

Primljen / Received: 22.9.2014.  
 Ispravljen / Corrected: 30.11.2014.  
 Prihvaćen / Accepted: 29.12.2014.

Dostupno online / Available online: 10.2.2015.

# Utjecaj sastava mješavine samozbijajućeg betona na robusnost

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Parviz Ghoddousi**, dipl.ing.građ.  
 Iransko sveučilište za znanost i tehnologiju  
 Teheran, Iran  
[Ghoddousi@iust.ac.ir](mailto:Ghoddousi@iust.ac.ir)



**Amir Masoud Salehi**, dipl.ing.građ.  
 Iransko sveučilište za znanost i tehnologiju  
 Teheran, Iran  
[am\\_salehi@iust.ac.ir](mailto:am_salehi@iust.ac.ir)

Prethodno priopćenje

**Parviz Ghoddousi, Amir Masoud Salehi**

## Utjecaj sastava mješavine samozbijajućeg betona na robusnost

U ovom radu prikazan je eksperimentalni program ocjenjivanja robusnosti za četiri različita samozbijajuća betona (eng. Self Compacting Concrete - SCC). Projektirana je kontrolna mješavina te tri serije mješavina s razlikama u osnovnim svojstvima u svježem stanju. Za ocjenu robusnosti u odabranim mješavinama se mijenjala količina vode. Ispitane mješavine su zatim rangirane primjenom metode višeatributnog odlučivanja. Rezultati pokazuju da smanjenje otpornosti na segregaciju i smanjenje sposobnosti zaobilazanja prepreka uzrokuje značajno smanjenje robusnosti samozbijajućih betona.

### Ključne riječi:

samozbijajući beton, robusnost, sastav mješavine, višeatributno odlučivanje

Scientific paper - Preliminary report

**Parviz Ghoddousi, Amir Masoud Salehi**

## Effect of mix proportion on robustness of self-compacting concrete

An experimental program aimed at evaluating robustness of four distinct types of self-compacted concrete (SCC) is presented in this paper. A control mix was designed and three series of mixes were made, with variation of principal fresh mix properties. In order to evaluate robustness, the selected mixes were subjected to variations in water content. The tested mixes were then ranked using the multi-attribute decision making method. The results indicate that the reduction in segregation resistance, and the decrease in the obstacle passing ability, lead to a considerable decrease in robustness of self-compacting concrete.

### Key words:

self-compacting concrete, robustness, mix proportion, multi-attribute decision making

Vorherige Mitteilung

**Parviz Ghoddousi, Amir Masoud Salehi**

## Einfluss der Zusammensetzung selbstverdichtenden Betons auf die Robustheit

In dieser Arbeit wird ein Versuchsprogramm zur Beurteilung der Robustheit vier verschiedener Arten selbstverdichtenden Betons (eng. Self Compacting Concrete - SCC) dargestellt. Eine Kontrollmischung und drei Mischungsserien verschiedener grundlegender Eigenschaften im frischen Zustand sind vorbereitet worden. Um die Robustheit der ausgewählten Mischungen zu bewerten, ist der Wasseranteil variiert worden. Die getesteten Mischungen wurden dann durch Multi-Attribut-Entscheidungen eingestuft. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verringerung der Beständigkeit gegen Segregation und eine reduzierte Fähigkeit der Umgehung von Hindernissen, die Robustheit des selbstverdichtenden Betons bedeutend verringern.

### Schlüsselwörter:

selbstverdichtender Beton, Robustheit, Mischungszusammensetzung, Multi-Attribut-Entscheidungen

## 1. Uvod

Samozbijajući beton (eng. *Self Compacting Concrete* - SCC) jest beton visokih uporabnih svojstava koji ima dobru sposobnost tečenja pod utjecajem vlastite težine, prolaska kroz uske prozore (tj. gusto složene armaturne šipke), punjenja teško dostupnih kutova, pritom zadržavajući homogenost, bez pojave segregacije tijekom i nakon ugradnje. U konačnici se postiže ugradnja bez dodatnog zbijanja. Ukratko, samozbijajući beton trebao bi imati visoku sposobnost tečenja, dobru sposobnost zaobilaženja prepreka, dobru sposobnost punjenja te visoku segregacijsku stabilnost [1-4]. Iako je samozbijajući beton prvi put uporabljen prije gotovo dva desetljeća, njegova primjena je još uvijek ograničena. Razlog tomu je činjenica da svojstva samozbijajućeg betona još nisu u potpunosti istražena, a njegova svojstva su vrlo osjetljiva na male promjene u sastavu mješavine [5-7]. Samozbijajući beton je osjetljiviji na promjene negoli obični beton, zbog kombinacije detaljnih zahtjeva, složenijeg projektiranja sastava betonske mješavine te niske granice tečenja i viskoznosti [5]. Zbog toga neki sastavi mješavina samozbijajućeg betona ne mogu osigurati i odgovarajuću robusnost.

Razni istraživači su predložili različito definiranje robusnosti betona. Primjerice, prema definiciji danoj u propisima RILEM TC 288-MPS [8], robusnost betona je svojstvo betonske mješavine da bude otporna na promjene u svojstvima i količinama sastavnog materijala, zatim na promjene tijekom miješanja, transporta i ugradnje betona, kao i na promjene s obzirom na uvjete okoliša. Međutim, u slučaju samozbijajućeg betona, zbog specifičnih svojstava koje ima u svježem stanju, definicija robusnosti usmjerena je upravo na ta svojstva. Primjerice, Europske smjernice za samozbijajući beton [9] definiraju robusnost kao sposobnost betona da zadrži svoja svojstva u svježem stanju u slučaju malih promjena u količini ili svojstvima sastavnih materijala. Danas se primjenjuje nekoliko metoda za procjenu robusnosti samozbijajućeg betona [10, 11]. Prva metoda predložena je u Europskim smjernicama za samozbijajući beton [9]. Prema toj metodi, u kvalitetno projektiranoj i robusnoj mješavini samozbijajućeg betona može doći do promjene udjela vode u količini od 5 do 10 l/m<sup>3</sup>, a da se pri tome zadrže zahtijevana svojstva određenog razreda. Takva promjena iznosi otprilike +6 %. Slične preporuke dane su za promjenu udjela vode do +6 % od ciljane vrijednosti bez promjene ciljanih (zahtijevanih) svojstava betona, [6]. Prednost ove metode je njezina jednostavnost. Međutim, budući da se ovom metodom procjenjuje samo zadovoljava li mješavina samozbijajućeg betona zahtjeve ispitivanja ili ih ne zadovoljava, robusnost različitih betonskih mješavina ne može se kvantitativno usporediti ovom metodom procjene.

