačne čvrstoće nakon 7 dana te na povećanje čvrstoće nakon 28 dana za sve vrste mješavina (slike 17. i 18.). Naši rezultati potvrđuju hipotezu da leteći pepeo razvija pucolansku reakciju polako te postiže čvrstoću u kasnijim fazama [16]. Jednako tako, poželjno je usporediti porast čvrstoće mješavina nakon 28 i 90 dana. Najniži rast čvrstoće tipičan je za mješavine s 40 % FA (M3, M6, M9 i M12), a najveći porast čvrstoće uočeni su u mješavinama s 20 % FA (M2, M5, M8 i M11).

Iako je primjena RAP-a u mješavinama smanjila tlačnu čvrstoću, to smanjenje nije bilo toliko naglašeno da bi eliminiralo upotrebu RAP-a u sastavu stabilizirajućih mješavina. Razlika u čvrstoći mješavina s RAP-om i bez njega može se nadoknaditi upotrebom letećeg pepela na razini zamjene od 40 % (uspoređujući M1- M6 ili M7-M12 nakon 28 dana). Zanimljivo je to da, iako su tlačne čvrstoće nakon 28 dana stalno rasle s povećanjem letećeg

pepela u mješavinama (u slučaju obje količine veziva), to nije bio slučaj s čvrstoćama nakon 90 dana. One su pokazale niže vrijednosti u mješavinama s 40 % letećeg pepela. Ta činjenica može se smatrati pozitivnom što se tiče ograničenja krutosti stabilizirajućih slojeva cestovne konstrukcije.

Tlačna čvrstoća cementnih stabilizirajućih mješavina najvažnije je mehaničko svojstvo ove vrste tzv. *slabih* betona, a zahtjevi za kvalitetu cementno stabilizirajućih slojeva određuju se na temelju toga svojstva. Ti zahtjevi nisu ujednačeni, već zavise od države do države. Osim toga, na određivanje traženih tlačnih čvrstoća također utječu vrsta ceste i prometno opterećenje. Europska norma EN 14227-1 klasificira hidraulički vezane mješavine na razrede čvrstoće koji su slični razredima betona [40]. Testirane mješavine klasificirale su se u određene razrede čvrstoće u skladu s tom normom (tablica 4.). Klasifikacija na razrede napravljena je na temelju tlačne čvrstoće dobivene na cilindričnim uzorcima nakon 28 dana. Ako se u procjeni razreda čvrstoće koriste cilindri s koeficijentima vitkosti drugačijima od 1 ili 2, prije upotrebe treba se uspostaviti korelacija s cilindrima koji imaju koeficijent vitkosti 1 ili 2 (EN 14227-1). U našem je istraživanju koeficijent vitkosti bio 1.2, te su se zato izračunali kriteriji (tablica 4., stupac 4.) kako bi se procijenio razred čvrstoće. Ova analiza očito pokazuje da udio veziva u testiranim mješavinama najviše utječe na razred čvrstoće. Razlika između te dvije skupine



Tablica 4. Razred čvrstoće testiranih stabilizirajućih mješavina prema EN 14227-1

Sastav			Vrsta mješavine	Tlačna čvrstoća [MPa]	EN 14227-1	
					Kriteriji [MPa]	Razred čvrstoće
1			2	3	4	5
4 % veziva	0 % RAP	0 % FA	M1	2,54	≥1,90	C1,5/2
		20 % FA	M2	2,61	≥1,90	C1,5/2
		40 % FA	M3	2,93	≥2,86	C2,3/3
	30 % RAP	0 % FA	M4	2,25	≥1,90	C1,5/2
		20 % FA	M5	2,30	≥1,90	C1,5/2
		40 % FA	M6	2,44	≥1,90	C1,5/2
6 % veziva	0 % RAP	0 % FA	M7	5,64	≥4,80	C4/5
		20 % FA	M8	6,34	≥5,80	C5/6
		40 % FA	M9	7,54	≥5,80	C5/6
	30 % RAP	0 % FA	M10	3,90	≥3,80	C3/4
		20 % FA	M11	4,71	≥3,80	C3/4
		40 % FA	M12	5,27	≥4,80	C4/5

mješavina varira od dva do četiri razreda čvrstoće. U skupini sa 4 % veziva, pet od šest mješavina istog je razreda čvrstoće (C1,5/2), što znači da su zanemarivi utjecaji obaju promjenjivih parametara, RAP-a i FA-a, na razred čvrstoće. Međutim, udio RAP-a u skupini mješavina sa 6 % veziva negativno utječe, dok udio FA pozitivno utječe na razred čvrstoće. Očito je da kombinacija različitih udjela materijala koji se koriste u ovom istraživanju može stvoriti vrlo širok raspon razreda čvrstoće cementnih stabilizacija. Taj zaključak omogućava da se prirodni agregat i portland cement zamijene s RAP-om i FA-om u slojevima cementne stabilizacije različitih vrsta cesta i prometnog opterećenja.

