

Primljen / Received: 9.5.2024.

Ispravljen / Corrected: 30.8.2024.

Prihvaćen / Accepted: 9.9.2024.

Dostupno online / Available online: 10.11.2024.

Istraživanje utjecaja zelenih hibridnih vlakana na žilavost i mehanička svojstva betona od pijeska željezne jalovine

Autori:

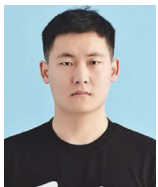


Izv.prof.dr.sc. **Huawang Shi**, dipl.ing.građ.
stone21st@163.com

Autor za korespondenciju



Zhenyao Shi, univ.bacc.ing.aedif.
849085806@qq.com



Bo Zhang, univ.bacc.ing.aedif.
3212166554@qq.com



Huilin Chen, univ.bacc.ing.aedif.
chenhuilin245@163.com

Tehničko sveučilište Hebei, Kina
Građevinski fakultet

Stručni rad

Huawang Shi, Zhenyao Shi, Bo Zhang, Huilin Chen

Istraživanje utjecaja zelenih hibridnih vlakana na žilavost i mehanička svojstva betona od pijeska željezne jalovine

Kako bi se smanjila krtoš i mogućnost stvaranja pukotina u betonu s pijeskom željezne jalovine, upotrijebljena je mješavina vlakana. U ovome su radu primijenjene dvije vrste jeftinih i ekološki prihvatljivih vlakana: čelična vlakna od recikliranih guma (RTSF) i kokosova vlakna (CF). Vlakna su pomiješana te je dobivena mješavina koja je podvrgnuta nizu ispitivanja, uključujući tlačno ispitivanje, vlačno ispitivanje, ispitivanje savijanjem i ispitivanje udarom. Učinci metode dodavanja vlakana i njihova udjela na žilavost i mehanička svojstva betona od pijeska željezne jalovine istraženi su u smislu ovisnosti utjecaja dodatka mješavine vlakana na žilavost i mehanička svojstva betona. Rezultati pokazuju da dodavanje dviju vrsta vlakana može učinkovito poboljšati žilavost i mehanička svojstva uzorka, a hibridno vlakno ima izraženiji učinak. U usporedbi s referentnom skupinom (Non) tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, čvrstoća na savijanje, udarna čvrstoća i vršno opterećenje na savijanje betona s udjelom od 0,75 % RTSF-a i 0,2 % CF-a povećali su se redom za 20,8 %, 42,9 %, 40,4 %, 92,4 % te 37,5 %. U kombinaciji s teorijskom analizom i analizom morfologije površine loma pokazalo se da čelična vlakna od recikliranih guma igraju glavnu ulogu u otpornosti na stvaranje pukotina, dok kokosova vlakna utječu na žilavost betona.

Ključne riječi:

mješavina vlakana, čelična vlakna od reciklirane gume, kokosova vlakna, pijesak željezne jalovine, žilavost

Professional paper

Huawang Shi, Zhenyao Shi, Bo Zhang, Huilin Chen

Investigating the effect of green hybrid fibre on toughening and mechanical properties of iron-tailing sand concrete

To improve the brittleness and susceptibility to cracking of iron tailings sand concrete, fibre blending was employed to toughen and resist cracking in the material. In this study, two inexpensive and environmentally friendly fibre materials were used: recycled tire steel fibre (RTSF) and coconut fibre (CF). The two fibre materials were blended and the resulting mixture was subjected to a series of performance tests, including compressive, tensile, flexural, impact, and bending tests. The effects of the fibre doping method and amount on the toughness and mechanical properties of iron tailings sand concrete were investigated in terms of the law of effect of the blended fibre admixture on the toughness and mechanical properties of iron tailings sand concrete. The results show that adding two types of fibres can effectively improve the toughness and mechanical properties of the specimen, and the hybrid fibre has a more obvious effect. Compared with the blank control group (Non), the compressive strength, splitting tensile strength, bending strength, impact strength, and bending peak load of the concrete with 0.75 % RTSF and 0.2 % CF increased by 20.8 %, 42.9 %, 40.4 %, 92.4 %, and 37.5 %, respectively. Combined with the theory and fracture surface morphology analysis, it was shown that recycled tire steel fibres play a major role in cracking resistance, while coconut fibres play a toughening role.

Key words:

fibre blending, recycling tire steel fibre, coconut fibre, iron tailing sand, toughening

1. Uvod

Željezna jalovina jest otpad ili nusproizvod koji nastaje u procesu rudarenja i koji sadržava nečistoće u rudi. Radi se o ostatku iz kojeg se ne uspijeva izdvojiti vrijedan metal i otpadu nakon što se ruda preradi mljevenjem, obogaćivanjem i drugim postupcima, a velika količina jalovine prodire u zemljišne resurse i uzrokuje onečišćenje okoliša. Posljednjih je godina otkriveno da se pijesak željezne jalovine može primjenjivati za pripremu betona radi ponovne upotrebe krutog otpada i smanjenja rasipanja resursa [1-3]. Znatno broj istraživanja [4-12] pokazao je da optimalna stopa zamjene pijeska željezne jalovine u betonu može povećati njegovu čvrstoću, no prekoračenje te stope može negativno utjecati na ponašanje betona prilikom razvoja pukotina. Dodavanje vlakana može poboljšati žilavost i ponašanje betona prilikom razvoja pukotina, pa se stoga vlakna mogu kombinirati s pijeskom željezne jalovine kako bi se poboljšali žilavost i ponašanje betona od pijeska željezne jalovine prilikom razvoja pukotina [13-6].

Istraživanje [17] pokazalo je da čelična vlakna pri određenome udjelu u betonu od pijeska željezne jalovine mogu spriječiti razvoj pukotina, smanjiti širinu pukotina, ojačati beton i povećati otpornost na pukotine te znatno poboljšati mehanička svojstva betona od pijeska željezne jalovine. Znanstvenici u zemlji i inozemstvu otkrili su da se čelična vlakna od recikliranih guma (eng. *recycled tire steel fibre* - RTSF) mogu primjenjivati u betonskim materijalima, a mehanička svojstva betona imaju određenu ulogu u smanjenju cijene industrijskih čeličnih vlakana (eng. *industrial steel fiber* - ISF). Karsamarakoon i sur. također su ispitivali mehanička svojstva RTSF-a i usporedili ih sa svojstvima SF-a te otkrili da se tlačna čvrstoća betona s udjelom RTSF-a povećala za 7 – 12 %, a primjenom SF-a za 17 – 20 % [18]. Hang [19] je istraživao odnos jednoosnoga vlačnog naprezanja i deformacije (σ - ϵ). Utvrđeno je da RTSF slabo povećava vlačnu čvrstoću SFRC-a pri malome udjelu vlakana. Carrillo [20] je eksperimentalno otkrio da su RTSF i ISF slični u smislu povećanja tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i Poissonova omjera betonskih uzoraka te da je RTSF povećao žilavost betona. Međutim, doprinos RTSF-a bio je manji od doprinosa ISF-a. Fan i sur. [21] pokazali su da RTSF može znatno poboljšati temeljne mehaničke karakteristike betona i zamijeniti ISF u određenim rasponima udjela.

Međutim, svaka vrsta vlakana ima svoja ograničenja i ne može odgovarajuće poboljšati svojstva betona. Dodavanje raznih drugih vlakana u beton može znatno optimirati svojstva betona u koji je dodana samo jedna vrsta vlakana. Kokosovo vlakno (eng. *Coconut Fiber* - CF) jest vlaknasti materijal dobiven iz ljuske kokosova oraha

te je lagano i dobre čvrstoće. Sivakumaresa Chockalingam [22] primijenio je kokosova vlakna za ojačanje betona visokih svojstava i otkrio da ona mogu poboljšati čvrstoću i trajnost betona. Alomayri Thamer i sur. [23] pripremili su beton istodobnim miješanjem nekoliko obrađenih otpada, točnije granule zgure iz visokih peći (eng. *granulated blast furnace slag* - GBFS), recikliranoga krupnog agregata (eng. *recycled coarse aggregate* - RCA) i kokosovih vlakana (CF). Utvrđeno je da su mehanička svojstva betona s recikliranim agregatom modificiranog GBFS-om, CF-om i modificiranim plastifikatorom jednaka ili veća od svojstava betona s nemodificiranim prirodnim agregatom. Navedeno upućuje na to da dodavanje CF-a može u određenoj mjeri neutralizirati negativne učinke RCA-e na beton. Istraživanja su pokazala da dodavanje kokosovih vlakana betonu povećava njegovu otpornost na pojavu pukotina i poboljšava njegovu žilavost i otpornost na udar [24-26]. Primjena kokosovih vlakana pomaže u smanjenju stvaranja otpada i ima mali utjecaj na okoliš. Kokosova vlakna obnovljivi su resurs, a njihova primjena kao mikroarmature u betonu u skladu je s načelima održivog razvoja i osigurava smanjenje potrebe za tradicionalnim neobnovljivim vlaknastim materijalima.

