



**DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE
MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE**



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

Konferencija
GRAĐEVINSKI MATERIJALI U
SAVREMENOM GRADITELJSTVU

Nacionalna konferencija sa međunarodnim učešćem

Zbornik radova

Beograd, 19. jun 2015. godine

CIP - Каталогизација у публикацији -
Народна библиотека Србије, Београд

666.7/.9(082)
691(082)

КОНФЕРЕНЦИЈА Грађевински материјали у савременом градитељству
(2015 ; Београд)

Zbornik radova / Konferencija Građevinski materijali u savremenom graditeljstvu, Beograd, 19. jun 2015. godine ; [organizatori] Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije [i] Institut IMS. ; [editor Dragica Jevtić]. - Beograd : Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, 2015 (Đurinci : Atom štampa). - [6], 182 str. : ilustr. ; 25 cm

Tiraž 250. - Str. [6]: Predgovor / Dragica Jevtić. - Napomene uz tekst. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-87615-06-9

1. Друштво за испитивање и истраживање материјала и конструкција Србије
(Београд)

а) Грађевински материјали - Зборници

COBISS.SR-ID 215539980

Izdavač: **Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije**
Beograd, Kneza Miloša 9/1

Editor: **Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.**
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

Štampa: "Atom štampa" - Đurinci

Tiraž: 250 primeraka

Konferenciju **GRAĐEVINSKI MATERIJALI U SAVREMENOM GRADITELJSTVU**, koja se održava u Beogradu 19. juna 2015. godine, organizovali su **Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije** i **Institut IMS**.

Skup je organizovan uz podršku: **MINISTARSTVA ZA NAUKU I TEHNOLOŠKI RAZVOJ SRBIJE** i **INŽENJERSKE KOMORE SRBIJE**

Beograd, 19. jun 2015. godine

NAUČNI KOMITET

1. Prof. dr Radomir Folić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
2. Prof. dr Dragoslav Stojić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
3. Prof. dr Ljubomir Vlajić, Saobraćajni Institut CIP, Beograd
4. Prof. dr Mirjana Malešev, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
5. Doc. dr Gordana Topličić-Ćurčić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
6. Dr Zagorka Radojević, Institut IMS, Beograd
7. Dr Nenad Šušić, Institut IMS, Beograd
8. Dr Ksenija Janković, Institut IMS, Beograd
9. Dr Milorad Smiljanić, Institut za puteve, Beograd
10. Professor Mihailo Trifunac, Civil Eng. Department University of Southern California, Los Angeles, USA
11. Prof.dr Dubravka Bjegović, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakulte, Zagreb, Hrvatska
12. Predrag Popović, Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook, Illinois, USA
13. Professor Asterios Lionis, Democratus University of Trace, Faculty of Civil Eng., Greece
14. Professor Ivan Damnjanović, Texas A&M University, College Station, TX Zachry Department of Civil Engineering, USA
15. Prof. dr Meri Cvetkovska, Građevinski fakultet, Univ. „Sv. Kiril i Metodij“, Skoplje, Makedonija
16. Prof. dr Miloš Knežević, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora
17. Prof. dr Damir Zenunović, Univerzitet u Tuzli, BIH

ORGANIZACIONI ODBOR

1. Prof. dr Dragica Jevtić, Građevinski fakultet, Beograd
2. Dr Vencislav Grabulov, Institut IMS, Beograd
3. Prof. dr Branko Božić, Građevinski fakultet, Beograd
4. Prof. dr Mihailo Muravljev, Građevinski fakultet, Beograd
5. Prof. dr Boško Stevanović, Građevinski fakultet, Beograd
6. Prof. dr Zoran Grdić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
7. Prof. dr Dragoslav Šumarac, Građevinski fakultet, Beograd
8. Prof. dr Vlastimir Radonjanin, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
9. Prof. dr Karolj Kasaš, Građevinski fakultet, Subotica
10. Prof. dr Milan Dimkić, Institut "Jaroslav Černi", Beograd
11. Milutin Ignjatović, generalni direktor Saobraćajnog Instituta CIP, Beograd
12. Pal Kermeci, inž.tehn. "Potisje Kanjiža", Kanjiža
13. Vesna Zvekić, dipl.inž.tehn., „Polet“ Novi Bečej

