

Primljen / Received: 2.8.2014.

Ispravljen / Corrected: 2.10.2014.

Prihvaćen / Accepted: 22.10.2014.

Dostupno online / Available online: 10.12.2014.

# Uporaba granitne prašine u samozbijajućem betonu

## Autori:



Doc.dr.sc. **Aarhi Karmegam**, dipl.ing.građ.  
Tehničko sveučilište Alagappa Chettiar  
Odjel građevinarstva  
Indija  
[aarhi\\_karmegam@yahoo.co.in](mailto:aarhi_karmegam@yahoo.co.in)



Prof.dr.sc. **Arunachalam Kalidass**, dipl.ing.građ.  
Tehničko sveučilište Thiagarajar  
Odjel građevinarstva  
Indija  
[vakarunachalam@gmail.com](mailto:vakarunachalam@gmail.com)



Mr.sc. **Dileepan Ulaganathan**, dipl.ing.građ.  
L & T Limited  
[dileepthambi@gmail.com](mailto:dileepthambi@gmail.com)

Prethodno priopćenje

**Aarhi Karmegam, Arunachalam Kalidass, Dileepan Ulaganathan**

## Uporaba granitne prašine u samozbijajućem betonu

Samozbijajući beton treba sadržavati mineralne dodatke za poboljšanje svojstava tečenja betona. Kao mineralni dodatak u samozbijajućem betonu može se koristiti granitna prašina. Rezultati ispitivanja rentgenskom difrakcijom (XRD) te skeniranje elektronskim mikroskopom (SEM) pokazali su da postoji obećavajuća budućnost za korištenje ovog otpadnog materijala kao punila u samozbijajućim betonima, uz dodatak letećeg pepela. Rezultati su pokazali da je moguće koristiti granitnu prašinu i leteći pepeo da bi se poboljšala svojstva i ekonomska isplativost samozbijajućeg betona.

### Ključne riječi:

samozbijajući beton, granitna prašina, leteći pepeo, mehanička svojstva

Preliminary note

**Aarhi Karmegam, Arunachalam Kalidass, Dileepan Ulaganathan**

## Utilization of granite sawing waste in self compacting concrete

The self-compacting concrete must contain mineral admixtures to improve the flow properties. The granite sawing waste can be utilized as mineral admixture in the self-compacting concrete. The results obtained by XRD and SEM methods show that there is a promising future for the use of this waste material as filler in self-compacting concrete, along with fly ash. The results show that the granite sawing waste and fly ash can be used to improve the properties and cost-effectiveness of the self-compacting concrete.

### Key words:

self-compacting concrete, granite sawing waste, fly ash, mechanical properties

Vorherige Mitteilung

**Aarhi Karmegam, Arunachalam Kalidass, Dileepan Ulaganathan**

## Anwendung von Granitpulver in selbstverdichtendem Beton

Selbstverdichtender Beton muss mineralische Zusätze enthalten, die das Fließverhalten des Betons verbessern. Als mineralische Zusätze kann Granitpulver angewandt werden. Resultate von auf XRD und SEM Methoden beruhenden Versuchen haben gezeigt, dass der Anwendung dieses Abfallstoffes als Füllmittel für selbstverdichtenden Beton, unter dem Zusatz von Flugasche, eine vielversprechende Zukunft bevorsteht. Des Weiteren zeigen die Resultate, dass Granitpulver und Flugasche angewandt werden können, um Eigenschaften und Wirtschaftlichkeit selbstverdichtenden Betons zu verbessern.

### Schlüsselwörter:

selbstverdichtender Beton, Granitpulver, Flugasche, mechanische Eigenschaften

## 1. Uvod

Samozbijajući beton donio je revolucionarnu promjenu u građevinskoj industriji od njegove pojave 1980. godine. Budući da je njegova proizvodnja mnogo jednostavnija nego proizvodnja običnog betona, upotreba je široko rasprostranjena pri velikim građevinskim radovima, izgradnji mostova, podzemnih željeznica, itd. Kvaliteta samozbijajućeg betona znatno je bolja nego kvaliteta običnog betona [1]. Druga prednost je ta da nema potrebe za posebno vještim rukovanjem pri ugradnji, izlivanju i obradi betona, a u prilog tome ide činjenica da se manjak kvalificirane radne snage sve više osjeti u mnogim zemljama [2]. Mješavina samozbijajućeg betona uvijek sadrži superplastifikatore i često se koristi velika količina praškastih materijala i/ili aditiva koji utječu na viskoznost. Superplastifikator je neophodan za proizvodnju betonske mješavine dobrih svojstava tečenja (niska granica tečenja), dok su praškasti materijali ili viskozna sredstva potrebni za održavanje stabilnosti paste (dovoljna viskoznost), smanjujući time izdvajanje vode i segregaciju. Sitne čestice koje se dodaju često sadrže vapnenac, leteći pepeo, zgru visokih peći itd. Nadalje, udio krupnog agregata je u samozbijajućem betonu znatno manji nego u tradicionalnim betonskim mješavinama dobivenima vibriranjem, kako bi se smanjio rizik od zaustavljanja tečenja betona kroz gustu armaturu i uske otvore u oplati [3]. Izvrsna svojstva deformabilnosti, dobra stabilnost paste i nizak rizik od zaustavljanja tečenja osnovni su zahtjevi za uspješno izlivanje samozbijajućeg betona [4]. Svojstva očvrstnuleg betona iznimno su važna za projektante kao i za korisnike, te iz tog razloga postoje brojni podaci o tim svojstvima [5]. Ne postoje univerzalne metode za ispitivanje samozbijajućeg betona. Odabir ovisi o inženjerskoj procjeni, vrsti i tipu materijala. Odgovarajuća betonska mješavina može se dobiti metodom pokušaja i pogrešaka [6]. Razvijene su mnoge različite metode ispitivanja kako bi se odredila svojstva samozbijajućeg betona. Do sada niti jedna metoda ili kombinacija metoda nije postigla sveopće odobravanje, a svaka metoda ima svoje pristalice. Isto tako niti jednom metodom nisu utvrđeni relevantni zahtjevi ugradljivosti, tako da bi se svaki uzorak trebao ispitati kroz više metoda kako bi se dobili različiti parametri ugradljivosti [7]. Granit ima raznovrsnu upotrebu zbog svojih karakteristika kao što su visoka trajnost te otpornost na ogrebotine, mrlje, pukotine, toplinu, hladnoću i vlagu. Nažalost, povećava se i količina krutog otpada zbog rezanja i poliranja granita [8]. Taj se otpad zasad ostavlja na odlagalištima te dolazi do povećanja troškova i negativnog utjecaja na okoliš što utječe na ekonomsku i ekološku održivost takve industrijske proizvodnje, kao i na zdravstvenu zaštitu [9]. U posljednjih je nekoliko desetljeća posebna pozornost usmjerena na zaštitu okoliša te su poduzete mjere da se granitni ostaci ponovo upotrijebe. Glavni je cilj održivog razvoja smanjiti potrošnju prirodnih resursa pravilnim recikliranjem. U Indiji se više od 40 % granitnog otpada proizvodi u Tamil Naduu, uslijed