Važno je uočiti da se dobiveni rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće te dobiveni proračun odnose isključivo na leteći pepeo koji se koristi u ovom istraživanju (iz termoelektreane "Nikola Tesla B"). Zato je važno provesti kemijsku analizu letećeg pepela kojoj slijedi preliminarno ispitivanje po Proctoru i ispitivanje tlačne čvrstoće kada se priprema uobličene sastava stabilizirajućih mješavina. Kemijski sastav letećeg pepela različitog porijekla često je neusklađen, pa je važno provesti kemijsku analizu koja određuje mogućnost upotrebe betonskih kompozita u najvećoj mjeri. Svojstva ugljena kao sirovine koja se koristi za njegovu proizvodnju, kao i proces njegova izgaranja u kotlu, ključni su čimbenici koji utječu na kvalitetu letećeg pepela [4].

## 5. Analiza rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće cjelovitim faktorskim oblikovanjem

Cjelovito faktorsko oblikovanje provedeno je s ciljem da se procijeni istodobni utjecaj promjenjivih parametara na tlačnu čvrstoću cementnih stabilizacija nakon 28 dana, kao i da se odredi koji od analiziranih čimbenika ima najveći utjecaj [41-43]. Ta vrsta statističke analize omogućava ispitivanje hipoteze mogućeg odnosa tlačne čvrstoće testiranih cementnih stabilizacija i promjenjivih utjecajnih čimbenika. Faktorskom analizom može se odrediti relativna magnituda utjecaja promjenjivih parametara. Na temelju njihovog utjecaja na vrijednost tlačne čvrstoće može se formulirati najjednostavniji analitički odnos "tlačna čvrstoća cementne stabilizacije - utjecajni čimbenici".

Faktorsko oblikovanje bilo je ustrojeno kao  $2^3$ , a to je podrazumijevalo tri promjenjiva čimbenika i dvije razine razmatranja.

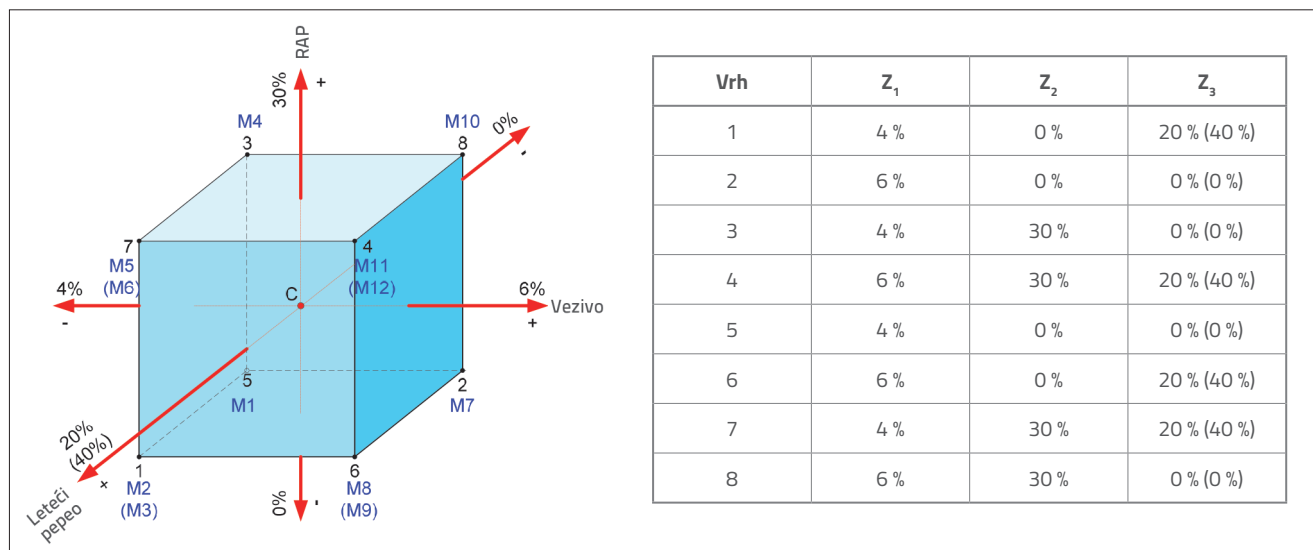
U ovom eksperimentalnom istraživanju cementnih stabilizacija količina je veziva varirala na dvije razine (4 % i 6 %), kao i udio RAP-a (0 % i 30 %), a udio FA varirao je na tri razine (0 %, 20 % i 40 %). Odabrao se faktorski dizajn  $2^3$  budući da je riječ o tri varijable od kojih su dvije varirale na dvije razine. Dvije faktorske analize provedene su kako bi se iskoristila prednost odabranog