S A D R Ž A J

Dejana Milinković, Ljiljana Miličić HIDRAULIČNA VEZIVA ZA PUTEVE - SASTAV, SPECIFIKACIJA I KRITERIJUMI USAGLAŠENOSTI U SKLADU SA SERIJOM STANDARDA EN 13282	1
Mirjana Drpić, Dragiša Ivanišević PASIVNA ZAŠTITA OD POŽARA U GRAĐEVINARSTVU U OKVIRU TEHNIČKE REGULATIVE U SRBIJI I U EVROPI	11
Dubravka Bjegović, Ivana Banjad Pečur, Nina Štirmer ULAGANJE U ZNANOST KAO POKRETAČ GRAĐEVINARSTVA	19
Ivan Ignjatović, Nikola Tošić, Snežana Marinković, Jelena Dragaš TEHNOLOŠKI I EKONOMSKI ASPEKT PROIZVODNJE AGREGATA OD RECIKLIRANOG BETONA U SRBIJI	31
Tijana Vojnović Čalić, Dragica Jevtić, Aleksandra Krstić-Furundžić OTPORNOST NA MRAZ MIKROARMIRANIH CEMENTNIH MALTERA SA AGREGATOM OD DROBLJENE OPEKE	39
Aleksandar Milenković, Danica Boljević, Damir Savković KAMENA VUNA KAO IZOLACIONI MATERIJAL U GRAĐEVINSKOJ AKUSTICI	49
Milica Arsenović, Lato Pezo, Slavka Stanković, Zagorka Radojević PREDVIĐANJE KVALITETA OPEKARSKIH PROIZVODA NA OSNOVU HEMIJSKOG SASTAVA POLAZNE SIROVINE	59
Boško Stevanović, Ivan Glišović, Marija Todorović KOMPOZITNI MATERIJALI ZA OJAČANJE DRVENIH KONSTRUKCIJA	67
Goran Mladenović, Mirjana Vukićević, Jovan Despotović POTENCIJALNI EKONOMSKI EFEKTI PRIMENE ELEKTROFILTERSKOG PEPELA U IZGRADNJI PUTEVA	79
Enes Curić, Marko Milošević, Zoran Grdić, Dragoljub Drenić DISTRIBUCIJA NAPONA U AB PRETHODNO NAPREGNUTIM PRAGOVIMA NA MESTU NALEGANJA ŠINE U AMBIJENTALNIM USLOVIMA EKSPLOATACIJE	91
Miloš Vasić, Zagorka Radojević PROUČAVANJE UTICAJA REŽIMA SUŠENJA NA KVALITET OPEKARSKIH PROIZVODA	101



Iva Despotović¹, Nenad Ristić², Zoran Grdić³,
Gordana Topličić – Ćurčić⁴

UDK:691.322.059.64

UDK: 691.5:662.613.11

MOGUĆNOST PRIMENE ELEKTROFILTERSKOG PEPELA I RECIKLIRANOG AGREGATA U SAMOUGRAĐUJUĆEM BETONU KAO ZNAČAJAN DOPRINOS EKOLOŠKOM GRAĐEVINARSTVU

Rezime: Velika produkcija elektrofilterskog pepela, koji je glavni ostatak pri sagorevanju uglja, a kojim se „upravlja“ odlaganjem na deponije, predstavlja ogroman rizik i opasnost za životnu sredinu. Drugi veliki zagađivač jeste i građevinski otpad nastao u toku građevinske proizvodnje ili rušenjem dotrajalih objekata, u čemu prednjači betonski otpad. U tom smislu, reciklirani agregat, dobijen drobljenjem starog betona, svakako predstavlja održivo rešenje.

Po svojoj tehnologiji, samougrađujući beton zahteva određenu količinu praškaste komponente za spravljanje, tako da mogućnost upotrebe elektrofilterskog pepela u oblasti ovih betona stvara prostor za različita istraživanja. Rezultati sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja pokazuju da se elektrofilterski pepeo može upotrebiti za spravljanje samougrađujućeg betona. Ako se pri tom primenjuje i reciklirani agregat, ovakav samougrađujući beton se s pravom može nazvati ekološkim materijalom.

Gljučne reči: elektrofilterski pepeo, reciklirani agregat, samougrađujući beton, ekološki materijali

THE POTENTIALS OF APPLYING FLY ASH AND RECYCLED CONCRETE AGGREGATE IN SELF – COMPACTING CONCRETE AS A SIGNIFICANT CONTRIBUTION TO ENVIRONMENTAL CONSTRUCTION

Abstract: Great production of fly ash, which is the main residue from combustion of coal, and that is "managed" by landfilling, is a huge risk and danger for environment. The second large pollutant is the construction waste, arose in the course of construction production or by demolition of dilapidated building, what leads concrete waste. In that sense, recycled concrete aggregate is a sustainable solution.

By its technology, Self – Compacting Concrete, requires a certain amount of powder component for the production, so that the possibility of using fly ash in the area of the concrete creates space for various research. The results of own experimental tests show that fly ash can be used for the production of self-compacting concrete. If, when this applies and recycled aggregate, this Self – Compacting Concrete can rightly be called environmentally friendly material.