Zato ovaj rad ispituje učinke čeličnih vlakana od recikliranih guma i kokosovih hibridnih vlakana na žilavost i otpornost na pojavu pukotina betona od pijeska željezne jalovine kroz tlačna ispitivanja, ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem, ispitivanja otpornosti na udar i savijanje, pružajući referencu za izradu zelenih betona s hibridnim vlaknima te za primjenu i poticanje primjene betona od pijeska željezne jalovine u stvarnim projektima.

2. Eksperiment

2.1. Materijali korišteni u eksperimentu

2.1.1. Cementirajući materijali

U ispitivanju primijenjen je obični silikatni cement P-042,5. Cement je u skladu s normom GB 175-2023 Opći silikatni cement [27]. U ispitivanju također je korišten leteći pepeo razreda I. Tehnički pokazatelji letećeg pepela razreda I. zadovoljavaju nacionalnu normu GB/ T159-2017 Leteći pepeo za cement i beton [28].

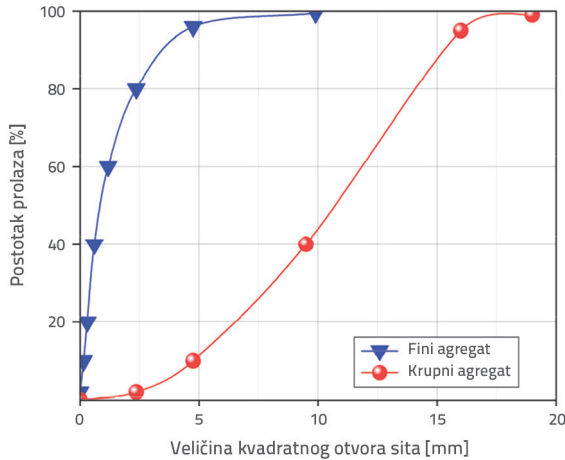
2.1.2. Krupni i sitni agregati

Sitni agregat odabran je iz pijeska željezne jalovine koji je potjecao iz područja Chengde u Hebeiju, u Kini. Nakon

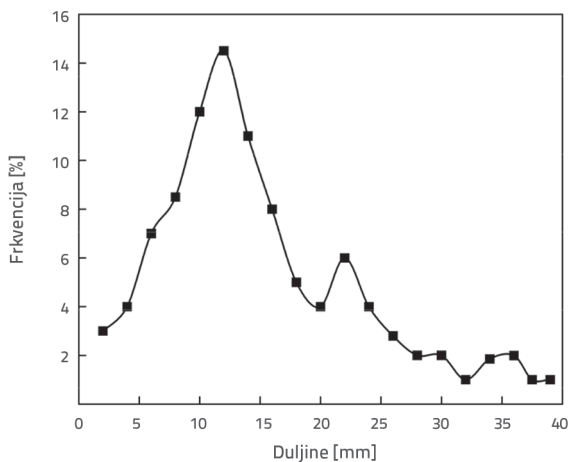
Tablica 1. Fizikalna svojstva agregata

Svojstva Agregat	Prividna gustoća [kg/m ³]	Nasipna gustoća [kg/m ³]	Apsorpcija vode [%]	Udio muljevutih čestica [%]	Otpornost na drobljenje	Raspon veličine agregata [mm]
Drobljeni kamen	2758,5	1531,5	0,58	0,52	9,6	2,5 – 20
Pijesak željezne jalovine	2732	1506	6,5	2,6	10,1	0 – 9,5

prosijavanja klasificiran je kao srednji pijesak zone II., s modulom finoće od 2,8. Krupni agregat jest prirodni drobljeni agregat iz kamenoloma grada Handana, s veličinom čestica od 5 do 20 mm. Krivulje granulometrijskog sastava agregata prikazane su na slici 1., a fizikalna svojstva agregata u tablici 1.



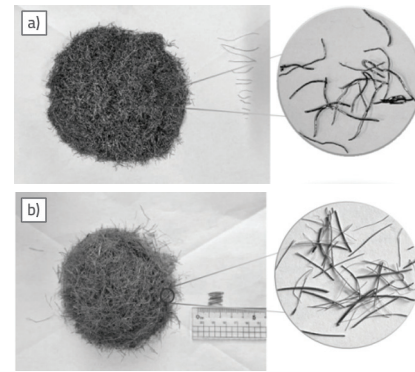
Slika 1. Granulometrijski sastav agregata



Slika 2. Dijagram frekvencije raspodjele duljine RTSF-a

2.1.3. Vlakna i njihova obrada

Ispitane su dvije vrste vlakana, i to čelična vlakna od recikliranih guma (RTSF) i kokosova vlakna (CF). RTSF je dobiven iz pogona za obradu otpadnih guma u Xingtaiju. Kako bi se filtrirale čestice gume, RTSF je potrebno prethodno prosijati kroz sита normiranih otvora. Dijagram frekvencije raspodjele duljine RTSF-a prikazan je na slici 2., a RTSF nakon obrade na slici 3. CF dobiven je iz odbačenih ljuski kokosova oraha, nakon čega je prvo podvrgnut procesu namakanja kako bi se smanjilo taloženje. Nakon sušenja na zraku CF je podijeljen u pojedinačne niti i isječen na duljinu od 10 mm (slika 3.), nakon čega je kokosovo vlakno bilo pet sati namakano u otopini NaOH masenog udjela 5 % [29], a potom isprano, osušeno na zraku i skladišteno. Glavna svojstva vlakana prikazana su u tablici 2.



Slika 3. Izgled čeličnih vlakana od reciklirane gume i kokosovih vlakana: a) RTSF; b) CF

Tablica 2. Glavna svojstva RTSF i CF vlakana

Svojstva \ Vlakna	RTSF	CF
Gustoća [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	7800	1150
Vlačna čvrstoća [MPa]	2185	95~230
Promjer [μm]	210~240	100~450
Duljina [mm]	2,9~39,8	10

2.1.4. Voda i superplastifikator

Korištena je pitka voda. Superplastifikator bio je visokoučinkovito sredstvo za smanjenje vode na bazi polikarboksilne kiseline, sa stopom smanjenja vode od 25 %. Primjenom sredstva za smanjenje vode polikarboksilne kiseline može se promijeniti ionska adsorpcija samog vlakna, a istodobno prilagoditi konzistencija cementnog morta, čime se raspršuju vlakna [25] i izbjegava njihovo grudanje.

2.2. Sastavi mješavina i priprema uzorka

U ovom je eksperimentu vodocementni omjer iznosio 0,38, udio letećeg pepela 20 %, udio pijeska 35 %, a udjeli dvaju vlakana uzeti su kao eksperimentalne varijable. Volumenski udio RTSF-a iznosio je 0,5 %, 0,75 % i 1,0 %, a volumenski udio kokosova vlakna 0,1 %, 0,2 % i 0,3 %. Izrađena je kontrolna skupina te ukupno 16 ispitnih skupina. Udio vlakana u mješavinama prikazan je u tablici 3.

Postupak pripreme betona prikazan je na slici 4. Beton je miješan u skladu s normom CECS 13:2009 Normirane metode ispitivanja betona s vlaknima [30]. Prvo su pijesak željezne jalovine, cement i leteći pepeo stavljeni u miješalicu te miješani dvije minute, nakon čega je dodan krupni agregat te je potom miješanje trajalo tri minute. Drobljena kamena vlakna prosijana su u kokosova vlakna pomoću sítu normiranog otvora. Dodani su voda i superplastifikator. Mješavina je miješana četiri minute. Isto normirano sito primijenjeno je za prosijavanje RTSF-a. Nakon miješanja dobivena je svježa betonska mješavina dobre

Tablica 3. Udio čeličnih vlakana od recikliranih guma i kokosovih vlakana u betonu od pijeska željezne jalovine

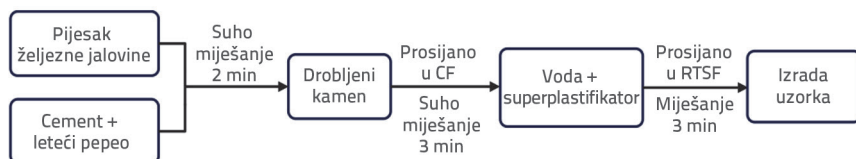
Skupina	Voda [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	Leteći pepeo [kg/m ³]	Pijesak željezne jalovine [kg/m ³]	Drobljeni kamen [kg/m ³]	Superplastifikator [kg/m ³]	RTSF [kg/m ³]	CF [kg/m ³]
Kontrolna skupina							0	0
RS0-C01							0	1,15
RS0-C02							0	2,3
RS0-C03							0	3,45
RS05-C0							39	0
RS075-C0							5,5	0
RS10-C0							78	0
RS05-C01	170	358	89	624	1159	3,6	39	1,15
RS05-C02							39	2,3
RS05-C03							39	3,45
RS075-C01							58,5	1,15
RS075-C02							58,5	2,3
RS075-C03							58,5	3,45
RS10-C01							78	1,15
RS10-C02							78	2,3
RS10-C03							78	3,45

fluidnosti te je izmjereno njezino slijeganje koje je iznosilo približno 95 – 150 mm. Mješavina je zatim ugrađena u kalup oblika kocke brida 100 mm i prizme dimenzija 100 × 100 × 400 mm. Svi su uzorci zbijeni i protreseni 30 s na betonskome vibracijskom stolu, a zatim prekriveni plastičnom folijom. Nakon što je 24 sata ostavljen na sobnoj temperaturi, uzorak je izvađen iz kalupa i čuvan 28 dana u standardnoj prostoriji za njegu, a zatim ispitan.