rezanja i poliranja granita. Granitni otpad u kombinaciji s vodom i sitnim česticama nakon sušenja postaje potencijalni problem za okoliš. Dakle, ovaj rad je usmjeren na razvoj betona uz primjenu granitne prašine, industrijskog otpada, kao zamjenskog materijala za cement. Krupniji granitni otpad koji ostaje nakon obrade granita može se koristiti umjesto krupnog agregata za beton [10, 11]. Također se koristi za proizvodnju obojene žbuke i keramičkih proizvoda [12, 13]. Neki istraživači koriste biomasu kao punilo za samozbijajući beton, poput biomase od maslina [14], a neki kao dodatak koriste zgru visokih peći [15]. Kriterij viskoznosti zadovoljen je korištenjem drugačijeg sastava agregata i cementa drugačijih svojstava, vapnenačkih dodataka i dodataka koji eliminiraju izdvajanje vode, [16]. U samozbijajućem betonu već se koriste vapnenačka i bazaltna prašina i njihova uporaba je ekonomična [17]. Granitna prašina se uspješno upotrebljava kao zamjena za pijesak u običnom betonu [18]. Znanstvenici su zaključili da zamjena pijeska granitnom prašinom nema štetan utjecaj na čvrstoću i trajnost betona. Za potrebe ovog istraživanja razvijena je odgovarajuća mješavina betona s potrebnim svojstvima samozbijajućeg betona. Poliranje granita daje fini prah koji se bez obrade koristi u daljnjem procesu. Taj se otpadni materijal koristi u ovom istraživanju i naziva se granitna prašina. Kako je leteći pepeo mineralni dodatak koji poboljšava ugradljivost betona, učinak granitne prašine može se dodatno poboljšati upotrebom letećeg pepela. U ovom radu provedena su ispitivanja kako bi se učinkovito zamijenio cement granitnom prašinom (u postocima 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %) i letećim pepelom (25 %). Provedeno je nekoliko ispitivanja, kao što su rasprostiranje slijeganjem, ispitivanje V-lijevkom, L-kockom i U-kockom kako bi se utvrdili optimalni parametri samozbijajućih mješavina. Također su proučavani: tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća savijanjem i cijepanjem te deformacijska svojstva uzoraka.

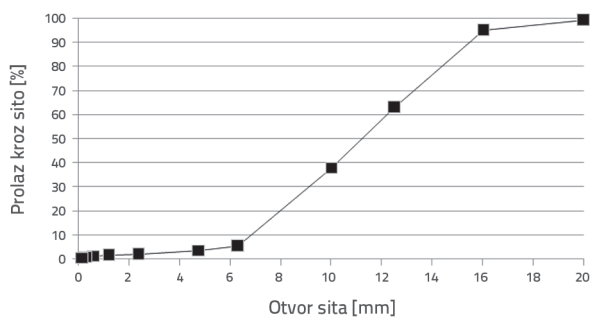
## 2. Ispitivanja

### 2.1. Materijali

U ispitivanjima je korišten obični portland cement klase 43, svojstava u skladu s IS 8112-1989, (R2005). Spomenuti cement proizvodi se temeljitim miješanjem vapnenca i gline i/ili materijala koji sadrže silicijev dioksid, aluminijev ili željezni oksid, pečenjem na temperaturi klinkeriranja i mljevenjem dobivenog klinkera. Jedini materijal koji se dodaje nakon procesa pečenja je gips. Prema metodi propusnosti zraka po Blaineu, prema IS 4031 (Part 2)-1988, finoća mljevenja iznosila je 299 m<sup>2</sup>/kg, specifična težina je 3,11 g/cm<sup>3</sup>, a tlačna čvrstoća pri starosti od 28 dana je 48,5 N/mm<sup>2</sup>. Pri izradi samozbijajućeg betona treba paziti na količinu krupnih čestica koja ne bi smjela prelaziti 50 % ukupnog volumena. Primjenjuje se drobljeni agregat koji

sadrži 95 % čestica manjih od 16 mm kako bi se izbjeglo zaustavljanje tečenja samozbijajućeg betona. Upotrebljava se i obični riječni pijesak granulometrijske zone II specifične težine 2,6 g/cm<sup>3</sup>.

Kao superplastifikator upotrijebljen je Conplast SP430, dodatak baziran na odabranim sulfonirano naftalenskim polimerima, koji ne sadrži kloride. Isporučuje se kao smeđa otopina koja se brzo raspršuje u vodi. Conplast SP430 raspršuje sitne čestice u betonskoj mješavini čime se poboljšava učinkovitost količine vode u betonu, tj. moguće veliko smanjenje udjela vode utječe na povećanje čvrstoće betona. Granitna prašina i leteći pepeo se koriste kao mineralni dodaci. Leteći pepeo klase F dobiven je iz termoelektrane u blizini Mettur brane u Indiji.



Slika 1. Udio korištenog krupnog agregata

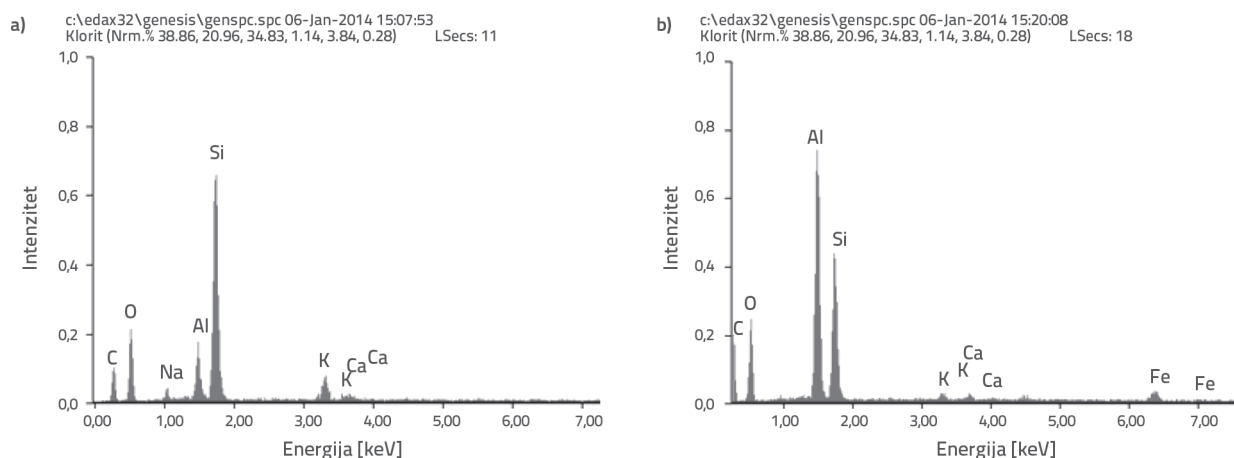
Specifična težina letećeg pepela je 2,1 g/cm<sup>3</sup>. Upotrijebljena je granitna prašina iz Tamil Nadua, India. S obzirom na to da granitna prašina ima manje čestice, za ispitivanje raspodjele veličine čestica provedena je analiza. Utvrđeno je da koeficijent zakrivljenosti iznosi 1,95, a koeficijent ujednačenosti je 7,82. Specifična težina granitne prašine je 2,59 g/cm<sup>3</sup>. Karakteristična svojstva i mineralni sastav ovih dvaju mineralnih dodataka i cementa prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva običnog portland cementa i mineralnih dodataka