Key words: fly ash, recycled aggregate, self – compacting concrete, eco - material

¹ dr, profesor, VGGŠ, Hajduk Stankova 2, Beograd, ivickad@gmail.com

² student doktorskih studija, asistent, GAF, A. Medvedeva 14, Niš, nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs

³ dr, red.prof., GAF, Niš, Aleksandra Medvedeva 14, zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs

⁴ dr, vanr. prof., GAF, Niš, Aleksandra Medvedeva 14, gordana.toplicic.curcic@gaf.ni.ac.rs

1. UVOD

Leteći pepeo, kao produkt termoelektrana, u Srbiji je minimalno iskorišćen. Od šest miliona tona koliko se godišnje proizvede koristi se svega 2,7 odsto i to pre svega u industriji cementa [8]. Procenjuje se, da je na deponijama površine oko 1.500 hektara odloženo 200 miliona tona pepela.

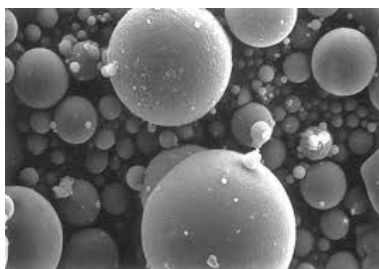
Prema podacima iz godišnjeg izveštaja Evropske asocijacije za agregat (2010) reciklirani agregat čini 5% ukupne proizvodnje agregata u Evropskoj uniji gde je Nemačka najveći proizvođač (60 miliona tona), a slede Velika Britanija (49 miliona tona), Holandija (20 miliona tona) i Francuska (17 miliona tona). U Australiji se oko 50% betonskog otpada reciklira, dok se u Japanu impozantnih 98% betonskog otpada pretvara u reciklirani agregat [4].

Procenjuje se da u Republici Srbiji godišnje nastaje oko 1 milion tona građevinskog otpada i otpada od rušenja. Ovaj otpad završava na deponijama komunalnog otpada, a koristi se i kao inertan materijal za prekrivanje otpada na deponiji. Reciklaža građevinskog otpada praktično i ne postoji [7].

Samougrađujući beton, po svojoj tehnologiji, zahteva određenu količinu praškaste komponente, što otvara mogućnost za primenu letećeg pepela. Sa druge strane, primena agregata od recikliranog betona rešava problem deponovanja betonskog otpada i iscrpljivanja nalazišta prirodnog agregata.

Predmet rada je analiza svojstava samougrađujućeg betona sa letećim pepelom i recikliranim agregatom, koji se, ovako spravljen, svakako može nazvati ekološkim materijalom.

2. LETEĆI PEPEO



Slika 1. Čestica letećeg pepela (SEM slika) [6]

Začetnici ideje o primeni letećeg pepela, dobijenog sagorevanjem uglja, u betonu bili su McMillan i Powers 1934. godine. Krajem 40-tih godina izvršena ispitivanja u Britaniji (Fulton i Marshall) su dovela do gradnje brana Lednock, Clatworthy i Lubreoch sa letećim pepelom kao cementnim dodatkom. Sve ove konstrukcije su i posle 60 godina u odličnom stanju [6].

Prilikom sagorevanja uglja u peći na temperaturi između 1250°C i 1600°C, nesagorive čestice se spajaju formirajući sferične staklaste kapljice silikata (SiO_2), aluminata (Al_2O_3), oksida gvožđa (Fe_2O_3) i drugih, manje važnih konstituenata.

Čestice elektrofilterskih pepela najčešće su staklasti sferični oblici, čija veličina varira od 1 μm do oko 150 μm , a za tipičnu veličinu mogu se uzeti čestice ispod 20 μm . Elektrofilterski pepeli imaju specifične karakteristike po kojima se bitno razlikuju od ostalih industrijskih nusprodukata koji se koriste kao dodaci u industriji cementa. Osim toga varijacije tih karakteristika mnogo su veće nego, npr. kod troski visokih peći ili filterske silikatne prašine, jer zavise od vrste i kvaliteta upotrebljenog uglja i tehnoloških uslova spaljivanja (temperature), kao i od režima hlađenja čestica elektrofilterskog pepela [6]. Sferične čestice daju značajan doprinos fluidnosti betona u plastičnom stanju optimizujući upakovanost čestica. Ponašaju se poput „loptastih veza“ u betonu, smanjujući potrebnu količinu vode za postizanje tražene obradljivosti.