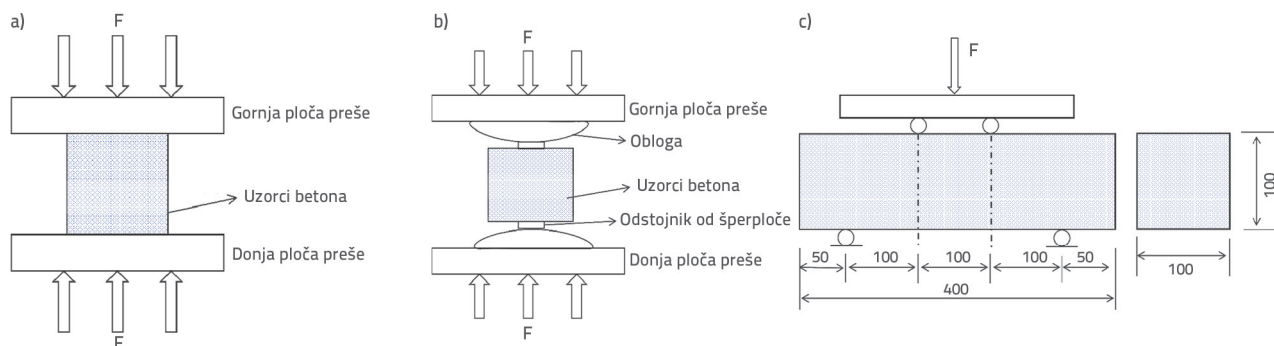
2.3. Metode ispitivanja

2.3.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje (100 × 100 × 100 mm, 100 × 100 × 400 mm)

Uzorak je ispitan nakon 28 dana njege u normiranim uvjetima, u skladu s Normiranim metodama ispitivanja mehaničkih svojstava običnog betona (GB/T 50081-2002) [31]. Za provođenje ispitivanja tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem na uzorku oblika kocke dimenzija 100 × 100 × 100 mm s povećanjem opterećenja od 0,5 MPa/s i 0,05 MPa/s odabran je YE-2000A automatski uređaj za ispitivanje



Slika 4. Dijagram tijeka pripreme betona

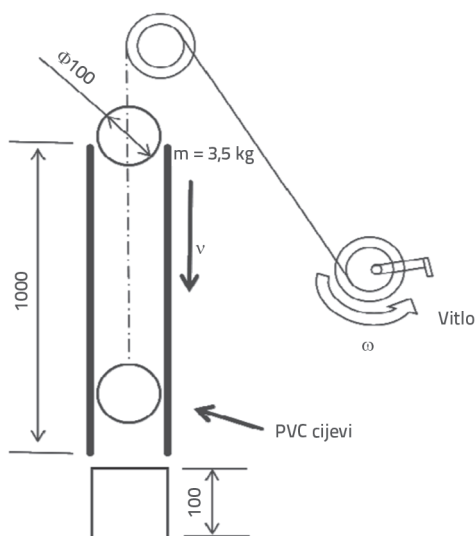


Slika 5. Shematski dijagram eksperimentalnog opterećenja: a) Shematski dijagram opterećenja tlačnim ispitivanjem; b) Shematski dijagram opterećenja ispitivanjem vlačne čvrstoće cijepanjem; c) Shematski dijagram opterećenja pri ispitivanju savijanjem

tlaka upravljana mikroročunalom. U svakoj su skupini ispitana po tri uzorka te je dobivena srednja vrijednost za tlačnu i vlačnu čvrstoću svake skupine. Za prizmatični uzorak dimenzija $100 \times 100 \times 400$ mm, koji je primijenjen u ispitivanju čvrstoće na savijanje, opterećenje je povećano na $0,05$ MPa/s. Čvrstoća na savijanje svake skupine određena je ispitivanjem četiriju uzoraka i izračunavanjem srednje vrijednosti. Shema eksperimentalnog opterećenja prikazana je na slici 5.

2.3.2. Ispitivanje otpornosti na udar

Udarana čvrstoća određena je metodom padajuće kuglice [32]. Odabrana je čelična kuglica promjera 100 mm i mase $3,5$ kg koja je slobodno pala s visine od 1 m u središte ispitnog uzorka, a udarac je bio ponavljan sve dok se na površini ispitnog uzorka nije pojavila vidljiva pukotina. Zabilježen je broj udaraca i pretvoren u energiju udara kako bi se odredila udarna čvrstoća betona od pijeska željezne jalovine. Izračunavanjem srednje vrijednosti triju ispitanih uzoraka u svakoj skupini dobivena je udarna čvrstoća. Shema eksperimentalnog opterećenja prikazana je na slici 6.



Slika 6. Shematski dijagram ispitivanja otpornosti na udar, uzorak: $100 \times 100 \times 100$ mm

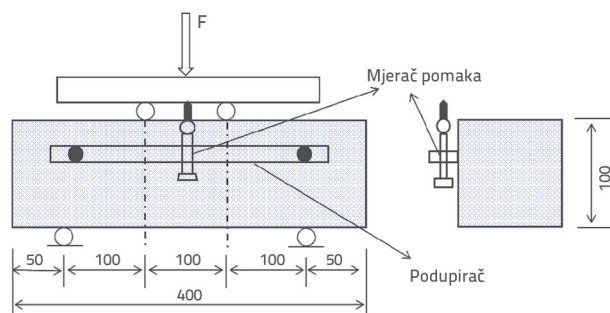
Rezultati su izračunani pomoću izraza (1):

$$W = n \cdot m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

pri čemu je W udarna čvrstoća materijala u nanometrima, n broj udarca uzorka, m masa padajućeg čekića u kilogramima, g ubrzanje gravitacije, uzeto kao $9,8$ N/kg, a h vertikalna visina pada padajućeg utega.

2.3.3. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Ispitni uzorci njegovani su do starosti od 28 dana, u skladu s normom CECS 13:2009 Normirane ispitne metode za vlaknasti beton [30], u WDW-100D elektroničkome univerzalnom stroju za ispitivanje opterećenja primjenom mjerača pomaka za mjerenje srednjeg raspona poremećaja, a srednja vrijednost izračunana je kao rezultat ispitivanja četiriju uzoraka u svakoj skupini primjenom kontrole pomaka za opterećenje i brzine opterećenja od $0,5$ mm/min. Shema eksperimentalnog opterećenja prikazana je na slici 7.



Slika 7. Ispitivanje čvrstoće na savijanje, uzorak: $100 \times 100 \times 400$ mm

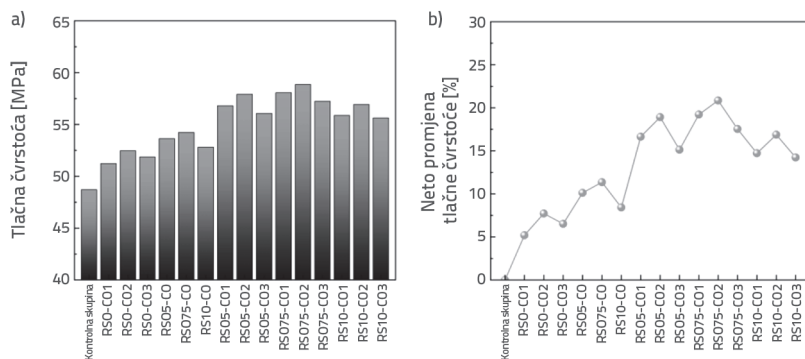
3. Rezultati ispitivanja i rasprava

3.1. Mehanička svojstva

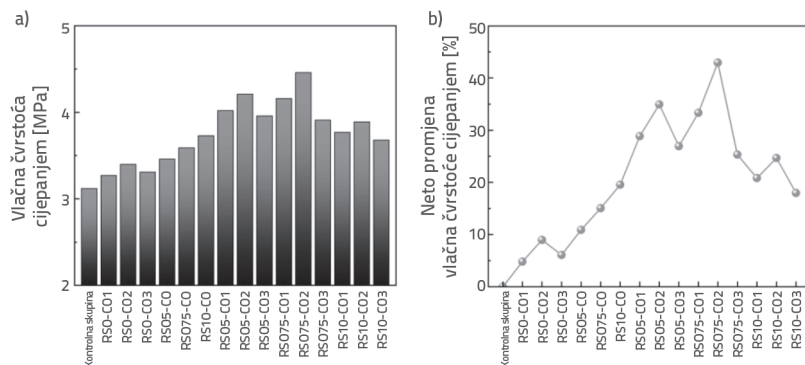
Od mehaničkih svojstava ispitani su tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje u četirima točkama.

