

Primljen / Received: 19.3.2021.

Ispravljen / Corrected: 27.2.2023.

Prihvaćen / Accepted: 20.12.2023.

Dostupno online / Available online: 10.3.2024.

# Disperzivno armirani beton: korelacije između sastava, strukture i svojstava

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Marin Amareanu**, dipl.ing.kem.  
Tehničko sveučilište za graditeljstvo  
Fakultet za željeznice, ceste i mostove  
Bukurešt, Rumunjska  
[mirel.amareanu@utcb.ro](mailto:mirel.amareanu@utcb.ro)



Izv.prof.dr.sc. **Larisa Melita**, dipl.ing.stroj.  
Tehničko sveučilište za graditeljstvo  
Fakultet za željeznice, ceste i mostove  
Bukurešt, Rumunjska  
[larisa.melita@utcb.ro](mailto:larisa.melita@utcb.ro)

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Marin Amareanu, Larisa Melita**

## Disperzivno armirani beton: korelacije između sastava, strukture i svojstava

U ovom radu istraživana je utjecaj čeličnih vlakana na fizikalna i mehanička svojstva disperzivno armiranog betona s dodacima. Konačni cilj je stvaranje i dobivanje betona visokih uporabnih svojstava. Mehanička čvrstoća nije uvijek primarni uvjet kod visokokvalitetnog betona. Međutim, trajnost betona koja je osigurana kroz vrlo nisku propusnost i otpornost na agresivno okruženje može voditi do betona visokih uporabnih svojstava. Za pripremu betona korišten je leteći pepeo, granulirana zgora iz visokih peći i silicijska prašina, a za disperzivnu armaturu čelična vlakna. Učinci ovih dodataka i prisutnost čeličnih vlakana koriste se za povećanje duktilnosti betona, njegovu sposobnost apsorpcije energije (za povećanje mehaničke čvrstoće) i poboljšanje opće trajnosti betona.

### Ključne riječi:

sastav betona, disperzivno armirani beton, čelična vlakna, mehanička čvrstoća

Research Paper

**Marin Amareanu, Larisa Melita**

## Disperse reinforced concrete: composition-structure-properties correlations

This study focuses on the influence of metal fibres on the physical and mechanical properties of dispersed reinforced concrete with additions. The final aim is to design and obtain high-performance concrete. Mechanical strength is not always the primary requisite imposed on high-quality concrete. However, the durability provided by very low permeability and aggressive environment resistance can lead to high-performance concrete. Fly ash, granulated blast-furnace slag, and microsilica were used for concrete preparation, and metal fibres were used for disperse reinforcement. The effects of these additions and the presence of steel fibres are used to increase concrete ductility, its ability to absorb energy (to increase mechanical strength), and the improvement of general durability.

### Key words:

concrete composition, dispersed reinforced concrete, metal fibers, mechanical strengths

## 1. Uvod

Disperzivno armirani beton definira se kao beton izrađen od hidrauličkog cementa sa sitnim ili krupnim agregatima i diskontinuiranim vlaknima [1] ili beton izrađen od hidrauličkog cementa s agregatoma različitih veličina ili bez njega, koji uključuje uglavnom diskontinuirana vlaknasta ojačanja [2]. U Rumunjskoj se disperzivno armirani beton s čeličnim vlaknima (BFM) definira kao materijal dobiven miješanjem cementa, agregata, čeličnih vlakana, aditiva, mineralnih dodataka i vode u unaprijed određenim omjerima, čija se svojstva poprimaju hidratacijom cementa i očvršćivanjem te međudjelovanjem između čeličnih vlakana i matrice [3].

Mnogi su znanstvenici istraživali učinke mineralnih dodataka ili čeličnih vlakana u betonskim konstrukcijama [4-10]. Međutim, malo je radova u kojima se kvantitativno istraživao kumulativni učinak disperzivne armature i utjecaj aditiva na strukturu i svojstva betona [11-13].

S obzirom na vrhunska svojstva disperzivno armiranog betona u usporedbi s konvencionalnim betonom, uporaba raznih dodataka i čeličnih vlakana može biti opravdana za poboljšanje sastava i strukture betona bez utjecaja na svojstva ojačanja.

Glavni je cilj ovog istraživanja dobiti beton visokih uporabnih svojstava promjenama sastava i strukture te disperzijom armature. Istraživanje je usmjereno na dobivanje betona s homogenim cementom (CEM I 42.5) i različitim dodacima letećeg pepela, granulirane zgure iz visokih peći i silicijske prašine. Potom se proučavao utjecaj tih dodataka na procese hidratacije-hidrolize cementa. Stoga postoji očita paralela

između sposobnosti komponenata u sustavu cementa-dodataka za međudjelovanje s vodom i njihove sposobnosti da razviju mehaničku čvrstoću nakon očvršćivanja. Također je proučavan utjecaj disperzivne armature na fizikalna i mehanička svojstva betona.

Uloga mikroarmiranja u konvencionalnom ili klasičnom armiranom betonu ističe se kontrolom raspucavanja presjeka, čime se poboljšavaju mehanička čvrstoća i svojstva apsorpcije energije, otpornosti na udarce, otpornosti na habanje, otpornosti na visoke temperature, skupljanja i trajnosti. Osim toga, vrijednosti tangencijalnog naprezanja adhezije između vlakna i matrice izračunane su iz pojave prvih vidljivih pukotina u graničnom stanju, a vrijednosti modula elastičnosti određene su primjenom različitih matematičkih modela. Ti su rezultati uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima.

## 2. Eksperiment

U ovom su istraživanju izvršene promjene sastava ispitivanog betona kako bi se postigli predloženi ciljevi dodavanjem zgure, letećeg pepela i silicijske prašine.

### 2.1. Materijali

Za pripremu betona korišten je cement CEM I 42.5, a dodana je zgura iz visokih peći, leteći pepeo i silicijska prašina. Kemijska i fizikalna svojstva CEM I 42.5 prikazana su u tablici 1., a kemijski sastavi dodataka [14] prikazani su u tablici 2.

Tablica 1. Fizikalno-kemijska svojstva cementa CEM I 42.5

CEM I 42.5 R	Kemijski sastav [%]											
	LOI	CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	R <sub>ins</sub>	Bez CaO	
	2,11	63,72	20,13	3,09	4,49	3,28	2,35	0,30	0,91	0,20	0,90	
	Mineraloški sastav [%]											
	C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S			C <sub>3</sub> A			C <sub>4</sub> AF			
	67,18		11,768			6,355			9,97			
	Fizikalna svojstva											
	Specifična površina [cm <sup>2</sup> /g]			Postojanost volumena [mm]				Vrijeme vezivanja [min.]				
	3198			0,0				početak		kraj		
								165		230		

Tablica 2. Kemijski sastav korištenih dodataka

Kemijski sastav	Dodaci [masa %]	Zgura	Leteći pepeo	Silicijska prašina
LOI		3,56	3,08	2,85
SiO <sub>2</sub>		34,23	56,24	87,88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		11,01	22,44	2,96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1,00	8,03	1,69
CaO		42,78	5,65	2,36
MgO		3,99	0,00	0,00
SO <sub>3</sub>		0,33	1,33	0,94
Na <sub>2</sub> O		0,81	0,56	0,21
K <sub>2</sub> O		0,81	2,22	0,79
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,83	0,00	0,00
Netopivi ostatak HCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		1,05	0,00	0,00
Reaktivni SiO <sub>2</sub>		u.d.	52,04	u.d.