Nunes i suradnici [12, 13] predlažu metodu procjene robusnosti samozbijajućeg betona u smislu učestalosti zadovoljavanja kriterija prihvaćanja samozbijajućeg betona unatoč dnevnim oscilacijama u sastavu. Za primjenu ove metode potreban je faktorski plan projektiranja kako bi se ustanovili empirijski

odnosi između projektiranih parametara mješavine i pokazatelja svojstava korištenjem statističkih jednadžbi odstupanja od eksperimentalnih rezultata. Međutim, nedostatak ove metode jest činjenica da odnos između parametara sastava mješavine i svojstava betona mora biti unaprijed poznat, a to zahtijeva velik broj pokusnih betonskih mješavina.

Na temelju svojih istraživanja pokazuju Kwan i Ng [7, 14] da se dopušteni raspon količine superplastifikatora (eng. *Superplasticizer* - SP), kao i dopušteno rasprostiranje slijeganjem (tj. kada količina superplastifikatora ili rasprostiranja slijeganjem zadovoljavaju svim zahtjevima za samozbijajući beton) mogu uzeti kao kvantitativna mjera robusnosti samozbijajućeg betona. Naji i suradnici [6] su za usporedbu i vrednovanje robusnosti samozbijajućeg betona koristili koeficijent varijacije (eng. *Coefficient of variation* - CV). U osam betonskih mješavina su upotrijebili pijesak s tri različita postotka vlažnosti. Za svaki sastav betona određeno je dvadeset svojstava samozbijajućeg betona. Za svako svojstvo određeno je koeficijent varijacije odgovora (svojstva) dobiven za tri različite vrijednosti vlažnosti pijeska, a taj se koeficijent u konačnici koristio za procjenu relativnog odstupanja svakog odgovora (tj. svojstva). Na temelju koeficijenata varijacije napravljen je poredak betonskih mješavina prema robusnosti.

Projektirana mješavina samozbijajućeg betona može postići bolja svojstva obradljivosti i ekonomičnosti ako se izvedu ciljane promjene u sastavu mješavine. Međutim, te promjene mogu dovesti do problema kao što su promjene u robusnosti samozbijajućeg betona. Drugim riječima, da bi se optimizirao sastav mješavine samozbijajućeg betona, robusnost samozbijajućeg betona se mora promatrati u odnosu na ograničenja obradljivosti i ekonomičnosti. Dakle, glavni cilj ovog rada jest procjena robusnosti samozbijajućeg betona, a za usporedbu robusnosti tih betona predlaže se višeatributno odlučivanje.

## 2. Eksperimentalni program i metode analize

### 2.1. Materijali

U ovom radu za izradu betonskih mješavina primijenjeni su portland cement ASTM tipa 1 i vapnenački prah kao punilo. Kemijski sastav i fizikalna svojstva cementa i vapnenca prikazani su u tablici 1. Drobljeni vapnenac je primijenjen kao krupni agregat s maksimalnom nominalnom veličinom zrna od 19,5 mm. Specifična težina krupnog agregata iznosila je 2,55 %, apsorpcija vode 1,8 %, a izmjerene su u skladu s normom ASTM C127-88 [15]. Za sitni agregat upotrijebljen je pijesak nominalne veličine zrna od 4,75 mm. Specifična težina i apsorpcija vode pijeska iznosile su 2,60 i 3,9 %, a izmjerene su u skladu s normom ASTM C128-88 [16]. Prema istoj normi određen je modul finoće, a iznosio je 3,85. Granulometrija sitnog i krupnog agregata nalazi se unutar dopuštenih granica prema normi ASTM C33 [18]. Također je primijenjena i treća generacija polikarboksilatnih superplastifikatora (smeđa otopina specifične težine 1.1.), koji

poboljšavaju obradljivost betonskih mješavina elektrostatičkim odbijanjem i prostornim smetnjama [19].

Tablica 1. Svojstva cementa i vapnenačkog praha

Sastav	Cement	Vapnenački prah
SiO <sub>2</sub> [%]	20,74	2,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	4,90	0,35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	3,50	0,50
CaO [%]	62,95	51,22
MgO [%]	1,20	1,80
SO <sub>3</sub> [%]	3,00	1,24
LOI [%]	1,56	42,06
SG	3,150	2,660

kratice: LOI - gubitak žarenjem ; SG - specifična težina

## 2.2. Sastav mješavine

Cilj ovog istraživanja bio je ocijeniti robusnost četiriju mješavina samozbijajućeg betona. Kontrolna mješavina koja se smatra "kvalitetnim" samozbijajućim betonom određena je kao početna ciljuna mješavina, a pripravljena je prema metodi ICAR [21]. Tri serije mješavina u kojima su mijenjana osnovna svojstva samozbijajućeg betona, tj. sposobnost punjenja, zaobilaženja prepreka i otpornost na segregaciju, pripravljene su temeljem sljedećih načela. Omjer cementa i praha je smanjen, a količina superplastifikatora je povećana kako bi se povećala sposobnost punjenja kontrolne mješavine (F), bez promjene udjela agregata. Kako bi se smanjila sposobnost zaobilaženja prepreka (P), a zadržao isti sastav morta, volumen krupnog agregata je povećan, a količina superplastifikatora je nešto smanjena. Kako bi se odredio sastav betonske mješavine s modificiranom otpornošću na segregaciju u odnosu na kontrolnu mješavinu, volumen paste je smanjen, a količina vode i superplastifikatora umjereno je povećana [21]. Sastav tih četiriju referentnih mješavina prikazan je u tablici 2.

