

Primljen / Received: 25.2.2015.

Ispravljen / Corrected: 7.5.2015.

Prihvaćen / Accepted: 1.6.2015.

Dostupno online / Available online: 10.2.2017.

Mehanička svojstva hibridnog mikroarmiranog betona s miješanim cementom

Autori:



Mr.sc. [Ramesh Kanagavel](#), dipl.ing.građ.
Sveučilište za informacijske tehnologije K.L.N.
Katedra za građevinarstvo
Tamil Nadu, Indija
ramesh_kanagavel@rediffmail.com



Prof.dr.sc. [Arunachalam Kalidass](#), dipl.ing.građ.
Sveučilište za inženjerstvo Thiagarajar
Katedra za građevinarstvo
Tamil Nadu, Indija
vakarunachalam@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

[Ramesh Kanagavel, Arunachalam Kalidass](#)

Mehanička svojstva hibridnog mikroarmiranog betona s miješanim cementom

U radu su promatrane tlačna, vlačna, savojna i udarna čvrstoća hibridnih mikroarmiranih betona s dodatkom vlakana. Kao djelomična zamjena cementa upotrijebljeni su leteći pepeo, pepeo rižinih ljuski i vapnenac. Korištena su čelična, karbonska i polipropilenska vlakana u različitim udjelima. Rezultati su pokazali da hibridni mikroarmirani beton s čeličnim i karbonskim vlaknima, odnosno čeličnim, karbonskim i polipropilenskim vlaknima imaju bolja tlačna, vlačna i savojna svojstva te veću udarnu čvrstoću.

Ključne riječi:

miješani cementi, hibridni mikroarmirani beton, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, savojna čvrstoća, udarna čvrstoća, postpukotinsko ponašanje

Original scientific paper

[Ramesh Kanagavel, Arunachalam Kalidass](#)

Mechanical properties of hybrid fibre reinforced quaternary concrete

Quaternary blending cement concrete with fibres is studied in terms of compressive, split tensile, and flexural strength properties, and impact resistance. Fly ash, rice husk ash, and limestone powder, are used as partial replacement of cement. Steel, carbon, and polypropylene fibres, are used in different fractions. The results show that the steel-carbon and steel-carbon-polypropylene hybrid fibre reinforced concretes perform better with regard to compressive, split tensile, and flexural strength properties, and impact resistance.

Key words:

quaternary blending cement, hybrid fibres, compressive strength, split tensile strength, flexural strength, impact resistance, post crack resistance

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

[Ramesh Kanagavel, Arunachalam Kalidass](#)

Mechanische Eigenschaften faserverstärkten Hybridbetons mit Mischzement

In dieser Arbeit werden Druck-, Zug-, Biege- und Stoßfestigkeit faserverstärkten Hybridbetons untersucht. Teilweise wurden dabei Flugasche, Reisschalenasche und Kalkstein als Zementersatz verwendet. Es wurden Stahl-, Carbon- und Polypropylenfasern in verschiedenen Anteilen eingesetzt. Die Resultate haben gezeigt, dass faserverstärkter Hybridbeton mit Stahl- und Carbonfasern, bzw. mit Stahl-, Carbon- und Polypropylenfasern bessere Druck-, Zug- und Biegeeigenschaften sowie eine bessere Stoßfestigkeit hat.

Schlüsselwörter:

Mischzement, Hybridbeton, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Biegefestigkeit, Stoßfestigkeit, Rissverhalten

1. Uvod

U današnje vrijeme sve se češće u pripremi betona primjenjuju zamjenski materijali (mineralni dodaci) za cement kako bi se smanjio udio cementa i poboljšala svojstva betona [1]. Mineralni dodaci se primjenjuju u znatnoj mjeri jer je dokazano da njihova primjena u miješanim cementima poboljšava svojstva betona. Kathirvel i suradnici [2] istraživali su optimalni udio zamjenskog materijala poput letećeg pepela, pepela rižinih ljuski i vapnenačkog punila u betonskoj mješavini, s obzirom na čvrstoću i trajnost betona. Rezultati istraživanja su pokazali da primjena miješanih cemenata s dodatkom od 20 % letećeg pepela, 10 % vapnenačkog punila i 10 % pepela rižinih ljuski pozitivno utječe na vrijednosti tlačne, vlačne i savojne čvrstoće te trajnosti betona. Unatoč brojnim prednostima primjene mineralnih dodataka u betonu, još uvijek ne postoji dovoljan broj istraživanja za slučajeve kratkotrajnih udarnih i dinamičkih opterećenja. Zbog niske vlačne čvrstoće betona, pri takvim vrstama opterećenja dolazi do krhkog loma. Otpornost na udarna opterećenja važna je kod primjene betona u industrijskim građevinama i zračnim lukama, u područjima gdje se zahtijeva povećana otpornost na udar zračnih projektila, ili postoji opasnost od udarnih opterećenja poput eksplozija, potresa i valova [3]. Dodavanje vlakana betonu poboljšava njegovu vlačnu čvrstoću, otpornost na udarno opterećenje, savojnu čvrstoću i žilavost [4].

Čelična, karbonska i polipropilenska (PP) vlakna često se koriste u betonu kako bi mu se poboljšala određena svojstva [5]. U istraživanjima koja su proučavala utjecaj dodatka čeličnih vlakana [6], odnosno polipropilenskih vlakana [7] betonu, pokazana su poboljšanja mehaničkih svojstava i sposobnosti apsorpcije energije betona. Dodatak karbonskih vlakana poboljšava otpornost na pojavu pukotina i povećava otpornost betona na zamor [8]. Karbonska vlakna imaju odlična mehanička i toplinska svojstva te kemijsku stabilnost [9]. Zbog toga je u mikroarmiranom betonu slabija matrica ojačana čvrstim vlaknima kako bi se dobio kompozit poboljšanih svojstava. Istraživači s velikim entuzijazmom istražuju hibridne mikroarmirane betone (HMAB) pripremljene kombinacijom dviju ili više vrsta vlakana. Dodatak jedne vrste vlakana može donekle

poboljšati svojstva betona. Istraživanja su potvrdila da se kombinacijom više vrsta vlakana dobiva hibridni kompozit koji ima bolja mehanička svojstva od kompozita s jednom vrstom vlakana [5, 10-13].