Tablica 5. Opis utjecajnih čimbenika i moguće razine njihova razmatranja

Utjecajni čimbenici		Stupanj razmatranja ( $x_i$ - kodirana bezdimenzijska vrijednost)			
		Niža razina		Viša razina	
Oznaka	Opis	Vrijednost	Opis parametra	Vrijednost	Opis parametra
$Z_1$	Količina veziva	-1	4 %	+1	6 %
$Z_2$	Udio RAP-a	-1	0 %	+1	30 %
$Z_3$	Udio FA-a	-1	0 %	+1	20 % (40 %)

Tablica 6. Vrijednosti bezdimenzijskih koordinata "x<sub>i</sub>" i njihovih odgovarajućih proizvoda

N	Vrsta cementne stabilizacije	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>
1	M2 (M3)	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
2	M7	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	M4	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	M11 (M12)	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	M1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
6	M8 (M9)	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	M5 (M6)	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	M10	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1



Slika 19. Grafički prikazuje te podatke, kao i doseg faktorskih analiza

faktorskog oblikovanja: u prvoj je udio FA varirao na dvije razine (0 % i 20 %), a u drugoj su odabrane razine 0 % i 40 %. U tim analizama koristile su se eksperimentalne vrijednosti tlačne čvrstoće cementnih stabilizacija nakon 28 dana.

Tablica 5. prikazuje osnovne podatke za faktorsku analizu što uključuje tri promjenjiva faktora i dvije razine razmatranja. Vrijednosti u zagradama koristile su se u drugoj analizi.

Svaki vrh zamišljenog modela predstavlja kombinaciju utjecajnih čimbenika, što daje osam različitih vrsta cementnih stabilizacija s maksimalnom količinom FA u iznosu od 20 % te dodatne četiri cementne stabilizacije s maksimalnom količinom FA u iznosu od 40 % za drugu faktorsku analizu (vrijednosti u zagradama).

Središte faktorskog eksperimenta (kocka) može se fizički interpretirati kao cementna stabilizacija koja predstavlja srednju vrijednost između cementnih stabilizacija napravljenih sa 4 % i 6 % veziva, 0 % i 30 % RAP-a, te 0 % i 20 % (40 %) FA. Zato središte faktorskog eksperimenta predstavlja zamišljenu cementnu stabilizaciju s 5 % veziva, 15 % RAP-a i 10 % FA (20 % FA u drugoj faktorskoj analizi). U faktorskom oblikovanju funkcionalni odnos između analiziranog svojstva i promjenjivih parametara približava se uz pomoć polinoma sljedećeg oblika:

$$f(Z_1, Z_2, Z_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \tag{1}$$

Tablica 6. prikazuje sve vrijednosti kodiranih bezdimenzijskih koordinata "x<sub>i</sub>", kao i vrijednosti njihovih proizvoda koji su potrebni za izračun koeficijenata polinoma.

Sljedećim izrazima određuju se koeficijenti polinoma:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \tag{2}$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j \quad (i = 1, 2 \text{ i } 3) \tag{3}$$

$$b_{km} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{kj} x_{mj} y_j \quad (k = 1, 2 \text{ i } 3; m = 1, 2 \text{ i } 3) \tag{4}$$

$$b_{123} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{2j} x_{3j} y_j \tag{5}$$

gdje je "y<sub>j</sub>" prosječna vrijednost rezultata pojedinačnog ispitivanja tlačne čvrstoće cementne stabilizacije nakon 28 dana

Tablica 7. Koeficijenti polinoma odnosa " $f_{c,28} = f_{c,28}(Z_1, Z_2, Z_3)$ "

Količina FA [%]	Koeficijenti polinoma							
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
20	3,787	1,360	-0,496	0,205	-0,345	0,176	0,011	0,018
40	4,064	1,523	-0,598	0,482	-0,404	0,339	-0,091	-0,042

za određenu kombinaciju utjecajnih parametara, ili za određenu vrstu cementne stabilizacije.