Tablica 3. Glavne fizikalne karakteristike korištenih dodataka

Korišteni dodaci	Zgura	Leteći pepeo	Silicijska prašina
Vlaga [%]	13,54	0,05	0,00
Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	2,78	1,75	2,24
Volumenska težina [kg/m <sup>3</sup> ]	750,2	650	

Tablica 4. Kemijski moduli za granuliranu zguru iz visokih peći

Značajke	Granulirana zgura iz visokih peći	Traženi uvjeti po SR EN 197-1
Kemijski moduli		
% (CaO + SiO <sub>2</sub> + MgO)	79,95	min. 66
% (CaO + MgO) / SiO <sub>2</sub>	1,41	min. 1,0

Tablica 5. Svojstva korištenog čeličnog vlakna

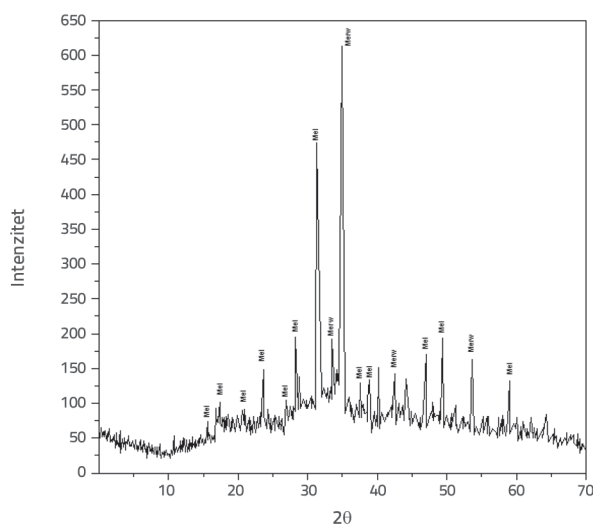
Vrsta vlakna	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Duljina [mm]	Omjer izgleda [lf/df]*
Valovito vlakno	7,8	2500	200	50	60

Ostala svojstva dodataka prikazana su u tablicama 3. i 4., odnosno slikama 1., 2. i 3. Svojstva čeličnih vlakana koja se koriste za armiranje betona navedena su u tablici 5.

Dodaci su zajedno s cementom dodani tijekom pripreme betona. Leteći pepeo, granulirana zgura iz visokih peći i silicijska prašina su materijali koji, u kombinaciji s bijelim cementom, razvijaju svojstva očvršćivanja betona svojim hidrauličkim utjecajem, pucolanskom aktivnošću ili oboje.

### 2.1.1. Granulirana zgura iz visokih peći

Zgura je kemijski analizirana [15], a njezin kemijski sastav naveden je u tablici 2. Kemijski moduli su izračunani na temelju kemijskog sastava. Dobivene vrijednosti navedene su u tablici 4. i uspoređene sa zahtjevima [16].



Slika 1. XRD analiza uzorka troske

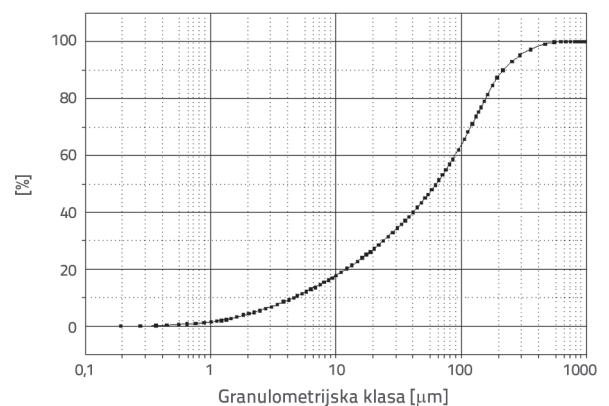
Iz podataka prikazanih u tablici 4., korištena zgura bila je unutar uvjeta prihvatljivosti koje propisuje norma SR EN 197-1.

U mineraloškom smislu, rendgenska difrakcijska analiza uzorka zgure, prikazana na slici 1., pokazala je prisutnost melilitnih (Mel) i mervinitnih (Merw) spojeva kao većine kristalnih faza.

Osim toga, rendgenska difrakcijska analiza pokazala je da uzorak granulirane zgure sadrži 70 % amorfne faze, što je više od vrijednosti za ovu vrstu materijala. Dakle, u vezi s udjelom amorfne faze (staklasta) analizirana granulirana zgura udovoljava zahtjevima norme SR EN 197-1.

### 2.1.2. Leteći pepeo

Pepeo je dobiven iz termoelektreane Govora, Rumunjska, opremljene sustavom za suhi prihvati. Analizirana su fizikalna i kemijska svojstva uzoraka. Raspodjela veličine čestica prikazana je kao granulometrijska krivulja na slici 2.



Slika 2. Raspodjela veličine granulacije za uzorak pepela iz Govore

Što se tiče letećeg pepela, iz podataka prikazanih u tablici 2, može se reći da:

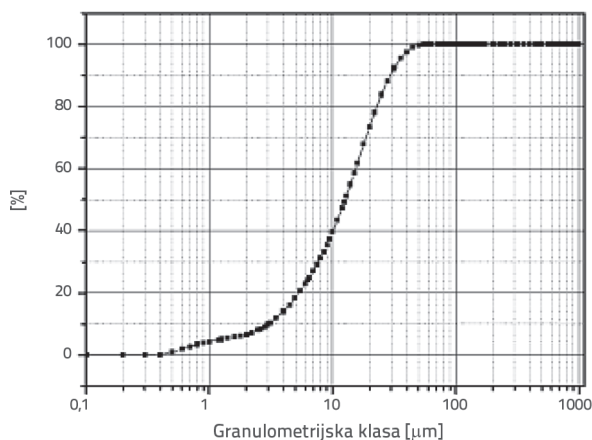
- leteći pepeo iz Govore u potpunosti je udovoljavao uvjetima propisanim u SR EN 197-1;

- uzorak pepela bio je silicijev dioksid-aluminij tip, u kojem je zbroj ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pucolanskih oksida bio veći od 70 %.

### 2.1.3. Silicijska prašina

Granulometrijske karakteristike upotrijebljenog silicijevog dioksida prikazane su na slici 3.

Silicijska prašina ima vrlo izraženu finoću (Blaineova specifična površina  $\approx 23750 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) [17] koja proizlazi iz distribucije veličine čestica; udio čestica ispod  $50 \mu\text{m}$  je  $\approx 99 \%$ .