Kako bi se odredila robusnost svake mješavine, pripravljene su četiri serije mješavina uz referentnu mješavinu. Udio vode svake serije mijenjao se od  $\pm 3$  i  $\pm 6$  % prema osnovnoj količini vode. Primjerice, pripravljeno je pet serija mješavine F, a udio vode u njima je 181,42 (F-6 %), 187,21 (F-3 %), 193 (F), 198,79 (F+3 %) i 204,58 (F+6 %) kg/m<sup>3</sup>.

Tablica 2. Sastav betonskih mješavina

Beton	v/c	Voda	Cement	Vapnenački prah	Sitni agregat	Krupni agregat	Sitni/Ukupni agregat	Superplastifikator [%*]
C	0,5	200	400	175	611	916	0,6	0,64
F	0,483	193	400	175	618	927	0,6	0,75
P	0,5	200	400	175	763	763	0,5	0,58
S	0,514	192,6	375	160	633	949	0,6	0,81

\* Postotak udjela cementa

## 2.3. Postupak miješanja i metode ispitivanja

Svaka mješavina samozbijajućeg betona miješana je u količini od 35 litara u gravitacijskoj miješalici kapaciteta 60 litara. Kako bi se smanjio utjecaj apsorpcije vode agregata na svojstva svježeg samozbijajućeg betona, vlažnost agregata u svakoj seriji bila je jednaka ili veća od one u zasićenom površinski suhom stanju (eng. *Saturated surface dry* - SSD) [21]. Svaka mješavina samozbijajućeg betona je miješana 4 minute, zatim je ostavljena da odstoji jednu minutu.

Određivanje svojstava obradljivosti započelo je pet minuta nakon miješanja cementa i vode. Usporedno s provedbom mjerenja, beton je miješan jednu minutu u intervalima od pet minuta. Svojstva obradljivosti betona određena su pomoću ispitivanja rasprostiranja slijeganjem, T<sub>50'</sub> J-prstenom, V-lijevkom u nultoj i petoj minuti, prema metodama PCI [22] i određivanjem segregacije sijanem, Verzija 2, prema Europskim smjernicama za samozbijajući beton [9]. Da bi se ispitala tlačna čvrstoća, betonska mješavina je ugrađena u dva kockasta kalupa (100 mm) bez nabijanja i vibriranja, tako da je beton u kalup ugrađen vlastitom težinom, tj. samozbijanjem, prema normi BS 1881 [23]. Nakon što su njegovani 24 sata u laboratorijskim uvjetima, pri kontroliranoj temperaturi od 18±2°C, uzorci su izvađeni iz kalupa te su njegovani u kontejneru za njegovanje betona na 20±2°C tijekom 28 dana. Nakon 28 dana, tlačna čvrstoća uzoraka je određena ispitivanjem pomoću hidraulične preše maksimalne nosivosti 2000 kN.

## 2.4. Metode ispitivanja

Robusnost samozbijajućih betona je uspoređena i rangirana primjenom dviju metoda.

### 2.4.1. Koeficijent varijacije

Prema prvoj metodi, koju su predložili Naji i suradnici [6], dobiven je koeficijent varijacije za pet različitih udjela vode u svakoj referentnoj mješavini betona. Ovaj indeks primijenjen je za procjenu relativnog odstupanja svakog odgovora (svojstva). Kako bi se dobio poredak različitih mješavina samozbijajućeg betona na temelju robusnosti, dobivene vrijednosti koeficijenta varijacije su uspoređene i rangirane u silaznom poretku. Najmanja vrijednost koeficijenta varijacije pokazuje najbolju robusnost u svakom

ispitivanju. Naposljetku, konačni poredak dobiven je na temelju zbroja podrangova vrijednosti za sve betone.

#### 2.4.2. Višeatributno odlučivanje

Postupak odlučivanja uključuje niz koraka: identifikaciju problema, definiranje preferencija, procjenu mogućnosti i određivanje najboljih mogućnosti. Odlučivanje je krajnje intuitivno kada se promatraju jednokriterijski problemi, jer treba samo odabrati mogućnost koja ima najbolje rangiranu preferenciju. Međutim, kada se pomoću metoda odlučivanja ocjenjuju mogućnosti s više kriterija, pojavljuju se problemi, kao što su težina kriterija, ovisnost preferencija i sukobi među kriterijima, koji kompliciraju pitanje te je potrebno upotrijebiti sofisticiranije metode [24].

Kako bi se olakšalo sustavno istraživanje u području višekriterijskog odlučivanja (MCDM), Hwang i Yoon su predložili klasifikaciju problema višekriterijskog odlučivanja (MCDM) u dvije glavne kategorije: višeatributno odlučivanje (eng. *Multiple Attribute Decision Making* - MADM) i višeciljno odlučivanje (eng. *Multiple Objective Decision Making* - MODM), koji se koriste za različite namjene i za različite tipove podataka. Višeatributno odlučivanje primjenjuje se u procjeni aspekta koje se obično povezuje s ograničenim brojem predodređenih mogućnosti i diskretnim rangiranjem preferencija [25].