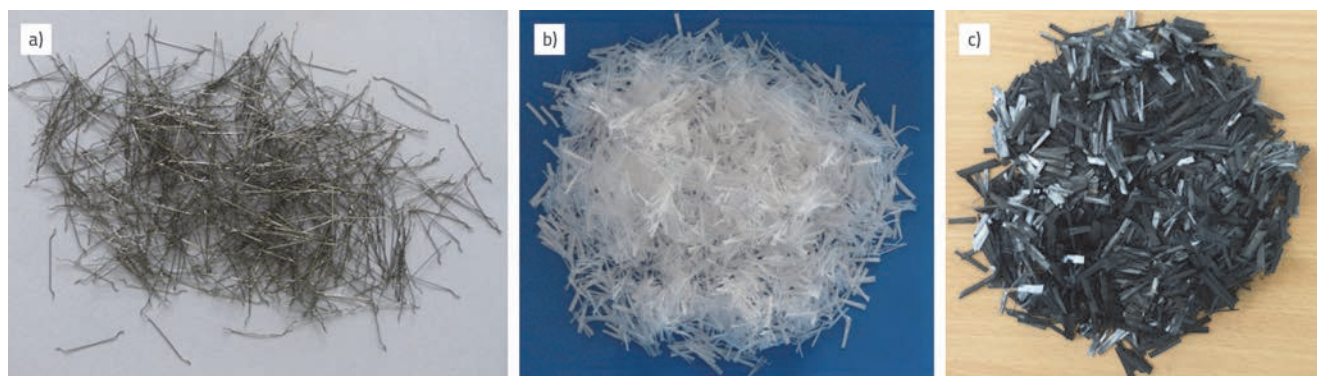
U literaturi su navedena brojna istraživanja koja su provedena s ciljem ispitivanja utjecaja zamjenskih materijala cementu na svojstva betona, a provedena su na uzorcima betona s jednom vrstom vlakana i na uzorcima s više vrsta vlakana. Određeni broj istraživača proučavao je utjecaj dodavanja jedne vrste vlakana te utjecaj kombinacije vlakana u betonu s mineralnim dodatcima kao djelomične zamjene za cement. Dodavanje čelično-karbonskih i čelično - karbonsko - polipropilenskih vlakana betonu s miješanim cementom uz mineralne dodatke (leteći pepeo, pepeo rižinih ljuski i vapnenac) nije do sada bilo predmet istraživanja, te je upravo zato provedeno istraživanje koje je predstavljeno u ovom radu.

2. Eksperimentalni program

2.1. Svojstva materijala

U svim betonskim mješavinama korišten je obični portland cement, minimalne tlačne čvrstoće od 53 MPa nakon 28 dana njegovanja, specifične težine 3,11. Za sitni agregat upotrijebljen je riječni pijesak specifične težine 2,60, a kao krupni agregat upotrijebljen je drobljeni granit. Za primjenu su korištene čestice agregata koje prolaze kroz sito otvora 12,5 mm, a zadržavaju se na situ otvora 4,75 mm, specifične težine 2,70. Leteći pepeo je dobiven iz termoelektrana u Tuticorinu, Tamil Nadu, u Indiji. Pepeo rižinih ljuski imao je specifičnu težinu 2,3, a vapno 2,80. Za pripremu betona koristila se obična pitka voda. Kemijski sastav letećeg pepela, pepela rižinih ljuski i vapna prikazan je u tablici 1.

Kratka karbonska vlakna sa zakrivljenim krajevima, fibrilirana PP vlakna i čelična vlakna upotrijebljena u ovom istraživanju prikazana su na slici 1. Duljina čeličnih vlakana je 35 mm, promjer je 0,45 mm, koeficijent oblika 78, specifična težina 7,86, a vlačna čvrstoća je između 800 i 1000 MPa. Polipropilenska vlakna duljine su 20 mm, promjera 0,04 mm, specifične težine 0,91, a vlačna čvrstoća iznosi između 350 i 450 MPa. Duljina



Slika 1. Prikaz vlakana: a) čelična; b) polipropilenska; c) karbonska

karbonskih vlakana je 12 mm, promjer je 11 mikrona, a udio ugljika u vlaknima iznosi 95 %. Vlačna čvrstoća je 4300 MPa, a obujamska težina iznosi 554 g/l.

Tablica 1. Kemijski sastav letećeg pepela, pepela rižinih ljuski i vapnenca

Kemijski sastav [%]	Leteći pepeo	Pepeo rižinih ljuski	Vapnenac
SiO ₂	60,24	87,02	6,83
Fe ₂ O ₃	7,84	0,64	4,51
Al ₂ O ₃	27,50	1,12	4,14
CaO	0,59	0,64	55,71
MgO	0,85	0,63	5,12
SO ₃	0,03	0,58	0,20
Na ₂ O	0,00	0,14	0,18
K ₂ O	0,02	0,19	0,04
LOI	0,72	7,76	22,00

2.2. Sastav mješavine

Mješavina običnog betona pripravljena je u skladu s propisima IS 10262-2009 [14] za beton razreda M30. Omjer sastojaka u mješavini bio je 1:1, 61:2,25, dok je vodocementni omjer iznosio 0,48.

Ova mješavina bila je kontrolna mješavina, a tijekom pripreme obični portland cement zamijenjen je sa 20 % letećeg pepela, 10 % pepela rižinih ljuski i 10 % vapna po težini cementa određenoj na temelju prethodnog istraživanja koje su proveli Kathirvel i suradnici [2]. Sastav svih betonskih mješavina prikazan je u tablici 2.

Karbonska vlakna dodana su u udjelu od 0,25 % i 0,5 % težine vezivnih materijala (cement i mineralni dodatci). Nakon dodavanja karbonskih vlakana u hibridnu mješavinu s PP vlaknima, ukupan udio vlakana u mješavini iznosio je 0,25 % i 0,5 % težine vezivnih materijala. Čelična vlakna dodana su u volumnim udjelima od 0,5 %, 1 % i 1,5 % u svim mješavinama s karbonskim, odnosno hibridnim karbonskim i polipropilenskim vlaknima. Različiti udjeli vlakana u mješavini prikazani su u tablici 3.