3.1.1. Tlačna čvrstoća

Vrijednosti tlačne čvrstoće betona od pijeska željezne jalovine s dodatkom miješanih vlakana prikazane su na slici 8. Dodavanje 0,5 % i 0,75 % RTSF-a povećalo je tlačnu čvrstoću betona od željezne jalovine na 53,64 MPa odnosno 54,24 MPa, što je oko 10,12 % odnosno 11,35 % više u odnosu na kontrolnu skupinu (48,71 MPa). Navedeni se rezultati ponešto razlikuju od rezultata koje su objavili Baričević i sur., što je možda uzrokovano različitim frekvencijama raspodjele proučavanih duljina RTSF-a. Duljina RTSF-a primijenjenog u ovom eksperimentu bila je veća te je iznosila približno 10 mm, dok je duljina RTSF-a koju su primijenili Baričević i sur. iznosila približno 6 mm. Što je vlakno kraće, lakše se stvaraju grudice u betonu, čime se smanjuje tlačna čvrstoća betona [33]. RTSF je raspoređen u kaotičnoj fazi unutar betona i može učinkovito apsorbirati energiju te spriječiti stvaranje početnih pukotina u betonu. Zato se tlačna čvrstoća betona od pijeska željezne jalovine nakon dodatka RTSF-a povećala. Međutim, kada je udio RTSF-a bio u rasponu od 0,75 % do 1,0 %, nije bilo znatnog povećanja vrijednosti tlačne čvrstoće betona (52,81 MPa), posebno kada je udio RTSF-a dosegnuo 1,0 %, čime je došlo do malog smanjenja vrijednosti tlačne čvrstoće u usporedbi sa skupinom s udjelom od 0,75 %. To može biti zato što je udio vlakana bio prevelik i lako je došlo do grudanja vlakana u betonu, što je rezultiralo uništavanjem jednolike strukture



Slika 8. Rezultati ispitivanja: a) Tlačna čvrstoća; b) Neto promjena tlačne čvrstoće



Slika 9. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem: a) Vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem; b) Neto promjena vlačne čvrstoće cijepanjem

betona. Svaki dio deformacije sile bio je nekonzistentan, što je dovelo do smanjenja njegove tlačne čvrstoće.

Pri određenome udjelu RTSF-a miješanje s CF-om može znatno poboljšati tlačnu čvrstoću betona od pijeska željezne jalovine, odnosno miješanje s 0,2 % CF-a može povećati tlačnu čvrstoću betona od pijeska željezne jalovine za približno 7,72 %. Kada je udio CF-a veći od 0,2 %, čini se da dolazi do malog smanjenja tlačne čvrstoće. Tako je pri udjelu CF-a od 0,2 % uočeno najveće poboljšanje tlačne čvrstoće betona. Slično RTSF-u, CF pokazuje trodimenzijski sustav kaotične raspodjele faza u betonu, apsorbirajući vanjsku energiju i silu te sprječavajući stvaranje malih pukotina [34].

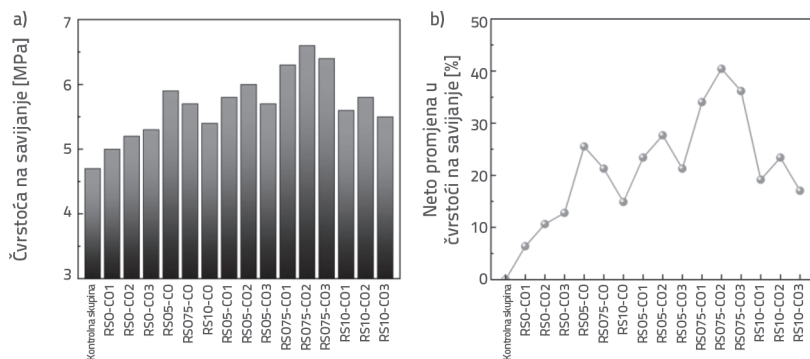
Dodavanje 0,1 do 0,2 % CF-a i 0,75 % RTSF-a može maksimirati tlačnu čvrstoću betona od pijeska željezne jalovine. Na primjer, tlačna čvrstoća skupine RS075-C01 iznosi 58,07 MPa, a skupine RS075-C02 58,86 MPa, što je 19,22 % odnosno 20,84 % više od kontrolne skupine. Navedeni rezultati pokazuju da dodavanje RTSF-a i CF-a može stvoriti dobru strukturu betona otpornu na pukotine [35], koja odgađa stvaranje mikroskopskih pukotina i početak razvoja makroskopskih pukotina.

3.1.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Vlačne čvrstoće cijepanjem betona od pijeska željezne jalovine s dodatkom miješanih vlakana prikazane su na slici 9. Vlačna čvrstoća cijepanjem betona od pijeska željezne jalovine pokazuje

znatno poboljšanje s dodatkom RTSF-a. U rasponu udjela RTSF-a od 0,5 % do 1,0 % vlačna čvrstoća cijepanjem betona od pijeska željezne jalovine povećava se od 10,9 % do 19,6 % u usporedbi sa kontrolnom skupinom. U usporedbi s RTSF-om CF također pokazuje znatno poboljšanje vlačne čvrstoće betona cijepanjem, iako u manjoj mjeri. Vlačna čvrstoća cijepanjem betona od pijeska željezne jalovine pomiješanog s 0,2 % CF-a pokazuje poboljšanje od približno 9 % u usporedbi s vlačnom čvrstoćom cijepanjem kontrolne skupine. Razlozi su mala vlačna čvrstoća i modul elastičnosti CF-a, koji ograničavaju njegov utjecaj na vlačnu čvrstoću betona. Međutim, radi se o ekološki prihvatljivijoj i ekonomski isplativijoj opciji, a također pomaže poboljšati otpornost na nastanak pukotina u betonu od pijeska željezne jalovine.

U usporedbi s dodavanjem jedne vrste vlakana, ili RTSF-a ili CF-a, miješanje dviju vrsta vlakana dalo je bolje rezultate. Na primjer, vlačna čvrstoća cijepanjem skupine RS075-C02 iznosila je 4,46 MPa, što je 43 % veće od vlačne čvrstoće kontrolne skupine i veće od vlačne

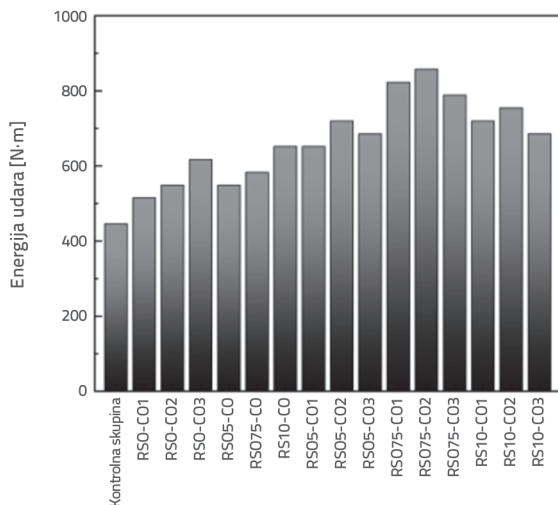


Slika 10. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje u četirima točkama: a) Čvrstoća na savijanje; b) Neto promjena u čvrstoći na savijanje

čvrstoće skupine s RTSF-om (15,1 %) i skupine s CF-om (9 %). Druge skupine hibridnih vlakana također su pokazale određeni stupanj poboljšanja u odnosu na skupine pojedinačnih vlakana. U drugim hibridnim vlaknastim betonskim matricama kao što je čelično-polipropilenski hibridni mikroarmirani beton također postoji sinergistički učinak tih vlakana, a točnije hibridni sustav vlakana velikog modula elastičnosti i malog modula elastičnosti vlakana koja su međusobno isprepletana da tvore sličnu strukturu krošnje drveta u betonskoj matrici. Vlakno velikog modula elastičnosti predstavlja središnju granu, a vlakno malog modula elastičnosti ima ulogu bočne grane.

3.1.3. Čvrstoća na savijanje u četiri točke

Vrijednosti čvrstoće na savijanje betona od pijeska željezne jalovine s dodatkom miješanih vlakana prikazane su na slici 10. Savojna čvrstoća kontrolne skupine iznosi 4,7 MPa. Maksimalno povećanje čvrstoće na savijanje uzoraka u skupinama s pojedinačnim CF i RTSF vlaknima je 12,8 % (RS0-C03) odnosno 25,5 % (RS05-C0), a vrijednosti čvrstoće na savijanje iznose 5,3 MPa odnosno 5,9 MPa. Učinak na čvrstoću na savijanje betona



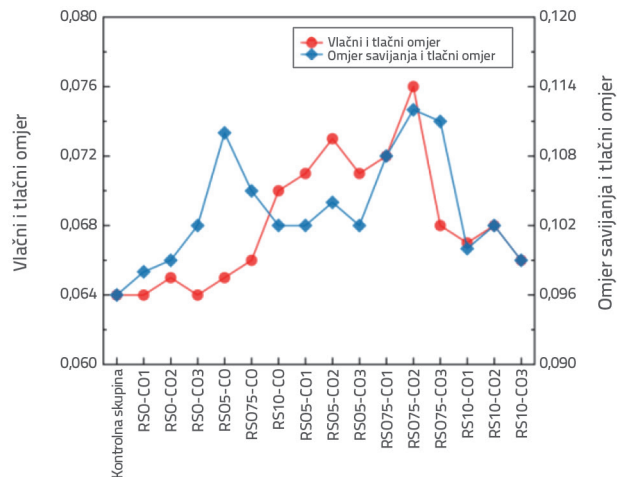
Slika 11. Energija udara

najveći je kada volumenski udio RTSF-a dosegne 0,5 %. Navedeno je u skladu s rezultatima autora Gu i sur. [36]. Taj znatni učinak RTSF-a na čvrstoću na savijanje betona rezultat je toga što u usporedbi s CF-om RTSF ima veću elastičnu čvrstoću i bolju otpornost na makropukotine i premoštenje pukotina. U procesu savijanja uzoraka vlakna se izvlače iz betonske matrice i troše dio energije. Zato dodavanje određenog udjela RTSF-a i CF-a može znatno poboljšati ponašanje betona pri savijanju. Osim toga RTSF sadržava gumene čestice koje nisu dovoljno prosijane te je gumeni mikroprah pričvršćen na njegovu površinu, što slabi adhezijsko naprezanje između unutrašnjosti betona, agregata i cementnih materijala. Posljedično, povećanje udjela RTSF-a rezultira odgovarajućim smanjenjem čvrstoće na savijanje betona zbog stvaranja slabijeg sučeljka unutar materijala.