Koeficijenti polinoma (1) izračunani su na temelju izraza (2) - (5) i eksperimentalnih vrijednosti tlačnih čvrstoća cementne stabilizacije nakon 28 dana.

Analitički odnos između tlačne čvrstoće cementne stabilizacije i istodobni utjecaj svih triju promjenjivih parametara u slučaju kad je maksimalna količina FA 20 % prikazan je na sljedeći način:

$$f_{c,28,20\%FA} = 3.787 + 1.360x_1 - 0.496x_2 + 0.205x_3 - 0.345x_1x_2 + 0.176x_1x_3 + 0.011x_2x_3 + 0.018x_1x_2x_3 \quad (6)$$

Isti je analitički odnos za maksimalnu količinu FA koja iznosi 40 % prikazan na sljedeći način:

$$f_{c,28,40\%FA} = 4.064 + 1.523x_1 - 0.598x_2 + 0.482x_3 - 0.404x_1x_2 + 0.339x_1x_3 - 0.091x_2x_3 - 0.042x_1x_2x_3 \quad (7)$$

Vrijednosti tlačnih čvrstoća cementnih stabilizacija dobivene izrazima (6) i (7) bile su identične dobivenim eksperimentalnim vrijednostima, te iz tog razloga nije bilo potrebno ispitati adekvatnost matematičkog modela. Tablica 7. prikazuje vrijednosti koeficijenata polinoma za analizirane količine FA s ciljem da se odredi magnituda utjecaja promjenjivih parametara. Koeficijenti polinoma utvrđuju određenu vrstu utjecaja, odnosno oni imaju sljedeće fizikalno značenje:

- $b_0$  - utvrđuje prosječnu vrijednost tlačne čvrstoće svih testiranih cementnih stabilizacija (središte kocke)
- $b_1$  - utvrđuje utjecaj ukupne količine veziva
- $b_2$  - utvrđuje utjecaj udjela RAP-a
- $b_3$  - utvrđuje utjecaj udjela FA-a
- $b_{12}$  - utvrđuje dodatni utjecaj zbog interakcije ukupne količine veziva i udjela RAP-a
- $b_{13}$  - utvrđuje dodatni utjecaj zbog interakcije ukupne količine veziva i udjela FA-a
- $b_{23}$  - utvrđuje dodatni utjecaj zbog interakcije udjela RAP-a i udjela FA-a
- $b_{123}$  - utvrđuje dodatni utjecaj zbog interakcije ukupne količine veziva, udjela RAP-a i udjela FA-a.

Znak "+" koji se nalazi ispred svakog koeficijenta polinoma, a nakon što se pomnoži s kodiranom bezdimenzijskom koordinatom " $x_i$ ", pokazuje pozitivan utjecaj na tlačnu čvrstoću cementne stabilizacije, a znak "-" pokazuje negativan

utjecaj. Apsolutna vrijednost koeficijenta polinoma pokazuje magnitudu utjecaja promjenjivog čimbenika na vrijednost tlačne čvrstoće.

Na temelju analize vrijednosti osnovnih polinomnih izraza (koeficijenti polinoma iz tablice 7. pomnoženi s kodiranim bezdimenzijskim koordinatama " $x_i$ " iz tablice 6.) zaključeno je sljedeće:

- Izraz " $b_1x_1$ ": Količina veziva najviše utječe na tlačnu čvrstoću cementnih stabilizacija. Prosječna vrijednost koeficijenta " $b_1$ " za obje analizirane količine FA (20 % ili 40 %) iznosi +1,43 što znači da upotreba veće količine veziva (6 %) rezultira povećanjem tlačne čvrstoće u iznosu 2,86 MPa.
- Izraz " $b_2x_2$ ": Drugi najveći koeficijent je " $b_2$ " i pokazuje utjecaj količine RAP-a (0 % ili 30 %) na tlačnu čvrstoću cementnih stabilizacija. Prosječna vrijednost koeficijenta za obje analizirane količine FA (20 % ili 40 %) iznosi -0,55 što znači da primjena 30 % RAP-a rezultira smanjenjem tlačne čvrstoće u iznosu 1,1 MPa.
- Izraz " $b_3x_3$ ": Koeficijentom " $b_3$ " utvrđuje se utjecaj udjela FA-a u ukupnoj količini veziva. 20 % FA povećava tlačnu čvrstoću za 0,41 MPa, a 40 % FA vodi do povećanja čvrstoće za 0,96 MPa.

