

Primljen / Received: 30.9.2025.

Ispravljen / Corrected: 9.4.2026.

Prihvaćen / Accepted: 19.6.2026

Dostupno online / Available online: 10.8.2026.

Ispitivanje mehaničkih svojstava betona s pustinjским pijeskom i bazaltnim vlaknima za hidrotehničke građevine

Autori:

^{1,2}Jianpeng Zhang, dipl.ing.građ.17041@ynu.edu.cn

Autor za korespondenciju

¹Xiaodi Dong, dipl.ing.građ.dxd4244DXD@163.com³Han Xu, dipl.ing.građ.bicycle987@163.com¹Qingsong Li, dipl.ing.građ.Lqs1944717024@163.com¹Yifan Han, dipl.ing.građ.m15099196374@163.com¹ Sveučilište Yili Normal, Kina

Fakultet za fizičke znanosti i tehnologiju

² Laboratorij za fazne prijelaze i mikrostrukture u kondenziranim tvarima Xinjiang, Kina³ Yili Hongjing Engineering Detection Co., Kina

Prethodno priopćenje

[Jianpeng Zhang, Xiaodi Dong, Han Xu, Qingsong Li, Yifan Han](#)

Ispitivanje mehaničkih svojstava betona s pustinjским pijeskom i bazaltnim vlaknima za hidrotehničke građevine

U ovome istraživanju bazaltna vlakna i pustinjский pijesak ugrađeni su u beton za hidrotehničke građevine kako bi se ispitao njihov utjecaj na mehanička svojstva i troškove proizvodnje betona. Ispitivanje je provedeno primjenom ortogonalnoga eksperimentalnog plana u kojemu su mijenjani omjer vode i cementa, udio zamjene cementa letećim pepelom, udio zamjene riječnog pijeska pustinjским pijeskom te količina bazaltnih vlakana radi procjene mehaničkih svojstava betona s pustinjским pijeskom i bazaltnim vlaknima (DSBFC). Mikrostruktura i fazni sastav DSBFC-a analizirani su primjenom pretražnoga elektronskog mikroskopa (SEM) i rendgenske difrakcije (XRD). Rezultati pokazuju da su omjer vode i cementa te udio letećeg pepela glavni čimbenici koji utječu na mehanička svojstva DSBFC-a, dok bazaltna vlakna učinkovito sprječavaju nastanak pukotina u betonu. Optimalni sastav DSBFC-a, označen kao A1B2C2D2, obuhvaća omjer vode i cementa od 0,50, zamjenu cementa letećim pepelom od 5 %, zamjenu riječnog pijeska pustinjским pijeskom od 10 % te dodatak bazaltnih vlakana u količini od 0,5 kg/m³. U usporedbi s običnim betonom, optimalni DSBFC povećao je tlačnu čvrstoću za 9,05 %, čvrstoću na savijanje za 2,72 % te tlačnu čvrstoću cijepanjem za 21,60 %, dok su troškovi proizvodnje kubnog metra betona smanjeni za 0,958 %.

Ključne riječi:

ortogonalni pokusi, mehanička svojstva, mikrostruktura, pucolanski učinak, pustinjский pijesak, bazaltna vlakna

Research Paper

[Jianpeng Zhang, Xiaodi Dong, Han Xu, Qingsong Li, Yifan Han](#)

Study of the mechanical properties of desert sand basalt fiber concrete for hydraulic structures

In this study, basalt fibres and desert sand were mixed into concrete for hydraulic structures, and their impact on the mechanical characteristics and cost was investigated. The experiment was designed as an orthogonal test, where the water-cement ratio, fly ash replacement rate, desert sand replacement rate, and amount of basalt fibres were varied to assess the mechanical properties of desert sand basalt fibre concrete (DSBFC). The microstructure and physical phase composition of DSBFC were studied using scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The results suggest that the water-cement ratio and fly ash replacement rate are the primary factors influencing the mechanical properties of DSBFC, while basalt fibres effectively prevent concrete cracking. The DSBFC with optimum composition, designated as A1B2C2D2, comprised a water-cement ratio of 0.5, fly ash replacement ratio of 5 %, desert sand replacement ratio of 10 %, and basalt fibre amount of 0.5 kg/m³. Compared with regular concrete, DSBFC increased the compressive strength, flexural strength and split tensile strength by 9.05 %, 2.72 %, and 21.60 %, respectively, and the cost of concrete per cubic meter decreased by 0.958 %.

Key words:

orthogonal tests, mechanical properties, microstructure, pozzolanic effect, desert sand, basalt fiber

1. Uvod

Područje Xinjanga karakteriziraju specifični prirodni i ekološki uvjeti, uključujući visok udio soli u okolišu, niske temperature, izraženu seizmičku aktivnost i velike dnevne temperaturne oscilacije [1–3]. Zato hidrotehničke građevine imaju ključnu ulogu u gospodarskome i društvenome razvoju te regije [4]. Međutim, tijekom dugotrajnoga korištenja hidrotehnički objekti te regije izloženi su snažnim potresima i čestim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Posljedično se na betonskim konstrukcijama pojavljuju pukotine, odlamanje, karbonatizacija, korozija armature te propuštanje hidrotehničkih kanala. Osim toga sile nastale smrzavanjem i širenjem leda uzrokuju izbočivanje, pucanje i urušavanje obloženih ploča, što predstavlja ozbiljnu prijetnju gospodarskome i društvenome razvoju Xinjanga [5–9]. Zato postoji hitna potreba za razvojem betonskih materijala prikladnih za sanaciju oštećenih dijelova hidrotehničkih građevina.

Bazaltna vlakna jesu anorganska vlakna dobivena iz prirodnog bazalta koja se odlikuju visokom razinom čvrstoće, modulom elastičnosti te otpornošću na koroziju i povišene temperature [10, 11]. Njihova primjena u betonu i mortu posljednjih je godina znatno porasla jer učinkovito ograničavaju nastanak i širenje pukotina te poboljšavaju otpornost betona na pucanje i žilavost betona mehanizmima kao što su premošćivanje pukotina te blokiranja njihova širenja i prijenosa naprezanja [12–14]. Huang i sur. [15] istraživali su utjecaj različitih duljina bazaltnih vlakana (3, 6, 9 i 12 mm) te utvrdili da beton s vlaknima duljine 6 mm pokazuje najbolja mehanička svojstva i najveću otpornost na smrzavanje i odmrzavanje. Qin i sur. [16] proučavali su vlakna duljina 6, 24, 30 i 48 mm. Iz njihovih rezultata vidljivo je da vlakna duljine 24 mm učinkovito poboljšavaju unutarnju strukturu pora betona, ograničavaju nastanak mikropukotina i povećavaju zbijenost matrice, čime unapređuju mehanička svojstva betona. Krassowska [17] i Wang [18] utvrdili su da dodatak kratko rezanih bazaltnih vlakana duljine 12 i 24 mm u betonske grede i stupove odgađa pojavu pukotina te znatno smanjuje njihov broj i intenzitet. Bazaltna vlakna također su uspješno primijenjena u betonu s recikliranim agregatom [19, 20], betonu s jalovinom ugljena [21], betonu s koraljnim agregatom [22] te pjenastom betonu na bazi plovuća [23].