Kada se leteći pepeo doda betonu počinje pucolanska reakcija između silicijum dioksida (SiO_2) i kalcijum hidroksida (Ca(OH)_2) ili kreča, (nus produkt hidratacije Portland cementa), koja je slaba tokom prvih 24 sata na 20°C . Zbog toga se za datu količinu cementa, sa povećanjem sadržaja letećeg pepela postižu niže rane čvrstoće. Prisustvo letećeg pepela usporava reakciju alita u okviru Portland cementa u ranom stadijumu. Međutim, nastajanje alita se kasnije ubrzava zahvaljujući stvaranju jezgara hidratacije na površini čestica letećeg pepela. Kalcijum hidroksid se utiskuje na površinu staklastih čestica reagujući sa SiO_2 ili $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ rešetkom. Nastali hidratacioni produkti odbijaju jedinjenja letećeg pepela sa niskim Ca/Si odnosom. Što je veća finoća pepela to je veća i površina obuhvaćena reakcijama; što je veća temperatura to će se reakcije brže odvijati. Zbog toga dostupna literatura preporučuje projektovanje i praćenje 90 – dnevne čvrstoće [2].

U odnosu na sadržaj CaO pepeo se deli na: elektrofilterski pepeo sa niskim sadržajem CaO i elektrofilterski pepeo sa visokim sadržajem CaO. Američki standard ASTM C 618 elektrofilterski pepeo sa niskim sadržajem CaO označava kao klasu «F», a one sa visokim sadržajem CaO kao klasu «C» elektrofilterskih pepela. U prvu grupu ubraja se elektrofilterski pepeo sa sadržajem CaO manjim od 5 mas. %, uglavnom od antracitnog uglja. Elektrofilterski pepeo iz druge grupe obično sadrži između 5 i 40 mas. % CaO i potiče od uglja slabijeg kvaliteta [1].

3. RECIKLIRANI AGREGAT

Zrno recikliranog agregata sastoji se od zrna (ili dela zrna) prirodnog agregata i cementnog maltera originalnog betona, koji ga delimično ili potpuno obavlja. Prisustvo starog cementnog maltera, koji je manje zapreminske mase i veće poroznosti od zrna prirodnog agregata uslovljava “lošija” svojstva recikliranog u odnosu na prirodni agregat. Postoje različite metode kojima se može ukloniti stari cementni malter (struganje, potapanje u blage rastvore sumporne ili hlorovodonične kiseline) i znatno poboljšati kvalitet recikliranog agregata ali i povećati cenu proizvodnje. Generalno, reciklirani agregat u odnosu na prirodni agregat ima sledeća svojstva: veće upijanje vode, manju zapreminsku masu, veće habanje, veću drobljivost, veću količinu prašinih čestica, veći sadržaj organskih materija i moguć sadržaj hemijski škodljivih materija. Sam postupak mešanja betona koji sadrži ovaj agregat izgleda nešto drugačije. Različiti autori predlažu različita rešenja, ali je najčešće korišćen tzv. metod mešanja „iz dve faze“ (Two stage Mixing Approach – TSMA) [5]. U okviru ovog postupka se prvo dozira krupan i sitan agregat koji se meša oko 1 minut, a zatim dodaje otprilike polovina potrebne količine vode i mešanje nastavlja još 1 minut. Sledi doziranje cementa i mešanje

30 sekundi, da bi se na kraju dodala preostala količina vode i proces spravljanja betona završio dvominutnim mešanjem. Prilikom prve faze mešanja, kada se doda polovina potrebne količine vode a zatim i cement, donekle se ovlaže zrna recikliranog agregata i na njima se formira tanak sloj cementne paste koja može da prodre u stari malter i popuni postojeće pukotine i šupljine. Druga polovina vode je dovoljna za proces hidratacije. SEM analize (elektronska mikroskopija) pokazuju da na ovaj način prelazna zona postaje mnogo gušća, a šupljine popunjenije nego u slučaju „običnog“ mešanja betona.

3.1. Preporuke RILEM - a

RILEM – Međunarodno udruženje laboratorija za ispitivanje materijala i konstrukcija je 1994. godine objavilo preporuke vezane za reciklirani agregat. Prema ovim preporukama, reciklirani agregat se svrstava u sledeće kategorije [3]:

Tip I: agregat koji potiče uglavnom od zidarskog otpada

Tip II: agregat koji potiče uglavnom od betonskog otpada

Tip III: agregat koji se uglavnom sastoji od mešavine recikliranog agregata (max 20%) i prirodnog agregata (min 80%). U okviru recikliranog agregata, max 10% može biti reciklirani agregat tipa I. Za klasifikaciju recikliranog agregata u kategoriju Tip I ili Tip II obično je dovoljan vizuelni pregled, dok su zahtevi u pogledu zapreminskih masa i drugih ograničenja dati u tabeli 1. Reciklirani agregat ne sme sadržati materije ili supstance koje usporavaju vezivanje betona za više od 15% u poređenju sa vezivanjem betona identičnog sastava sa prirodnim agregatom ili koje štete betonu po bilo kojoj osnovi. Primena sitnog agregata nije dozvoljena što se vidi po ograničenju frakcija sitnijih od 4mm na 5%. Reciklirani agregat koji ispunjava iznete zahteve se može koristiti u nearmiranim i armiranim betonima ukoliko oni zadovoljavaju sve uslove trajnosti koje propisuje RILEM ili CEN regulativa.