#### Metoda jednostavnog zbrajanja težina

Metoda jednostavnog zbrajanja težina (SAW) vjerojatno je najpoznatija i najprimjenjenija metoda višeatributnog odlučivanja. Ako postoji  $m$  mogućnosti i  $n$  atributa, tada je najbolja mogućnost ona koja zadovoljava (u slučaju maksimizacije) sljedeći izraz:

$$A^* = \left\{ p_i \mid \max_i p_i \mid i = 1, 2, 3, m \right\} \quad (1)$$

i

$$p_i = \sum_{j=1}^m w_j r_{ij} \quad (2)$$

Oznake u tom izrazu predstavljaju sljedeće:  $A^*$  je najbolja mogućnost (u slučaju maksimizacije),  $p_i$  je sintetizirano djelovanje  $i$ -te mogućnosti,  $w_j$  označava težinski faktor  $j$ -tog kriterija,  $r_{ij}$  je normalizirani preferencijalni rang  $i$ -te mogućnosti u uvjetima  $j$ -tog kriterija, a pretpostavka je da su kriteriji neovisni jedan o drugom. Osim toga, normalizirana preferencijalna procjena ( $r_{ij}$ )  $i$ -te mogućnosti s obzirom na  $j$ -ti kriterij može se definirati kao [24]:

- U slučaju kada je bolja veća,  $r_{ij} = (x_{ij} - x_j^-) / (x_j^+ - x_j^-)$ , gdje je  $x_j^+ = \max_i x_{ij}$  i  $x_j^- = \min_i x_{ij}$  ili kada je  $x_j^+$  tražena/poželjna razina, a  $x_j^-$  je najgora razina.
- U slučaju kada je manja bolja,  $r_{ij} = (x_j^- - x_{ij}) / (x_j^- - x_j^+)$ .

Tablica 3. Rezultati ispitivanja

Mješavina	Promjena udjela vode	Rasprostriranje slijeganjem [mm]	$T_{50}$ [s]	J-prsten [mm]	$V_{0min}$ [s]	$V_{5min}$ [s]	Segregacija slijeganjem [%]	Tlačna čvrstoća [MPa]
C	-6 %	570	1,54	1,25	4,28	5,19	7,12	52,1
	-3 %	610	1,39	1	4,1	4,5	8,3	46,8
	0	625	1,43	1,25	3,81	4,31	10,76	46,9
	+3 %	660	1,05	0,01	3,81	4,31	13,66	42,7
	+6 %	730	1,02	2,5	2,69	3,22	19,5	42,6
F	-6 %	670	1,35	4,75	4,88	3,22	16,28	48,3
	-3 %	690	1,4	5	3,91	2,97	15,23	48,0
	0	710	1,45	4,5	4,97	4,32	14	43,4
	+3 %	740	1,17	3,5	2,22	2,63	16,42	43,0
	+6 %	790	1,24	12	2,16	2,45	31,25	40,5
P	-6 %	610	1,31	6,25	4	7,8	10,5	46,4
	-3 %	630	1,3	5	4,16	7,25	10,5	42,1
	0	625	1,09	7,5	1,28	3,16	13,57	39,6
	+3 %	730	1,02	7,5	2,78	4,13	25,79	39,2
	+6 %	775	0,96	13,75	3,38	7,3	37,82	38,5
S	-6 %	580	1,08	3,75	2,4	3,7	13,19	40,5
	-3 %	600	1,07	3,25	1,85	3,13	14,35	36,2
	0	610	1,27	5	1,31	1,84	14,3	33,4
	+3 %	740	0,83	9,5	2,74	5,53	45,63	27,3
	+6 %	770	0,68	12,5	5,85	9,69	63,24	16,4

### 3. Rezultati i analize

Kako bi se dobile referentne mješavine (C, F, P i S), najprije je pripravljena mješavina s odgovarajućim svojstvima betona u svježem stanju (C), a nakon toga su razvijene modificirane mješavine (F, P i S). Zatim je promijenjen udio vode u svakoj mješavini za  $\pm 3\%$  i  $\pm 6\%$ , relativno prema osnovnoj količini vode, kako bi se ocijenila robusnost samozbijajućih betona. Nakon toga su određena svojstva u svježem stanju (navedena u poglavlju 2.4.). Oznake mješavina koje odgovaraju različitom udjelu vode nose naziv po prvom slovu mješavine i postotku vode s predznakom plus ili minus. Primjerice, naziv C+6% odnosi se na mješavinu koja je dobivena na temelju kontrolne mješavine kojoj je udio vode uvećan za 6%. Svojstva mješavina u svježem stanju s različitim udjelima vode prikazana su u tablici 3. Budući da je potrebno provesti više ispitivanja kako bi se odredila svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju, te kako varijacije u tim ispitivanjima nisu sustavne, usporedba promjena pojedinačnih ispitivanja nije korisna za usporedbu robusnosti samozbijajućih betona. Da bi se postigao ovaj cilj, treba primijeniti analitičke metode koje istovremeno uzimaju

u obzir promjene u svim ispitivanjima. Stoga se za usporedbu robusnosti različitih samozbijajućih betona primjenjuju metoda koeficijenta varijacije i višeatributno odlučivanje.