Tablica 2. Sastav mješavine sa zamjenskim materijalima

Materijal	Udio	Količina [kg/m ³]
Cement	0,6	260,72
Leteći pepeo	0,2	86,91
Pepeo rižinih ljuski	0,1	43,45
Vapnenac	0,1	43,45
Sitni agregat	1,61	698,90
Krupni agregat	2,25	977,92
Voda	0,48	208,6

Tablica 3. Kombinacija vlakana u mješavini

Broj mješavine	Oznaka mješavine	Čelična vlakna V _f [%]	Polipropilenska vlakna W _f [%]	Karbonska vlakna W _f [%]
1	CC	0	0	0
2	C1	0	0	0,25
3	C2	0	0	0,50
4	S1C1	0,50	0	0,25
5	S1C2	0,50	0	0,50
6	S2C1	1,00	0	0,25
7	S2C2	1,00	0	0,50
8	S3C1	1,50	0	0,25
9	S3C2	1,50	0	0,50
10	S1C0P0	0,50	0,125	0,125
11	S1C1P1	0,50	0,25	0,25
12	S2C0P0	1,00	0,125	0,125
13	S2C1P1	1,00	0,25	0,25
14	S3C0P0	1,50	0,125	0,125
15	S3C1P1	1,50	0,25	0,25

V_f – volumni udio, W_f – udio na masu veziva

2.3. Priprema i ugradnja betona

Krupni i sitni agregati miješani su najprije jednu minutu u miješalici. Dodani su cement, leteći pepeo, pepeo rižinih ljuski i vapnenac te je provedeno suho miješanje dvije minute. Dodana je voda, a miješanje je potom nastavljeno sljedećih 5 minuta. Nakon toga dodana je određena količina vlakana, a miješanje je nastavljeno idućih 5 minuta kako bi se sastojci jednoliko raspodijelili. Provela se Vebe metoda ispitivanja konzistencije kako bi se odredila obradivost mješavine s različitim kombinacijama vlakana. U mješavini s 1,5 % volumnog udjela čeličnih vlakana, smanjila se obradivost betona i uočeno je stvaranje gruda vlakana, takozvanih ježeva. U mješavini s kombinacijom karbonskih, PP i čeličnih vlakana ta pojava bila je izraženija. Svježi beton ugrađen je u kalupe i zbijen pomoću stolnog vibratora kako bi se odredila svojstva betona u očvrslom stanju. Beton je ugrađen u kalupe oblika kocke (150 mm x 150 mm x 150 mm), valjka (promjera 150 mm, duljine 300 mm) i prizme (100 mm x 100 mm x 500 mm) za ispitivanje tlačne, vlačne i savojne čvrstoće. Uzorci kružnog oblika (promjera 150 mm, debljine 64 mm) korišteni su za ispitivanja otpornosti na udarno opterećenje. Nakon 24 sata, uzorci su izvađeni iz kalupa i njegovani u vodi do početka ispitivanja.

2.4. Metodologija ispitivanja

Obradivost betona određena je VeBe ispitivanjem konzistencije prema propisima IS 1199-1959 (R1999) [15]. Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je na betonskim kockama, dok je

ispitivanje savojne čvrstoće provedeno na prizmama na koje je nanoseno opterećenje u dvjema točkama prema IS 516-1999 [16]. Vlačna čvrstoća cijepanjem određena je na valjcima prema propisima IS 5816-1999 [17]. Udarne čvrstoća betonskih uzoraka određena je prema ACI Committee Report 544.2R-89 [18]. Uzorci kružnog oblika (promjera 150 mm, debljine 64 mm) dobiveni su rezanjem valjka promjera 150 mm, duljine 300 mm. Ispitni uzorak postavljen je na ploču na četiri oslonca. Bat mase 4,54 kg u više navrata ispuštan je s visine od 457 mm na čeličnu kuglu promjera 63,5 mm, postavljenu na sredini gornje površine betonskog uzorka. Udarci su ponavljani do pojave prve vidljive pukotine (N1) te do sloma diska (N2), a pritom je određena čvrstoća pri pojavi prve pukotine te čvrstoća betona pri slomu. Shematski dijagram koji prikazuje postavke ispitivanja otpornosti na udarno opterećenje može se vidjeti na slici 2. Sposobnost apsorpcije energije betonskog uzorka određen je [19, 20] pomoću jednadžbe

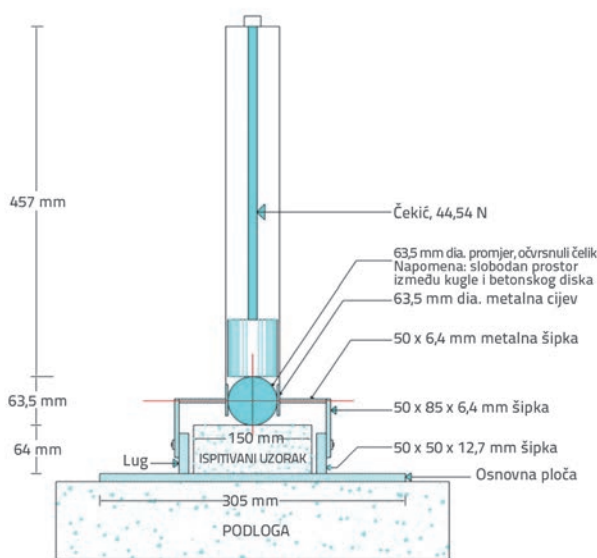
$$E_{imp} = N \cdot m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

gdje je:

- E_{imp} - energija udara u džulima [J]
- m - masa padajućeg bata [kg], $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- h - visina s koje je bat ispušten na uzorak
- N - broj udara.

Tlačna, savojna i vlačna čvrstoća cijepanjem dobivene su ispitivanjem triju uzoraka, dok je ispitivanje udarne čvrstoće provedeno na pet uzoraka nakon 28 dana njegovanja te su dobivene prosječne vrijednosti.

Rezultati ispitivanja uspoređeni su s rezultatima referentnog uzorka koji je pripremljen s mineralnim dodacima cementu, ali bez vlakana.



Slika 2. Shematski prikaz ispitivanja udarne čvrstoće

3. Rezultati i rasprava

Rezultati ispitivanja obradivosti, tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem, savojne čvrstoće i otpornosti na udar prikazani su u tablici 4. Postotak povećanja tlačne, savojne i vlačne čvrstoće cijepanjem u odnosu na referentnu mješavinu pri starosti od 28 dana prikazan je na slikama 3., 4. i 5.