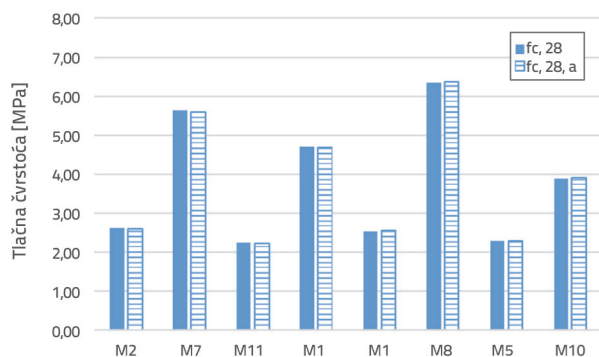
Teško je fizički objasniti kombinirane utjecaje promjenjivih parametara uz vrijednosti dodatnih polinomnih izraza: " $b_{12}x_1x_2$ ", " $b_{13}x_1x_3$ ", " $b_{23}x_2x_3$ " i " $b_{123}x_1x_2x_3$ ". Oni se koriste za matematičko baždarenje konačnih polinomnih vrijednosti.

Analizom apsolutnih vrijednosti koeficijenata polinoma došlo se do zaključka da su dodatni utjecaji koeficijenata " $b_{23}$ " i " $b_{123}$ " gotovo zanemarivi. U cementnim stabilizacijama s 20 % FA zanemarivanje tih dvaju koeficijenata rezultira odstupanjima u odnosu na točne vrijednosti i to za manje od 1 %. U slučaju cementnih stabilizacija s 40 % FA, najveće odstupanje iznosi 3,4 %, odnosno 0,13 MPa. Izostavljanje koeficijenata " $b_{23}$ " i " $b_{123}$ " iz izraza (6) i (7) stvara pojednostavljene izraze za analitičko određivanje tlačne čvrstoće cementnih stabilizacija:

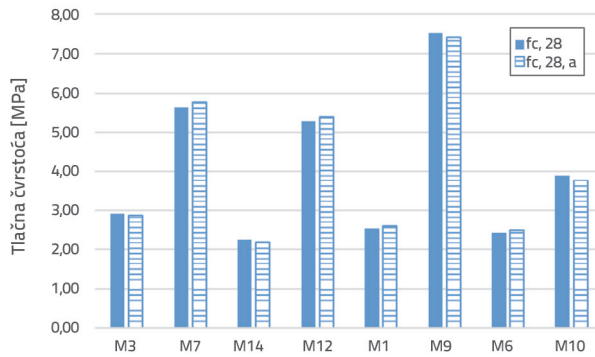
$$f_{c,28,20\%FA} = 3.787 + 1.360x_1 - 0.496x_2 + 0.205x_3 - 0.345x_1x_2 + 0.176x_1x_3 \quad (8)$$

$$f_{c,28,40\%FA} = 4.064 + 1.523x_1 - 0.598x_2 + 0.482x_3 - 0.404x_1x_2 + 0.339x_1x_3 \quad (9)$$

Slike 20. i 21. prikazuju eksperimentalne vrijednosti tlačnih čvrstoća i njihovih odgovarajućih analitičkih vrijednosti dobivenih pojednostavljenim izrazima (8) i (9).