Slika 3. Raspodjela veličine granulacije za uzorak silicijske prašine

Podaci prikazani u tablici 2., koji se odnose na silicijsku prašinu, pokazuju da:

- gubitak žarenjem ispod je dopuštenog maksimuma od 4 %;
- zbroj pucolanskih oksida  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  bio je  $\approx 92 \%$ , što upućuje na izvrsnu reaktivnost materijala.

### 2.1.4. Čelična vlakna

Svojstva upotrijebljenih čeličnih vlakana navedena su u tablici 5, a njihovi oblici prikazani su na slici 4.



Slika 4. Valovita vlakna

## 2.2. Uvjeti i postupak eksperimenta. Metode izračuna

Za pripremu betona sa zgurom, letećim pepelom i silicijskom prašinom razmatran je sljedeći sastav:

- omjer voda / cement,  $v/c \approx 0,4$
- masa cementa,  $450 \text{ kg}/\text{m}^3$
- dodatak (zgura, leteći pepeo i silicijska prašina), 20 % u odnosu na masu cementa
- udio mikroarmature, 2 %
- superplastifikator (SP) Glenium 27 BASF, 1 % u odnosu na masu cementa
- otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, 100
- uvučeni zrak, 2 %
- frakcije riječnih agregata, (0-4) 52 % te (4-8) 48 %.

Potrebne količine za dobivanje kubnog metra betona prikazane su u tablici 6. Sve vrste pripremljenog betona su armirane disperzivno. Izrađene su šarže betona u potrebnim količinama prema tablici 6., kako bi volumen betona bio dovoljan za izradu tri uzorka oblika prizme ( $10 \times 10 \times 55 \text{ cm}$ ) za svaku vrstu dobivenog betona: konvencionalnog i disperzivno armiranog. Za sve mješavine provedena su ispitivanja mehaničke čvrstoće na tri uzorka oblika prizme. Svaki je uzorak pripremljen upotrebom gore navedenih materijala s konstantnim vodocementnim omjerom od 0,4. Čvrstoća na savijanje  $f_f$  određena je za sve prizme, a tlačna čvrstoća  $f_c$  za "glave" prizme.

Uzorci oblika prizme za određivanje mehaničke čvrstoće prema normi SR EN 12390-4:2002 - Ispitivanje očvrstulog betona. Dio 4: Tlačna čvrstoća i normi SR EN 12390-5:2019 - Ispitivanje očvrstulog betona. Dio 5: Čvrstoća na savijanje ispitnih uzoraka njegovani su na zraku 7, 14 i 28 dana. Varijacije mehaničke čvrstoće disperzivno armiranog betona u usporedbi s konvencionalnim betonom izračunane su pomoću izraza (1).

$$f = \frac{f_{\text{armirani}} - f_{\text{konvencionalni}}}{f_{\text{armirani}}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

gdje su:

- $f_{\text{armirani}}$  - mehanička čvrstoća ( $f_r, f_c$ ) uzoraka armiranog betona
- $f_{\text{konvencionalni}}$  - mehanička čvrstoća ( $f_r, f_c$ ) uzoraka konvencionalnog betona.

Prema Thomanu i Raederu [18] i drugim istraživačima [19-27], modul elastičnosti kao nagib tangente na krivulju naprezanja i deformacije određen je pod jednoosnim naprezanjem i izračunan je na 25 posto od maksimalne vrijednosti naprezanja. Modul elastičnosti izračunan je prema izrazu (2).

U ovom istraživanju dobivena je krivulja naprezanja i deformacije ispitivanog betona pod aksijalnim tlačnim naprezanjem. Ispitivanja su provedena na cilindričnim uzorcima (promjera  $\phi = 150 \text{ mm}$  i visine  $h = 300 \text{ mm}$ ) na univerzalnom ispitnom stroju Advantest 9 CONTROLS sljedećih karakteristika: područje rada: 3000 kN, namjena: tlačna čvrstoća, modul elastičnosti betona, točnost - 0,1 kN. Za beton normalne volumenske mase uočena je korelacija između modula elastičnosti,  $E_c$ , i tlačne čvrstoće,  $f_c'$  [26] i prikazana je ovakav:

$$E_c = 3320 \times \sqrt{f_c'} + 6900 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

i to za:  $21 \text{ MPa} < f_c' < 83 \text{ [MPa]}$ .

Tablica 6. Materijali za m<sup>3</sup> betona s dodacima zgre, pepela i silicijske prašine

Sastav	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Omjer vode/veziva	Omjer vode/cementa	Dodatak superplastifikatora [L]	Agregati		Zgura [kg]	Leteći pepeo [kg]	Silicijska prašina [kg]	Čelična vlakna [kg]	Proračunata gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]
					(0-4)	(4-8)					
<b>I. Referentni beton</b>											
1. Konvencionalni beton	450	0,4	0,4	4,5	944	872					2446
2. Disperzivno armirani beton	450	0,4	0,4	4,5	944	872				157	2603
<b>II. Beton sa zgurom</b>											
1. Konvencionalni beton	450	0,34	0,4	4,5	899	829	90				2448
2. Disperzivno armirani beton	450	0,34	0,4	4,5	899	829	90			157	2605
<b>III. Beton s letećim pepelom</b>											
1. Konvencionalni beton	450	0,34	0,4	4,5	872	805		90			2397
2. Disperzivno armirani beton	450	0,34	0,4	4,5	872	805		90		157	2554
<b>IV. Beton sa silicijskom prašinom</b>											
1. Konvencionalni beton	450	0,34	0,4	4,5	938	767			90		2425
2. Disperzivno armirani beton	450	0,34	0,4	4,5	938	767			90	157	2582

Tangencijalno naprezanje veze između vlakna i matrice izračunano je pomoću jednadžbi predloženih u [28-30]. Za armirane elemente s disperziranim vlaknima izloženim savijanju, vlačna čvrstoća na savijanje kompozitnog materijala  $f_{tf}^f$  može se izraziti kao

$$f_{tf}^f = A \cdot (1 - \mu) \cdot f_{tf} + C \cdot \mu \cdot \sigma_f \quad (3)$$

gdje:

A - koeficijent koji uzima u obzir promjenu dijagrama opterećenja i jediničnog naprezanja u izduženom području

$\mu$  - volumetrijski postotak armature

$f_{tf}$  - vlačna čvrstoća na savijanje matrice

C - koeficijent učinkovitosti duljine

$\sigma_f$  - uzdužno naprezanje veze.

Uzimajući u obzir da:  $C \cdot \mu \cdot \sigma_f = 0,82 \cdot \tau_m \cdot \mu \cdot l/d$ , relacija (3) postaje:

$$f_{tf}^f = A \cdot (1 - \mu) \cdot f_{tf} + B \cdot \mu \cdot \frac{l}{d} \quad (4)$$

gdje je:

B - koeficijent koji ovisi o tangencijalnom naprezanju veze,  $\tau_m$ .