3.1. Obradivost

Vebe ispitivanje daje točnije rezultate obradivosti mikroarmiranog betona (FRC) nego standardno ispitivanje slijeganjem i ispitivanje faktora zbijanja [21]. Čak i pri vrlo niskim vrijednostima konzistencije betona slijeganjem, mikroarmirani beton dobro podnosi vibracije [18]. Rezultati Vebe ispitivanja prikazani su u tablici 4. Dodatak karbonskih, čeličnih i PP vlakana svježem betonu produžilo je vrijeme trajanja Vebe ispitivanja. S većim udjelom vlakana u mješavini, vrijeme Vebe ispitivanja se povećavalo, što je upućivalo na smanjivanje obradivosti betona. Trajanje Vebe ispitivanja bilo je između 5 i 8 sekundi za beton s dodatkom karbonskih vlakana (CFRC). U mješavini s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana, ispitivanje je trajalo još duže. Ti rezultati su u skladu s rezultatima ispitivanja koje je proveo Tayfun Uygunoglu [21], koji je zaključio da dodatak čeličnih vlakana povećava trajanje Vebe ispitivanja između 2 i 70 sekundi za volumni udio vlakana 0-1.3 %. U ovom istraživanju, trajanje Vebe ispitivanja za hibridni mikroarmirani beton s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana (CSHFRC) bilo je između 11 i 67 sekundi.

Kada su u mješavinu CSHFRC dodana i fibrilirana PP vlakna, trajanje VeBe ispitivanja je ponovo produženo. U hibridnom mikroarmiranom betonu s dodatkom karbonskih, čeličnih i PP vlakana vrijeme ispitivanja bilo je između 13 i 70 s. S dodatkom čeličnih vlakana sa zakrivljenim krajevima trajanje se produžava. Istovjetne zaključke dobili su Ozgur Eren i Khaled Marar [22] te Karahan i Atis [23]. Pri volumnom udjelu čeličnih vlakana od 1,5 %, obradivost mješavine opada te dolazi do stvaranja gruda u betonu. Stvaranje gruda ubrzava se kada se karbonska i polipropilenska vlakna miješaju s čeličnim vlaknima. Dodavanje fibriliranih polipropilenskih vlakana utječe na stvaranje mrežaste strukture u betonu koja ograničava tečenje mješavine. Zbog velikog broja i velike površine vlakana, ona apsorbiraju više cementne paste koja ih obavija te utječe na viskoznost betonskih mješavina, uzrokujući smanjenu obradivost. Uslijed toga, obradivost je dalje smanjivana te se pojavilo stvaranje gruda vlakana kada betonska mješavina više nije u potpunosti kompaktna. Taj efekt bio je dominantniji u CSPHFRC mješavinama u usporedbi s CSHFRC mješavinama.

3.2. Tlačna čvrstoća

Tablica 4. prikazuje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće. Postotak povećanja tlačne čvrstoće u odnosu na referentnu mješavinu nakon 28 dana njegovanja prikazan je na slici

Tablica 4. Rezultati obradivosti, tlačne, vlačne (cijepanjem), savojne i udarne čvrstoće

Oznaka mješavine	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Savojna čvrstoća [N/mm ²]	Trajanje VeBe ispitivanja [s]	Udarne čvrstoća				
					Broj udaraca		Udarne energija [Nm]		Postotak povećanja postpukotinske nosivosti $[(N2-N1)/(N1)] \times 100$
					Prva pukotina (N1)	Slom (N2)	Prva pukotina	Slom	
CC	37,16	3,60	4,31	3	251	252	5108,8	5129,1	0,4
C1	47,96	3,98	5,50	5	675	677	13738,7	13779,4	0,3
C2	44,44	4,17	5,68	8	752	754	15305,9	15346,6	0,3
S1C1	48,53	5,00	7,20	11	921	1103	18745,7	22450,0	19,8
S1C2	50,44	5,28	7,58	15	980	1193	19946,5	24281,8	21,7
S2C1	54,71	6,46	9,54	20	1115	1607	22694,3	32708,2	44,1
S2C2	52,98	6,84	9,90	28	1194	1762	24302,2	35863,0	47,6
S3C1	50,22	7,89	12,88	45	1285	2135	26154,4	43454,9	66,1
S3C2	49,69	8,28	13,32	67	1411	2364	28718,9	48115,9	67,5
S1C0P0	49,11	5,12	7,36	13	937	1128	19071,3	22958,9	20,4
S1C1P1	52,22	5,38	7,66	17	997	1219	20292,5	24811,0	22,3
S2C0P0	53,33	6,14	9,44	24	1132	1656	23040,3	33705,5	46,3
S2C1P1	52,80	6,68	9,78	36	1205	1799	24526,1	36616,1	49,3
S3C0P0	49,82	7,64	12,72	47	1323	2210	26927,8	44981,4	67,0
S3C1P1	48,62	7,96	13,16	70	1460	2479	29716,2	50456,6	69,8

3. Iz rezultata se može zaključiti da je tlačna čvrstoća mikroarmiranog betona s dodatkom karbonskih vlakana, odnosno kombinacijom karbonskih i čeličnih vlakana te betona s dodatkom karbonskih, čeličnih i PP vlakana veća nego čvrstoća referentnog betona nakon 28 dana njegovanja. Povećanje tlačne čvrstoće nakon 28 dana njegovanja uzoraka za betone s dodatkom karbonskih vlakana iznosi između 20 i 29 %, za beton s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana između 31 i 47 % u usporedbi s referentnim betonom, dok za HMAB s kombinacijom karbonskih, čeličnih i PP vlakana to povećanje iznosi između 31 i 44 %. U betonu s dodatkom karbonskih vlakana povećana je tlačna čvrstoća 29 % u odnosu na referentnu mješavinu. Slične rezultate dobili su Baeza i suradnici [24], koji su zaključili da dodavanje karbonskih vlakana betonu može povećati tlačnu čvrstoću betona do 25 % u odnosu na referentnu mješavinu. Tlačna čvrstoća u mješavini S1C1 povećana je 31 %, a u mješavini S1C2 36 %, u odnosu na referentnu mješavinu. Dobiveni rezultati u skladu su s rezultatima prethodnih istraživanja.