Slika 20. Eksperimentalne ( $f_{c,28}$ ) i analitičke ( $f_{c,28,a}$ ) vrijednosti tlačnih čvrstoća cementnih stabilizacija koje sadrže 0 % i 20 % FA nakon 28 dana



Slika 21. Eksperimentalne ( $f_{c,28}$ ) i analitičke ( $f_{c,28,a}$ ) vrijednosti tlačnih čvrstoća cementnih stabilizacija koje sadrže 0 % i 40 % FA nakon 28 dana

## 6. Zaključak

Ovo istraživanje ispituje mogućnosti upotrebe rekonstruiranog asfaltnog kolnika kao zamjenskog materijala za prirodni agregat u iznosu od 30 % zajedno s letećim pepelom koji zamjenjuje 20 % ili 40 % portland cementa u cementnim stabilizacijama koje sadržavaju 4 % odnosno 6 % veziva. Bitumen u RAP-u iznosio je 3,8 %, a FA je bio klasificiran kao vapnenački leteći pepeo prema EN 14227-4. Kombinacijom tih dvaju materijala povoljni učinak primjene otpada i recikliranih materijala postaje još očitiji. Na temelju analize vrijednosti OMC-a i MDD-a može se zaključiti ovo:

- Prisutnost RAP-a u stabilizirajućim mješavinama povećava vrijednosti OMC-a zbog većeg specifičnog površinskog područja i većeg udjela finih čestica. Međutim, leteći pepeo ne utječe na vrijednosti OMC-a u stabilizirajućim mješavinama s 4 % veziva, neovisno o sastavu RAP-a, dok veći sastav FA u mješavinama sa 6 % veziva rezultira smanjenjem vrijednosti OMC-a.
- Povećanje ukupne količine veziva u stabilizirajućim mješavinama povećava vrijednost MDD-a zbog smanjenja međuzrnatih poroznosti. Prisutnost RAP-a u stabilizirajućim mješavinama smanjuje vrijednosti MDD-a zbog manje gustoće. Utjecaj sastava FA na vrijednosti MDD-a gotovo je zanemariv u slučaju stabilizirajućih mješavina neovisno o ukupnoj količini veziva.

Cjelovitim faktorskim oblikovanjem, a na temelju matematičke procjene utjecaja promjenjivih parametara na tlačnu čvrstoću nakon 28 dana, zaključeno je sljedeće:

- Količina veziva najviše utječe na tlačnu čvrstoću cementnih stabilizacija. Upotreba većih količina veziva (6 %) rezultira prosječnim povećanjem od 2,72 MPa u stabilizacijama s 20 % FA, odnosno prosječnim povećanjem od 3,04 MPa u mješavinama s 40 % FA.

- Drugi je najveći utjecajni čimbenik RAP. Neovisno o sastavu FA, primjena 30 % RAP-a rezultira smanjenjem tlačne čvrstoće obje vrste cementnih stabilizacija i to za približno 1,1 MPa.
- 20 % FA povećava tlačnu čvrstoću za 0,41 MPa, dok 40 % FA vodi do povećanja čvrstoće za 0,96 MPa.

Prema EN 14227-1, cementne su stabilizacije, na temelju tlačne čvrstoće nakon 28 dana, klasificirane u određene razrede čvrstoće. Ova analiza potvrđuje da udio veziva u cementnim stabilizacijama najviše utječe na razred čvrstoće. Razlika između mješavina s 4 % i 6 % veziva varira između dva i četiri razreda čvrstoće (C1,5/2 – C5/6). U skupini s 4 % veziva zanemariv je utjecaj RAP-a i FA-a na razred čvrstoće. Međutim, udio RAP-a u skupini mješavina sa 6 % veziva negativno utječe, dok udio FA pozitivno utječe na razred čvrstoće.

Očito je da kombinacija različitih udjela materijala koji se koriste u ovom istraživanju može stvoriti vrlo širok raspon razreda čvrstoće cementnih stabilizacija. Taj zaključak omogućava da se prirodni agregat i portland cement zamijene RAP-om i FA-om u slojevima cementne stabilizacije različitih vrsta cesta i prometnog opterećenja. Dobiveni rezultati u našem istraživanju opravdavaju upotrebu letećeg pepela i RAP-a u cementno stabilizirajućim kolničkim konstrukcijama. Šira upotreba tih materijala u cestogradnji imala bi značajne dobrobiti u ekonomskom i ekološkom smislu, u smislu energetske učinkovitosti i drugo.

## Zahvala

Ovaj rad predstavlja dio istraživanja u sklopu projekta "Multidisciplinarno teorijsko i eksperimentalno istraživanje u obrazovanju i znanosti u području građevinarstva, upravljanja rizikom te sigurnosti od požara i geodezije" koje provodi Departman za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu.