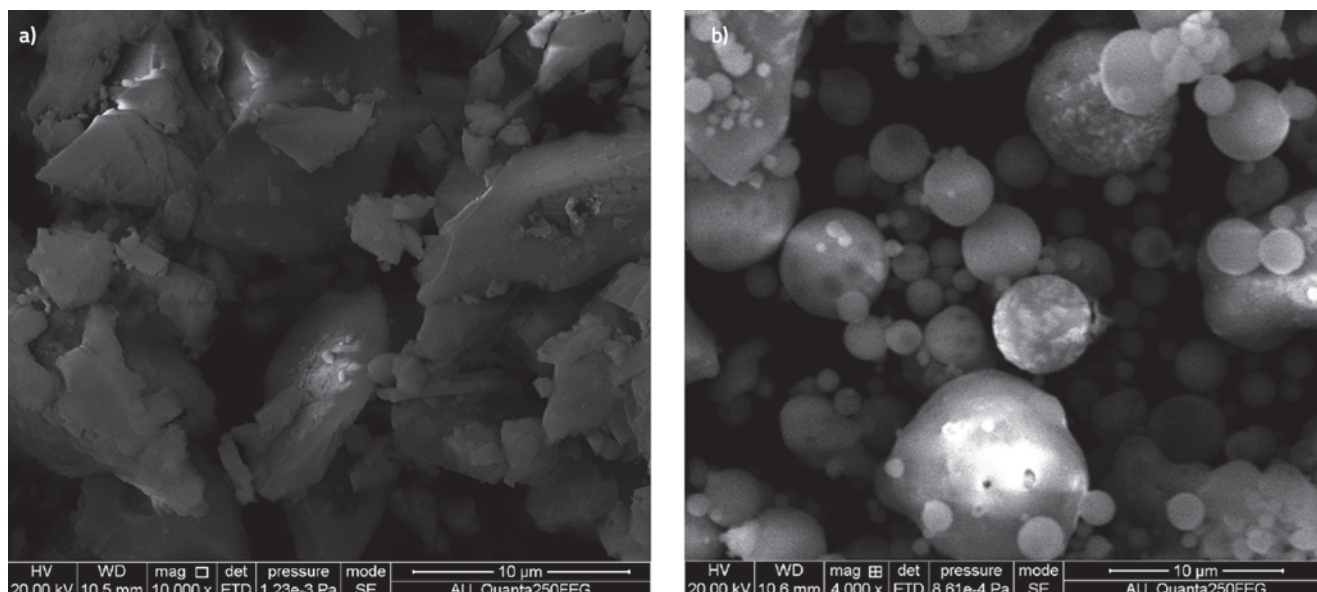
Sastojak	Cement [%]	Granitna prašina [%]	Leteći pepeo [%]
CaO	63,5	3,6	5,9
SiO <sub>2</sub>	21,5	61,4	45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5	16,3	30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55	3,6	11
MgO	1,5	1,7	2,25
SO <sub>3</sub>	1,2	0,05	1,5
LOI	1,0	5,0	1,0
Alkali	0,12	6,2	2,1
Netopljivi ostaci	0,8	0,9	0,2

Iz XRD rezultata prikazanih na slici 2., upotrijebljena granitna prašina sadrži više od 60 % silicijevog dioksida koji može dati pogodan učinak u samozbijajućem betonu. Oko 16,3 % glinice u granitnoj prašini i 30 % u letećem pepelu osiguravaju pucolansku reakciju u betonu što doprinosi tlačnoj čvrstoći. Preostali dio granitne prašine sastoji se od kalcijevog oksida CaO (3,6 %), željeznog oksida Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,6 %) i ostataka koji nemaju velik utjecaj na čvrstoću.

Granitna prašina i leteći pepeo imaju određenu količinu silicijevog dioksida i aluminijevog oksida što upućuje na mogućnost pucolanske reakcije i kvazicementnu prirodu. Da bi se leteći pepeo koristio kao aditiv u betonu, treba sadržavati najmanje 25 % reaktivnog silicijevog dioksida, a isto vrijedi i za granitnu prašinu. Udio željeznog oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), aluminijevog oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i silicijevog dioksida (SiO<sub>2</sub>) u letećem pepelu mora biti najmanje 70 % za moguću primjenu u betonu: zbroj tih oksida je veći od 80 % u odabranoj granitnoj prašini, što dovodi do zaključka da bi mogao biti koristan za betonske mješavine. Iako naizgled visok, udio alkalnih tvari u granitnoj prašini (ekvivalent Na<sub>2</sub>O)



Slika 2. Rezultati ispitivanja za granitnu prašinu i leteći pepeo



Slika 3. Usporedba čestica granita i letećeg pepela skeniranih elektronskim mikroskopom

nije slobodan, stoga se smatra da neće pridonijeti eventualnim alkalnoagregatnim reakcijama. Na slici 3. vidi se da su čestice po obliku, teksturi i granulometriji vrlo nepravilne.

Procjena oblika, teksture i granulometrije čestica pokazala je da su čestice granita nešto veće, uglastije, poroznije te imaju veću specifičnu površinu i hrapavost od tipične čestice letećeg pepela koja u prirodi ima sferični oblik.