Chen i Liu [13] zaključili su kako je tlačna čvrstoća u laganom betonu s dodatkom čeličnih i karbonskih vlakana povećana 27,6 % nakon 28 dana. Wu Yao i suradnici [5] naveli su da je tlačna čvrstoća u hibridnom betonu s čeličnim i karbonskim vlaknima povećana 31,4 % nakon 28 dana.

Najveća čvrstoća postignuta je u mješavini S2C1. Bolji sinergijski efekt uočen je u mješavinama S10P0 i S1C1P1, za razliku od

mješavina S1C1 i S1C2, s volumnim udjelom čeličnih vlakana od 0,5 %. Maksimalna čvrstoća povećana je za 32 % u mješavini S1C0P0 i 41 % u mješavini S1C1P1, nakon 28 dana njegovanja. Međutim, negativni sinergijski efekt zapažen je u svim ostalim mješavinama s dodatkom čeličnih, karbonskih i PP vlakana, za razliku od mješavina s čeličnim i karbonskim vlaknima, s volumnim udjelom čeličnih vlakana od 1 % i 1,5 %.

Tlačna čvrstoća dostiže manje vrijednosti u mješavinama S2C0P0 i S3C1P1 nego u mješavinama S2C1 i S3C2. Hibridizacija je manje učinkovita u mješavinama s većim udjelom vlakana [25].

Veći udio vlakana u mješavini dovodi do stvaranja gruda, što ima značajan utjecaj na obradivost i udio zraka u mješavini, a konačno dovodi do smanjenja tlačne čvrstoće.



Slika 3. Povećanje tlačne čvrstoće nakon 28 dana

3.3. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Rezultati vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su u tablici 4., a postotak porasta čvrstoće u odnosu na referentnu mješavinu betona nakon 28 dana može se vidjeti na slici 4. Zaključeno je da se vlačna čvrstoća povećava s većim udjelom vlakana u mješavini. Mikroarmiranom betonu s dodatkom karbonskih vlakana vlačna čvrstoća cijepanjem povećana je 11-16 %, dok je betonu s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana povećana 39-130 %, a betonu s dodatkom čeličnih, karbonskih i PP vlakana povećana je 42-121 % nakon 28 dana.

Maksimalno povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem iznosi 130 %, a određeno je u mješavini S3C2 s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana. Povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem u mješavini S1C1 iznosi 39 %, a u mješavini S1C2 približno 47 % u odnosu na kontrolnu mješavinu nakon 28 dana.

Istovjetne zaključke donijeli su Chen i Liu [13], čiji su rezultati pokazali da povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem u laganom betonu visokih uporabnih svojstava s dodatkom čeličnih i karbonskih vlakana iznosi 38,3 %.

Wu Yao i suradnici [5] u svojim su ispitivanjima zaključili da je vlačna čvrstoća cijepanjem u hibridnim kompozitima s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana povećana 36,5 % pri starosti uzorka od 28 dana. Maksimalna vlačna čvrstoća cijepanjem postignuta je u mješavini S3C2. Wu Yao i suradnici [5] navode kako se dodavanjem karbonskih i čeličnih vlakana postiže najveća vlačna čvrstoća. Ti rezultati uspoređeni su s betonskim mješavinama s dodatkom karbonskih, čeličnih i polipropilenskih vlakana, odnosno mješavinama s karbonskim i čeličnim vlaknima, a pozitivni sinergijski efekt uočen je jedino u mješavinama S1C0P0 i S1C1P1, za razliku od mješavina S1C1 i S1C2 s volumnim udjelom čeličnih vlakana od 5 %.

Maksimalno povećanje čvrstoće u mješavini S10P0 iznosi 42 %, a u mješavini S1C1P1 49 % u odnosu na kontrolni beton. Razlog povećanja vlačne čvrstoće može biti prisutnost navedenih vlakana u mješavini, visoki modul elastičnosti čeličnih i karbonskih vlakana, efekt sidrenja kukastih krajeva čeličnih vlakana, isprepletenost polipropilenskih mrežastih vlakana i veći broj polipropilenskih vlakana u kritičnom presjeku zbog njegove male specifične težine.

Promatranjem mješavina s volumnim udjelom vlakana od 1 % i 1,5 %, negativan sinergijski efekt uočen je u mješavini s dodatkom čeličnih, karbonskih i polipropilenskih vlakana, za razliku od mješavine s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana, koja je imala i veću čvrstoću. Slične zaključke u svom radu naveli su Chen i Liu [13].

Pri višem udjelu različitih vrsta vlakana došlo je do stvaranja gruda vlakana, zbog čega beton nije bio u potpunosti kompaktan. Zbog toga se nije ostvarila dobra veza između vlakana i cementne paste, a zbog velike poroznosti smanjena je vlačna čvrstoća. Ta pojava bila je dominantnija u mješavinama s karbonskim, čeličnim i polipropilenskim vlaknima. Prema rezultatima ispitivanja, pozitivan sinergijski efekt pojavio se u svim mješavinama s karbonskim i čeličnim vlaknima, i to pri

svim ispitivanim udjelima čeličnih vlakana, dok je u mješavini s dodatkom karbonskih, čeličnih i polipropilenskih vlakana do pozitivnog sinergijskog efekta došlo pri volumnom udjelu čeličnih vlakana od 0,5 %. Rezultati su pokazali da je povećanje veće kod vlačne čvrstoće cijepanjem u odnosu na tlačnu čvrstoću, a isti zaključak donesen je u prethodnim istraživanjima koja su pokazala da vlakna više utječu na povećanje vlačne nego tlačne čvrstoće.



Slika 4. Povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem pri starosti uzorka od 28 dana

3.4. Savojna čvrstoća

Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće različitih mješavina prikazani su u tablici 4., a povećanje savojne čvrstoće u odnosu na čvrstoću kontrolnog betona nakon 28 dana prikazano je na slici 5.