#### 3.1. Analiza koeficijenta varijacije

Koeficijent varijacije (eng. *Coefficient of variation* - CV) odnosi se na statističku mjeru distribucije točaka u nizu podataka oko srednje vrijednosti. Predstavlja omjer standardne devijacije i aritmetičke sredine. Koeficijent varijacije je koristan statistički podatak za usporedbu stupnja varijacije pojedinih serija podataka, iako su velike razlike između njihovih aritmetičkih sredina. Prema tome, metodom koju su predložili Naji i suradnici [6], određene su vrijednosti koeficijenta varijacije za svako ispitivanje različitih samozbijajućih betona, nakon izračuna vrijednosti aritmetičke sredine i standardne devijacije. U sljedećem koraku, različiti samozbijajući betoni poredani su prema vrijednosti koeficijenta varijacije svakog ispitivanja. U tablici 4. prikazani su rezultati ispitivanja. Očito je da manja vrijednost koeficijenta varijacije označava manju raspršenost rezultata, prema tome beton je robusniji u traženom ispitivanju. Podrangovi svakoga ispitivanja

Tablica 4. Statistički rezultati obradljivosti i poredak različitih mješavina u svakom ispitivanju

Test	Parametar	Mješavine			
		C	F	P	S
Rasprostriranje slijeganjem	Srednja vrijednost	639,00	720,00	674,00	660,00
	Standardna devijacija	60,25	46,90	73,77	88,03
	Koeficijent varijacije	9,43 %	6,51 %	10,95 %	13,34 %
	Poredak	2	1	3	4
T <sub>50</sub>	Srednja vrijednost	1,29	1,32	1,14	0,99
	Standardna devijacija	0,24	0,12	0,16	0,23
	Koeficijent varijacije	18,34 %	8,71 %	14,17 %	23,49 %
	Poredak	3	1	2	4
J-prsten	Srednja vrijednost	1,20	3,95	8,00	6,80
	Standardna devijacija	0,89	3,43	3,38	4,03
	Koeficijent varijacije	73,84 %	86,83 %	42,22 %	59,25 %
	Poredak	3	4	1	2
V <sub>0</sub>	Srednja vrijednost	3,74	3,63	3,18	2,83
	Standardna devijacija	0,62	1,38	1,23	1,77
	Koeficijent varijacije	16,56 %	37,96 %	38,69 %	62,68 %
	Poredak	1	2	3	4
V <sub>5</sub>	Srednja vrijednost	4,31	3,12	5,93	4,78
	Standardna devijacija	0,71	0,74	2,12	3,05
	Koeficijent varijacije	16,42 %	23,58 %	35,81 %	63,83 %
	Poredak	1	2	3	4
Segregacija sijanjem	Srednja vrijednost	11,87	18,64	19,64	30,14
	Standardna devijacija	4,95	7,12	11,96	23,04
	Koeficijent varijacije	41,70 %	38,20 %	60,91 %	76,43 %
	Poredak	2	1	3	4

Tablica 5. Poredak samozbijajućih betona po robusnosti primjenom metode koeficijenta varijacije

Beton	Sub-ranking of fresh concrete tests						Zbroj	Poredak po robusnosti
	Rasprostiranje slijeganjem	T <sub>50</sub>	J-prsten	V <sub>0</sub>	V <sub>5</sub>	Segregacija sijanjem		
C	2	3	3	1	1	2	12	2
F	1	1	4	2	2	1	11	1
P	3	2	1	3	3	3	15	3
S	4	4	2	4	4	4	22	4

samozbijajućeg betona u svježem stanju i njihov zbroj prikazani su u tablici 5. Zbroj podrangova za samozbijajuće betone predstavlja glavni indeks za rangiranje prema robusnosti.

Vidimo da je mješavina F na prvom mjestu, a mješavina C je na drugom mjestu. Temeljem ovih rezultata, samozbijajući beton sa smanjenom otpornošću na segregaciju ima najmanju robusnost. Drugim riječima, mješavina S je najosjetljivija od svih mješavina u ovom ispitivanju.

Međutim, primjena metode koeficijenta varijacije dovodi do dvaju problema u rangiranju samozbijajućeg betona po robusnosti. Prvo, da bi se odredio koeficijent varijacije, vrijednost standardne devijacije je podijeljena sa srednjom vrijednošću. Nakon toga, razlike vrijednosti između koeficijenata varijacije se odrede na temelju srednjih vrijednosti. Primjerice, u usporedbi mješavina C i F, a na temelju ispitivanja segregacije sijanjem, može se vidjeti iz standardne devijacije da mješavina C ima minimalne promjene.

Međutim, zbog visoke srednje vrijednosti, mješavina F izložena je manjim promjenama u ispitivanju segregacije sijanjem provedenim na temelju vrijednosti koeficijenta varijacije. Dakle, rangiranje samozbijajućeg betona može biti netočno uslijed podešavanja po srednjoj vrijednosti. Zbog toga se, kako bi se odredilo podrangiranje, eliminira utjecaj razlike između vrijednosti koeficijenata varijacije.

Primjerice, u usporedbi rezultata ispitivanja rasprostiranja slijeganjem i J-prstena, za mješavinu C i F, rezultati mješavine C i F, razlika u podrangu je jedinična. Ali razlike između vrijednosti koeficijenata varijacije su 3 % kod ispitivanja rasprostiranja slijeganjem, i 13 % za J-prsten. Drugim riječima, pretvaranjem vrijednosti koeficijenta varijacije u rang, velike razlike između rezultata ispitivanja se ne mogu uzeti u obzir u konačnom poretku.