Prije navedeni autori su obradom eksperimentalno dobivenih podataka utvrdili sljedeće odnose:

a) Vlačna čvrstoća na savijanje  $f_{tf}^f$  materijala pri pojavi prve pukotine izražava se kao:

$$f_{tf}^f = 0,843 \cdot (1 - \mu) \cdot f_{tf} + 0,82 \cdot \tau_f \cdot \mu \cdot \frac{l}{d} \quad (5)$$

b) Vlačna čvrstoća na savijanje,  $f_{tf}^f$  materijala u graničnom stanju izračunava se kao:

$$f_{tf}^f = 0,97 \cdot (1 - \mu) \cdot f_{tf} + 3,41 \cdot \tau_f \cdot \mu \cdot \frac{l}{d} \quad (6)$$

gdje su:

$\tau_f$  - tangencijalno naprezanje veze između vlakana i matrice pri pojavi prve pukotine

$\tau_f$  - tangencijalno naprezanje veze između vlakana i matrice u krajnjem graničnom stanju.

Stoga se za ocjenu vlačne čvrstoće na savijanje elemenata ojačanih vlaknima može koristiti izraz (4) u kojoj parametar B ovisi o kvaliteti betona. Valjanost ovog odnosa također je ograničena parametrom ( $\mu \cdot l/d$ ).

U ovom je istraživanju tangencijalno naprezanje veze između vlakana i matrice izračunano pomoću izraza (5) i (6) i eksperimentalno je određeno iz vlačne čvrstoće na savijanje disperzivno armiranog betona pri pojavi prve pukotine i graničnog stanja [31].

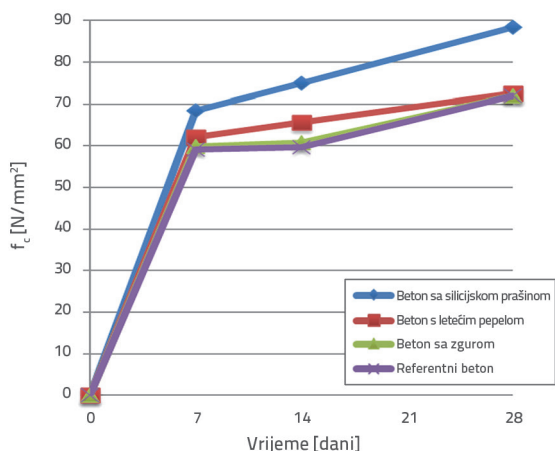
### 3. Rezultati i rasprava

Varijacije mehaničke čvrstoće (tlačna,  $f_c$  i vlačna čvrstoća pri savijanju,  $f_t$ ) tijekom procesa očvršćivanja (do 28 dana) [32] ispitivanih betona prikazane su u tablici 7.

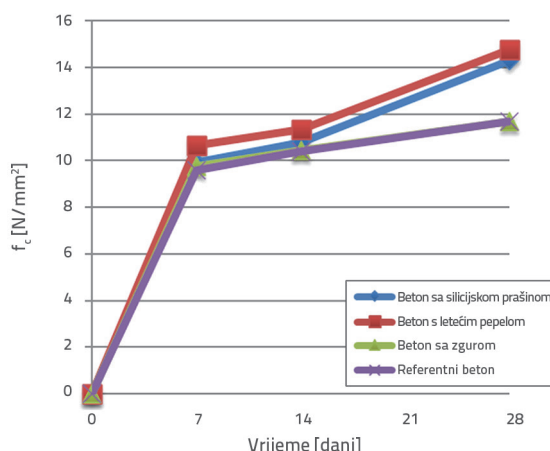
Utjecaj vrste dodatka na razvoj mehaničke čvrstoće ( $f_c$ ,  $f_t$ ) tijekom procesa očvršćivanja (do 28 d) ispitivanih betona prikazan je na slikama 5. do 8.

Tablica 7. Varijacija mehaničkih čvrstoća tijekom procesa njege (do 28 dana) za betone: konvencionalne i ojačane s 2 % (vol. posto) čeličnih vlakana

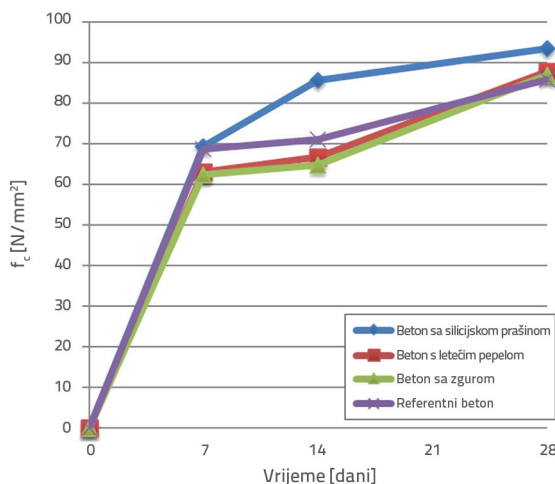
Sastav		Vrijeme njege [dani]			$f_c$ [MPa]			$f_r$ [MPa]			Čvrstoća na savijanje, $f_r$ [MPa] disperzivno armiranog betona na prve pukotine		
		7	14	28	7	14	28	7	14	28			
I. Referentni beton	1. Konvencionalni beton	59,05	59,70	71,90	9,60	10,40	11,70						
	2. Disperzivno armirani beton	68,75	71,10	85,95	15,35	17,50	20,40	10,3	12,2	15,1			
II. Beton sa zgurom	1. Konvencionalni beton	59,85	60,80	72,05	9,75	10,45	11,70						
	2. Disperzivno armirani beton	62,35	64,85	86,90	15,00	19,20	21,10	10,0	12,9	15,3			
III. Beton s letećim pepelom	1. Konvencionalni beton	62,05	65,55	72,50	10,65	11,35	14,75						
	2. Disperzivno armirani beton	63,15	66,70	87,80	14,85	23,45	26,95	10,67	16,9	19,6			
IV. Beton sa silicijskom prašinom	1. Konvencionalni beton	68,45	75,00	88,45	9,95	10,80	14,30						
	2. Disperzivno armirani beton	69,40	85,60	93,45	15,85	19,95	25,80	10,9	14,9	18,9			



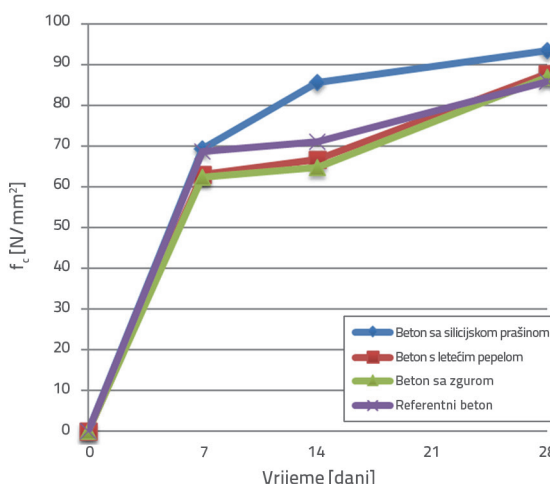
Slika 5. Utjecaj vrste dodatka na razvoj tlačne čvrstoće tijekom vremena njege konvencionalnog betona