3.2. Procjena žilavosti

3.2.1. Analiza udarne čvrstoće

Energija udara (slika 11.), vlačni i tlačni omjer (slika 12.) i omjer savijanja prikazuju rezultate ispitivanja udarne čvrstoće na uzorcima s različitim skupinama vlakana. Kao što je to prikazano na slici, podaci pokazuju da je dodavanjem vlakana energija udara uzoraka u svakoj skupini bila povećana u različitim stupnjevima. Naime, skupina s mješovitim vlaknima pokazuje superiornu otpornost na udarce. To je uglavnom zato što kod uzorka na koji se primjenjuje udarna sila vlakna unutar betona i betonska matrica deformiranjem istodobno troše energiju, čime se poboljšava udarna čvrstoća uzorka (otpornost na početno pucanje). Nakon oštećenja uzorka udarom uništava se površina



Slika 12. Vlačni i tlačni omjer te omjer savijanja

i stvara pukotina, a vlakna igraju ulogu premoščivanja te sprječavaju daljnji razvoj pukotina i poboljšavaju udarnu čvrstoću uzorka. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je udarna čvrstoća skupine s dodanim ili CF-om ili RTSF-om usporediva, tj. udarna čvrstoća CF uzorka s 0,3 % volumenskog udjela iznosi 617 Nm, a udarna čvrstoća RTSF uzorka s 1,0 % volumenskog udjela 652 Nm. To je slično vlaknu slame koju su proučavali Zhang Xueyuan i sur. [37] jer CF, kao biljno vlakno, ima velik udio celuloze i dobru fleksibilnost koja može učinkovito apsorbirati i raspršiti vanjske udarne sile, čime se poboljšava otpornost betonskih uzoraka na udar.

3.2.2. Analiza vlačnog i tlačnog omjera te omjera savijanja

Vlačni i tlačni omjeri odnose se na sposobnost deformacije betona pod vlačnim i tlačnim naprezanjima. Omjer savijanja odnosi se na ponašanje betona pri ponavljanim vlačnim i tlačnim naprezanjima. Ta se dva omjera mogu upotrebljavati kao pokazatelji žilavosti betona. Navedeno je prikazano na slikama 11. i 12. Vlačni i tlačni omjer uzorka prvo raste, a zatim se smanjuje s povećanjem udjela CF-a te ponovno raste, a zatim se postupno izjednačava s povećanjem udjela RTSF-a. U usporedbi s kontrolnom skupinom i skupinom s jednom vrstom vlakana, vlačni omjeri skupine s miješanim vlaknima znatno su poboljšani. Vlačni omjeri skupina RS05-C02 i RS075-C02 poboljšani su za 14 % odnosno 19 %, u usporedbi s kontrolnom skupinom, što upućuje na to da miješanje RTSF-a i CF-a može imati pozitivan utjecaj i poboljšati vlačni omjer betona. S povećanjem udjela CF-a trend omjera savijanja uzorka pokazuje postupni porast jer kada je dodavanje CF-a konstantno, smanjenje njegove čvrstoće na savijanje manje je od smanjenja tlačne čvrstoće, a dodavanje CF-a poboljšava ponašanje uzorka pri savijanju. S povećanjem udjela RTSF-a trend omjera savijanja uzorka pokazuje postupno smanjenje, a omjer savijanja skupine RS05-CO veći je od omjera ostalih skupina s jednom vrstom vlakana, što je posljedica toga da kada volumenski udio RTSF-a iznosi 0,5 %, stupanj njegove čvrstoće na savijanje puno je veći od njegove tlačne čvrstoće. U kombinaciji sa sveobuhvatnom analizom vlačnog i tlačnog omjera te omjera savijanja za svaku skupinu uzoraka, skupine s jednom vrstom vlakana i skupine s miješanim vlaknima mogu poboljšati žilavost uzoraka unutar određenog udjela, što učinkovito može smanjiti krhkost željezne jalojvine i defekte u betonu.

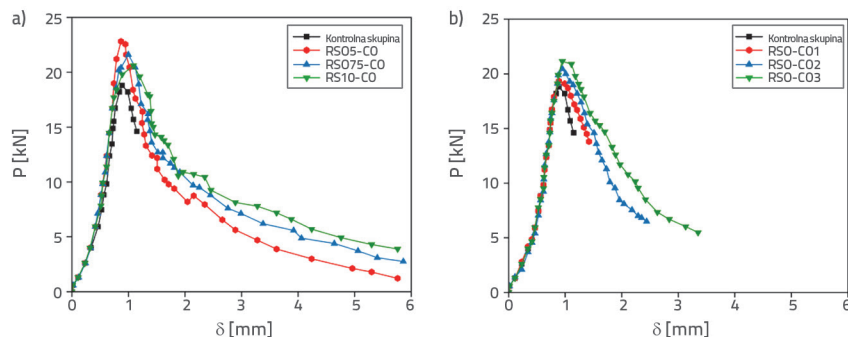
3.2.3. Žilavost pri savijanju (i indeks žilavosti pri savijanju)

Žilavost pri savijanju svakog uzorka kvantificirana je površinom ispod krivulje opterećenja i pomaka tijekom savijanja. Veća površina upućuje na bolju žilavost uzorka pri savijanju [38]. Krivulje opterećenja i pomaka uzoraka u skupini

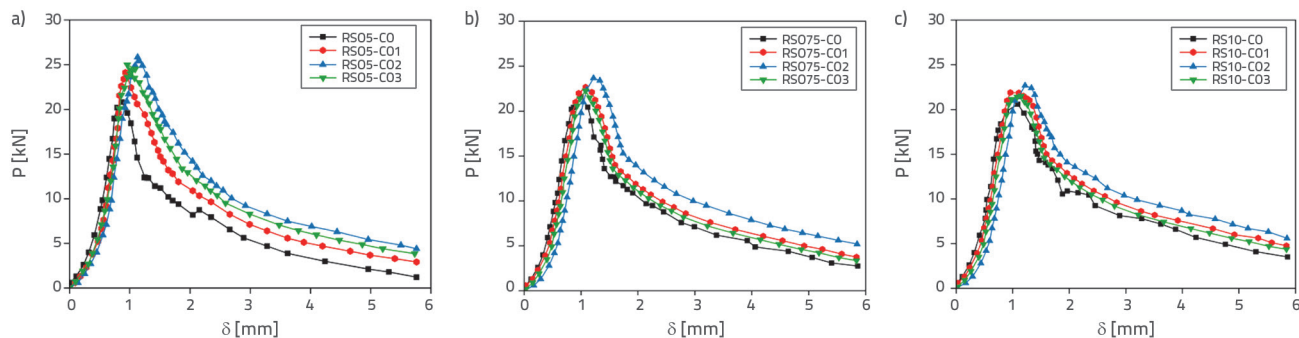
s jednom vrstom vlakna i u skupini miješanih vlakana prikazane su na slici 13., a krivulje opterećenja i pomaka (P- δ) skupine s jednom vrstom vlakna na slici 14.