Pustinjski pijesak široko je rasprostranjen, ali nedovoljno iskorišten prirodni resurs u Xinjangu. Zbog sitne granulacije, nepovoljnoga granulometrijskog sastava i visokog udjela finih čestica obično se smatra neprikladnim za izravnu primjenu u građevinarstvu [24]. Međutim, zbog smanjenja raspoloživih količina riječnog pijeska i sve većih zahtjeva vezanih uz zaštitu okoliša primjena pustinjskog pijeska postala je jedno od aktualnih istraživačkih područja [25, 26]. Zhang i sur. [27] koristili su pustinjski pijesak za proizvodnju alkalno aktiviranog betona ultravisokih svojstava. Xu i sur. [28] istraživali su mehanička svojstva betona s pustinjskim pijeskom izloženog ciklusima vlaženja i sušenja te sulfatnoj koroziji. Munir i sur. [29] pokazali su da kompresijsko oblikovanje betona s pustinjskim pijeskom

može poboljšati njegova mehanička svojstva i trajnost. U radu Farida [30] pripremljen je samozbijajući beton s pustinjskim pijeskom te su ispitana njegova reološka svojstva, mehanička svojstva i trajnost. Također su provedena brojna istraživanja primjene čeličnih, staklenih i polipropilenskih vlakana u betonu s pustinjskim pijeskom [31–33].

Posljednjih godina energetska učinkovitost i održiva gradnja postale su središnje teme građevinarstva. Leteći pepeo, kao nusproizvod termoelektrana na ugljen, široko se primjenjuje kao dodatni cementni materijal. Njegova primjena znatno smanjuje troškove proizvodnje betona te znatno doprinosi zaštiti okoliša [34, 35]. Zehra i sur. [36] razvili su samozbijajući laki beton s dodatkom letećeg pepela i bazaltnih vlakana. Leteći pepeo poboljšao je obradivost i čvrstoću u kasnijoj starosti, dok su bazaltne vlakna povećala razinu vlačne čvrstoće i otpornosti na pucanje. Njihov sinergijski učinak rezultirao je poboljšanom mikrostrukturom i trajnošću samozbijajućega lakog betona. Nadalje, Li i sur. [37] utvrdili su da istodobna primjena letećeg pepela i bazaltnih vlakana potiče sekundarnu hidrataciju cementne matrice, povećava njezinu gustoću te poboljšava vezu između vlakana i matrice. Time bazaltne vlakna učinkovitije sudjeluju u prijenosu opterećenja unutar očvrstnalog betona. Hamada i sur. [38] proizveli su beton velike čvrstoće kombiniranjem letećeg pepela, granulirane zgre iz visoke peći i pustinjskog pijeska, iskorištavajući učinak ispune i pucolansku aktivnost letećeg pepela, pri čemu je nakon sedam dana postignuta tlačna čvrstoća od 76,45 MPa. Zhang i sur. [39] koristili su leteći pepeo i pustinjski pijesak za proizvodnju lakih betona (eng. *Lightweight Concrete* – LC) razreda čvrstoće LC20 i LC25.

Iako su beton s bazaltnim vlaknima i beton s pustinjskim pijeskom pojedinačno opsežno istraživani, istraživanja betona koji istodobno sadržava pustinjski pijesak i bazaltne vlakna (eng. *desert sand basalt fiber concrete* – DSBFC) još su uvijek ograničena. U ovome radu ortogonalnim eksperimentalnim planom ispituje se utjecaj omjera vode i cementa, udjela zamjene cementa letećim pepelom, udjela zamjene riječnog pijeska pustinjskim pijeskom te količine bazaltnih vlakana na obradivost, mehanička svojstva, mikrostrukturom i fazni sastav betona radi određivanja optimalnog sastava DSBFC-a pogodnog za sanaciju oštećenih hidrotehničkih betonskih konstrukcija.

2. Materijali i eksperimentalni plan

2.1. Materijali

U istraživanju korišteni su cement P.O 42.5R proizvođača *Xinjiang Zhongtai Chemical Torkun Energy Chemical Co., Ltd.* (tablica 1.) te leteći pepeo klase II. proizvođača *Xinjiang Hengtai Bailian New Material Technology Co., Ltd.* (tablica 2.). Kao agregat korišteni su riječni pijesak kao krupni pijesak s modulom finoće 3,34, udjelom vlage od 5,46 %, gustoćom od 2640 kg/m³ i granulacijom od 0 do 4,75 mm te pustinjski pijesak s modulom finoće 0,8, gustoćom od 2663 kg/m³ i granulacijom od 0 do 0,4 mm. Obje vrste agregata zadovoljile su zahtjeve granulometrijskog sastava

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva cementa P.O 42.5R

Gustoća [g/cm ³]	Specifična površina [m ² /kg]	Vrijeme vezivanja [min]		Čvrstoća na savijanje [MPa]		Tlačna čvrstoća [MPa]	
		Početak	Kraj	3 dana	28 dana	3 dana	28 dana
3,1	362,5	170	218	6,6	9,2	31,3	56,5

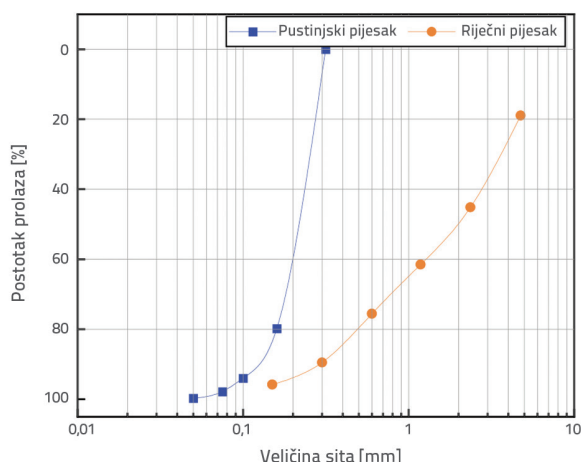
Tablica 2. Fizikalna svojstva letećeg pepela klase II.

Finoća [%]	Gubitak pri žarenju [%]	Omjer potrebe za vodom [%]	Količina vlage [%]
7,7	3,91	95	0,3

Tablica 3. Parametri bazaltnih vlakana

Promjer [μm]	Gustoća [g/cm ³]	Izduženje [%]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [MPa]
7 – 15	2,65	2,8	4000	105

propisane normama JGJ 52 [40] i ASTM C33 [41], što je prikazano krivuljama prosijavanja na slici 1.



Slika 1. Krivulje raspodjele veličine čestica pustinskog i riječnog pijeska

Kratko rezana bazalna vlakna duljine 12 mm nabavljena su od tvrtke *Xinjiang Woyu Preventive and Control New Materials Company, Ltd.* (tablica 3.). Kao superplastifikator korišten je HSC polikarboksilatna kiselina, s učinkom smanjenja potrebne količine vode od 15 mas. %. U svim pokusima korištena je vodovodna voda.