## LITERATURA

- [1] Rukavina, T., Dragčević, V., Lopuh, S., Rajić, S.: Metode stabilizacije slabo nosivog tla pri izgradnji prometnica, GRAĐEVINAR, 59 (2007) 4, pp. 301-309.
- [2] Barišić, I., Dimter, S., Rukavina, T.: Cementne stabilizacije - karakteriziranje materijala i projektni kriteriji, GRAĐEVINAR, 63 (2011) 2, pp. 135-142.
- [3] Yeo, Y.S.: Characterisation of Cement Treated Crushed Rock Base Course for Western Australian Roads, Doctoral thesis, Australia, 2011.
- [4] Braunović, P.: Pavement structures containing local stabilized materials, Građevinska knjiga, Belgrade, 1991.
- [5] Production of CCPs in European countries in 2016., <http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html> (assessed on 22.10.2020)
- [6] Luo, Y., Wu, Y., Ma, S., Zheng, S., Zhang, Y., Chu, P.: Utilization of coal fly ash in China: a mini-review on challenges and future directions, Environmental Science and Pollution Research (2020), pp. 1-14, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08864-4>
- [7] Surabhi: Fly ash in India: Generation vis-à-vis Utilization and Global perspective, International Journal of Applied Chemistry, ISSN 0973-1792, 13 (2017) 1, pp. 29-52, <http://www.ripublication.com>
- [8] Beneficial Use of Coal Combustion Products, ACAA – American Coal Ash Association, <https://www.acaa-usa.org/publications/freepublications.aspx> (assessed on 22.10.2020).
- [9] Vukičević, M., Pujević, V., Marjanović, M., Jocković, S., Maraš-Dragojević, S.: Stabilizacija sitnozrnatog tla letećim pepelom, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 8, pp. 761-770, <https://doi.org/10.14256/JCE.1281.2014>
- [10] Highway Institute: Utilization of fly ash and slag produced in the TPP "Nikola Tesla" (A and B) and TPP "Kostolac" (A and B) for road construction, Belgrade, 2008.
- [11] World energy outlook 2019, International Energy Agency, [iea.org/weo](http://iea.org/weo), ISBN 978-92-64-97300-8.
- [12] Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S., Al Malty, A.E.S.: Green recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials, 47 (2013), pp. 1503-1511, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076>
- [13] Dimter, S., Rukavina, T., Minažek, K.: Estimation of elastic properties of fly ash-stabilized mixes using nondestructive evaluation methods, Construction and Building Materials, 102 (2016), pp. 505-514, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.175>
- [14] Yan, K., Gao, F., Sun, H., Ge D., Yang, S.: Effects of municipal solid waste incineration fly ash on the characterization of cement-stabilized macadam, Construction and Building Materials, 207 (2019), pp. 181-189, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.048>
- [15] Mahvash, S., Lopez-Querol, S., Bahadori-Jahromi, A.: Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization, Heliyon, 3 (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00274>
- [16] Thomas, M.: Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, Portland Cement Association, Illinois, US, 2007.
- [17] Stojanović, M., Radonjanin, V., Malešev, M., Matić, B., Furgan, S.: The impact of coal fly ash on tensile strengths of cement stabilizations with river aggregate, Journal of Road and Traffic Engineering, 64 (2018) 2, pp. 39-47, <https://doi.org/10.31075/PIS.64.02.05>
- [18] Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., Amirkhanian, S.: A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement, Construction and Building Materials, 180 (2018), pp. 579-604, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006>
- [19] Šolić, T., Rajić, S.: Tehnološki postupci izrade nosivih slojeva kolničkih konstrukcija, GRAĐEVINAR, 63 (2009) 1, pp. 29-37, UDK 625.85.001.3
- [20] Tebaldi, G., Dave, E., Marsac, P., Muraya, P., Hugener, M., Pasetto, M., Graziani, A., Grilli, A., Marradi, A., Wendling, L., et al.: Classification of recycled asphalt (RA) material, 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, France, 2012.
- [21] Ghanizadeh, A.R., Rahrovan, M., Bafghi, K.B.: The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation, Construction and Building Materials, 161 (2018), pp. 165-174, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.124>
- [22] Wirtgen group: Wirtgen Cold Recycling Technology, 1<sup>st</sup> edition, Windhagen, Germany, 2012.
- [23] FMG group: Cold in-place recycling with expanded asphalt mix (CIR EAM/FOAM) technology, Shatec engineering consultants, US, 2013.
- [24] Tabaković, A., McNally, C., Fallon, E.: Specification development for cold in-situ recycling of asphalt, Construction and Building Materials, 102 (2016), pp. 318-328, [10.1016/j.conbuildmat.2015.10.154](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.154)
- [25] Bessa, I.S., Aranha, A.L., Vasconcelos, K.L., Silva, A.H.M., Bernucci, L.L.B.: Laboratory and field evaluation of recycled unbound layers with cement for use in asphalt pavement rehabilitation, Materials and Structure, 49 (2016), pp. 2669-2680, <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0675-6>
- [26] Grilli, A., Bocci, E., Graziani, A.: Influence of reclaimed asphalt content on the mechanical behaviour of cement-treated mixtures, Road Materials and Pavement Design (2013), <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.794367>
- [27] Isola, M., Betti, G., Marradi, A., Tebaldi, G.: Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement, Construction and Building Materials, 48 (2013), pp. 238-247, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.042>
- [28] Taha, R., Al-Harthy, A.S., Al-Shamsi, K.L.: Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases, Journal of Materials in Civil Engineering, 14 (2002), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:3\(239\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(239))
- [29] Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Sanjayan, J.G., Disfani, M.M.: Unconfined compression testing of cement-treated demolition materials in base and sub-base applications, Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Brisbane, Australia (2014)
- [30] Guthrie, W.S., Brown, A.V., Eggett, D.L.: Cement Stabilization of Aggregate Base Material Blended with Reclaimed Asphalt Pavement, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2026 (2007), pp. 47-53, <https://doi.org/10.3141/2026-06>
- [31] Ghanizadeh, A.R., Rahrovan, M., Bafghi, K.B.: The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation, Construction and Building Materials, 161 (2018), pp. 165-174, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.124>