Slika 6. Utjecaj vrste dodatka na razvoj čvrstoće na savijanje tijekom vremena njege konvencionalnog betona



Slika 7. Utjecaj vrste dodatka na razvoj tlačne čvrstoće tijekom vremena njege armiranog betona

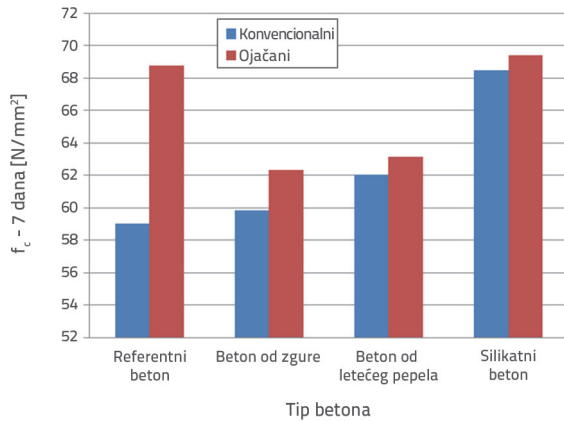


Slika 8. Utjecaj vrste dodatka na razvoj čvrstoće na savijanje tijekom vremena njege armiranog betona

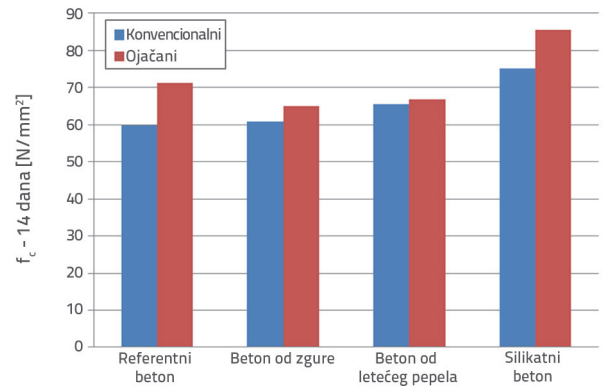
Prema slikama 5. i 7., za konvencionalne i disperzivno armirane betone postoji relativno slično ponašanje: beton pripremljen s dodatkom zgure i letećeg pepela, podvrgnut tlačnim ispitivanjima, i beton pripremljen s dodatkom silicijske prašine razlikuje se od ostalih betona po znatnom povećanju čvrstoće tijekom cijelog procesa očvršćivanja (do 28 dana).

Slike 6. i 8. za konvencionalne i disperzivno armirane betone s dodatkom silicijske prašine i letećeg pepela značajno povećavaju čvrstoću na savijanje u usporedbi s referentnim betonom i betonom s dodatkom zgure.

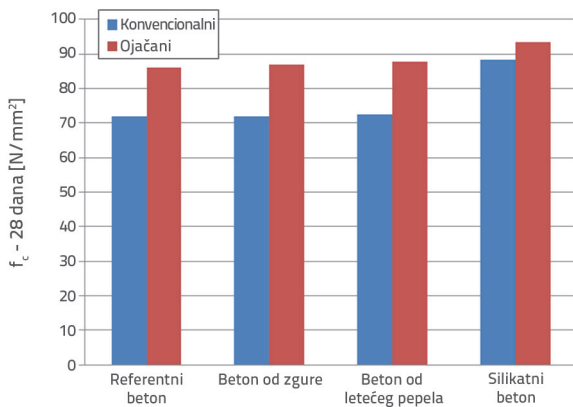
Povećanje mehaničke čvrstoće, kao što je prikazano na slikama 5. do 8., može se pripisati mogućoj pojavi kalcijevih hidrosilikata u većoj količini u betonima s dodatkom silicijske prašine i letećeg pepela, za razliku od betona s dodatkom zgure i referentnog uzorka. Pozitivan učinak silicijske prašine na mehaničku čvrstoću posljedica je progušćivanja sučeljka između agregata i matrice promjenama sastava i strukture u tom području. Čestice silicijske prašine su klice nukleacije za kristalizaciju  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [33]. Učinci mikroarmature na razvoj mehaničke čvrstoće ( $f_c$ ,  $f_b$ ) ispitivanih betona prikazani su na slikama 9. do 14.



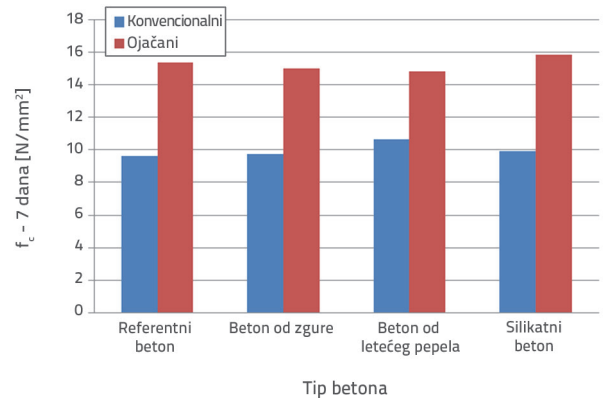
Slika 9. Utjecaj mikroarmature na tlačnu čvrstoću betona, izračunano nakon 7 dana



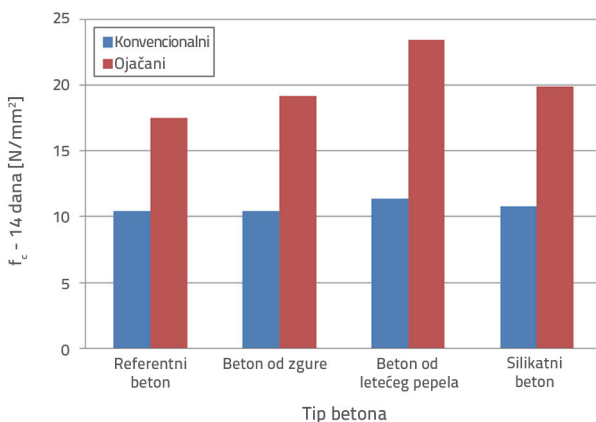
Slika 10. Utjecaj mikroarmature na tlačnu čvrstoću betona, izračunano nakon 14 dana



Slika 11. Utjecaj mikroarmature na tlačnu čvrstoću betona, izračunano nakon 28 dana



Slika 12. Utjecaj mikroarmature na čvrstoću na savijanje betona, izračunano nakon 7 dana



Slika 13. Utjecaj mikroarmature na čvrstoću na savijanje betona, izračunano nakon 14 dana



Slika 14. Utjecaj mikroarmature na čvrstoću na savijanje betona, izračunano za 28 dana

Na slikama 9. do 11. može se uočiti slično ponašanje disperzivno armiranog betona tijekom nanošenja tlačnog opterećenja kao i kod konvencionalnog betona, osim kod referentnog uzorka u početnom vremenu njege (7 dana). U ovom slučaju, primijećeno je značajno povećanje mehaničke čvrstoće korištenjem disperzivne armature u usporedbi s istim konvencionalnim uzorcima betona. To se može pripisati bržem razvoju stupnja kristalnosti hidro-spojiva u referentnom uzorku bez dodataka u usporedbi s razvojem stupnja kristalnosti hidrospojiva u sustavima sa znatno većim dodacima. Tako je adhezija između čeličnih vlakana i matrice u ovom početnom rasponu (do 7 dana) u referentnom uzorku poboljšana u usporedbi s betonom s dodacima.