Krivulje opterećenja i pomaka (P- δ) skupine s jednom vrstom vlakana, krivulje opterećenja i pomaka uzoraka u svakoj skupini gotovo su slične prije postizanja vršnog opterećenja (slika 13.). Uzorci kontrolne skupine pokazuju smanjenje krivulja nakon vršnog opterećenja, bez odgođenoga padajućeg područja te pokazuju iznenadna krhka oštećenja, što upućuje na slabu žilavost uzoraka pri savijanju. Vršna opterećenja uzoraka u skupini s kokosovim vlaknima veća su od opterećenja u kontrolnoj skupini, a nakon vršnog opterećenja slijedi kratko odgođeno područje spuštanja, koje kasni s povećanjem udjela CF-a, ali ne uspijeva kada pomak dosegne približno 3 mm. Dodavanje CF-a uzrokuje odgodu sloma uzoraka. Zato je dodavanje CF-a u određenoj mjeri poboljšalo žilavost uzoraka pri savijanju. Krivulja žilavosti pri savijanju uzorka u skupini s dodanim RTSF-om pokazuje očito odgođeno opadanje, a opadanje krivulje žilavosti blaže je s povećanjem udjela RTSF-a. Povećanje udjela RTSF-a od 0,5 % do 1,0 % rezultira kontinuiranim smanjenjem vršnog opterećenja, praćeno izraženijim izravnavanjem opadajućeg dijela krivulje žilavosti. To upućuje na to da prekomjerni udio RTSF-a može dodatno povećati žilavost uzoraka pri savijanju, iako će imati nepovoljan učinak na njihova mehanička svojstva. Razlog je taj što je, nakon postizanja vršnog opterećenja, oštećeno stanje uzorka podvrgnuto postupnome prelasku iz unutarnjih pukotina u makropukotine. RTSF je zatim prenio naprezanje kroz pukotine unutar matrice, djelujući kao sredstvo za premoštenje pukotina. Posljedično, kada su se, nakon što je postignuto vršno opterećenje, stvorile pukotine, uzorak je još uvijek mogao izdržati dio opterećenja [39] sve dok RTSF nije uklonjen iz unutrašnjosti matrice uzorka.

Kao što je to prikazano na slici 14., za hibridne skupine vlakana, kada se potvrdi dodavanje primjesa RTSF-a, vršno opterećenje uzorka koji pripada skupini miješanih vlakana pokazuje obrazac postupnog povećanja, nakon čega slijedi opadanje (slika 14.). Taj se fenomen može pripisati činjenici da dodavanje CF-a povećava otpornost na stvaranje pukotina i žilavost uzorka. Međutim, s povećanjem volumenskih udjela CF-a unutar matrice uzorka dolazi do prevelike količine vlakana, što dovodi do njihove

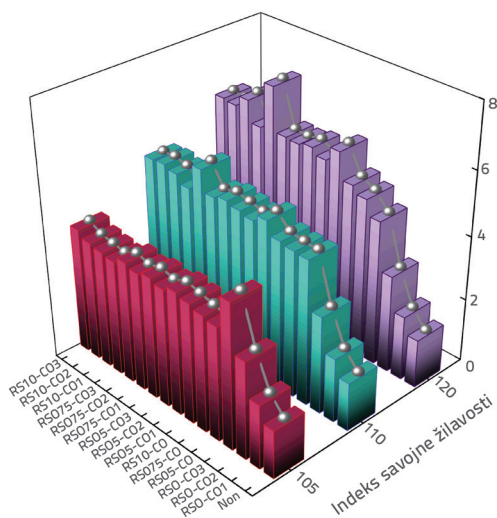


Slika 13. Krivulje opterećenja i pomaka (P- δ) skupine s jednom vrstom vlakana: a) Dodavanje čeličnog vlakna od recikliranih guma; b) Dodavanje kokosova vlakna



Slika 14. Krivulje opterećenja i pomaka ($P-\delta$) za skupine hibridnih vlakana: a) $P-\delta$ krivulja čeličnih vlakana od recikliranih guma u udjelu od 0,5 %; b) $P-\delta$ krivulja čeličnih vlakana od recikliranih guma u udjelu od 0,75 %; c) $P-\delta$ krivulja čeličnih vlakana od recikliranih guma u udjelu od 1,0 %

neravnomjerne raspodjele, što pak utječe na gustoću i čvrstoću uzorka [40], a vršno opterećenje uzorka smanjuje se. Kada se dodaje 0,2 % CF-a te 0,75 % RTSF-a, vršno opterećenje uzorka povećava se za 37,5 % u usporedbi sa skupinom bez dodatka. Povećanje vršnog opterećenja kod uzorka u skupini mješovitih vlakana izraženije je, a opadajući dio krivulje opterećenja i pomaka postupniji je. Također, u skupini mješovitih vlakana izraženiji je učinak poboljšanja na žilavost uzorka pri savijanju.



Slika 15. Indeks žilavosti pri savijanju

Tablica 4. Indeks žilavosti pri savijanju različitih uzoraka

Skupina	I5	I10	I20	Skupina	I5	I10	I20
Kontrolna skupina	1,52	1,52	1,52	RS05-C02	3,71	4,93	5,81
RS0-C01	2,02	2,02	2,02	RS05-C03	3,82	5,02	5,72
RS0-C02	3,07	3,07	3,07	RS075-C01	3,71	4,91	5,75
RS0-C03	4,56	4,56	4,56	RS075-C02	3,82	5,56	7,10
RS05-C0	3,58	4,59	5,03	RS075-C03	3,62	4,78	5,69
RS075-C0	3,66	4,66	5,25	RS10-C01	3,68	5,03	6,28
RS10-C0	3,77	5,06	6,06	RS10-C02	3,75	5,13	6,02
RS05-C01	3,81	4,84	5,62	RS10-C03	3,95	5,09	6,07

Indeks žilavosti betona pri savijanju, izračunan u skladu s normom CECS 13:2009 Normirane ispitne metode za beton ojačan vlaknima, prikazan je na slici 15. Relevantni podaci prikazani su u tablici 4. Indeks žilavosti pri savijanju (I5, I10 i I20) kontrolne skupine iznosi 1,52, dok je indeks skupina RS0-C01, RS0-C02 i RS0-C03 1,3, 2,0 i 3,0 puta veći od vrijednosti kontrolne skupine. S povećanjem volumena CF-a i RTSF-a raste indeks žilavosti pri savijanju. Međutim, skupina s RTSF-om pokazuje superiornu duktilnost u usporedbi sa skupinom s CF-om. Navedeno se pripisuje inherentnoj čvrstoći i sposobnosti RTSF-a da premosti betonske pukotine, što učinkovito odgađa proces savijanja i lomljenja betona, čime se povećava njegova žilavost. Indeks žilavosti pri savijanju (I5, I10 i I20) za skupinu RS075-C02 je 2,5, 3,6 odnosno 4,7 puta veći od žilavosti pri savijanju u kontrolnoj skupini.

3.3. Analiza žilavosti i mehanizma otpornosti na stvaranje pukotina

Uzimajući u obzir teoriju energetske ravnoteže, analizirani su proces oštećenja betona, morfologija vlakana površine loma betonskih greda te žilavost i mehanizam otpornosti na pucanje hibridnih vlakana u betonu od pijeska željezne jalovine [41].

Iz perspektive energetske ravnoteže, kada beton s hibridnim vlaknima pukne pod djelovanjem sile, rad vanjske sile G_w jednak je zbroju energije koju apsorbira betonska matrica G_j i energije

koju apsorbiraju vlakna Gx. Energija koju apsorbira matrica uključuje energiju deformacije generiranu deformacijom same matrice, Gjy, apsorbiranu energiju plastične deformacije na vrhu pukotine, GjL, i apsorbiranu energiju napuknute površine, GjK. Energija koju apsorbiraju vlakna uključuje energiju koju apsorbiraju sama vlakna, Gx, i energiju apsorbiranu lomom, Gx. Energija koju apsorbira vlakno uključuje energiju koju apsorbira samo vlakno, Gxd, i energiju odvajanja između vlakna i matrice, Gjx, a energetska ravnoteža procesa pucanja prikazana je u izrazu (2).

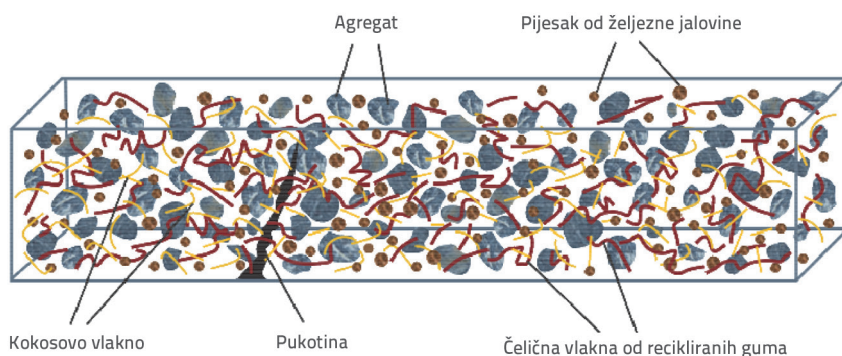
$$G_w = G_j + G_x = G_{jx} + G_{jL} + G_{jK} + G_{xd} + G_x \quad (2)$$

Tijekom opterećenja mikroarmiranog betona unutar matrice počele su se stvarati mikropukotine. U toj fazi vlakna koja okružuju te mikropukotine apsorbiraju energiju povezanu s pucanjem matrice, pretvarajući je u energiju deformacije unutar vlakana. Taj je proces spriječio širenje pukotina u betonu. Slika 16. Shematski