Tablica 6. Relativna razlika (RD) rezultata ispitivanja samozbijajućih betona (SCC) s promjenjivim udjelom vode

Ispitivanje	Mješavina "C"				Mješavina "F"				Mješavina "P"				Mješavina "S"			
	-6	-3	+3	+6	-6	-3	+3	+6	-6	-3	+3	+6	-6	-3	+3	+6
SF	0,09	0,02	0,06	0,17	0,06	0,03	0,04	0,11	0,02	0,01	0,17	0,24	0,05	0,02	0,21	0,26
T <sub>50</sub>	0,08	0,03	0,27	0,29	0,07	0,03	0,19	0,14	0,20	0,19	0,06	0,12	0,15	0,16	0,35	0,46
J-prsten	0,00	0,20	0,99	1,00	0,10	0,20	0,40	3,00	0,17	0,33	0,00	0,83	0,25	0,35	0,09	1,50
V <sub>0</sub>	0,12	0,08	0,00	0,29	0,02	0,21	0,55	0,57	2,13	2,25	1,17	1,64	0,83	0,41	1,09	3,47
V <sub>5</sub>	0,20	0,04	0,00	0,25	0,25	0,31	0,39	0,43	1,47	1,29	0,31	1,31	1,01	0,70	2,01	4,27
GTM*	0,34	0,23	0,27	0,81	0,16	0,09	0,17	1,23	0,23	0,23	0,90	1,79	0,08	0,00	2,19	3,42

\* ispitivanje segregacije sijanjem

## 3.2. Višeatributno odlučivanje

Prema navedenome u 3.1, druga metoda koja je primijenjena u ovom istraživanju jest metoda jednostavnog zbrajanja težina (SAW), najjednostavnija i široko primjenjivana metoda višeatributnog odlučivanja.

U prvom koraku, rangiranje samozbijajućih betona po robusnosti se definira kao problem odlučivanja (eng. *Decision Making* - DM). Taj problem se svodi na procjenu razlika između rezultata ispitivanja u mješavinama s promijenjenom i nepromijenjenom količinom vode. Stoga, u ovom slučaju, alternative su referentne mješavine, a kriteriji su razlika između rezultata ispitivanja u slučaju mješavina s promijenjenim udjelom vode i referentnih betona.

Prilikom određivanja kriterija uzimaju se u obzir dva slučaja. U prvom slučaju, vrijednosti kriterija su relativne razlike za usporedbu dviju metoda (koeficijenta varijacije i višeatributnog odlučivanja) i kako bi se odredila valjanost višeatributnog odlučivanja. U drugom slučaju, uzeta je u obzir apsolutna razlika kako bi se dobili točniji rezultati.

### 3.2.1. Relativna razlika ispitivanja

U ovom slučaju, kao vrijednost kriterija uzima se relativna razlika ispitivanja. Dakle, apsolutna vrijednost relativne razlike (eng. *Relative difference* - RD) dobivena je iz sljedeće jednadžbe:

$$RD = \left| \frac{R_{CM} - R_{RM}}{R_{RM}} \right| \quad (3)$$

R<sub>CM</sub> - rezultat ispitivanja mješavine s promijenjenim udjelom vode

R<sub>RM</sub> - rezultat ispitivanja referentne mješavine

RD vrijednosti samozbijajućih betona s različitim udjelom vode prikazane su u tablici 6.



Cilj ovog istraživanja jest usporediti robusnost referentnih samozbijajućih betona. Stoga ukupna RD vrijednost za četiri različita udjela vode (za svako ispitivanje) predstavlja vrijednost kriterija. Matrica procjene robusnosti je prikazana u tablici 7. U toj tablici su kriteriji rasprostiranje slijeganjem,  $T_{50}$ , J-prsten,  $V_0$ ,  $V_5$  te ispitivanje segregacije sijanjem prikazani oznakama  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$  i  $X_6$ .

Tablica 7. Matrica procjene robusnosti samozbijajućih betona

Mješavina	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
C	0,34	0,66	2,19	0,50	0,49	1,65
F	0,24	0,44	3,70	1,39	1,35	1,66
P	0,44	0,58	1,33	4,38	7,19	3,14
S	0,54	1,12	3,00	7,98	5,80	5,69

Potrebno je rangirati normalizirane preferencije kako bi se ljestvica transformirala u  $[0, 1]$ . Tablica 8. prikazuje normalizirani kriterij odlučivanja u različitim mogućnostima.

Tablica 8. Normalizirana matrica procjene robusnosti samozbijajućih betona

Mješavina	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
C	0,32	0,32	0,36	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	1,00	0,12	0,13	0,00
P	0,67	0,20	0,00	0,52	1,00	0,37
S	1,00	1,00	0,70	1,00	0,79	1,00

Problem odlučivanja (eng. *Decision Making Problem* - DM) uključen je u raznim kriterijima (ispitivanja samozbijajućeg betona u svježem stanju), stoga je nužno poznavati težinu svakog kriterija. Težina kriterija se odnosi na njegovu relativnu važnost u odnosu na druge kriterije. Budući da želimo dobiti rezultate koje je moguće usporediti s onima dobivenima metodom koeficijenta varijacije, a navedeni samozbijajući betoni ne zahtijevaju specifičnu primjenu, težina svih kriterija je jednaka te je prikazana u sljedećoj matrici:

$$w_j = [1/6 \ 1/6 \ 1/6 \ 1/6 \ 1/6 \ 1/6] \quad (4)$$

Tablica 10. Apsolutna razlika (AD) rezultata ispitivanja samozbijajućih betona s različitim udjelima vode

Ispitivanje	Mješavina "C"				Mješavina "F"				Mješavina "P"				Mješavina "S"			
	-6	-3	+3	+6	-6	-3	+3	+6	-6	-3	+3	+6	-6	-3	+3	+6
SF	55	15	35	105	40	20	30	80	15	5	105	150	30	10	130	160
$T_{50}$	0,11	0,04	0,38	0,41	0,10	0,05	0,28	0,21	0,22	0,21	0,07	0,13	0,19	0,20	0,44	0,59
J-prsten	0,00	0,25	1,24	1,25	0,25	0,50	1,00	7,50	1,25	2,5	0,00	6,25	1,25	1,75	4,5	7,5
$V_0$	0,47	0,29	0,00	1,12	0,09	1,06	2,75	2,81	2,72	2,88	1,50	2,10	1,09	0,54	1,43	4,54
$V_5$	0,88	0,19	0,00	1,09	1,10	1,35	1,69	1,87	4,64	4,09	0,97	4,14	1,86	1,29	3,69	7,85
GTM*	0,34	0,23	0,27	0,81	0,16	0,09	0,17	1,23	0,23	0,23	0,90	1,79	0,08	0,00	2,19	3,42

\* ispitivanje segregacije sijanjem

Dakle, sintetizirano svojstvo samozbijajućih betona, što je oznaka rangiranja prema robusnosti, dobiveno je pomoću jednadžbe 2. Tablica 9. prikazuje sintetizirano svojstvo i poredak samozbijajućih betona prema robusnosti. Što je manja vrijednost sintetiziranih svojstava, manja je razlika između rezultata ispitivanja pa takav samozbijajući beton ima veću robusnost.