## 2.2. Svojstva mješavine

Okamura [1] je osmislio jednu od najboljih i najpopularnijih metoda za izradu mješavine za samozbijajući beton. U toj metodi provode se najprije ispitivanja cementne paste i morta, a zatim se utvrđuju svojstva superplastifikatora, cementa, sitnog agregata i drugih mineralnih dodataka. EFNARC (European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) smjernice po Okamuri koriste se da bi se odredili udjeli sastojaka u mješavini. Pripremljeno je i ispitano pet mješavina s mineralnim dodacima, od kojih je jedna kontrolna mješavina, kako bi se ocijenila svojstva samozbijajućeg betona. Tablica 2. prikazuje sastav i oznake mješavina samozbijajućeg betona. U mješavinama je cement zamijenjen granitnom prašinom s udjelima od 0 %, 5 %, 10 %, 15

Tablica 2. Svojstva mješavine

Sastav \ Mješavina	Samozbijajući beton I	Samozbijajući beton II	Samozbijajući beton III	Samozbijajući beton IV	Samozbijajući beton V
<b>Cement</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	431	409,5	388	366,5	345
<b>Leteći pepeo</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	97	97	97	97	97
<b>Granit</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	-	21,5	43	64,5	86
<b>Sitni agregat</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	913	913	913	913	913
<b>Krupni agregat</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	755	755	755	755	755
<b>Voda</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	194	194	194	194	194
<b>Superplastifikator (po težini praha)</b>	1,25 %	1,25 %	1,25 %	1,25 %	1,25 %

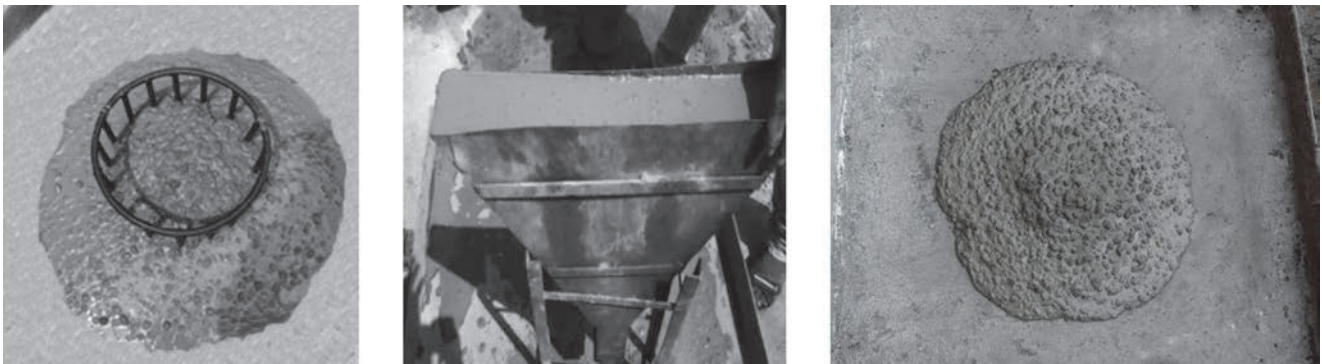
%, 20 % mase i leteći pepeo sa 25 % mase. Nakon preliminarnih ispitivanja s variranim udjelom praha (granitna prašina + leteći pepeo) i superplastifikatora, odabrani vodovezivni omjer po volumenu iznosio je 1.05, a ukupni udio praha imao je fiksnu specifičnu težinu 528 kg/m<sup>3</sup>. Udio superplastifikatora dobiven metodom pokušaja i pogrešaka iznosio je 1,25 % težine praha.

## 2.3. Ispitivanje svježeg betona

Posebna količina materijala pripremljena je za svaku mješavinu. U laboratorijskoj miješalici najprije se miješanjem homogenizira pijesak, zatim je dodan krupni agregat, granitna prašina, leteći pepeo i na kraju cement. Nakon što je dodana voda, u smjesu je stavljen superplastifikator. Disperzija superplastifikatora predstavlja kritičan dio u procesu miješanja. Da bi se održala potrebna razina viskoznosti, potrebni su duži ciklusi miješanja. Optimalno vrijeme miješanja i redoslijed materijala trebao bi se prethodno ispitati za svaku vrstu postrojenja. Rezultati preliminarnih ispitivanja pokazali su da su tri do četiri minute miješanja dovoljne da bi se stabilizirale vrijednosti rasprostiranja slijevanjem i V-lijevkom. Za ispitivanje svježeg betona koristilo se 35 % pripremljene mješavine.

Tablica 3. EFNARC svojstva samozbijajućeg betona

Svojstvo	Metoda ispitivanja	Tipična vrijednost
Sposobnost tečenja	Rasprostiranje slijeganjem Vrijednost $T_{50}$ cm rasprostiranjem slijeganjem V - lijevak	650-800 mm 2-7 s 8-12 s
Sposobnost zaobilaženja prepreka	L - kutija ( $H_2/H_1$ ) U - kutija ( $R_1-R_2$ )	0,8-1 0-30 mm
Otpornost na segregaciju	V - lijevak $T_5$ min	+3 s



Slika 4. Svojstva svježeg samozbijajućeg betona: J-prsten, V-lijevak, rasprostiranje slijeganjem

Ostali dio mješavine koristi se za izradu betonskih kocki i cilindričnih uzoraka bez vibriranja kako bi se odredila mehanička svojstva. Uzorci su uronjeni u vodu temperature 20° C sve do dana ispitivanja. Provedena su ispitivanja kako bi se odredila svojstava samozbijanja kao što su rasprostiranje slijeganjem, vrijednost  $T_{50}$ , V-lijevak, zaobilaženje prepreka L-kutijom. Sva mjerenja pri ispitivanju svježeg betona su ponovljena i određena je srednja vrijednost mjerenja. Na ponovljenim mjerenjima dobivena je ista srednja vrijednost.

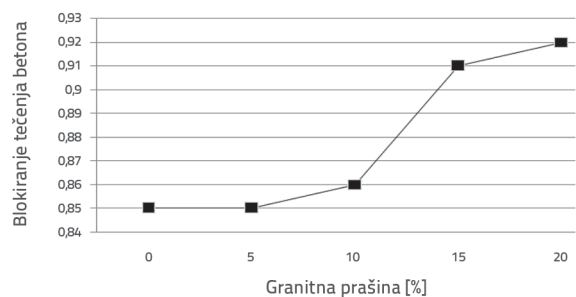
Da bi se smanjio utjecaj koji smanjenje obradljivosti ima na rezultate ispitivanja, svojstva mješavina betona u svježem stanju određena su 20 minuta nakon miješanja. Prije ispitivanja, svježi samozbijajući beton je ponovo miješan 30 sekundi. Redoslijed ispitivanja je bio sljedeći:

- rasprostiranje slijeganjem i mjerenje vrijednosti  $T_{50}$
- ispitivanje V-lijevkom
- ispitivanje L-kockom
- ispitivanje U-kockom i J-prstenom.