2.2. Ortogonalni eksperimentalni plan

Metoda ortogonalnog planiranja pokusa tehnika je višefaktorske optimizacije eksperimentalnog plana koja se temelji na primjeni ortogonalnih tablica. Takav pristup znatno smanjuje broj potrebnih pokusa te omogućuje učinkovitu procjenu utjecaja pojedinih čimbenika znanstveno utemeljenim odabirom reprezentativnih kombinacija ispitivanja [42]. U ovome istraživanju predmet ispitivanja bio je beton razreda C40 (projektirana tlačna čvrstoća od 40 MPa) namijenjen hidrotehničkim građevinama. Analiziran je utjecaj četiriju

čimbenika: omjera vode i cementa (W/C), udjela zamjene cementa letećim pepelom (FA), udjela zamjene riječnog pijeska pustinjskim pijeskom (DS) i količine bazaltnih vlakana (BF).

Za svaki čimbenik definirane su četiri razine, a sastavi betonskih mješavina određeni su u skladu sa smjernicama norme JGJ 55-2011 [43]. Razina FA1 označava mješavinu bez zamjene cementa letećim pepelom, razina DS1 označava primjenu isključivo riječnog pijeska kao sitnog agregata, dok razina BF1 predstavlja mješavinu bez dodatka bazaltnih vlakana. Čimbenici i njihove razine prikazani su u tablici 4., dok su sastavi mješavina korištenih u ortogonalnim pokusima prikazani u tablici 5. U sustavu označavanja pokusnih mješavina oznake A, B, C i D odnose se na omjer vode i cementa (W/C), udio letećeg pepela (FA), udio pustinskog pijeska (DS) i količinu bazaltnih vlakana (BF).

Tablica 4. Faktori i razine udjela faktora za mješavine

Razina	W/C	FA [%]	DS [%]	BF [g/cm ³]
	A	B	C	D
1	0,50	0	0	0
2	0,55	5	10	0,5
3	0,60	10	20	1,0
4	0,65	15	30	1,5

2.3. Izrada uzoraka i metode ispitivanja

Pri izradi uzoraka najprije su u miješalicu dodani riječni i pustinjski pijesak te su miješani 30 s. Nakon toga dodani su cement i leteći pepeo te je miješanje nastavljeno dvije minute. Zatim su dodana bazalna vlakna i miješana jednu minutu, a na kraju su dodani voda i superplastifikator te je miješanje nastavljeno još osam minuta. Po završetku miješanja svježi beton stavljen je u kalupe, zbijen na vibracijskome stolu te je površina uzoraka zaglađena i završno obrađena. Dijagram postupka izrade uzoraka prikazan je na slici 2. Tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem određivane su nakon 3, 7, 28 i 56 dana na ukupno 24 uzorka

Tablica 5. Sastav mješavina po ortogonalnome planu ispitivanja [g/cm³]

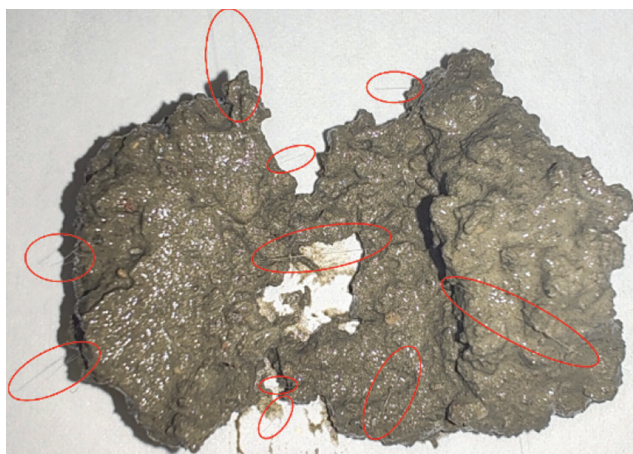
Broj	Oznaka mješavine	Voda	Cement	Leteći pepeo	Pustinjski pijesak	Riječni pijesak	Bazaltne vlakna	Superplastifikator	Gustoća
1	A1B1C1D1	290	580	0	0	1298	0	1,16	2169,16
2	A1B2C2D2	290	551	29	130,64	1165,65	0,5	1,16	2167,95
3	A1B3C3D3	290	522	58	260,72	1033,86	1	1,16	2166,74
4	A1B4C4D4	290	493	87	390,22	902,65	1,5	1,16	2165,53
5	A2B1C2D3	290	527,27	0	135,61	1209,96	1	1,05	2164,89
6	A2B2C1D4	290	500,91	26,36	0	1341,82	1,5	1,05	2161,64
7	A2B3C4D1	290	474,55	52,73	405,27	937,47	0	1,05	2161,07
8	A2B4C3D2	290	448,18	79,09	269,66	1069,33	0,5	1,05	2157,81
9	A3B1C3D4	290	483,33	0	279,02	1106,45	1,5	0,97	2161,27
10	A3B2C4D3	290	500,91	26,36	417,82	966,49	1	0,97	2203,55
11	A3B3C1D2	290	474,55	52,73	0	1378,34	0,5	0,97	2197,09
12	A3B4C2D1	290	448,18	79,09	138,80	1238,38	0	0,97	2195,42
13	A4B1C4D2	290	446,15	0	428,44	991,04	0,5	0,89	2157,02
14	A4B2C3D1	290	423,85	22,31	285,18	1130,88	0	0,89	2153,11
15	A4B3C2D4	290	401,54	44,62	142,37	1270,28	1,5	0,89	2151,20
16	A4B4C1D3	290	379,23	66,92	0	1409,24	1	0,89	2147,28



Slika 2. Dijagram postupka pripreme uzorka

dimenzija 100 × 100 × 100 mm, dok je čvrstoća na savijanje ispitivana nakon 7 i 28 dana na šest uzoraka dimenzija 160 × 40 × 40 mm. Nakon jednog dana uzorci su vađeni iz kalupa te njegovani u komori za standardno njegovanje u trajanju od 28 dana.

Tijekom miješanja snopovi bazaltnih vlakana postupno su se, uslijed trenja i međusobnog razdvajanja među zrcima morta, razdvajali u pojedinačna vlakna (monofilamente), što je prikazano na slici 3. Produljenjem vremena miješanja poboljšavalo se razdvajanje kratko rezanih bazaltnih vlakana. Nakon osam minuta miješanja pojedinačna bazaltne vlakna ravnomjernije su raspoređena unutar cementne matrice, čime je postignuta ujednačenija disperzija vlakana u mortu.



Slika 3. Stanje monofilamenta bazaltnih vlakana nakon miješanja

Postupak ispitivanja slijeganja betona:

1. Stožac za ispitivanje slijeganja ispunjen je u tri sloja jednoliko izmiješanim betonom, pri čemu je svaki sloj zauzimao približno trećinu volumena stošca. Svaki je sloj zbijen s 25 udara standardnom šipkom, pri čemu su udari izvođeni spiralno, od ruba prema središtu. Kod završnog sloja prema potrebi dodan je svježi beton kako bi stožac bio potpuno ispunjen.
2. Nakon punjenja višak betona uklonjen je lopaticom, a gornja površina uzorka poravnana je do ruba stošca.
3. Stožac za ispitivanje slijeganja zatim je ravnomjerno i okomito podignut te postavljen pokraj uzorka. Izmjereni su visina stošca i najveća visina ispitnog uzorka, a razlika između tih dviju vrijednosti zabilježena je kao vrijednost slijeganja betona.

Tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem određivane su nakon 3, 7, 28 i 56 dana, dok je čvrstoća na savijanje ispitivana nakon 7 i 28 dana u skladu s normom SL/T 352-2020 [44].

Obradivost betona za hidrotehničke građevine određena je prema normi GB/T 50080-2016 [45]. Svaka prikazana vrijednost čvrstoće predstavlja aritmetičku sredinu rezultata dobivenih na trima uzorcima. Tijekom ispitivanja tlačne čvrstoće brzina opterećivanja održavana je u rasponu od 0,5 do 0,8 MPa/s, dok je pri ispitivanju vlačne čvrstoće cijepanjem iznosila od 0,05 do 0,08 MPa/s. Budući da su uzorci DSBFC-a za ispitivanje tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem bili kocke dimenzija 100 × 100 × 100 mm, umjesto standardnih 150 × 150 × 150 mm, na dobivene rezultate primijenjeni su korekcijski faktori. Vrijednosti tlačne čvrstoće pomnožene su koeficijentom

0,95, dok su vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem pomnožene koeficijentom 0,85.

2.4. Ispitivanje pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) i rendgenskom difrakcijom (XRD)

Analiza mikrostrukture provedena je primjenom pretražnoga elektronskog mikroskopa (SEM) na uređaju ZEISS Sigma 500. Za ispitivanje odabrani su uzorci betona debljine 5 mm, koji su uronjeni u etilen-glikol tijekom 48 sati. Nakon toga otopina etilen-glikola zamijenjena je, a uzorci su ponovno uronjeni na dodatnih 48 sati. Po završetku postupka uzorci su izvađeni, osušeni, prevučeni tankim slojem zlata metodom naparivanja te analizirani SEM-om radi određivanja njihove mikrostrukture. Analiza rendgenskom difrakcijom (XRD) provedena je na uređaju Bruker D8 ADVANCE, proizvedenom u Njemačkoj. Uzorci betona različite starosti, iz kojih je prethodno uklonjena voda etilen-glikolom, sušeni su u sušioniku pri temperaturi od 65 °C do postizanja konstantne mase. Nakon sušenja uzorci su usitnjeni u tarioniku te prosijani kroz sito oznake 200 (veličina čestica ≤ 0,075 mm). Dobiveni prah podvrgnut je XRD analizi. Skeniranje je provedeno u području 2θ od 5° do 65°, pri brzini od 5°/min.

3. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava betona s pustinjским pijeskom i bazaltnim vlaknima (DSBFC) prikazani su u tablici 6., dok su rezultati ispitivanja slijeganja svježeg betona prikazani u tablici 7.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava DSBFC-a

Broj	Tlačna čvrstoća [MPa]				Čvrstoća na savijanje [MPa]		Vlačna čvrstoća cijepanjem [MPa]			
	3d	7d	28d	56d	7d	28d	3d	7d	28d	56d
1	46,89	50,33	53,37	56,65	3,05	3,67	2,95	3,80	4,12	4,45
2	48,26	55,48	58,20	61,11	3,08	3,77	2,64	3,82	5,01	6,20
3	37,95	47,72	56,23	59,26	2,92	3,63	2,86	3,80	4,92	5,06
4	30,78	45,36	47,00	51,27	2,75	3,14	2,54	2,92	4,26	4,92
5	34,27	47,05	51,50	53,93	3,13	3,52	3,06	3,58	4,31	4,94
6	35,21	48,48	54,20	57,11	3,24	3,66	3,01	3,56	4,53	5,04
7	28,13	37,99	42,67	44,80	2,81	3,34	2,05	3,28	3,91	3,99
8	26,81	37,71	43,07	45,22	2,76	3,28	2,10	3,04	3,46	4,21
9	32,33	39,50	45,20	47,31	2,47	3,31	2,67	3,11	3,91	4,66
10	28,97	37,70	45,63	48,62	2,78	3,54	2,56	3,06	3,55	4,36
11	37,76	48,18	51,80	54,53	3,29	3,50	2,66	3,20	4,05	4,56
12	37,34	47,85	50,90	54,24	3,17	3,30	2,53	3,18	3,94	4,89
13	28,21	35,01	50,80	52,29	2,52	3,48	2,03	2,59	3,76	4,52
14	26,46	35,29	51,00	53,34	2,48	3,53	2,04	3,15	3,71	4,96
15	28,49	38,14	43,90	46,10	2,65	3,40	1,96	2,90	3,43	4,65
16	24,54	35,42	41,20	43,90	2,41	3,02	1,78	3,11	3,90	4,11

Tablica 7. Eksperimentalni rezultati ispitivanja slijeganja za DSBFC

Broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Slijeganje betona [mm]	116	130	156	164	134	124	150	139	108	146	104	143	129	130	114	126

Nakon 28 dana vlačna čvrstoća cijepanjem pojedinih skupina iznosila je približno 7,27 do 9,47 % tlačne čvrstoće kocki, što je u skladu s ponašanjem običnog betona. Čvrstoća na savijanje iznosila je približno 6,46 do 7,83 % tlačne čvrstoće. U svim slučajevima bila je niža od vlačne čvrstoće određene metodom cijepanja.

Ta razlika može se objasniti geometrijom ispitnih uzoraka. Čvrstoća na savijanje određivana je na prizmama od cementnog morta dimenzija $40 \times 40 \times 160$ mm, čije manje dimenzije u pravilu rezultiraju nižim izmjerenim vrijednostima čvrstoće.

4. Analiza rezultata ispitivanja

4.1. Analiza obradivosti betona

Tijekom ispitivanja, nakon podizanja slijegnog stošca, beton je u svim skupinama poprimio karakterističan oblik s manjim gornjim i većim donjim stošcem, kako je to prikazano na slici 4. Laganim udaranjem po bočnoj strani uzorka betonski se stožac postupno slijegao bez urušavanja ili djelomičnog raspadanja, pri čemu se oko njegova podnožja nije izdvajala razrijeđena cementna pasta, što upućuje na dobru koheziju i sposobnost zadržavanja vode svježeg betona. Vrijednosti slijeganja prikazane u tablici 7. kretale su se od 104 do 164 mm, pri čemu je većina rezultata bila u rasponu od 100 do 160 mm. Dobivene vrijednosti pokazuju da uzorci betona s pustinjaškim pijeskom i bazaltnim vlaknima (DSBFC) imaju dobru obradivost te zadovoljavaju zahtjeve za primjenu u građevinskoj praksi. U usporedbi s običnim betonom, prisutnost pojedinačnih bazaltnih vlakana povećala je unutarnju koheziju betonske mješavine jer vlakna pružaju dodatni otpor segregaciji sastojaka [46].



Slika 4. Slijeganje betona s pustinjaškim pijeskom i bazaltnim vlaknima (DSBFC)

4.2. Analiza mehaničkih svojstava

4.2.1. Način loma uzoraka

Na uzorcima DSBFC-a provedena su ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama, a karakteristični oblici loma prikazani su na slici 5. Na početku opterećivanja na uzorcima nisu bile uočljive vidljive promjene, dok je njihova unutarnja struktura ostala nepromijenjena. Pri opterećenju koje je iznosilo približno 50 do 70 % granične čvrstoće počele su se pojavljivati mikropukotine na rubovima, uglovima ili u unutarnjim slabijim zonama uzorka. Daljnjim povećanjem opterećenja mikropukotine su se postupno širile i međusobno povezivale, tvoreći glavnu dijagonalnu pukotinu koja je dovela do formiranja posmične plohe loma. Neposredno prije dostizanja maksimalnog opterećenja glavna se pukotina naglo proširila, uzrokujući gubitak stabilnosti uzorka. Nakon toga nastupio je iznenadni lom praćen karakterističnim zvukom pucanja.