Zapaženo je da se savojna čvrstoća povećava s većim udjelom vlakana u mješavini. U mješavini s dodatkom karbonskih vlakana savojna čvrstoća povećana je 28-32 %, u mješavini s dodatkom karbonskih i čeličnih vlakana 67-209 %, dok je u mješavini s dodatkom karbonskih, čeličnih i PP vlakana povećana 71-205 % nakon 28 dana njegovanja uzoraka.

Zbog sinergijskog efekta, hibridni sustav s karbonskim i čeličnim vlaknima ima dobra svojstva pri svim ispitivanim volumnim udjelima vlakana. U mješavini s dodatkom karbonskih, čeličnih i PP vlakana, pozitivan sinergijski efekt hibridnih čeličnih vlakana na ponašanje mikroarmiranog betona uočen je samo u mješavinama S1C0P0 i S1C1P1, za razliku od mješavina S1C1 i S1C2, pri volumnom udjelu čeličnih vlakana od 0,5 %.

Maksimalni postotak povećanja savojne čvrstoće iznosi 71 % za mješavinu S1C0P0, odnosno 78 % za mješavinu S1C1P1 nakon 28 dana njegovanja. Razlog razvoja savojne čvrstoće kod istraživanih mješavina isti je kao kod vlačne čvrstoće cijepanjem. Negativan sinergijski efekt zapažen je u mješavini s karbonskim, čeličnim i PP vlaknima, s volumnim udjelom čeličnih vlakana od 1 % i 1,5 %. Mješavine s karbonskim i čeličnim vlaknima ostvarile su veću čvrstoću nego mješavine u koje su dodana i polipropilenska vlakna.

Maksimalno povećanje savojne čvrstoće u mješavini S3C2 iznosi 209 %. Rezultat upućuje na činjenicu da zbog pozitivnog sinergijskog efekta, mješavine s karbonskim i čeličnim vlaknima imaju dobra svojstva pri svim udjelima vlakana, dok se u

mješavinama s dodatkom i PP vlakana, dobra svojstva ostvaruju samo pri udjelu čeličnih vlakana od 0.5 %. Uspoređujući postotak povećanja savojne čvrstoće i tlačne čvrstoće, rezultati pokazuju da je povećanje savojne čvrstoće veće, što je slično kao kod rezultata vlačne čvrstoće, samo što je postotak povećanja savojne čvrstoće veći od povećanja vlačne čvrstoće.



Slika 5. Povećanje savojne čvrstoće pri starosti uzorka od 28 dana

3.5. Ispitivanje na udarno opterećenje

Otpornost betonskih mješavina na udar s obzirom na broj udaraca potrebnih za pojavu prvih pukotina (N1) i slom (N2) prikazana je u tablici 4. Brojevi udaraca N1 i N2 za različite kombinacije prikazani su na slici 6. Postotak povećanja postpukotinske nosivosti za sve uzorke prikazan je u tablici 4 i na slici 7. Povećanje postpukotinske otpornosti s dodatkom vlakana u odnosu na kontrolni beton zanemarlivo je. Vrijednosti N1 i N2 u kontrolnom betonu gotovo su identične zbog krtoćeg loma [6, 26].

Vrijednosti udarne čvrstoće ispitivanih uzoraka povećavale su se s većim udjelom vlakana u uzorcima. Iako je broj udaraca N1 i N2 bio veći nego u kontrolnom betonu, na uzorcima se pojavio krsti lom, kao i u kontrolnom uzorku.

Pri starosti betona od 28 dana, otpornost na širenje pukotina u betonu s karbonskim i čeličnim vlaknima povećana je 19,8 - 67,5 %, a u betonu s karbonskim, čeličnim i PP vlaknima povećanje je bilo 20,4 - 69,8 % u odnosu na kontrolni beton.

Maksimalno povećanje postpukotinske nosivosti bilo je 69,8 % veće nego u kontrolnom betonu, a odnosi se na mješavinu S3C1P1. Ovo povećanje uzrokovano je većim udjelima vlakana u betonu.

Pri većem udjelu vlakana u betonu, uzorci ispitivani na udarno opterećenje otkazuju uslijed izvlačenja vlakana iz matrice. Uzorci ispitivani na udarno opterećenje apsorbirali su više energije tijekom izvlačenja vlakana uzduž pukotine [27].

U uzorku S3C2 sa 1,5 % čeličnih vlakana, postpukotinska nosivost povećana je za 67,5 % u odnosu na kontrolni beton. Semsı Yazıcı i suradnici [28] u svojim su ispitivanjima došli do zaključka da najbolja svojstva uslijed udarnog opterećenja ima beton s volumnim udjelom od 1,5 % čeličnih vlakana.

U uzorku S3C2 s dodatkom čeličnih i karbonskih vlakana, povećanje postpukotinske nosivosti je 67,5 %, što je približno

50 % veća vrijednost od prethodno ispitivanih uzoraka s dodatkom samo čeličnih vlakana [29]. U ovom ispitivanju, dodavanje karbonskih vlakana čeličnim vlaknima moglo bi biti razlog povećanja nosivosti nakon pojave pukotina. Dodavanje karbonskih vlakana mikroarmiranom betonu s čeličnim vlaknima povećava sposobnost apsorpcije energije sučeljka čeličnih vlakana i matrice [30].

Povećanje postpukotinske otpornosti veće je u svim mješavinama s dodatkom karbonskih, čeličnih i PP vlakana nego u mješavinama bez PP vlakana i sa samo jednom vrstom vlakana.

Dodavanjem PP vlakana koja imaju nizak modul elastičnosti čeličnim i karbonskim vlaknima visokog modula elastičnosti može također biti razlog povećanja postpukotinske otpornosti u betonu.

Zbog miješanja različitih vrsta vlakana, značajan pozitivni sinergijski efekt uočen je u svim mješavinama s dodatkom čeličnih, karbonskih i PP vlakana.

U uzorku s karbonskim vlaknima, vrijednost N1 povećana je od 2,69 do 3 puta, a N2 je povećana od 2,69 do 2,99 puta u odnosu na kontrolni beton.

U uzorku s karbonskim i čeličnim vlaknima, vrijednost N1 povećana je od 3,67 do 5,62 puta, a N2 od 4,38 do 9,38 puta u odnosu na kontrolni beton nakon 28 dana.

U uzorku s karbonskim, čeličnim i PP vlaknima, vrijednost N1 povećana je od 3,73 do 5,82 puta, a vrijednost N2 od 4,48 do 9,84 puta u odnosu na kontrolni beton nakon 28 dana.