Tablica 9. Sintetizirano svojstvo samozbijajućeg betona za rangiranje prema robusnosti

Mješavina	Sintetizirana svojstva [%]	Poredak
C	17	1
F	21	2
P	46	3
S	92	4

Usporedba rezultata dobivenih metodama koeficijenta varijacije i jednostavnog zbrajanja težina (CV i SAW) pokazuje da se poredak mješavina B i F zamijenio. Uzrok je tomu što razlike između rezultata ispitivanja u metodi jednostavnog zbrajanja težina (SAW) nisu izuzete.

### 3.2.2. Apsolutna razlika rezultata ispitivanja

Apsolutna razlika (eng. *Absolute difference* - AD) rezultata ispitivanja je precizniji kriterij od relativne razlike. To je zbog činjenice da, na primjer, razlika od 50 mm kod ispitivanja rasprostiranja slijeganjem samozbijajućeg betona s početnom vrijednošću od 600 mm može biti jednako kritična kao za samozbijajući beton s početnom vrijednošću ispitivanja istog svojstva od 700 mm. Ali u slučaju relativne razlike, kod razlike u rasprostiranju slijeganjem od 50 mm određene su vrijednosti od 0,083 za samozbijajuće betone s početnim rasprostiranjem slijeganjem od 600 mm i 0,071 za 700 mm.

Dakle, u ovom poglavlju, problem procjene robusnosti samozbijajućeg betona je riješen primjenom metode jednostavnog zbrajanja težina koja se temelji na apsolutnoj razlici, jednadžba (5). Postupak određivanja sintetiziranog svojstva je isti, kako je objašnjeno u prethodnom poglavlju.

Rezultati dobiveni u različitim fazama ispitivanja prikazani su u tablicama 10. do 12., a matrica težine kriterija je ista kao

jednadžba 4. Konačno, rangiranje samozbijajućih betona prema robusnosti je određeno pomoću sintetiziranog svojstva, a rezultati su prikazani u tablici 13.

$$AD = |R_{CM} - R_{RM}| \quad (5)$$

$R_{CM}$  - rezultat ispitivanja mješavine s promijenjenim udjelom vode

$R_{RM}$  - rezultat ispitivanja referentne mješavine

Rangiranje dobiveno preko apsolutne razlike je slično onom dobivenom preko relativne razlike, što se može vidjeti u tablici 13. Međutim, treba uzeti u obzir da je veća razlika između sintetiziranih svojstava u ovom slučaju (AD vrijednost) i RD vrijednosti. Zbog nedostatka podešavanja u ispitivanju, razlike su realističnije.

Tablica 11. Matrica procjene robusnosti (AD) samozbijajućeg betona

Mješavina	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
C	210,00	0,94	1,88	2,16	2,74	17,74
F	170,00	0,64	6,71	6,01	9,25	23,18
P	275,00	0,63	9,20	13,84	10,00	42,61
S	330,00	1,42	7,60	14,69	15,00	81,43

Tablica 12. Normalizirana matrica procjene robusnosti (AD) samozbijajućeg betona

Mješavina	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
C	0,25	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,01	0,66	0,31	0,53	0,09
P	0,66	0,00	1,00	0,93	0,59	0,39
S	1,00	1,00	0,78	1,00	1,00	1,00

Tablica 13. Sintetizirana svojstva samozbijajućeg betona za procjenu robusnosti

Mješavina	Sintetizirana svojstva [%]	Poredak
C	11	1
F	27	2
P	60	3
S	96	4

### 3.3. Robusnost samozbijajućeg betona pod utjecajem proporcionalnosti mješavine

Kao što je navedeno u poglavlju 2.2, mješavine F, P i S su pripremljene kako bi se usporedila njihova posebna svojstva u odnosu na mješavinu C. Mješavina F je pripremljena kako bi se ispitaio utjecaj povećanja sposobnosti punjenja na robusnost betona. S druge strane, da bi se ispitaio utjecaj smanjenja sposobnosti zaobilaženja prepreka, pripremljena je mješavina P, a da se ispita utjecaj otpornosti na segregaciju, pripremljena je mješavina S.

Cilj je ovog rada procijeniti promjene robusnosti uslijed malih promjena u sastavu mješavine koja može drastično promijeniti svojstva samozbijajućih betona u svježem stanju.

Rezultati ovog istraživanja pokazali su da smanjenje otpornosti na segregaciju uslijed smanjenja količine praškastih materijala u mješavini uzrokuje veliko smanjenje robusnosti betona. Zatim, smanjenje sposobnosti zaobilaženja prepreka povećanjem količine krupnog agregata zapravo uzrokuje smanjenu robusnost. Također, osjetljivost mješavine F se blago povećavala zahvaljujući povećanju sposobnosti punjenja, bez povećavanja količine praha u mješavini. Stoga je prilikom određivanja sastava mješavine samozbijajućeg betona moguće optimizirati osnovne omjere u mješavini tako da se ispune zahtjevi obradljivosti i ekonomičnosti, što se postiže ciljanim promjenama u omjerima mješavine, ali te promjene mogu utjecati na robusnost (osjetljivost) betona. Primjerice, prema rezultatima različitih istraživanja te prema ovom istraživanju, smanjenjem količine praškastih materijala kojim će se vjerojatno dobiti ekonomičnija mješavina, smanjuje se robusnost betona. Stoga se robusnost obavezno treba uzeti u obzir prilikom optimiziranja sastava mješavine samozbijajućeg betona.