Tijekom ispitivanja rasprostiranja slijeganjem izmjereno je vrijeme potrebno da bi se postiglo slijeganje betona 500 mm u promjeru i konačni promjer kruga. U ispitivanju V-lijevkom mjereno je vrijeme potrebno da bi samozbijajući beton zahvaljujući vlastitoj masi protekao kroz V-lijevak. U ispitivanju L-kockom, kontrolna vrata su naglo otvorena i samozbijajući beton je tekao kroz horizontalni dio L-kocke. Nakon što je tečenje betona zaustavljeno, izmjerene su visine betona na kraju i na početku i određen je koeficijent blokiranja tečenja koji predstavlja omjer tih dviju visina.

Mjerenjem vrijednosti slijeganja različitih mješavina samozbijajućeg betona određeno je da je srednji promjer

betona nakon slijeganja između 650 mm i 800 mm. Kako bi se postigla dobra ravnoteža između deformabilnosti i stabilnosti, primijenjen je nizak vodovezivni omjer. Granitna prašina i leteći pepeo su dobra punila, ali ne utječu na koheziju mješavine. Zbog toga vrijednost  $T_{50}$  iznosi između 5 i 6 sekundi. Vrijednosti slijeganja betona iznosile su između 700 mm i 750 mm. Koeficijent blokiranja iznosi između 0,8 i 0,9, što osigurava odgovarajuću viskoznost mješavine. Rezultati ispitivanja svojstava svježeg betona poput svojstava tečenja i zaobilaženja prepreka, prikazani su u tablici 4. Provedena su preliminarna ispitivanja kako bi se odredili udjeli komponenata sastava u mješavinama i količina superplastifikatora te je zadovoljen kriterij samozbijanja u svim mješavinama. Ispitivanja su pokazala slične karakteristike tečenja betona. U početku se smatralo bi da uglasti oblik čestica granita mogao utjecati na svojstva tečenja i samozbijanja betona. No budući da leteći pepeo sadrži čestice sferičnog oblika koje teže povećanju kohezije, utjecaj uglatosti granitne prašine je minimaliziran, te su poboljšana svojstva tečenja betona.



Slika 5. Utjecaj granitne prašine na blokiranje tečenja betona

Tablica 4. Rezultati ispitivanja svježeg samozbijajućeg betona

Udio granitne prašine u samozbijajućem betonu [%]	Rasprostiranje slijeganjem [mm]	T <sub>50</sub> cm Rasprostiranje slijeganjem	V-lijevak [s]	L- kocka H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>	U-kocka R <sub>1</sub> -R <sub>2</sub>	J-prsten
Samozbijajući beton I [0 %]	730	5	8,66	0,85	6	5,3
Samozbijajući beton II [5 %]	740	5	8,75	0,85	6	5,3
Samozbijajući beton III [10 %]	735	4	8,48	0,86	4	5,8
Samozbijajući beton IV [15 %]	735	4	8,24	0,91	5	7,5
Samozbijajući beton V [20 %]	740	4	8,27	0,92	4	7,7

Tablica 5. Srednja vrijednost, standardna devijacija i koeficijenti varijacije rezultata u ispitivanjima očvrtnuloga betona

Svojstva očvrtnuloga betona		Samozbijajući beton I	Samozbijajući beton II	Samozbijajući beton III	Samozbijajući beton IV	Samozbijajući beton V
7-dnevna tlačna čvrstoća betona [MPa]	Srednja vrijednost	24,48	25,00	26,13	22,22	19,20
	Standardna devijacija	0,459	0,815	0,255	0,908	0,564
	Koeficijent varijacije	1,87	3,26	0,97	4,08	2,93
28-dnevna tlačna čvrstoća betona [MPa]	Srednja vrijednost	32,88	33,36	34,80	30,20	28,00
	Standardna devijacija	0,933	0,437	0,976	0,875	0,313
	Koeficijent varijacije	2,83	1,31	2,81	2,89	1,12
7-dnevna vlačna čvrstoća betona cijepanjem [MPa]	Srednja vrijednost	1,83	1,55	1,69	1,55	1,55
	Standardna devijacija	0,020	0,079	0,092	0,079	0,056
	Koeficijent varijacije	1,09	5,09	5,44	5,09	3,61
28-dnevna vlačna čvrstoća betona cijepanjem [MPa]	Srednja vrijednost	2,82	2,55	2,55	2,55	2,55
	Standardna devijacija	0,118	0,052	0,168	0,087	0,036
	Koeficijent, varijacije	4,18	2,04	6,58	3,41	1,41
28-dnevni modul elastičnosti [GPa]	Srednja vrijednost	27,87	28,41	28,43	26,42	25,42
	Standardna devijacija	0,112	0,727	0,072	0,461	0,522
	Koeficijent varijacije	0,40	2,56	0,25	1,74	2,05

## 2.4. Svojstva očvrtnuloga betona

Tlačna čvrstoća ispitivana je na kocki stranice 150 mm. Uzorci su izvađeni iz kalupa jedan dan nakon izlivanja, a zatim su uronjeni u vodu temperature 20 °C do ispitivanja koje je provedeno pri starosti od sedam i 28 dana. Ispitivana su po tri uzorka svake mješavine te je određena njihova srednja vrijednost. Vlačna čvrstoća cijepanjem određena je nakon 28 dana na cilindrima promjera 150 mm i visine 300 mm, nakon što su bili uronjeni u vodu do dana ispitivanja (prema IS: 5816-1970 [29]). Ispitivana su po tri uzorka svake mješavine i dobivene su srednje vrijednosti.

Modul elastičnosti je određen u skladu s Metodama za ispitivanja čvrstoće betona IS 516-1959 [30]. Cilindri promjera 150 mm i visine 300 mm različitih mješavina betona uronjeni su u vodu i testirani nakon 28 dana. Za tri različita uzorka iz različitih betonskih mješavina određene su tri različite tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće i moduli elastičnosti. U tablici 5. prikazane su srednje vrijednosti, standardne devijacije i koeficijenti varijacije dobiveni ispitivanjima.

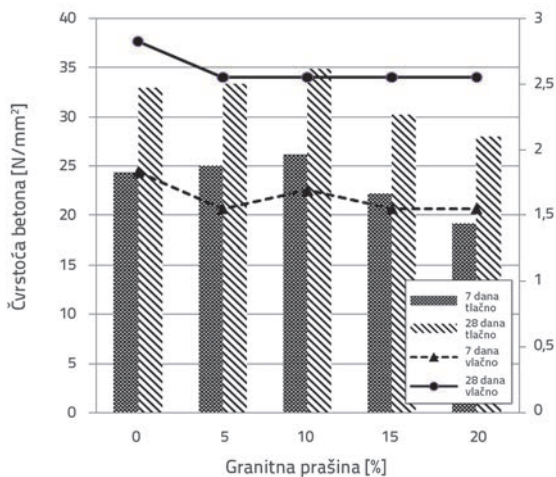
Utvrđene su niske vrijednosti standardne devijacije i koeficijenta varijacije rezultata ispitivanja, a one mogu biti u korelaciji s poboljšanjem homogenosti mješavina samozbijajućeg betona.