- [32] Euch, S.E., Ben Said, S.E.E., Loulizi, A.: Laboratory Investigation of Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2014), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001158)
- [33] Gonzalo-Orden, H., Linares-Unamunzaga, A., Perez-Acebo, H., Diaz-Miguela, J.: Advances in the Study of the Behavior of Full-Depth Reclamation (FDR) with Cement, *Applied Sciences* (2019), <https://doi.org/10.3390/app9153055>
- [34] Camargo, F.F., Edil, T.B., Benson, C.H.: Strength and stiffness of recycled materials stabilised with fly ash: a laboratory study, *Road Materials and Pavement Design* (2013), <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.779299>
- [35] Wen, H., Warner, J., Edil, T., Wang G.: Laboratory Comparison of Crushed Aggregate and Recycled Pavement Material With and Without High Carbon Fly Ash, *Geotech Geol Eng.*, (2010) 28, pp. 405–411, <https://doi.org/10.1007/s10706-009-9300-1>
- [36] Wen, H., Edil, T.B.: Sustainable Reconstruction of Highways with In-Situ Reclamation of Materials Stabilized for Heavier Loads, BCR2A Conference, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields 2009, Champaign, IL (2009), pp. 1011–1017.
- [37] Mohammadinia, A., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat A.: Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications, *Journal of Hazardous Materials*, 321 (2017), pp. 547–556, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.039>
- [38] Saride, S., Avirneni, D., Javvadi, S.C.P., Puppala, A.J., Hoyos, L.R.: Evaluation of Fly ash Treated Reclaimed Asphalt Pavement for Base/Subbase Applications, *Indian Geotechnical Journal*, 45 (2015), pp. 401–411, <https://doi.org/10.1007/s40098-014-0137-z>
- [39] Kisić, D., Miletić, S., Radonjić, V., Radanović, S., Filipović, J., Gržetić, I.: Natural radioactivity of coal and fly ash at the Nikola Tesla B TPP, *Chemical Industry*, 67 (2013) 5, pp. 729–738, <https://doi.org/10.2298/HEMIND121016120K>
- [40] Ovad, E., Barišić, I., Zagvozda, M.: Comparison of Croatian and European standards for determining the frost susceptibility of hydraulically bound mixtures, *Journal E-GFOS*, No. 9, (2014), pp. 41–48, <http://dx.doi.org/10.13167/2014.9.5>
- [41] Gary W. Oehlert: *A First Course in Design and Analysis of Experiments*, University of Minnesota, 2010, ISBN 0-7167-3510-5, pp. 679
- [42] George E. P. Box, J. Stuart Hunter, William G. Hunter: *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discover*, Wiley Interscience, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005, pp. 655
- [43] Zazimko, V.G.: *Optimizacija svojstv stroitelnih materialov*, Transparent, Moskva (1981)