Slika 5. Karakteristični oblik loma DSBFC-a pri tlačnome opterećenju

Oštećenja nastala tijekom ispitivanja čvrstoće na savijanje prikazana su na slici 6. U početnoj fazi opterećivanja nisu zabilježene promjene ni na površini ni u unutarnjoj strukturi uzorka. Kada je opterećenje doseglo približno 50 do 70 % granične čvrstoće, na donjoj strani uzorka u sredini raspona pojavile su se mikropukotine koje su se širile prema gore unutar ograničenog područja. Daljnjim povećanjem opterećenja pukotine su se vertikalno razvijale, njihova se širina povećavala, a na donjoj površini postale su jasno vidljive. Pri približavanju maksimalnome opterećenju pukotine su se naglo proširile, što je bilo popraćeno izraženim zvukom pucanja. Analiza površine loma pokazala je izložena pojedinačna bazalna vlakna, pri čemu su vlakna bila izvučena iz cementne matrice, a ne prekinuta. Time je potvrđena njihova uloga u premošćivanju pukotina.



Slika 6. Karakteristični oblik loma DSBFC-a pri ispitivanju čvrstoće na savijanje

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su na slici 7. Na početku opterećivanja na uzorku nisu uočene vidljive promjene. Kada je opterećenje doseglo približno 50 – 70 % granične čvrstoće, u tlačno opterećenoj zoni pojavila se blaga deformacija, dok su se u središnjemu dijelu uzorka razvile mikropukotine. One su se širile prema dolje u smjeru osi opterećenja. Daljnjim povećanjem deformacije mikropukotine su se nastavile širiti sve dok jedna dominantna pukotina nije potpuno presjekla uzorak, pri čemu se čuo karakterističan zvuk pucanja.



Slika 7. Karakteristični oblik loma DSBFC-a pri ispitivanju vlačne čvrstoće cijepanjem



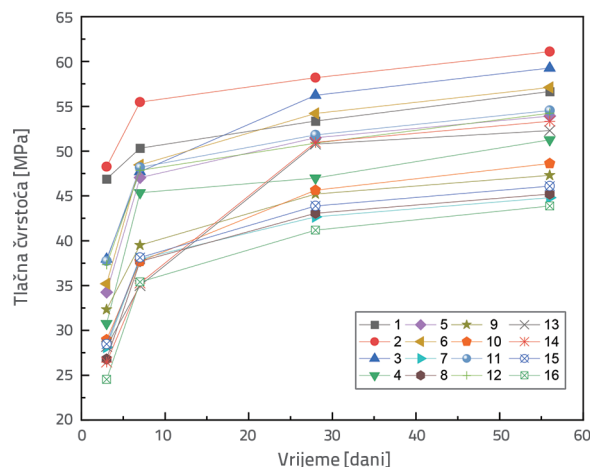
Slika 8. Površina loma DSBFC-a nakon ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Kao što je to prikazano na slici 8., čak i nakon potpunog loma uzorka tijekom ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem bazalna

vlakna nastavila su povezivati dvije razdvojene polovice uzorka. Vlakna su bila izvučena iz cementne matrice, a ne prekinuta, što pokazuje da njihova vlačna čvrstoća nije bila dosegnuta. Takvo ponašanje u skladu je s rezultatima opaženima tijekom ispitivanja čvrstoće na savijanje.

4.2.2. Analiza mehaničkih svojstava

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na kockama za sve skupine prikazani su na slici 9.



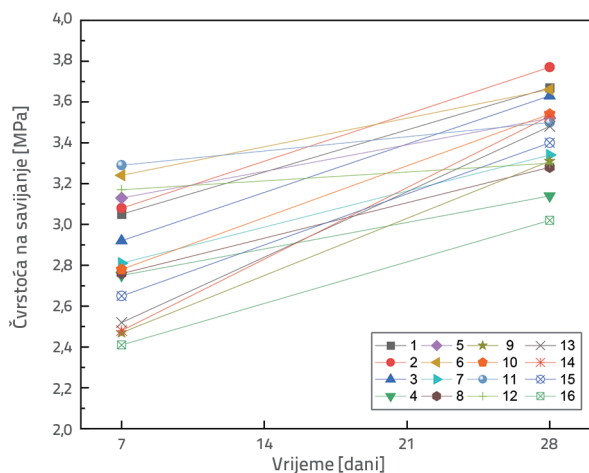
Slika 9. Tlačna čvrstoća DSBFC-a

Kod svih ispitivanih sastava tlačna čvrstoća povećavala se s vremenom njegovanja. Velika brzina prirasta čvrstoće zabilježena je u razdoblju od 0. do 28. dana, dok je između 28. i 56. dana povećanje bilo znatno manje izraženo. Nakon 28 dana uzorci su već dostignuli približno 95 % svoje čvrstoće ostvarene nakon 56 dana. Nakon 56 dana najveću tlačnu čvrstoću ostvarila je skupina 2, s vrijednošću od 61,11 MPa, dok je najmanju ostvarila skupina 16, s vrijednošću od 41,62 MPa.

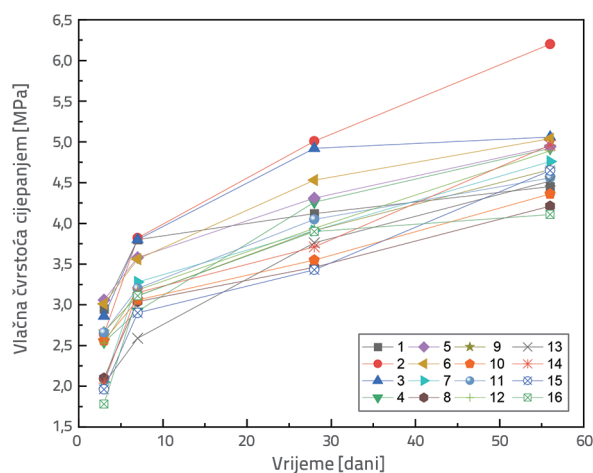
Nadalje je vidljivo da su nakon 7 dana uzorci skupina 3 i 6 imali manju tlačnu čvrstoću od kontrolne skupine (skupina 1), dok su nakon 28 dana njihove vrijednosti premašile čvrstoću kontrolnog betona. Nadalje, skupine 13 i 14 pokazale su povećanje čvrstoće od 45,1 % odnosno 44,5 %.

Takvo povećanje može se objasniti procesom hidratacije cementa tijekom ranog razdoblja njegovanja (od 0 do 7 dana), pri kojemu nastaju velike količine kalcijeva hidroksida. U kasnijoj fazi leteći pepeo reagira s nastalim kalcijevim hidroksidom stvarajući kalcij-silikat-hidratni gel (C-S-H gel), čime se povećava zbijenost cementne matrice i ubrzava razvoj čvrstoće [47, 48]. Rezultati ispitivanja čvrstoće na savijanje prikazani su na slici 10.