Mješavina samozbijajućeg betona je klase C25/30 (srednja tlačna čvrstoća betona je 30 N/mm<sup>2</sup>). Rezultati ispitivanja pokazuju da je za beton u kojemu je upotrebljeno 25 % letećeg pepela kao zamjena za cement postignuta željena srednja čvrstoća od 32,8 N/mm<sup>2</sup>.

Taj se beton može definirati kao referentni beton. Beton sa 5 % granitne prašine postigao je 1,5 % veću tlačnu čvrstoću i vlačnu čvrstoću sličnu referentnom betonu. Betonska mješavina s 10 % granitne prašine postigla je 5,8 % veću čvrstoću od referentnog betona, nakon čega povećanje udjela granitne prašine više ne rezultira povećanjem tlačne čvrstoće betona. Dobiveni rezultat sličniji je rezultatu referentnog betona. Vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem pokazuju da granitna prašina smanjuje vlačnu čvrstoću betona. Tijekom vizualnog pregleda površine sloma uzoraka, uočeno je da kod mješavina s manjim udjelom

granitne prašine dolazi do otkazivanja zrna agregata, što pokazuje da je čvrstoća morta veća. Povećanjem udjela granitne prašine dolazi do otkazivanja uslijed gubitka sile prijanjanja između zrna agregata i cementne matrice, što bi mogla biti posljedica utjecaja smanjenja čvrstoće morta.

Smanjenje vlačne čvrstoće nije uzrokovano samo smanjenim udjelom cementa, već to može biti i zbog količine slobodne vode koju čestice granita ne mogu apsorbirati. Količina vode u svim mješavinama je bila ista kako bi se mogao ispitati utjecaj udjela vode. Male količine granitne prašine u betonu poboljšavaju modul elastičnosti, ali nakon prekoračenja određenog omjera, modul elastičnosti se smanjuje. Isto se događa i u slučaju tlačne čvrstoće.



Slika 6. Utjecaj granitne prašine na mehanička svojstva betona

Tablica 6. prikazuje učinak granitne prašine na gustoću i brzinu ultrazvučnog impulsa u mješavinama. Postoji određeno smanjenje gustoće betona s povećanjem udjela granitne prašine, ali je gustoća betona veća pri starosti od 28 dana, u odnosu na 7 dana. Uzrok tome je najvjerojatnije formiranje pora

u česticama granita. Ultrazvučna brzina u svim mješavinama je velika te iznosi od 4,81 do 5,01 km/s, što potvrđuje da su kvaliteta i ujednačenost betona izvrsni.

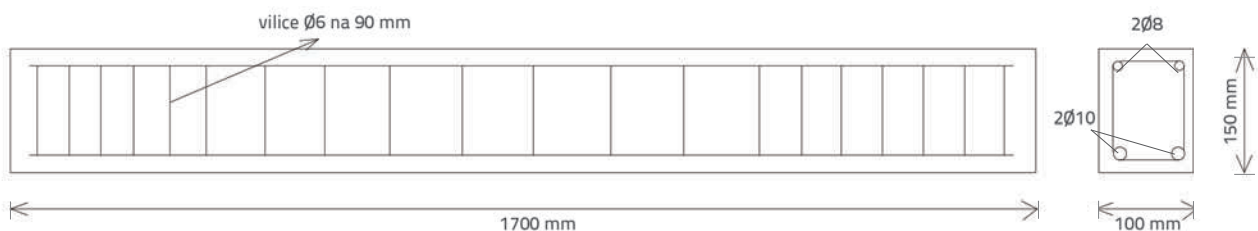
Tablica 6. Gustoća i brzina ultrazvučnog impulsa u betonskim mješavinama s granitnom prašinom

Udio granitne prašine u samozbijajućem betonu [%]	Gustoća [kg/m³] / brzina ultrazvučnog impulsa [km/s]	
	7 dana	28 dana
Samozbijajući beton I [0 %]	2385 / 4,81	2391 / 4,89
Samozbijajući beton II [5 %]	2345 / 4,83	2362 / 4,87
Samozbijajući beton III [10 %]	2291 / 4,81	2290 / 4,91
Samozbijajući beton IV [15 %]	2246 / 4,86	2256 / 5,01
Samozbijajući beton V [20 %]	2198 / 4,86	2210 / 4,90

### 2.5. Čvrstoća na savijanje

Ispitivanje čvrstoće na savijanje provedeno je na pet armiranobetonskih greda dimenzija 100 x 150 x 1700 mm, kako je prikazano na slici 7. Grede su podvrgnute ispitivanju na savijanje u četiri točke. Na grede su postavljena tri LVDT senzora u području čistog savijanja. Opterećenje se nanosi u malim prirastima pomoću hidrauličkog čekića i mjeri se vrijednost opterećenja. Tijekom ispitivanja zabilježeno je ponašanje uzoraka u smislu nastajanja pukotina, načina otkazivanja i graničnog opterećenja. Progibi su mjereni pomoću LVDT-a na udaljenosti 750 mm, 500 mm i 375 mm od oslonca. Odnos momenta i maksimalnog progiba grede je glavni kriterij u određivanju ponašanja armiranobetonskih greda pri savijanju. U svakom prirastu opterećenja, vrijednost opterećenja je održavana konstantnom te su bilježene vrijednosti progiba.