Obavezni zahtevi	Tip I	Tip II	Tip III
Min zapreminska masa zrna agregata u suvom stanju (kg/m ³)	1500	2000	2400
Max % agreg. sa zaprem. masom u ZPS* stanju < 2200 kg/m ³	-	10	10
Max % agregata sa zaprem. masom u ZPS* stanju < 1800 kg/m ³	10	1	1
Max % agregata sa zaprem. masom u ZPS* stanju < 1000 kg/m ³	1	0.5	0.5
Max sadržaj stranih materija (metala, stakla, asfalta)	5	1	1
Max sadržaj metala (% m/m)	1	1	1
Max sadržaj organskih materija (% m/m)	1	0.5	0.5
Max sadržaj sitnih čestica manjih od 0.063 mm (% m/m)	3	2	2
Max sadržaj peska (% m/m)	5	5	5
Max sadržaj sulfata (% m/m)	1	1	1

*ZPS – zasićeno, površinski suvo stanje

Tabela 1. Obavezni zahtevi kvaliteta recikliranog agregata

4. SOPSTVENO EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Za potrebe eksperimentalnog dela rada [2] su napravljene tri trofrakcijske samougrađujuće betonske mešavine sa letećim pepelom kao praškastom komponentom, etalon je spravljen sa rečnim agregatom; P50 sa frakcijom 8/16 mm zamenjenom recikliranim agregatom i P100 sa obe krupne frakcije (4/8 i 8/16 mm) zamenjene recikliranim. U svim mešavinama je korišćen superplastifikator ViscoCrete 5380 čije je doziranje izvršeno prema preporuci proizvođača. Kriterijum pri projektovanju mešavina je bio postizanje iste konzistencije betona, tj. slump – flow klase SF2 koja obuhvata uobičajenu primenu betona i podrazumeva rasprostiranje od 66 do 75 cm. Prilikom spravljanja betonskih mešavina je najpre agregat mešan sa polovinom potrebne vode u trajanju od oko 30 sekundi, a zatim su dodavane ostale komponente. Kada je korišćen reciklirani agregat, dodata je količina vode koju agregat upije za 30 minuta (II frakcija 2.22%, III frakcija 1.5%), mada ovaj princip nije mogao dosledno da se primeni. Sastav betonskih mešavina je prikazani u tabeli 2. Mešavine sa recikliranim agregatom su pravile velike probleme, da bi se uopšte postigla samougradljivost betona bilo je neophodno intervenisati u smislu povećanja I i smanjenja III frakcije za 5%.

materijal (kg/m ³)	cement	el.pepeo	0/4mm	4/8mm	8/16mm	voda	VSC5380	ωc	ωp
etalon	400	120	770.86	306.28	532	192.66	4.94	0.48	0.37
P50	400	120	809.14	306.28	505.43	214.28	5.08	0.54	0.41
P100	400	120	809.14	306.28	505.43	221	5.08	0.55	0.42

Tabela 2: Sastav betonskih mešavina

Na svežem betonu su urađena ispitivanja zapreminske mase, fluidnosti – Slump flow test prema EN 12350-8, viskoznosti – T500 test prema EN 12350-8, sposobnosti prolaza kroz armaturu – L box test prema EN 12350-10 i otpornosti na segregaciju – Sieve segregation test prema EN 12350-11. Na očvrslom betonu su urađena ispitivanja zapreminske mase, čvrstoće pri pritisku, čvrstoće pri zatezanju savijanjem, skupljanja, vodonepropustljivosti, upijanja vode i SEM analize.

4.1. Rezultati ispitivanja svežeg betona

bet. mešavina	zaprem. masa kg/m ³	Slump-flow dsr, cm	T500 s	L-box H1/H2	Sieve segregation %
EP	2288	70	4	0.94	11
P50	2279	70	5	0.95	7.8
P100	2298	66	6	0.91	5.5

Tabela 3. Rezultati ispitivanja svežeg betona

Rezultati ispitivanja svežeg betona su prikazani u tabeli 3.