## 4. Zaključak

U ovom istraživanju, primjenom manjih promjena u omjerima sastavnih materijala mješavine kvalitetnog samozbijajućeg betona (C) dobivene su tri različite mješavine: mješavina F s povećanom sposobnosti punjenja, mješavina P sa smanjenom sposobnosti zaobilaženja prepreka te mješavina S sa smanjenom otpornosti na segregaciju. Uspoređivanjem robusnosti mješavina samozbijajućeg betona pomoću različitih metoda možemo zaključiti sljedeće:

1. Usporedba robusnosti (ili osjetljivosti) betona u pojedinačnim ispitivanjima nije primjenjiva za cjelokupnu usporedbu robusnosti betona. Zbog toga se u ovom istraživanju predlaže metoda višeatributnog odlučivanja, kao odgovarajuća metoda prema kojoj se uspoređuje robusnost samozbijajućeg betona.
2. Rezultati procjene robusnosti dobiveni višeatributnim odlučivanjem pokazali su da beton sa smanjenom otpornosti na segregaciju ima i najmanju robusnost. Također, beton sa smanjenom sposobnošću zaobilaženja prepreka je osjetljiviji nego beton s povećanom sposobnošću punjenja.
3. Metoda višeatributnog odlučivanja uzima u obzir različite kriterije s različitim jedinicama, uključujući i kvalitativni kriterij, stoga omogućuje uporabu različitih ispitivanja samozbijajućeg betona u procjeni robusnosti.
4. Svojstvo višeatributnog odlučivanja je i mogućnost dodjeljivanja težine svakom kriteriju što omogućuje istraživanje robusnosti samozbijajućeg betona za specifične primjene.
5. Prema svojstvima višeatributnog odlučivanja (MADM), višeciljna optimizacija može se temeljiti na kriterijima obradljivosti, ekonomičnosti i robusnosti.



## LITERATURA

- [1] Skarendhal, A., Billberg, P.: Casting of Self Compacting Concrete, *final report of RILEM technical committee 188-CSC*, 2006.
- [2] ACI Committee 237. ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete, *Farmington Hills (USA): American Concrete Institute*; 2007.
- [3] Khayat, K., Workability, Testing and Performance of Self-Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*, 1999, Vol. 96, pp. 346-353.
- [4] Hwang, S., Khayat, K.: Performance of Hardened Self-Consolidating Concrete Designated for Repair Applications, *ACI SP-233*, 2006.
- [5] Bonen, D., Deshapande, Y., Olek, J., Shen, L., Struble, D., Lange, D., Khayat, K.: Robustness of Self-Consolidating Concrete, *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 2007.
- [6] Naji, S., Hwang, S., Khayat, K.: Robustness of Self-Consolidating Concrete Incorporating Different Viscosity-Enhancing Admixture, *ACI materials journal*, 2011.
- [7] Kwan, A., Ng, I.: Improving Performance and Robustness of SCC by Adding Supplementary Cementitious Materials, *Construction and Building Materials*, 2010, pp. 2260-2266, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.030>
- [8] Khayat, K., De Schutter, G.: Mechanical properties of self-compacting concrete, *State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 228-MPS*, RILEM Publications, 2013.
- [9] BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, and ERMCO.: The European Guidelines for Self-compacting Concrete. Specification, Production and Use., 2005.
- [10] Rigueira, J., García-Taengua, E., Serna-Ros, P.: Self-Consolidating Concrete Robustness in Continuous Production Regarding Fresh and Hardened State Properties, *ACI Materials Journal*, 2009, Vol. 106, pp. 301-307.
- [11] Gettu, R., Shareef, S., Ernest, K.: Evaluation of the Robustness of SCC, *Indian Concrete Journal*, 2009, Vol. 83, pp. 13-19.
- [12] Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P., Coutinho, J., Figueiras, J.: A Methodology to Assess Robustness of SCC Mixtures, *Cement and Concrete Research*, 2006, pp. 2115-2122, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.003>
- [13] Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P., Coutinho, J.: Robust SCC Mixes through Mix-Design, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012.
- [14] Kwan, A., Ng, I.: Optimum superplasticiser dosage and aggregate proportions for SCC, *Mag Concr Res* 2009, pp. 281-292, doi: <http://dx.doi.org/10.1680/mac.2008.00010>
- [15] ASTM C127-88, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate; American Society for Testing and Materials; 2001.
- [16] ASTM C 128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate; 2012.
- [17] ASTM C136-06, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates; 2006.
- [18] ASTM C33 / C33M-13, Standard Specification for Concrete Aggregates; 2013
- [19] Newman, J., Choo, B.: *Advanced Concrete Technology 1*, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [20] Koehler, E., Fowler, D.: ICAR Mixture Proportioning Procedure for Self-Consolidating Concrete; *RESEARCH REPORT ICAR 108-1*, 2007.
- [21] ACM Centre, Measurement of Properties of Fresh Self-Compacting Concrete, *TESTING SCC-Project Co-Ordinator*, University of Paisley, UK, 2005.
- [22] PCI. Interim guidelines for the use of self-consolidating concrete in precast/prestressed concrete institute plants (TR-6-03). Chicago (IL): Precast/Prestressed Concrete Institute; 2003.
- [23] BS Standard 1881: Part 116. Standard test method for compressive strength of cubic concrete specimens: British Standards Institution.
- [24] Tzeng, G., Huang, J.: Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, *CRC press*, 2011.
- [25] Triantaphyllou, E.: Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study, *Springer science+Business media Dordrecht*, 2000.