Povećanje mehaničke čvrstoće disperzivno armiranog betona u usporedbi s konvencionalnim betonom prikazano je na slikama 9. do 14., a istaknuli su ga i drugi istraživači [26, 27, 30, 32].

Prema tablici 7., vrijednosti mehaničke čvrstoće dobivene za ove betone ubrajaju se u kategoriju betona visokih uporabnih svojstava (engl. *high performance concrete* - HPC).

### 3.1. Način loma ispitivanog betona

Mehanizam loma uzoraka disperzivno armiranog betona razlikovao se od mehanizma loma uzoraka konvencionalnog betona.

Kod konvencionalnog betona uočen je nagli pad nosivosti uz pojavu i širenje prve pukotine. Te su vrijednosti poboljšane u slučaju disperzivno armiranog betona. Kod ove vrste betona, tijekom pojave pukotina, vlakna uspijevaju prenijeti naprezanje na susjedne presjeka, čime se povećava njegova nosivost.

Karakteristike pukotina kod disperzivno armiranog betona značajno se razlikuju od onih kod konvencionalnog betona. Pukotine koje nastaju pri maksimalnom opterećenju, prema vlačnoj čvrstoći; imaju homogenu raspodjelu u masi matrice i razvijaju se sa širinom pukotine u usporedbi prema konvencionalnom betonu, što dokazuju i drugi istraživači [27, 34-36].

Nearmirane grede su iznenada popustile s pojavom prvih pukotina i krhkog loma betona (osobito kod naprezanja za dobivanje vrijednosti čvrstoće na savijanje). U disperzivno armiranom betonu uočeno je veći broj pukotina, vlačna čvrstoća je veća, a čvrstoća raste nakon pojave i razvoja pukotina u betonskoj konstrukciji.

Zbog različite raspodjele naprezanja u dodirnim područjima između agregata i matrice u nearmiranom betonu (BIR), dobiva se slabije razvijena mreža pukotina. Kapacitet preraspodjele niskog naprezanja doveo je do širenja i razvoja pukotina, praćeni iznenadnim pukotinama u betonu.

Duktilno ponašanje ove vrste betona poboljšano je disperzijom čeličnih vlakana.

Kod disperzivno armiranog betona ravnomjerno su raspoređena naprezanja u sučelju između agregata i matrice zahvaljujući boljoj povezanosti agregata, matrice i čeličnih vlakana. Mreža pukotina počela se razvijati pri određenoj razini intenziteta

naprezanja. To se može pripisati izvrsnoj adheziji matrice vlakana, kao što je prikazano na slici 15.



Slika 15. Prijelom i adhezija vlakna i matrice

Kada se opterećenje poveća, vlakna djeluju kao premošćivači otvora pukotine, slično učinku velikih agregata u konvencionalnom betonu. U ovoj situaciji dolazi do laganog širenja pukotine istovremeno s razaranjem adhezije vlakna i matrice [37]. Matrica i vlakna surađuju sve do konačnog otkazivanja, što pridonosi čvrstoći materijala.

Zbog vlačnog naprezanja pri savijanju, duktilnost disperzivno armiranog betona s čeličnim vlaknima bila je veća od duktilnosti betona bez vlakana. Osim toga, uočena je određena rezerva čvrstoće nakon vršnog opterećenja zbog adhezije između vlakna i matrice. Spomenut je efekt "premošćivanja" pukotina (slika 15), posebno tijekom difuznog pucanja [38]. Time se odgađa pojava i razvoj pukotina u strukturi, čime se povećava čvrstoća i duktilnost materijala.

### 3.2. Mehanička svojstva ispitivanog betona

Vlačna čvrstoća pri savijanju betona armiranog vlaknima ovisi o betonskoj matrici i količini vlakana koja se koriste za armiranje. Iz gore prikazanih podataka i slika može se uočiti da se dodavanjem čeličnih vlakana matrici sprječava nastanak pukotina i smanjenje njihove širine i razmaka u usporedbi s matricom konvencionalnog betona. U tablici 8, vrijednosti tangencijalnog naprezanja veze između vlakana i matrice izračunane su od pojave prve vidljive pukotine do krajnjega graničnog stanja u disperzivno armiranom betonu pomoću izraza (5) i (6), a prikazani su podaci iz tablice 7.

U tablici 9. prikazana je evolucija procesa očvršćivanja betona, izražena varijacijom omjera  $f_c/f_{c(28 \text{ dana})}$  i  $f_r/f_{r(28 \text{ dana})}$  tijekom istraživanja (28 dana).

Prema podacima iz tablice 9. faze razvoja procesa očvršćivanja su: prva faza – razvoj je brz (do 7 dana) i druga faza – uočava se sporiji rast mehaničkih čvrstoća nakon 7 dana očvršćivanja.



Tablica 8. Tangencijalno naprezanje veze  $\tau$  između vlakana i matrice

Sastav	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vrijeme njege [dani]		
		7	14	28
I. Referentni beton	$\tau_f$	6,3	7,74	9,43
	$\tau_l$	2,41	3,67	5,52
	$\Delta\tau$	3,92	4,07	3,91
II. Beton sa zgurom (armirani)	$\tau_f$	5,82	9,42	10,14
	$\tau_l$	1,98	4,34	5,73
	$\Delta\tau$	3,84	5,08	4,41
III. Beton s pepelom (armirani)	$\tau_f$	4,80	12,87	13,14
	$\tau_l$	1,90	7,65	7,53
	$\Delta\tau$	2,90	5,22	5,61
IV. Beton sa silicijskom prašinom (armirani)	$\tau_f$	6,50	9,84	12,40
	$\tau_l$	2,72	6,07	7,20
	$\Delta\tau$	3,78	3,77	5,20

Tablica 9. Varijacija omjera  $f_t/f_{t(28\text{ dana})}$  za ispitivane uzorke betona

Sastav	Vrijeme njege [dani]	$f_c/f_c(28\text{ dana})$			$f_t/f_t(28\text{ dana})$		
		7	14	28	7	14	28
I. Referentni beton	1. Konvencionalni beton	0,821	0,830	1	0,821	0,889	1
	2. Disperzivno armirani beton	0,800	0,827	1	0,752	0,858	1
II. Beton sa zgurom	1. Konvencionalni beton	0,831	0,844	1	0,833	0,893	1
	2. Disperzivno armirani beton	0,717	0,746	1	0,711	0,910	1
III. Beton s pepelom	1. Konvencionalni beton	0,856	0,904	1	0,722	0,769	1
	2. Disperzivno armirani beton	0,719	0,760	1	0,551	0,870	1
IV. Beton sa silicijskom prašinom	1. Konvencionalni beton	0,774	0,848	1	0,696	0,755	1
	2. Disperzivno armirani beton	0,743	0,916	1	0,614	0,773	1