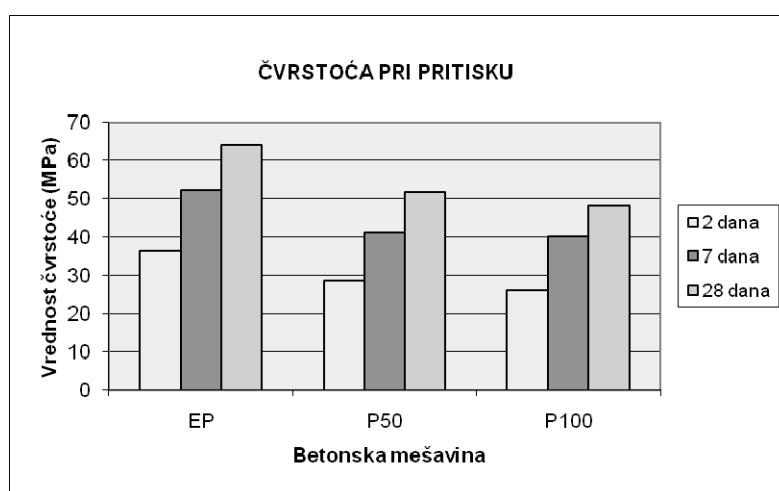
4.2. Rezultati ispitivanja očvrslom betona

Rezultati ispitivanja zapremine mase u očvrslom stanju su prikazani u tabeli 4.

	EP, γ (kg/m ³)	P50, γ (kg/m ³)	P100, γ (kg/m ³)
2 dana	2262.4	2313.5	2284.2
7 dana	2289.7	2315.5	2292.5
28 dana	2306.2	2314	2303.3

Tabela 4. Rezultati ispitivanja zapremine mase u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku su prikazani na slici 2.

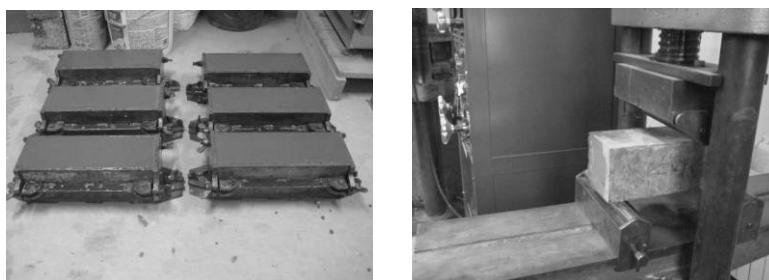


Slika 2. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem (slika 3) su prikazani u tabeli 5.

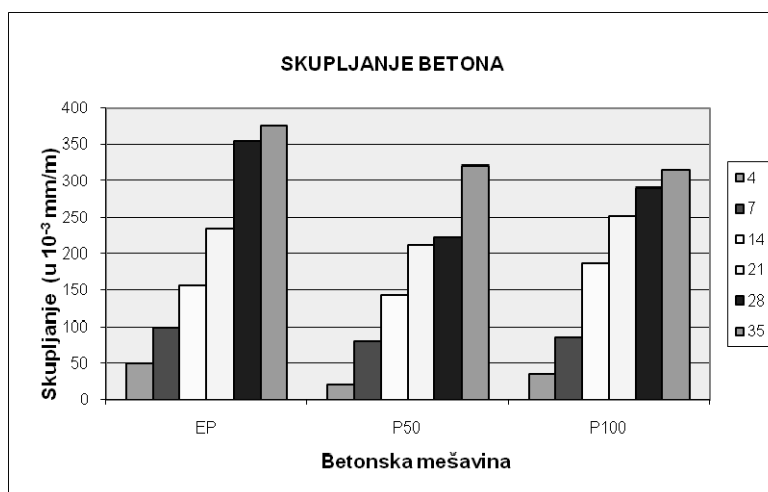
betonska mešavina	EP	P50	P100
28 dana	8.98	8.2	7.97

Tabela 5. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem (u MPa)



Slika 3: Ispitivanje čvrstoće pri zatezanju savijanjem

Ispitivanje skupljanja je izvršeno na uzorcima dimenzija 12x12x36 cm, u svemu prema SRPS U.M1.029. Rezultati ispitivanja skupljanja betona nakon 4, 7, 14, 21, 28 i 35 dana su prikazani na slici 4.



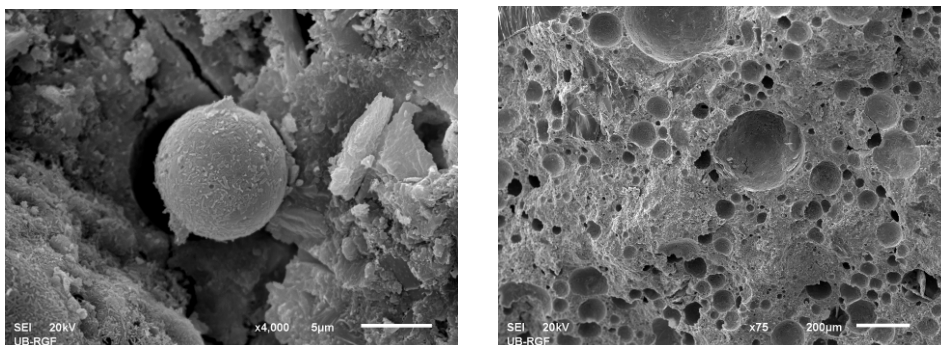
Slika 4. Skupljanje betona

Rezultati ispitivanja upijanja vode su prikazani u tabeli 6.