Kod svih skupina čvrstoća na savijanje povećavala se s vremenom njegovanja. Nakon 28 dana najveću vrijednost postigla je skupina 2 (3,77 MPa), dok je najmanju ostvarila skupina 16 (3,02 MPa). U razdoblju od 7. do 28. dana skupine 14 i 16 pokazale su najizraženiji porast čvrstoće na savijanje, s prirastom od 42,3 %. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su na slici 11.



Slika 10. Čvrstoća na savijanje DSBFC-a ispitana na prizmama



Slika 11. Vlačna čvrstoća DSBFC-a određena metodom cijepanja

Kao i tlačna te čvrstoća na savijanje, i vlačna čvrstoća cijepanjem povećavala se s vremenom njegovanja. Nakon 56 dana najveću vrijednost ostvarila je skupina 2 (6,20 MPa), a

najmanju skupina 16 (3,11 MPa), što je u skladu s rezultatima tlačne čvrstoće.

4.2.3. Statistička analiza

Rezultati tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje i vlačne čvrstoće cijepanjem nakon 28 dana statistički su analizirani primjenom mrežnog programa SPSSAU (<https://spssau.com>). U analizi raspona veća vrijednost parametra R označava snažniji utjecaj odgovarajućeg čimbenika na ispitivano svojstvo. Rezultati analize prikazani su u tablici 8.

Dobiveni rezultati upućuju na znatne razlike u utjecaju pojedinih čimbenika. Za tlačnu čvrstoću nakon 28 dana redoslijed utjecaja čimbenika bio je $FA > W/C > DS > BF$. Za čvrstoću na savijanje nakon 28 dana redoslijed utjecaja bio je $FA > W/C > BF > DS$. Za vlačnu čvrstoću cijepanjem nakon 28 dana redoslijed utjecaja bio je $W/C > FA > DS > BF$.

4.3. Određivanje optimalnog sastava mješavine

Kako bi se prikazala povezanost između mehaničkih svojstava DSBFC-a i različitih razina pojedinih čimbenika, na vodoravnu os dijagrama ucrtane su razine čimbenika, a na okomitu vrijednosti mehaničkih svojstava nakon 28 dana njegovanja. Dijagrami prikazani na slikama od 12. do 14. prikazuju odnos između razina pojedinih čimbenika i odgovarajućih pokazatelja čvrstoće te pružaju vizualnu osnovu za određivanje optimalnog sastava betonske mješavine.

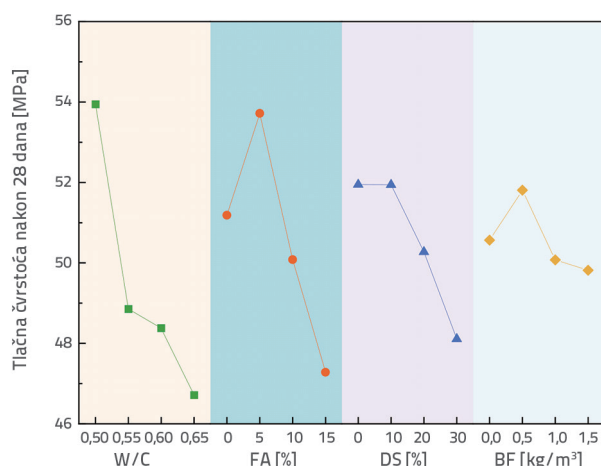
Kao što je to prikazano na slici 12., tlačna čvrstoća DSBFC-a postupno se smanjivala s povećanjem omjera vode i cementa (W/C). Pri omjeru $W/C = 0,65$ tlačna je čvrstoća bila 13,4 % manja u odnosu na mješavinu s omjerom $W/C = 0,50$. Povećanjem omjera vode i cementa raste koncentracija slobodnih molekula vode u svježoj betonskoj mješavini. Tijekom procesa njegovanja isparavanjem slobodne vode nastaju pore u cementnoj matrici, što smanjuje njezinu zbijenost i posljedično mehaničku čvrstoću. Zato veći omjer vode i cementa rezultira većom poroznošću

Tablica 8. Rezultati analize raspona

Broj	Tlačna čvrstoća nakon 28 dana [MPa]				Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana [MPa]				Vlačna čvrstoća pri cijepanju nakon 28 dana [MPa]			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
k1j	53,95	50,22	51,14	49,48	3,55	3,50	3,46	3,46	4,58	4,03	4,15	3,92
k2j	48,86	53,26	51,13	50,97	3,45	3,62	3,50	3,51	4,05	4,20	4,17	4,07
k3j	48,38	48,90	49,13	48,89	3,41	3,47	3,44	3,43	3,86	4,08	4,00	4,17
k4j	46,72	45,54	46,53	48,58	3,36	3,18	3,38	3,38	3,70	3,89	3,87	4,03
R	7,23	7,71	4,62	2,39	0,20	0,44	0,12	0,13	0,88	0,31	0,30	0,25

Napomena: k1j predstavlja srednju vrijednost rezultata testova u stupcu j u odnosu na faktor razine 1; R je ekstremna varijanca.

i manjom tlačnom čvrstoćom betona. Brojna istraživanja potvrdila su obrnuto proporcionalan odnos između omjera vode i cementa te tlačne čvrstoće betona [49, 50].



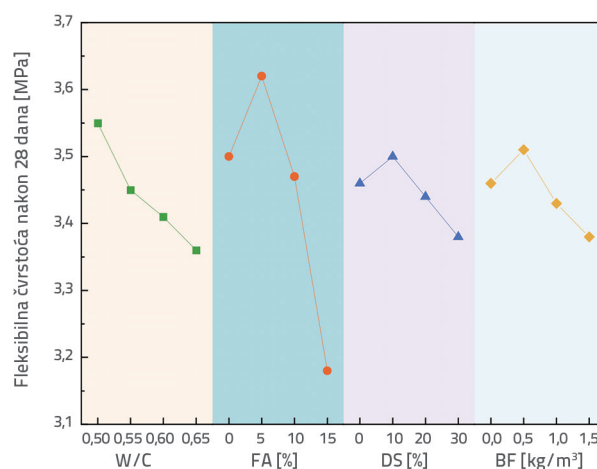
Slika 12. Dijagram analize raspona tlačne čvrstoće (W/C – omjer vode i cementa; FA – udio zamjene cementa letećim pepelom; DS – udio zamjene riječnog pijeska pustinjским pijeskom; BF – količina bazaltnih vlakana)

Dodatak letećeg pepela utjecao je na tlačnu čvrstoću betona. Pri udjelu letećeg pepela od 5 % tlačna je čvrstoća bila 6,05 % veća u odnosu na kontrolnu skupinu. Međutim, pri udjelima većima od 10 % čvrstoća se smanjila u odnosu na kontrolni beton. Takvo ponašanje posljedica je djelovanja letećeg pepela u cementnoj matrici. Pri manjim udjelima leteći pepeo reagira s kalcijevim hidroksidom, nastalim tijekom hidratacije cementa, pri čemu nastaje kalcijev silikatni hidrat (C-S-H gel) koji povećava zbijenost matrice i njezinu čvrstoću [51]. Kada je udio letećeg pepela previsok, raspoloživa količina kalcijeva hidroksida nije dovoljna za reakciju sa svim česticama pepela. Neizreagirani dio tada djeluje samo kao fino punilo, čime se smanjuje količina aktivnog cementnog veziva između agregata te dolazi do opadanja čvrstoće [52].