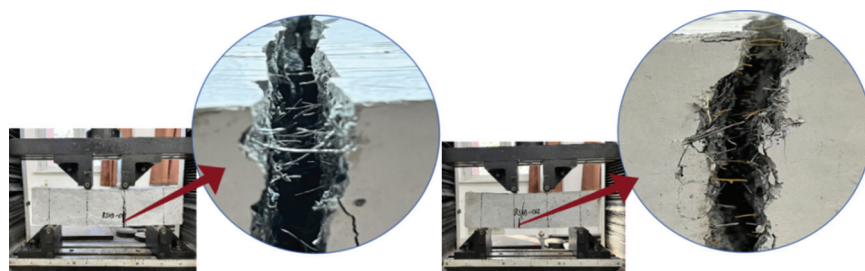
dijagram otpornosti na pucanje betona od pijeska željezne jalovine s dodatkom mješovitih vlakana pokazuje shematski dijagram otpornosti navedenog betona na pucanje. Kada vanjska sila dosegne krajnje opterećenje uzorka, uzorak će puknuti na slabijemu mjestu u rasponu. Nakon što je postignuto krajnje opterećenje, uzorak je napuknuo, a opterećenje se nastavilo. Pukotine su se nastavile širiti na slabijim mjestima unutar matrice uzorka, zaobilazeći dijelove na kojima su vlakna bila dobro raspoređena i ujednačena. U uzorku skupine s jednom vrstom vlakana pukotine su se širile okomito prema gore, dok u skupini hibridnih vlakana, zbog pozitivnog učinka miješanja vlakana i gušće raspodjele, beton može apsorbirati veću energiju, a učinak sprječavanja nastanka pukotina je veći. Pukotine su prikazane kao krivulja zakrivljena prema gore, kao što je to prikazano na slici 17. U procesu širenja pukotine matrica i vlakno kao glavno tijelo deformacije mogu se zajednički deformirati. U toj fazi vanjska sila koja djeluje na matricu i vlakna širi pukotinu na vlakno u blizini površine matrice te se apsorbirana energija prenosi na vlakno.

Opterećenje na vlakna snosi matrica. Kada dođe do sloma u matrici, taj dio matrice više nije u stanju preuzeti ulogu nošenja vanjskog opterećenja, već opterećenje u cijelosti preuzima vlakno, koje je glavni dio pukotine. Vlakno vlastitom deformacijom preuzima opterećenje kako bi apsorbiralo energiju i zatim spriječio širenje pukotina u uzorku.

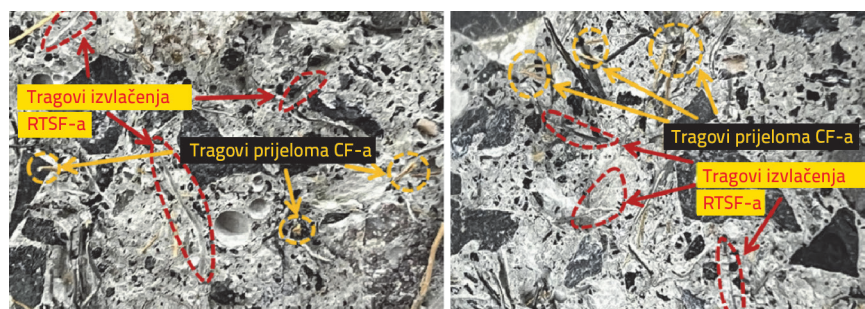
Oštećena površina betonske grede nakon oštećenja uzorka prikazana je na slici 18. Morfologija vlakana površina loma betonskih greda. Uočava se da su u plohi sloma uzorka vidljivi tragovi izvlačenja RTSF-a, što upućuje na to da je uzorak u procesu oštećenja uslijed naprezanja, a RTSF klizi u podlozi, pri čemu su se pojavile i proširile makroskopske pukotine. Kako bi izdržao glavno naprezanje te trenje između RTSF-a i podloge, RTSF koji se nalazi unutar pukotine, zbog svojega velikog modula elastičnosti i čvrstoće, apsorbira veliku količinu energije, učinkovito usporavajući daljnje širenje pukotine na uzorku. Zajedno s trenjem između RTSF-a i matrice apsorbira se velika količina energije, što učinkovito usporava daljnje širenje i produljenje pukotine u uzorku, a RTSF igra očitu ulogu u sprječavanju stvaranja pukotina u tome procesu. S daljnjim širenjem pukotine RTSF je nastavio kliziti i zatim se zbog malog modula elastičnosti i čvrstoće rasporedio u RTSF oko CF-a. Kao što je to prikazano na slici 18., prvi slom primijećen je na



Slika 16. Shematski dijagram betona od pijeska željezne jalovine s dodatkom mješovitih vlakana za otpornost na stvaranje pukotina



Slika 17. Obrazac oštećenja uzorka greda od betona s vlaknima i raspored vlakana pri slomu



Slika 18. Morfologija lomnih površina betonskih greda

dijelovima gdje je iskidano kokosovo vlakno. U tom je procesu CF apsorbirao puno energije [42], i do određene mjere odgodio daljnje istezanje RTSF-a, spriječio stvaranje mikropukotina matrice i širenje makropukotina te odigrao ulogu u ojačavanju betona. Zato se može primijetiti da dva hibridna vlakna imaju sinergističku ulogu u betonu od pijeska željezne jalovine [43], sprječavajući stvaranje i širenje unutarnjih pukotina u matrici u različitim stupnjevima i poboljšavajući žilavost i mehanička svojstva betona od pijeska željezne jalovine.

4. Zaključak

Cilj je ovog rada eksperimentalno ispitati i usporediti učinke RTSF-a, CF-a i metode dodavanja na žilavost i mehanička svojstva betona od pijeska željezne jalovine. Doneseni su sljedeći zaključci:

Dodavanje čeličnih vlakana od recikliranih guma i kokosovih vlakana u beton od pijeska željezne jalovine može poboljšati njegova mehanička svojstva. Utvrđeno je da dodavanje 0,75 % čeličnih vlakana od recikliranih guma i 0,2 % kokosovih vlakana ima najpovoljniji učinak na mehanička svojstva betona od pijeska željezne jalovine. Tlačna čvrstoća skupine betona s udjelom od 0,75 % RTSF-a i 0,2 % CF-a povećala se za 20,8 % u usporedbi s kontrolnom skupinom. Vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje povećale su se za 43 % odnosno 40,4 %. Sve su te vrijednosti bile veće od onih za skupinu s jednom vrstom vlakana i za druge mješovite skupine.

Žilavost betona od pijeska željezne jalovine dodatno je poboljšana variranjem udjela čeličnih vlakana od recikliranih guma i kokosovih vlakana. Pri udjelu od 0,75 % čeličnih vlakana od recikliranih guma i 0,2 % kokosovih vlakana vlačni i tlačni omjeri uzoraka dosegli su maksimum, a indeks žilavosti pokazao je pozitivnu korelaciju s povećanjem udjela mješavina dviju vrsta vlakana. Udarne čvrstoća bila je najveća pri prethodno navedenom udjelu, što predstavlja povećanje od 92,4 % u usporedbi s kontrolnom skupinom.

Vršno opterećenje pri savijanju uzorka je do određene mjere povećano i za skupinu s jednom vrstom vlakana i za skupinu s mješovitim vlaknima, što je dokazano povećanom površinom ispod krivulje opterećenja i pomaka. Međutim, krivulja opterećenja i pomaka uzorka u skupini mješovitih vlakana pokazala je postupniji pad, što upućuje na izraženije poboljšanje. RTSF i CF imaju različite uloge u ojačavanju betona od pijeska željezne jalovine. RTSF povećava početnu otpornost na pucanje betona od pijeska željezne jalovine zahvaljujući svojoj visokoj čvrstoći i modulu elastičnosti koji sprječava stvaranje i širenje novih pukotina. Suprotno tome, kokosova vlakna povećavaju žilavost betona od pijeska željezne jalovine zbog malog modula elastičnosti i dobre duktilnosti. Dva su vlakna u kombinaciji djelovala usklađeno s cementnom matricom, sprječavajući stvaranje i širenje pukotina unutar betona od pijeska željezne jalovine u različitim stupnjevima. To je rezultiralo povećanom žilavošću i boljim mehaničkim svojstvima betona od pijeska željezne jalovine.