betonska mešavina	EP	P50	P100
upijanje vode u %	2.12	1.95	1.93

Tabela 6. Rezultati ispitivanja upijanja vode

Ispitivanje vodonepropustljivosti je vršeno na uzorcima dimenzija 200x200x150 mm, pri starosti betona od 28 dana, u svemu prema SRPS U.M1.015:1998. Uzorci su 24 h izloženi dejstvu vode pod pritiskom od 1 bara, sledećih 48 h pritisku od 3 bara, i na kraju poslednja 24 h ispitivanja, pritisku od 7 bara. Nakon ovoga se polome i meri dubina prodora vode. Kod svih uzoraka prodor vode je iznosio 8 – 10 cm, tako da su oni prema kriterijumu da prodor vode bude manji od 4 cm vodopropustljivi.



Slika 5. Mikrostruktura betona

SEM analizama (slika 5) je omogućeno da se „zaviri“ u strukturu spravljenih betona i bolje objasne rezultati koji su dobijeni ispitivanjima.

5. ANALIZA REZULTATA

Razlike u zapreminskoj masi betona u svežem stanju su male, najveća (P100) i najmanja (P50) se razlikuju za 19 kg/m^3 , tj. 0.8%. Prečnik rasprostiranja je iznosio od 66 – 70 cm što je sve mešavine svrstalo u projektovanu klasu, SF2, pri čemu upotreba recikliranog agregata zbog oštroičnog oblika zrna smanjuje rasprostiranje betona. U skladu sa ovim su i rezultati provere viskoznosti i horizontalnosti betona, dok je sa otpornošću na segregaciju obrnuto: manji prečnik rasprostiranja znači veću otpornost.

Razlike u zapreminskoj masi očvrslog betona, takođe nisu velike. Prilikom svakog merenja (2,7 i 28) dana, najveću zapreminsku masu je imala mešavina P50, pri čemu je razlika u rezultatima najviše 2.2%.

Očekivano, najveću vrednost čvrstoće pri pritisku je imao etalon, nakon 2 dana za 7.6 MPa (20.9%) i 10.1 MPa (27.8%) veću od mešavina sa jednom i obe krupne reciklirane frakcije. Nakon 7 dana, ta razlika je iznosila 11 MPa (21%) i 12 MPa (23%). Nakon 28 dana, etalon je dostigao 64 MPa, za 12.3 MPa više od mešavine P50 (51.7 MPa), i za 16.8 MPa više od mešavine P100 (47.2 MPa), pri čemu su i betoni sa recikliranim agregatom dostigli značajne čvrstoće.

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem su ujednačeni, i iznose oko 8 MPa.

Dostupni podaci iz literature kao i sopstvena prethodna istraživanja pokazuju da je nezahvalno predviđati ili nalaziti neku zakonitost kada je skupljanje betona u pitanju. Najveće skupljanje je izmereno kod etalona sa pepelom, koje je nakon 35 dana bilo za 14.6% veće od betona P50 i 16% veće od betona P100.

Rezultati ispitivanja skupljanja vode su ujednačeni i iznose oko 2%.

SEM analize pokazuju veoma poroznu mikrostrukturu, nevezano za primenjenu vrstu agregata, pri čemu su prisutne i nevezane čestice pepela (slika 5). Najizraženija je poroznost betona sa obe krupne reciklirane frakcije – P100 gde se prečnici pora kreću od 30 - 90 μm . Ovakva struktura objašnjava smanjenu vodonepropustljivost, istraživanja iz dostupne literature je vezuju za primenu pepela sa visokim sadržajem CaO, kakav je i korišćen u eksperimentu.