Pustinjский pijesak karakterizira znatno sitnija granulacija u odnosu na riječni pijesak. Zamjena riječnog pijeska pustinjским pijeskom u udjelu od 10 % gotovo da nije utjecala na tlačnu čvrstoću, dok su veći udjeli doveli do njezina smanjenja. Razlog je to što sitnije čestice pustinjского pijeska imaju veću specifičnu površinu od jednake mase riječnog pijeska. Posljedično je potrebna veća količina cementnog veziva za njihovo oblaganje, pa se raspoloživo vezivo raspodjeljuje na veću ukupnu površinu agregata, što rezultira smanjenjem čvrstoće.

Količina bazaltnih vlakana također je utjecala na tlačnu čvrstoću betona. Pri dodatku od 0,5 kg/m³ ostvarena je najveća tlačna čvrstoća, koja je bila 3,01 % veća od čvrstoće kontrolne skupine. To poboljšanje može se pripisati ravnomjernoj disperziji vlakana tijekom miješanja. Trenjem između vlakana i cementne matrice dolazi do razdvajanja snopova u pojedinačna vlakna. Ona prekidaju međusobnu povezanost pora, smanjuju nastanak većih

šupljina te povećavaju zbijenost cementne matrice. Međutim, pri povećanju količine bazaltnih vlakana na 1,0 kg/m³ tlačna čvrstoća smanjila se za 1,19 % u odnosu na kontrolnu skupinu. To se objašnjava činjenicom da pri većim količinama dolazi do međusobnog grupiranja vlakana i stvaranja lokalnih slabih zona unutar betona, koje prerano otkazuju pod opterećenjem i uzrokuju lom uzorka.

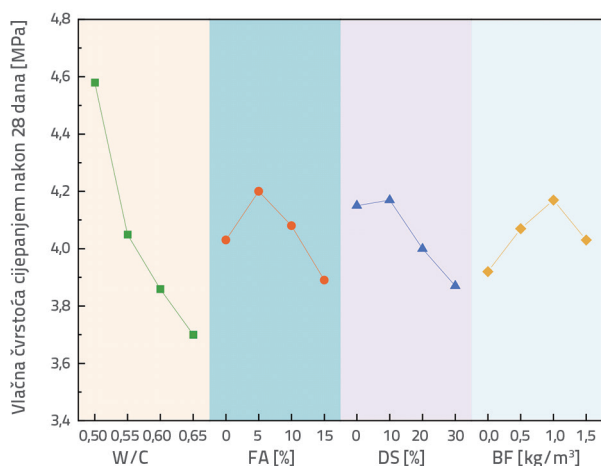


Slika 13. Dijagram analize raspona čvrstoće na savijanje (W/C – omjer vode i cementa; FA – udio zamjene cementa letećim pepelom; DS – udio zamjene riječnog pijeska pustinjским pijeskom; BF – količina bazaltnih vlakana)

Na slici 13. prikazan je utjecaj četiriju ispitivanih čimbenika na čvrstoću na savijanje, pri čemu je uočen trend sličan onome kod tlačne čvrstoće. Pri udjelu pustinjского pijeska od 10 % čvrstoća na savijanje bila je veća nego kod običnog betona. To poboljšanje može se objasniti činjenicom da sitne čestice pustinjского pijeska ispunjavaju mikropore u cementnoj pasti, čime povećavaju zbijenost matrice [53]. S druge strane, udio letećeg pepela imao je izražen utjecaj na savojnu čvrstoću. Pri zamjeni cementa od 15 % čvrstoća na savijanje smanjila se za 9,14 % u odnosu na kontrolnu skupinu. Prekomjerna količina letećeg pepela u tome slučaju djeluje ponajprije kao inertno punilo jer više ne sudjeluje u reakcijama hidratacije niti doprinosi povezivanju agregata i vlakana, što dovodi do smanjenja cjelovitosti cementne matrice. Na slici 14. pokazano je da su utjecaji omjera vode i cementa, letećeg pepela i pustinjского pijeska na vlačnu čvrstoću cijepanjem bili vrlo slični njihovom utjecaju na tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje. Međutim, utjecaj bazaltnih vlakana bio je znatno drugačiji. Povećanjem njihove količine s 0,5 na 1,5 kg/m³ vlačna čvrstoća cijepanjem najprije je rasla, a zatim se smanjivala. Najveća vrijednost tlačne čvrstoće ostvarena je pri dodatku od 1,0 kg/m³ bazaltnih vlakana. Od svih ispitivanih čimbenika omjer vode i cementa pokazao je najveći utjecaj na vlačnu čvrstoću cijepanjem.

Rezultati prikazani u tablici 8. te trendovi prikazani na slikama od 12. do 14. pokazuju da su među četiri analizirana čimbenika omjer vode i cementa te udio letećeg pepela imali najveći utjecaj

na mehanička svojstva betona, dok je utjecaj količine bazaltnih vlakana bio najmanji. Općenito, povećanjem omjera vode i cementa, udjela letećeg pepela i udjela pustinskog pijeska dolazi do pogoršanja mehaničkih svojstava DSBFC-a. Nasuprot tome, vlačna čvrstoća cijepanjem pri povećanju količine bazaltnih vlakana najprije raste, a zatim opada.



Slika 14. Dijagram analize raspona vlačne čvrstoće cijepanjem (W/C – omjer vode i cementa; FA – udio zamjene cementa letećim pepelom; DS – udio zamjene riječnog pijeska pustinskim pijeskom; BF – količina bazaltnih vlakana)

Na temelju dijagrama prikazanih na slikama od 12. do 14. određene su optimalne razine pojedinih čimbenika. Za omjer vode i cementa razina 1 pokazala je najbolje rezultate u svim

ispitivanim svojstvima. Za leteći pepeo optimalnom se pokazala razina 2. Kod udjela pustinskog pijeska tlačne čvrstoće na razinama 1 i 2 bile su gotovo jednake (slika 12.), dok su čvrstoća na savijanje i vlačna čvrstoća cijepanjem bile najveće pri razini 2 (slike 13. i 14.), zbog čega je ona odabrana kao optimalna. Kod bazaltnih vlakana razina 2 ostvarila je najveće tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje (slike 12. i 13.). Iako je razina 3 dala najveću vlačnu čvrstoću cijepanjem (slika 14.), tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje bile su niže od vrijednosti kontrolne skupine, zbog čega je razina 2 ocijenjena najpovoljnijom.