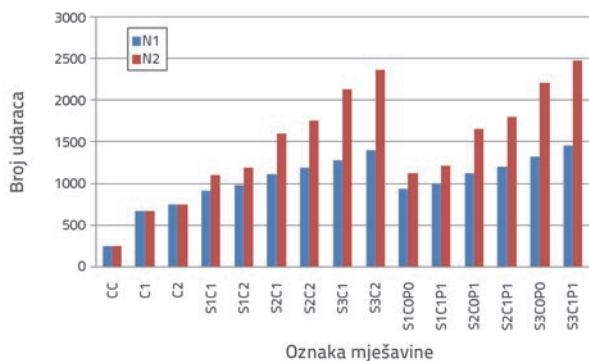
Maksimalna vrijednost N1 bila je 5,82, a N2 9,84 puta veća nego u kontrolnom betonu u uzorku S3C1P1. Te vrijednosti više su od vrijednosti iz prethodnih ispitivanja, a N1 i N2 su povećane od 4 do 8,5 puta u laganom betonu s čeličnim vlaknima u usporedbi s običnim laganom betonom nakon 28 dana njegovanja, pri udjelu vlakana od 1,5 % [31] (bez PP i karbonskih vlakana). Kada se u betonu koriste samo čelična vlakna, razmak između vlakana je veći.

S druge strane, kad se polipropilenska i karbonska vlakna pomiješaju s čeličnim vlaknima (pojedinačno ili u kombinaciji), povećava se otpornost betona na udarno opterećenje jer se smanjuje razmak između vlakana što utječe na poboljšanje svojstava betona.

Dodavanjem dviju ili više vrsta vlakana mješavini poboljšavaju se uporabna svojstva betona. Beton s dodatkom polipropilenskih vlakana u kombinaciji s čeličnim vlaknima ima veću otpornost na udarno opterećenje od betona s čeličnim ili karbonskim vlaknima.

Razlog tome jest činjenica da polipropilenska vlakna odgađaju pojavu pukotina, jer je nosivost betona veća. Pozitivan sinergijski efekt značajno je veći u mješavini s kombinacijom čeličnih, karbonskih i PP vlakana za razliku od mješavina koje sadrže samo karbonska vlakna, odnosno kombinaciju karbonskih i čeličnih vlakana.

Tara Rahmani i suradnici [32] te Mahmoud Nili i V. Afroughsabet [6, 7]. Na uzorku s dodatkom karbonskih vlakana uočen je krsti lom u 3 dijela, s tankim pukotinama.



Slika 6. Otpornost na udarna opterećenja pri pojavi prve pukotine i pri slomu uzorka



Slika 7. Otpornost na udarna opterećenja (postotak porasta postpukotinske otpornosti) za sve mješavine

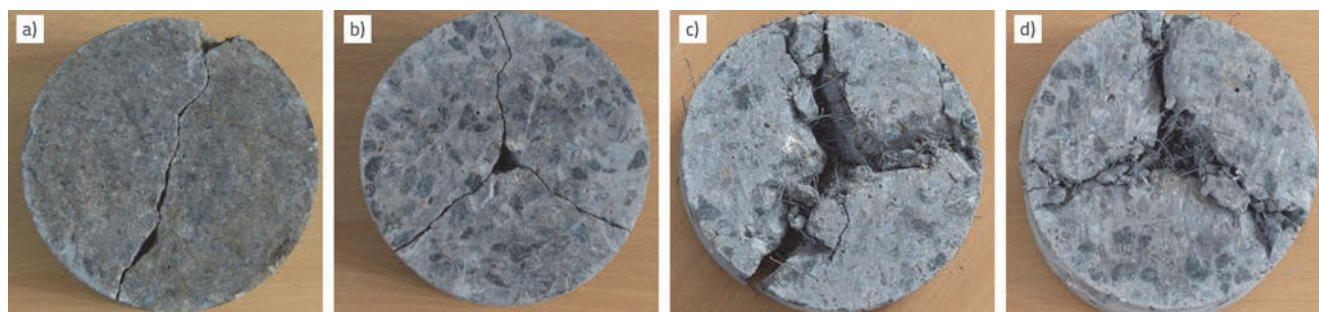
Vrste loma svih ispitivanih uzoraka prikazane su na slici 8. U kontrolnom uzorku pojavio se kruti lom, a iste rezultate dobili su. Veći broj pukotina uočen je na uzorcima koji sadrže čelična i karbonska, odnosno kombinaciju čeličnih, karbonskih i PP vlakana. U usporedbi s CFRC uzorcima s jednom vrstom vlakana, oblik pukotine pri kojoj je došlo do sloma promijenio se te više nije jedna velika pukotina, više manjih pukotina, ali strukturna cjelovitost uzorka nije promijenjena. Strukturna cjelovitost vrlo je važna za betonske konstrukcije koje su izložene kratkotrajnom

dinamičkom opterećenju. Miješanje različitih vrsta vlakana je dovelo do strukturne cjelovitosti betona pri udarnom opterećenju.

4. Zaključak

Na temelju eksperimentalnih rezultata zaključeno je sljedeće:

- Obradivost betona smanjuje se s povećanjem udjela vlakana u mješavini, bez obzira na to radi li se o jednoj ili više vrsta vlakana u mješavini.
- Dodavanjem hibridnih vlakana betonu povećava se njegova tlačna, vlačna čvrstoća cijepanjem i savojna čvrstoća pri starosti od 28 dana. Zapažen je veći pozitivni sinergijski efekt u mješavini s kombinacijom čeličnih, karbonskih i PP vlakana nego u mješavini s kombinacijom čeličnih i karbonskih vlakana pri volumnom udjelu vlakana od 1,5 %. Međutim, sinergijski efekt gubi se pri povećanju volumnog udjela vlakana u mješavini na 1 % i 1,5 %. Mješavine s dodatkom 1 % i 1,5 % karbonskih i čeličnih vlakana imaju bolja svojstva od mješavina s kombinacijom karbonskih, čeličnih i PP vlakana.
- Mješavine s karbonskim vlaknima imaju manju otpornost na udarno opterećenje u odnosu na mješavine s kombinacijom čeličnih i karbonskih, odnosno čeličnih, karbonskih i PP vlakana, koje su pokazale veću nosivost. Uzorci s karbonskim i PP vlaknima imaju visoku otpornost na udarno opterećenje, a maksimalno povećanje postpukotinske nosivosti iznosi 69.8 % u mješavini S3C1P1 u odnosu na kontrolni beton nakon 28 dana njegovanja. U mješavini S3C1P1, energija potrebna za pojavu prve pukotine povećana je 5,82 puta, a energija potrebna za slom uzorka povećana je 9,84 puta u odnosu na energiju primijenjenu na kontrolni beton. Ti rezultati pokazali su da miješanje različitih vrsta vlakana poboljšava svojstva betona pri udarnom opterećenju i postpukotinsku nosivost u odnosu na beton s jednom vrstom vlakana. Dodavanje hibridnih vlakana betonskim mješavinama poboljšava mehanička svojstva betona, ali ima i velike prednosti u betonskoj industriji koje se prije svega odnose na ekonomičnost i zaštitu okoliša.