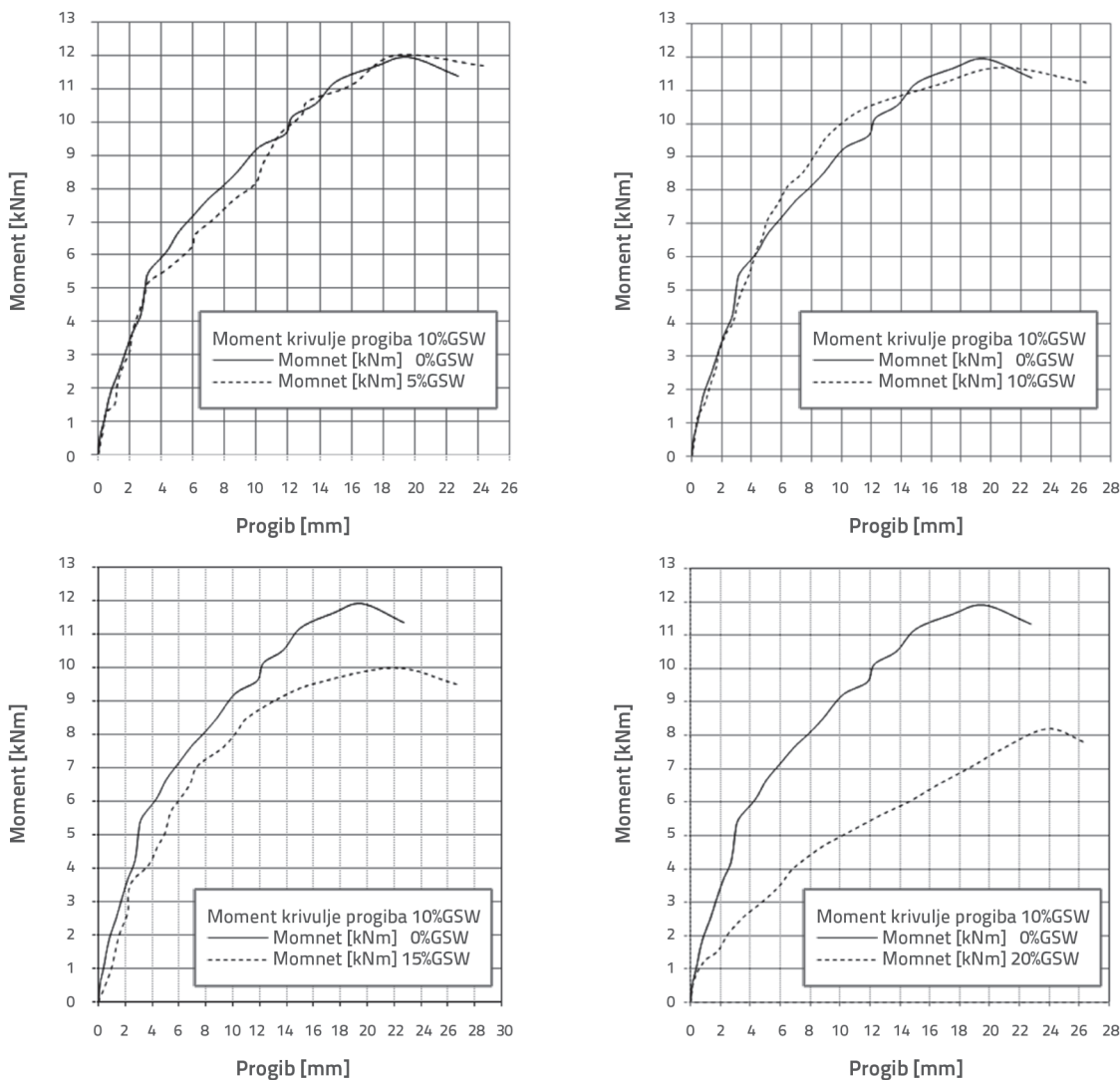
Tablica 7. prikazuje vrijednosti graničnih opterećenja i opterećenja pri pojavi prvih pukotina. Sve grede pokazale su otpornost



Slika 7. Detalji armiranobetonske grede

Tablica 7. Rezultati otpornosti na savijanje

Uzorak	Granično opterećenje (Pu) [kN]	Granična vrijednost progiba na sredini raspona [mm]	Opterećenje pri prvoj pukotini [kN]	Način otkazivanja
Samozbijajući beton I [0 %]	47,73	19,657	18	Savijanje
Samozbijajući beton II [5 %]	48,04	18,847	19	Savijanje
Samozbijajući beton III [10 %]	46,66	20,715	15	Savijanje
Samozbijajući beton IV [15 %]	40,08	22,125	13	Savijanje
Samozbijajući beton V [20 %]	32,89	23,824	12	Savijanje



Slika 8. Krivulje progiba uslijed djelovanja momenta na uzorcima koji sadrže granitnu prašinu

na savijanje. Sve pukotine su bile vertikalne a formiraju se u središnjem području savijanja, u kojemu je moment savijanja konstantan, što pokazuje da je došlo do otkazivanja nosivosti uslijed savijanja. Horizontalne pukotine nisu uočene.

Način otkazivanja i pukotine koje su nastale pokazuju da nije došlo do otkazivanja uslijed gubitka sile prianjanja između armature i betona. Došlo je do popuštanja čelika u vlačnom području nakon čega slijedi drobljenje betona u tlačnom području te dolazi do tipičnog otkazivanja zbog nedostatka nosivosti na savijanje (nedovoljna armatura), pri čemu nema utjecaja granitne prašine.

Nakon opterećenja pri kojemu je došlo do prve pukotine, dolazi do popuštanja armature te pojave većeg broja pukotina u vlačnom području, a s povećanjem opterećenja pukotine napreduju prema točki opterećenja. Pri djelovanju graničnog opterećenja dolazi do drobljenja svih armiranobetonskih greda u tlačnom području. U uzorcima IV i V pojavilo se više pukotina u vlačnoj zoni, što pokazuje da nemaju veliku otpornost na savijanje.

Slika 8. prikazuje rezultate progiba uslijed momenta savijanja armiranobetonskih greda koje sadrže granitnu prašinu. Sa slika se vidi da grede koje sadrže 5 do 10 % granitne prašine imaju sličnu otpornost na savijanje kao i kontrolna armiranobetonska greda koja ne sadrži granitne čestice. Kada udio granitne prašine u betonu prelazi 15 %, smanjuje se krutost armiranobetonske grede.

Duktilnost konstrukcijskog elementa važna je jer predstavlja sposobnost postizanja velikih progiba pod određenim opterećenjima. U ovom eksperimentalnom radu mjerena je duktilnost pomaka, čija je vrijednost dovoljno upozorenje prije pojave pukotina. Duktilnost pomaka predstavlja odnos između ukupnog elastoplastičnog pomaka na granici loma i pomaka na granici plastifikacije. Indeks duktilnosti prikazan je u tablici 8. Prema ispitivačima, njihova vrijednost je u normalnim granicama. Vrijednosti indeksa duktilnosti pokazuju da armiranobetonske grede koje sadrže granitnu prašinu imaju duktilnije ponašanje.