LITERATURA

- [1] Hui, J., Xie, Q., Chen, T.: Research progress on the basic properties of iron tailing sand concrete, *New Building Materials*, 50 (2023) 1, pp. 1-7, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-702X.2023.01.001>
- [2] Karthikeyan, B., Kathiyayini, R., Aravindh Kumar, V., Uthra, V.: Effect of dumped iron ore tailing waste as fine aggregate with steel and basalt fibre in improving the performance of concrete, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021), pp. 7624-7632, <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.906>
- [3] Jayasimha, N., Sujini, B., Annapurna, B.P.: A study on durability and strength properties of high strength concrete with partial replacement of iron ore tailings with fine aggregates, *Materials Today: Proceedings*, 65 (2022), pp. 922-1929, <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.05.163>
- [4] Zhang, Z., Zhang, Z., Yin, S., Yu, L.: Utilization of iron tailings sand as an environmentally friendly alternative to natural river sand in high-strength concrete: Shrinkage characterization and mitigation strategies, *Materials*, 13 (2020), Paper 24:5614, <https://doi.org/10.3390/ma13245614>.
- [5] Oritola, S., Abd, L.S., Abdul, R.M.S.: Performance of iron ore tailings as partial replacement for sand in concrete, *Applied Mechanics and Materials*, 735 (2015), pp. 122-127, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.735.122>.
- [6] Shettima, A.U., et al.: Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete, *Construction and Building Materials*, 120 (2016), pp. 72-79, [doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095).
- [7] Tian, Z.X., et al.: Experimental study on the properties of concrete mixed with iron ore tailings, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2016) 1, Paper 8606505, <https://doi.org/10.1155/2016/8606505>.
- [8] Zhao, S., Fan, J., Sun, W.: Utilisation of iron ore tailings as fine aggregate in ultrahigh-performance concrete, *Construction and Building Materials*, 50 (2014), pp. 540-548, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019>.
- [9] Dong, Y., Zhang, H., Hou, Y., et al.: Study on mechanical properties of recycled mixture with high content of iron tailings sand, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2021) 1, Paper 7658444, <https://doi.org/10.1155/2021/7658444>.
- [10] Arbili, M., Alqurashi, M., Majdi, A., et al.: Concrete made with iron ore tailings as a fine aggregate: A step towards sustainable concrete, *Materials*, 15 (2022) 18, pp. 6236, <https://doi.org/10.3390/ma15186236>.
- [11] Tiwari, S., Rai, A., Bajpai, YK.: Effect of partial replacement of sand by iron ore tailings on the compressive strength of concrete, *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 4 (2017), pp. 56-72, <http://dx.doi.org/10.19101/IJATEE.2018.545008>.
- [12] Jayasimha, N., Sujini, B., Annapurna, B.P.: A study on durability and strength properties of high strength concrete with partial replacement of iron ore tailings with fine aggregates, *Materials Today: Proceedings*, 65 (2022), pp. 1922-1929, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.163>.

- [13] Zheng, W., Wang, S., Quan, X., et al.: Carbonation resistance and pore structure of mixed-fiber-reinforced concrete containing fine aggregates of iron ore tailings, *Materials*, 15 (2022), Paper 8992, <https://doi.org/10.3390/ma15248992>.
- [14] Wang, C., Ji, Y., Qie, R., et al.: Mechanical performance investigation on fiber strengthened recycled iron tailings concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024), p. e02734, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02734>.
- [15] Pi, Z., Huang, S., Xu, J., et al.: The reinforcement mechanism of basalt and polypropylene fibers on the strength, toughness, and crack resistance of tailing mortar, *Construction and Building Materials*, 419 (2024), Paper 135531, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135531>.
- [16] Xu, J., Pi, Z., Huang, S., et al.: Hybrid effect of basalt and polyacrylonitrile fibers on physico-mechanical properties of tailing mortar, *Buildings*, 14 (2024) 3, p. 639, <https://doi.org/10.3390/buildings14030639>.
- [17] Sun, X.L., Zhu, Q., Chen, J.H.: Effect of steel fiber on mechanical properties of recycled concrete with iron tailing sand, *Henan Science and Technology*, 41 (2022) 2, pp. 69-72, <https://doi.org/10.19968/j.cnki.hnjk.1003-5168.2022.02.016>.
- [18] Samarakoon, S.S.M., Ruben, P., Pedersen, J.W., Evangelista, L.: Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste, *Case Studies in Construction Materials*, (2019), Paper 11, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>.
- [19] Hu, H., Wang, Z., Figureueiredo, F.P., Papastergiou, P., Guadagnini, M., Pilakoutas, K.: Postcracking tensile behavior of blended steel fiber-reinforced concrete, *Structural Concrete*, 20 (2019) 2, pp. 707-719, <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201800100>
- [20] Carrillo, J., Lizarazo-Marriaga, J., Lamus, F.: Properties of steel fiber reinforced concrete using either industrial or recycled fibers from waste tires, *Fibers and Polymers*, 21 (2020), pp. 2055-2067, <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-020-1076-1>
- [21] Fan, X.C., Li, G.Y., Chen, M.: Experimental study on the basic mechanical properties of steel fiber concrete with recycled tires, *Concrete*, (2021) 7, pp. 65-68+74, <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1002-3550.2021.07.014>
- [22] Sivakumaresa, C.L.N., Rymond, N.M.: Strength and durability characteristics of coir, kenaf and polypropylene fibers reinforced high performance concrete, *Journal of Natural Fibers*, 19 (2022) 13, pp. 6692-6700, <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2021.1929656>
- [23] Alomayri, T., Yosri, A.M., Ali, B., et al.: The influence of coconut fibres and ground steel slag on strength and durability properties of recycled aggregate concrete: Sustainable design of fibre-reinforced concrete, *Journal of Materials Research and Technology*, 24 (2023), pp. 10027-10039, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.212>.
- [24] Gupta, M., Kumar, M.: Effect of nano silica and coir fiber on compressive strength and abrasion resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 226 (2019), pp. 44-50, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.232>
- [25] Yi, J.P.: Research on the properties of cementitious materials toughened by coconut fibre, Harbin Institute of Technology, 2020., <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.002131>
- [26] Shah, S.H.A., Amir, M.T., Ali, B., et al.: Mechanical performance and environmental impact of normal strength concrete incorporating various levels of coconut fiber and recycled aggregates, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (2022), pp. 83636-83651, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23793-0>.
- [27] CNKI: GB 175-2023: General purpose - Portland cement, Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Beijing, China, 2023.
- [28] CNKI: GB/T 1596-2017: Fly ash used in cement and concrete, National Technical Committee for Cement Standardization (SAC/TC 184), Beijing, China, 2017.
- [29] Ismail, S., Li, J., Ming, Z.F.: A Review on Chemical Modification by using Sodium Hydroxide (NaOH) to investigate the mechanical properties of Sisal, Coir and Hemp fiber reinforced concrete composites, *Journal of Natural Fibers*, 19 (2022) 13, pp. 5133-5151, <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2021.1875359>
- [30] CNKI: Standard for fiber concrete test methods: CECS13:2009, China Engineering Construction Standardization Association, Beijing, China, 2009.
- [31] CNIS: GB/T50081 Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete, China National Institute of Standardization, Beijing, China, 2002.
- [32] Liao, Z.Y., Lei, J.S., et al.: Experimental study on mechanical properties of rice straw fiber cementitious composites, *Concrete and Cement Products*, (2017) 7, pp. 47-50, <http://dx.doi.org/10.19761/j.1000-4637.2017.07.010>.
- [33] Baricevic, A., Bjegovic, D., Skazlic, M.: Hybrid Fiber-Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, (2017), [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001906](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001906).
- [34] Farooq, M.A., Alomayri, T., Ali, B., Sultan, T., Yosri, A.M.: Influence of hybrid coir-steel fibres on the mechanical behaviour of high-performance concrete: Step towards a novel and eco-friendly hybrid-fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 389 (2023), <http://dx.doi.org/10.1016/j.CONBUILDMAT.2023.131728>
- [35] Kong, X.Q., Gao, H.D., Gang, J.M.: Research on fracture properties of steel-polypropylene hybrid fiber recycled concrete, *Concrete*, (2018) 10, pp. 74-78+81, <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1002-3550.2018.10.018>
- [36] Gu, M.J.: Experimental study on bending and tensile properties of recycled tire steel fiber recycled coarse aggregate concrete, *Journal of Wuhan University of Technology*, 44 (2022) 12, pp. 75-82, <http://dx.chinadoi.cn/10.3963/j.issn.1671-4431.2022.12.011>
- [37] Zhang, X.Y., Lu, C., Zhang, D.M.: Toughening properties and splitting tensile strength prediction model of rice straw fiber in lightweight aggregate concrete, *Materials Herald*, 34 (2020) 2, pp. 2034-2038, <http://dx.chinadoi.cn/10.11896/cldb.18120161>
- [38] Mo, S.X., Guo, Y.C., Qin, X.: Mechanical, shrinkage and fracture properties of mixed fiber-reinforced inner-culture cement concrete, *Highway and Transportation Science and Technology*, 38 (2021) 08, pp. 1-8, <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1002-0268.2021.08.001>
- [39] Wang, E.C., Li, G., Chai, Y.K.: Research on fracture properties of steel-sisal hybrid fibre recycled concrete, *Silicate Bulletin*, (2023), pp. 1-10, <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20230619.002>.
- [40] Hao, C.H., Liu, J.H., Wang, J.A.: Toughness and acoustic emission characterization of fiber-reinforced concrete, *Journal of Coal*, 48 (2023) 3, pp. 1209-1219, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0117>
- [41] Zhao, S.Q., You, Q.L., Li, J.Z.: Analysis of toughening and crack-resisting effect of modified polyester fiber on airport cement concrete, *Materials Herald*, (2024), pp. 1-14, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230824.1442.016>
- [42] Liu, J.P., Tang, J.H., Han, F.Y.: Principles and applications of modern concrete toughening and crack prevention, *Journal of Civil Engineering*, 54 (2021) 10, pp. 47-54, <https://doi.org/10.15951/j.tmgxb.2021.10.007>
- [43] Quan, C.Q., Jiao, C.J., Yang, Y.Y.: Orthogonal experimental study on mechanical properties of hybrid fiber concrete, *Journal of Construction Materials*, 22 (2019) 3, pp. 363-370, <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1007-9629.2019.03.006>