6. ZAKLJUČCI

- Samougradjući beton sa letećim pepelom i recikliranim agregatom ispunjava propisane uslove samougradljivosti, s tim što primena recikliranog agregata, zbog oštrovičnog oblika zrna smanjuje prečnik rasprostiranja.
- Na veličinu zapremine mase, vrsta primenjenog agregata ne utiče značajnije.
- Uticaj letećeg pepela na čvrstoću betona pri pritisku: kada se leteći pepeo doda betonu počinje pucolanska reakcija između silicijum dioksida (SiO_2) i kalcijum hidroksida (Ca(OH)_2) ili kreča, koji je nus produkt hidratacije Portland cementa. Slaba pucolanska reakcija se odvija tokom prvih 24 sata na 20°C . Zbog toga se za datu količinu cementa, sa povećanjem sadržaja letećeg pepela postižu niže rane čvrstoće. Prisustvo letećeg pepela usporava reakciju alita u okviru Portland cementa u ranom stadijumu. Međutim, produkcija alita se kasnije ubrzava zahvaljujući stvaranju jezgara hidratacije na površini čestica letećeg pepela. Kalcijum hidroksid se utiskuje na površinu staklastih čestica reagujući sa SiO_2 ili Al_2O_3 - SiO_2 rešetkom. Sporiji priraštaj čvrstoće betona sa letećim pepelom onemogućava njegovu primenu tamo gde se očekuju velike rane čvrstoće što se može rešiti primenom akceleratora. Dostupna literatura zbog ovog razloga upućuje na projektovanje i praćenje 90 – dnevne čvrstoće betona. SEM analize jasno pokazuju izuzetno sunderastu, tj. poroznu strukturu betona sa letećim pepelom bez obzira na vrstu primenjenog agregata.
- Rezultati ispitivanja čvrstoće pri zatezanju savijanjem su ujednačeni i pokazuju da vrsta agregata ne utiče na vrednost ove čvrstoće.
- Ne može se utvrditi zakonitost skupljanja niti izvesti neki uopšten zaključak, već se skupljanje kod svakog od ovih betona mora posebno i pažljivo pratiti.
- Izmereno upijanje vode je oko 2% što nije veliki rezultat obzirom na izrazito sunderastu mikrostrukturu, što se može objasniti manjim sadržajem otvorenih pora veličine 1- 10 μm kroz koje je najbrži transport vode, a što je opet u vezi sa pucolanskom aktivnošću letećeg pepela da učestvuje u C-S-H formacijama i popunjava pore.
- Velika eksploatacija prirodnog agregata ozbiljno je ugrozila rečne eko-sisteme, tako da je na nekim mestima i zabranjena. Pored ovoga sve veća udaljenost prirodnih nalazišta od mesta gradnje svakako utiče na cenu materijala. Sa druge strane, u urbanim sredinama postoje znatne količine betonskog otpada koji nastaje prilikom izgradnje ili rušenja starih objekata te je prisutan problem deponovanja ovakvog materijala. Razvijene, ekološki svesne zemlje, mnogo polažu na recikliranje sirovina i za odlaganje na deponije (koje oduzimaju korisno zemljište) naplaćuju novčane kazne. Drobljenjem betonskog otpada dobija se reciklirani agregat koji se može „vratiti“ u proizvodnju.
- Glavni problem primene recikliranog agregata jeste povećana poroznost koja je posledica postojanja zaostale stare cementne paste na zrnima agregata. Postojanje stare cementne paste je osnovni uzročnik neujednačenosti kvaliteta agregata i dovodi do smanjenja čvrstoće pri pritisku betona. Postoje postupci „čišćenja“ agregata koji poskupljuju beton, ali treba imati u vidu ekološku korist njegove upotrebe.

- Primena letećeg pepela i recikliranog agregata u samougrađujućem betonu, a na osnovu dobijenih performansi betona, je itekako opravdana, i ovakav beton se s pravom može nazvati ekološkim materijalom.

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR 36017 pod nazivom: "Istraživanje mogućnosti primene otpadnih i recikliranih materijala u betonskim kompozitima, sa ocenom uticaja na životnu sredinu, u cilju promocije održivog građevinarstva u Srbiji".

7. REFERENCE

- [1] ASTM C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [2] Despotović I: Uticaj različitih mineralnih dodataka na osobine samougrađujućeg betona, doktorska disertacija, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Niš, 2015.
- [3] Ignjatović I.: Granična nosivost AB grednih nosača od betona sa recikliranim agregatom, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Beograd, 2013.
- [4] Janssen G., Hendriks C.F.: Sustainable use of recycled materials in building construction, *Advances in Building Technology*, Volume 2 (2002), pp.1399 – 1407.
- [5] Jevtić D., Zakić D., Savić A.: Specifičnosti tehnologije spravljanja betona na bazi recikliranog agregata, *Materijali i konstrukcije* 52 (2009)1, str. 52 – 62.
- [6] Newman J., Chao B.S.: *Advanced concrete Technology*, Elsevier, 2003, p.280
- [7] Trumić M., Trumić M.: Uloga pripreme u reciklaži otpada i održivom razvoju Srbije, naziv monografije: Stanje i perspektive pripreme mineralnih sirovina u Srbiji, Izdavač: Inženjerska Akademija Srbije, Beograd, (2011), str. 73-93.
- [8] www.balkanmagazin.net