\*  $f_c$  – mehaničke čvrstoće ( $f_c, f_t$ ) ispitivanih betona nakon 7, 14 i 28 dana;  $f_c(28\text{ dana})$  – mehaničke čvrstoće ( $f_c, f_t$ ) ispitivanih betona nakon 28 dana

Tablica 10. Varijacije mehaničkih čvrstoća ( $\Delta f_c, \Delta f_t$ ) za konvencionalni beton u odnosu na armirani beton

Sastav	Vrijeme njege [dani]	$\Delta f_c$ [%]			$\Delta f_t$ [%]		
		7	14	28	7	14	28
I. Referentni beton		14,11	16,03	16,35	37,45	40,57	42,65
II. Beton sa zgurom		4,01	6,25	17,09	35,00	45,57	44,55
III. Beton s pepelom		1,74	1,72	14,43	28,28	51,60	45,27
IV. Beton sa silicijskom prašinom		1,37	12,38	5,35	37,22	45,86	44,57

Tablica 11. Vrijednosti modula elastičnosti: izračunane,  $E_{c\text{ izrač}}$  i eksperimentalne,  $E_{c\text{ eksp}}$  nakon 28 dana

Sastav	$f_c(28\text{ dana})$ [MPa]	$E_{c\text{ izrač}}$ nakon 28 dana [GPa]	$E_{c\text{ eksp}}$ nakon 28 dana [GPa]
I.1. Referentni beton (konvencionalni)	71,9	35,051	49,015
I.2. Referentni beton (armirani)	85,95	37,679	57,850
II.1. Beton sa zgurom (konvencionalni)	72,05	35,080	49,350
II.2. Beton sa zgurom (armirani)	86,9	37,849	57,940
III.1. Beton s pepelom (konvencionalni)	72,5	35,168	49,650
III.2. Beton s pepelom (armirani)	87,8	38,008	58,230
IV.1. Beton sa silicijskom prašinom (konvencionalni)	88,45	38,123	58,124
IV.2. Beton sa silicijskom prašinom (armirani)	93,45	38,994	66,314

U tablici 10. prikazana je varijacija mehaničke čvrstoće armiranog betona u odnosu na konvencionalni beton u proučavanim razdobljima, izračunana prema izrazu (1).

Uočen je stalni porast razlike između mehaničkih čvrstoća disperzivno armiranog betona i nearmiranog betona tijekom cijelog razdoblja očvršćivanja (28 dana). Iznimka je beton sa silicijskom prašinom kod kojeg je razlika u tlačnim čvrstoćama između armiranog i nearmiranog betona nakon 14 dana veća nego nakon 28 dana.

Vrijednosti izračunanog modula elastičnosti, dobivene pomoću izraza (2), i vrijednosti eksperimentalnog modula nakon 28 dana prikazane su u tablici 11.

Postoje velike razlike između stvarnih i izračunanih vrijednosti modula elastičnosti u odnosu na izraz (2). Stvarne vrijednosti svrstavaju ispitivane betone u kategoriju betona visokih uporabnih svojstava (HPC) [39-42].

#### 4. Zaključak

Prikazani podaci pokazuju da su upotrebom dodataka zgre, pepela i silicijske prašine u sastav betona značajno povećava fizikalno-mehanička svojstva dobivenih betona u odnosu na referentni beton, i to svojstvo savijanja, tlačno naprezanje i modul elastičnosti.

Povećanje mehaničke čvrstoće betona s dodacima nastalo je zbog progušćivanja sučeljka između agregata i matrice kroz modifikacije sastava i strukture ove zone. Tablica 8 sažima ove učinke. Betoni s dodatkom disperzivne armature pokazuju povećanje tangencijalnog naprezanja između vlakana i matrice u usporedbi s betonima s disperzivnom armaturom bez dodataka. Utjecaj dodataka na aktivna hidraulička svojstva strukture i svojstva čvrstoće armiranog betona objašnjava se preklapanjem dvaju učinaka: učinka punila i pučolanskog učinka. Tako je uočeno

progušćivanje cementne matrice i modifikacija njezinog sastava kalcijevim hidroksidom. Tvorba slabo bazičnih hidrosilikata, s višim stupnjem polimerizacije, stabilnija je i važnija u sučeljku agregata i cementne paste i u sučeljku vlakna i cementne paste. Ekstremno niska poroznost hidratizirane cementne paste razlikovala se od konvencionalnog betona (referentni uzorak). Dakle, nevezana voda inducira otvorenu mrežu pora, što smanjuje gustoću cementne matrice i dovodi do niže tlačne čvrstoće.

Prikazani rezultati koji se odnose na povećanje mehaničke čvrstoće u slučaju disperzivno armiranog betona ishod su zgušnjavanja strukture i različitih načina loma u usporedbi s konvencionalnim betonima. Kod disperzivno armiranog betona, otvaranjem pukotina, vlakna svojim djelovanjem premošćivanja pukotine povećavaju duktilnost i nosivost (čvrstoća se povećava i nakon pojave i razvoja pukotina u betonskoj konstrukciji). Nearmirane grede su naglo popustile s pojavom prvih pukotina, a beton je napravio krsti lom.

Ojačanje vlaknima je učinkovita tehnika za poboljšanje čvrstoće na savijanje kompozitnih materijala na bazi cementa.

Potrebna je kombinacija poboljšanih napora i duktilnog ponašanja kako bi se postigla visoka učinkovitost prilikom savijanja betona. Stoga se preporučuje armiranje visokoučinkovitih kompozita vlaknima. Disperzivnom armaturom postignuta je učinkovita kontrola mikropukotina, čime je povećana mehanička čvrstoća na udar, trajnost i uporabljivost dobivenog betona.

Modul elastičnosti betona, tangencijalno naprezanje veze između vlakana i matrice, način loma i čvrstoća na savijanje disperzivno armiranog betona kod prvih pukotina bili su usporedivi s rezultatima koje su dobili i objasnili drugi istraživači [16-23] u svojim radovima. Ovi rezultati pokazuju da je predloženi pristup primjenjiv za predviđanje mehaničkih svojstava disperzivno armiranog betona.