Slika 8. Vrsta sloma uzoraka: a) kontrolni beton; b) beton s karbonskim vlaknima; c) beton s karbonskim i čeličnim vlaknima; d) beton s karbonskim, čeličnim i PP vlaknima

LITERATURA

- [1] Supit, S.W.M., Shaikh, F.U.A.: Effect of nano- CaCO_3 on compressive strength development of high volume fly ash mortars and concretes, *Journal of Advanced concrete Technology*, 12 (2014), pp. 178-186, <https://doi.org/10.3151/jact.12.178>
- [2] Kathirvel, P., Saraswathy, V., Karthik, S.P., Sekar, A.S.S.: Strength and Durability Properties of Quaternary Cement Concrete Made with Fly Ash, Rice Husk Ash and Limestone Powder. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (2013), 3, pp. 589-598. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0331-1>
- [3] Marar, K., Eren, O., Celik, T.: Relationship between flexural toughness energy and impact energy of high strength fiber reinforced concrete (HSFRC), *Materiales De Construcción*, 51 (2001), pp. 5-13.
- [4] Mohammadi, Y., Singh, S.P., Kaushik, S.K.: Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 956-965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.004>
- [5] Yao, W., Li, J., Wu, K.: Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction, *Cement and Concrete Research*, 33 (2003), pp. 27-30.
- [6] Nili, M., Afroughsabet, V.: Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 37 (2010), pp. 879-886. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.004>
- [7] Nili, M., Afroughsabet, V.: The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (2010), pp. 927-933. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.025>
- [8] Deng, Z.: The fracture and fatigue performance in flexure of carbon fiber reinforced Concrete, *Cement & Concrete Composites*, 27 (2005), pp. 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.03.002>
- [9] Park, S.B., Lee, B.I., Lim, Y.S.: Experimental study on the engineering properties of carbon fiber reinforced cement composites, *Cement and Concrete Research*, 21 (1991), pp. 589-600.
- [10] Sivakumar, A., Santhanam, M.: Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres, *Cement & Concrete Composites*, 29 (2007), pp. 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.006>
- [11] Qian, C.X., Stroeven, P.: Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000), pp. 63-69.
- [12] Banthia, N., Sappakittipakorn, M.: Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp. 1366-1372. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.005>
- [13] Chen, B., Liu, J.: Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 913-917. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.035>
- [14] IS 10262-2009, Indian Standard Guidelines for concrete mix design proportioning, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 2009.
- [15] IS 1199-1959, (Reaffirmed 1999), Indian Standard Methods of Sampling and Analysis of Concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [16] IS 516-1959, (Reaffirmed 1999) Edition 1.2 (1991-07), Indian Standard Methods of Tests for Strength of Concrete, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [17] IS 5816-1999, Indian Standard Splitting Tensile Strength of Concrete- Method of Test, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [18] ACI 544.2R-89 (Reapproved 2009), Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Reported by ACI Committee 544, Farmington Hills, Michigan.
- [19] Alavi Nia, A., Hedayatian, M., Nili, M., Afroughsabet, V.: An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete, *International Journal of Impact Engineering*, 46 (2012), pp. 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.01.009>
- [20] Mo, K.H., Yap, S.P., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Bu, C.H.: Impact resistance of hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete, *Construction and Building Materials*, 50 (2014), pp. 499-507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.016>
- [21] Uygunoglu, T.: Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 766-772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.008>
- [22] Eren, O., Marar, K.: Effect of steel fibers on plastic shrinkage cracking of normal and high strength concretes, *Materials Research*, 13 (2010), 2, pp. 135-141.
- [23] Karahan, O., Atis, C.D.: The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete, *Materials and Design*, 32 (2011), pp. 1044-1049. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>
- [24] Baeza, F.J., Galao, O., Zornoza, E., Garcés, P.: Effect of aspect ratio on strain sensing capacity of carbon fiber reinforced cement composites, *Materials and Design*, 51 (2013), pp. 1085-1094. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.010>
- [25] Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., Bindiganavile, V.: Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear, *Cement & Concrete Composites*, 48 (2014), pp. 91-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>
- [26] Dawood, E.T., Ramli, M.: Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, *Construction and Building Materials*, 28 (2012), pp. 193-200. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.057
- [27] Tabatabaei, Z.S., Volz, J.S., Keener, D.I., Gliha, B.P.: Comparative impact behavior of four long carbon fiber reinforced concretes, *Materials and Design*, 55 (2014), pp. 212-223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.048>
- [28] Yazıcı, S., Arel, H.S., Tabak, V.: The effects of impact loading on the mechanical properties of the SFRCs, *Construction and Building Materials*, 41 (2013), pp. 68-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.095>
- [29] Nataraja, M.C., Nagaraj, T.S., Basavaraja, S.B.: Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 2350 - 2359. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.011>

- [30] Chung, D.D.L.: Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material, *Composites: Part B*, 31 (2000), pp. 511-526.
- [31] Wang, H.T., Wang, L.C.: Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 38 (2013), pp 1146-1151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.016>
- [32] Rahmani, T., Kiani, B., Shekarchi, M., Safari, A.: Statistical and experimental analysis on the behavior of fiber reinforced concretes subjected to drop weight test, *Construction and Building Materials*, 37 (2012), pp. 360-369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.068>