Tablica 8. Momenti i indeks duktilnosti

Uzorak	Teoretski granični moment $M_{u_s}$ [kNm]	Granični moment određen eksperimentalno $M_{u_{exp}}$ [kNm]	$\frac{M_{Control}}{M_{GSW}}$	Indeks duktilnosti
Samozbijajući beton I [0 %]	7,10	11,93	-	2,945
Samozbijajući beton II [5 %]	7,20	12,01	1,0067	3,419
Samozbijajući beton III [10 %]	7,25	11,66	0,9773	3,536
Samozbijajući beton IV [15 %]	7,067	10,02	0,8398	3,588
Samozbijajući beton V [20 %]	6,956	8,22	0,6890	3,591



Slika 9. Ispitivanje armiranobetonske grede

### 3. Zaključak

Rezultati su pokazali da se dobra svojstva deformabilnosti samozbijajuće betonske mješavine mogu dobiti smanjenjem vodovezivnog omjera. Prema mikrostrukturnim rezultatima, čestice granita imaju uglastu strukturu čestica i veliku specifičnu površinu. Stoga imaju tendenciju povećavanja kohezivnosti mješavine, ali joj smanjuju obradljivost. Budući da su čestice letećeg pepela sferičnog oblika, one poboljšavaju obradljivost i povećavaju deformabilnost mješavine. Spoj tih dvaju sastojaka daje bolje obradivu mješavinu. Budući da je vodovezivni omjer konstantan, tečenje betona je jednako za sve mješavine. Granitna prašina sadrži više od 25 % reaktivnog silicijskog

dioksida pa se može djelomično koristiti kao zamjenski materijal za cement. Glavni sastav granitne prašine čine čestice na bazi  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  i  $Fe_2O_3$ , a s obzirom na to da je veličina tih čestica vrlo mala, osiguravaju dobru djelomičnu zamjenu za cement u betonu. Kada je udio granitne prašine kao zamjene za cement do 10 % mase, čvrstoća betona se povećava do 5,83 %. S druge strane, može se koristiti do 15 % granitne prašine u mješavini, a da pri tome ne dođe do gubitka tlačne čvrstoće, zbog odgovarajuće raspodjele veličine čestica i potencijalne pucolanske reakcije. Stalna hidratacija i priroda granitne prašine uzrokuje povećanje gustoće betona nakon 28 dana.

Prisutnost granitne prašine izaziva slabu pucolansku reakciju zbog koje se u početku povećava modul elastičnosti, ali s većom količinom granita u mješavini, modul elastičnosti se smanjuje. Kada je količina granitne prašine veća od 15 %, smanjuje se čvrstoća cementnog morta što uzrokuje smanjenje krutosti armiranobetonskih greda. Ekvivalentno ponašanje pri savijanju uočeno je i onda kada je udio granitne prašine bio do 15 %. Stoga zaključujemo da se granitna prašina može koristiti kao djelomična zamjena za cement.

### Zahvala

Autori zahvaljuju Odjelu za industrijsku kemiju, Sveučilišta Alagappa, Karaikudi (Tamil Nadu) na ustupanju SEM i XRD rezultata. Autori se zahvaljuju TEQIP Faza II, NPIU, New Delhi, na podršci pruženoj Visokoj školi za inženjering i tehnologiju Alagappa Chettiar u svrhu financiranja ovog istraživanja.

### LITERATURA

- [1] Okamura, H., Ouchi, M.: Self Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, 1 (2003) 1, pp. 5–15.
- [2] Goodier, G.: Development of Self compacting Concrete, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings, 156 (2003) SB4, pp. 405–414.
- [3] Wenzhong Z., Bartos, P.: Permeation properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, 33 (2003), pp. 921–926.
- [4] Domone, P.: A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, Cement & Concrete Composites, 29 (2007), pp. 1–12.
- [5] Khayat, K.: Workability, testing and Performance of Self Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 96 (1999) 3.
- [6] Felekoglu, B., Turkel, S., Baradan, B.: Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Building and Environment, 42 (2007), pp. 1795–1802.

- [7] EFNARC, Specification and guidelines for self-compacting concrete, UK, 2002., ISBN 0953973344, pp. 32.
- [8] Torres, P., Fernandes, H., Olhero, S., Ferreira, J.: Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles, *J Eur Ceram Soc*, 29 (2009) 1, pp. 23–30.
- [9] Mota, R., Santos, F., Mateus, A., Marques, F., Goncalves, M., Figueiras, J., et al.: Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys, *J Appl Geophy*, 57 (2004) 1, pp. 11–22.
- [10] Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., Kaplan, H.: Durability of Concrete made with Granite and Marble as recycled aggregates, *Journal of materials Processing Technology*, 208 (2008), pp. 299–308.
- [11] Abukersh, S., Fairfield, C.: Recycled aggregate concrete produced with red Granite dust as a partial cement replacement, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 4088–4094.
- [12] Marmol, I., Ballester, P., Cerro, S., Monros, G., Morales, J., Sanchez, L.: Use of Granite Sludge wastes for the production of coloured cement based mortars, *Cement and Concrete Composites*, 32 (2010), pp. 617–622.
- [13] Acchar, W., Vieira, F., Hotza, D.: Effect of Marble and Granite Sludge in Clay Materials, *Material science and Engineering, A* 419 (2006), pp. 306–309.
- [14] Cuenca, J., Rodríguez, J., Martín-Morales, M., Sánchez-Roldán, Z., Zamorano, M.: Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 40 (2013), pp. 702–709.
- [15] Boukendakdji, O., Kadri, E., Kenai, S.: Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete, *Cement & Concrete Composites*, 34 (2012), pp. 583–590.
- [16] Diederich, P., Mouret, M., Ponchon, F.: Simple tools for achieving self-compacting ability of concrete according to the nature of the limestone filler, *Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 840–852.
- [17] Uysal, M., Yilmaz, K.: Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 33 (2011), pp. 771–776.
- [18] Vijayalakshmi, M., Sekar, A., Ganeshprabhu, G.: Strength and Durability Properties of Concrete made with Granite Industrial Waste, *Construction Building Materials*, 46 (2013), pp. 1–7.
- [19] Leemann, A., Lura, P., Loser, R.: Shrinkage and Creep of SCC-The influence of Paste volume and binder composition, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 2283–2289.
- [20] Khatib, J.: Performance of Self Compacting Concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 1963–1971.
- [21] Roziere, E., Granger, S., Turcry, Ph., Loukili, A.: Influence of Paste Volume on shrinkage cracking and Fracture properties of Self Compacting Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007), pp. 626–636.
- [22] Alyamac, K., Ince, R.: A preliminary Concrete mix Design for SCC with Marble powders, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), pp. 1201–1210.
- [23] Okamura, H., Ozawa, K.: Mix Design for Self-Compacting Concrete, *Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers*, (1995).
- [24] Diederich, P., Mouret, M., Ponchon, F.: Simple tools for achieving self-compacting ability of concrete according to the nature of the limestone filler, *Construction and Building Materials*, 48 (2013), pp. 840–852.
- [25] Felixkala, T., Partheeban, P.: Granite Powder Concrete, *Indian Journal of science and Technology*, 3 (2010) 3, pp. 311–317.
- [26] Brouwers, H., Radix, H.: Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 2116 – 2136.
- [27] Delsye, C., Teo, M., Mannan, A., Kurian, J.: Flexural Behaviour of Reinforced Lightweight Concrete Beams Made with Oil Palm Shell, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (2006) 3, pp. 1–10.
- [28] Neville, A.: *Properties of Concrete*, 4th edition, Longman, London, 1995.
- [29] IS: 5816–1970 Splitting tensile strength of concrete cylinders.
- [30] IS: 516 –1959 Methods of tests for Strength of Concret.