#### LITERATURA

- [1] ACI Committee 544, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Journal 2, pp. 729-744, 1973.
- [2] RILEM- Fiber Concrete Materials, A Report Prepared by Technical Committee 19-FRC-RILEM, Matériaux et Constructions, 10 (56), pp.103-120, 1977.
- [3] GP 075-2002 - Guide of Establish Performance Criteria and Compositions for Disperse Reinforced Concretes with Metallic Fibers, 2002.
- [4] Bolander, J. E., Choi, S., Duddukuri, S.R.: Fracture of fiber-reinforced cement composites: effect of fiber dispersion, International Journal of Fracture, <https://doi.org/10.1007/s10704-008-9269-4>, 2008.
- [5] Corobceanu, V., Giusca, R.: The durability of prestressed concrete elements reinforced with fibres, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, <https://doi.org/10.2478/v10175-012-0023-8>, 2012.
- [6] Pant, A.S., Parekar, S.R.: Steel fibre reinforced concrete beams without reinforcement under combined bending, shear and torsion, Indian Concrete Journal, 86 (2012) 4, pp. 39-45.
- [7] Ahmed Shaikh, F.U.: Review of mechanical properties of short fiber reinforced geopolymer composites, Construction and Building Materials, 43 (2013), pp. 37-49.
- [8] American Society for Testing and Materials: ASTM C1608-07: Standard test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste, Annual book of ASTM standards, West Conshohocken, PA, 2012.
- [9] Kang, S-T., Kim, J-K.: The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC), Cement and Concrete Research, 41 (2011) 10, pp. 1001-1014.
- [10] Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S., Koh, K.T.: Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Composites, 34 (2012) 2, pp.172-184.

- [11] Bentur, A., Mindess, S.: *Fiber Reinforced Cementitious Composites* (second edition), Taylor & Francis, London and New York, 2007.
- [12] Kanakubo, T.: Tensile Characteristics Evaluation Method for Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4 (2006) 1, pp. 3–17.
- [13] Muntean, R.: Efficient elements made of dispersedly reinforced concrete with polypropylene synthetic fibers, Doctoral Thesis, Transilvania University of Brasov, RO, 2012.
- [14] Maruyama, I., Teramoto, A.: Temperature dependence of autogenously shrinkage of silica fume cement pastes with a very low water–binder ratio, *Cement and Concrete Research*, 50 (2013), pp. 41–50.
- [15] Romanian Standard - European Norm: SR EN 196-2: Methods of Cement Testing-Part 2: The Chemical Analysis of the Cement, 2006.
- [16] Romanian Standard - European Norm: SR EN 197-1: Cement-Part I: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, 2002.
- [17] Oertel, T., Hutter, F., Helbig, U., Sextl, G.: Amorphous silica in ultra-high performance concrete: First hour of hydration, *Cement and Concrete Research*, 58 (2014), pp.131–142.
- [18] Thoman, W.H., Raeder, W.: Ultimate strength and modulus of elasticity of high strength Portland cement concrete, *ACI Journal Proceedings*, 30 (1934) 3, pp. 231-238.
- [19] Kaar, P.H., Hanson, N.W., Capell, H.T.: Stress-strain characteristics of high-strength concrete. In: Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55, American Concrete Institute, Detroit, pp.161-185, 1978.
- [20] Jin, L., Du, X., Ma, G.: Macroscopic effective moduli and tensile strength of saturated concrete, *Cement and Concrete Research*, 42 (2012) 12, pp. 1590–1600.
- [21] Smith, E.F., Tynes, W.O., Saucier, K.L.: High-Compressive-Strength Concrete, Development of Concrete Mixtures, Technical Documentary Report No: RTD TDR-63-3114, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, pp. 44.
- [22] Nedderman, H.: Flexural Stress Distribution in Very-High-Strength Concrete, M. Sc. Thesis, University of Texas at Arlington, pp. 182, 1973.
- [23] Freedman, S.: High-Strength Concrete, *Modern Concrete*, 34 (1970) 6, pp. 29-36, 34 (1970) 7, pp. 28-32, 34 (1970) 8, pp. 21-24, 35 (1971) 9, pp. 15-22, 35 (1971) 10, pp. 16-23.
- [24] Teychenne, D.C., Parrott, L.J., Pomeroy, C.D.: The Estimation of the Elastic Modulus of Concrete for the Design of Structures, Paper No: CP 23/78-Building Research Establishment, Garston, Watford, pp. 11, 1978.
- [25] Ahmad, S.H.: Properties of Confined Concrete Subjected to Static and Dynamic Loading, Ph. D. Thesis, University of Illinois, pp. 179, 1981.
- [26] Martinez, S., Nilson, A.H., Slate, F.O.: Spirally-Reinforced High-Strength Concrete Columns. In: Research Report No. 82-10, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, 1982.
- [27] Corobceanu, V., Giușcă, R.: The durability of pre-stressed concrete elements reinforced with fibers, *Bulletin of the Polish Academy of Science-Technical Sciences*, 60 (2012) 1, pp. 165-170.
- [28] Romualdi, J.P., Batson, G.B.: Mechanics of Crack Arrest in Concrete, In: Proceedings of ASCE 89 (EM3), pp. 147-168, 1963.
- [29] Majumdar, A.J.: Properties of fiber cement composites, RILEM, 1975.
- [30] Schnütgen, B.: Some results of investigation on steel fiber reinforced concrete, JACI, Detroit, 1973.
- [31] Tailhan, P.R.J.L., Le Maou, F.: Comparison of concrete creep in tension and in compression: Influence of concrete age at loading and drying conditions, *Cement and Concrete Research*, 51 (2013), pp. 78–84.
- [32] Swamy, R.N., Mangat, P.S., Rao, C.V.: The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices, ACI, Detroit, 1974.
- [33] Amăreanu, M.: Concretes with mineral binders and macromolecular compounds, *Romanian Journal of Materials*, 40 (2010) 3, pp. 203–213.
- [34] Ranaivomanana, N., Turatsinze, S.M.A.: Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels, *Cement and Concrete Research*, 52 (2013), pp. 1–10.
- [35] Tailhan, J.L., Rossi, P., Caucci, A.M.: Probabilistic modeling of cracking in concrete structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.878256>, 2014.
- [36] Yamamoto, Y., Nakamura, H., Kuroda, I., Furuwa, N.: Cracking analysis of reinforced concrete structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.881755>, 2014.
- [37] Watanabe, K., Bangi, M.R., Horiguchi, T.: The effect of testing conditions (hot and residual) on fracture toughness of fiber reinforced high-strength concrete subjected to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, 51 (2013), pp. 6-13.
- [38] Alam, S.Y., Loukili, A., Grondin, F.: Monitoring size effect on crack opening in concrete by digital image correlation, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16 (2012) 7, pp. 818-836.
- [39] Schmidt, M., Fehling, E.: [https://www.researchgate.net/publication/264879054\\_Ultra-High-performance\\_Concrete\\_Research\\_Development\\_and\\_Application\\_in\\_Europe](https://www.researchgate.net/publication/264879054_Ultra-High-performance_Concrete_Research_Development_and_Application_in_Europe)
- [40] Giry, C., Oliver-Leblond, C., Dufour, F., Ragueneau, F.: Cracking analysis of reinforced concrete structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.881756>, 2014.
- [41] Gjorv, O.E.: Durability of Concrete Structures, *Arabian Journal of Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0033-5>, 2011.
- [42] Kim, S., Han, S., Park, C., Yun, K.K.: Compressive behavior characteristics of High-Performance Slurry-Infiltrated Fiber-Reinforced Cementitious Composites (SIFRCCs) under uniaxial compressive stress, *Materials*, 13 (2020) 159, pp. 121-133.