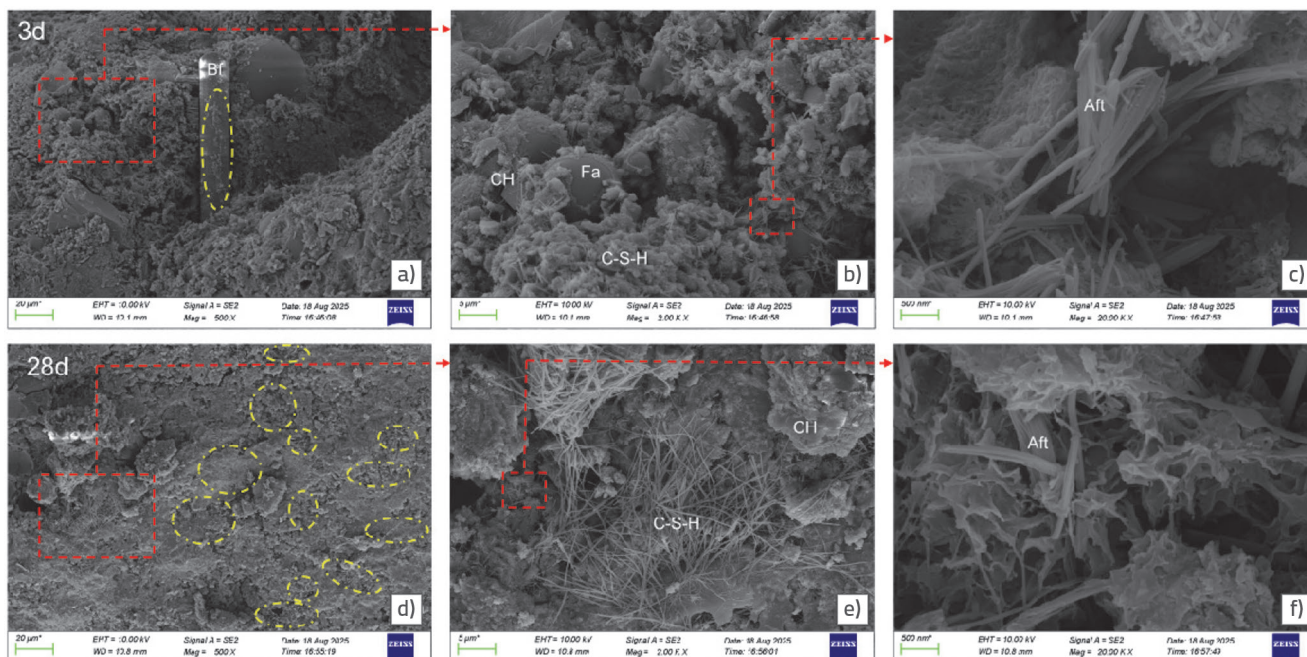
Može se zaključiti da optimalni sastav betonske mješavine iznosi $W/C = 0,50$, $FA = 5\%$, $DS = 10\%$ i $BF = 0,5 \text{ kg/m}^3$. U usporedbi s kontrolnom skupinom, takav sastav povećao je tlačnu čvrstoću za 9,05 %, čvrstoću na savijanje za 2,72 % te vlačnu čvrstoću cijepanjem za 21,60 %.

4.4. Analiza mikrostrukture

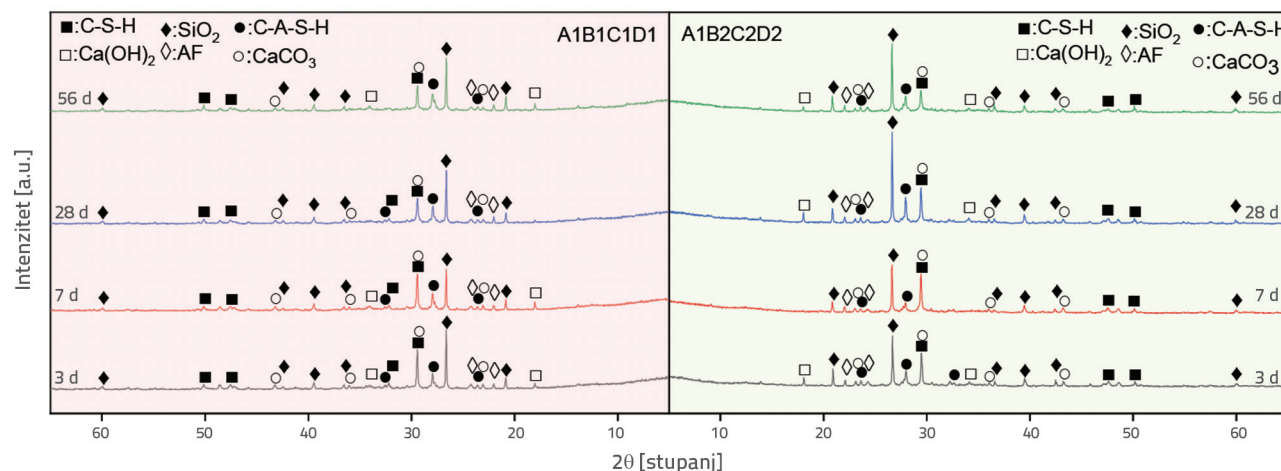
4.4.1. SEM analiza

Pretražni elektronski mikroskop (SEM) korišten je za analizu mikrostrukture sastavnih dijelova betona. Analiziran je drugi skup uzoraka nakon 3 i 28 dana njegovanja, a odgovarajuće SEM snimke prikazane su na slici 15.

Morfologija matrice nakon 3 dana prikazana je na slici 15.a, gdje su jasno vidljiva pojedinačna bazaltna vlakna. To opažanje u skladu je s prethodno prikazanim razdvajanjem snopova kratko rezanih bazaltnih vlakana u monofilamente tijekom miješanja (slika 3.). Na površini vlakana uočene su nakupine C-S-H gela, što potvrđuje dobro prijanjanje između cementne matrice i bazaltnih vlakana.



Slika 15. Mikrostruktura uzoraka betona nakon 3 i 28 dana njegovanja (A1B2C2D2) (Aft – etringit; BF – bazaltna vlakna; CH – kalcijev hidroksid; C-S-H – kalcij silikat hidrat; FA – leteći pepeo)



Slika 16. XRD difraktogrami uzoraka A1B1C1D1 i A1B2C2D2

Na slici 15.b prikazane su čestice letećeg pepela ugrađene u matricu okruženu pločastim kristalima kalcijeva hidroksida (CH) i nakupinama C-S-H gela. Na povećanom prikazu (slika 15.c) jasno su vidljivi igličasti i štapičasti kristali etringita (Aft).

Nakon 28 dana (slika 15.d) razvila se gusta isprepletena mikrostruktura u kojoj dominira C-S-H gel, čvrsto povezujući sve sastavne dijelove matrice. Povećani prikaz na slici 15.e pokazuje trodimenzionalnu mrežu C-S-H gela zajedno s pločastim kristalima kalcijeva hidroksida, kojih je nakon 28 dana znatno više nego nakon 3 dana. Na lokalno povećanoj slici 15.f može se uočiti manja količina igličastih i štapičastih kristala etringita okruženih velikom količinom nakupljenog C-S-H gela. U toj fazi mikrostruktura betona bila je znatno zbijenija i stabilnija nego nakon 3 dana njegovanja.

4.4.2. XRD analiza

Mineralni sastav uzoraka prve i druge skupine nakon 3, 7, 28 i 56 dana njegovanja analiziran je metodom rendgenske difrakcije (XRD), a rezultati su prikazani na slici 16.

Identificirane su sljedeće mineralne faze: kvarc (SiO_2), etringit (Aft), kalcit (CaCO_3), kalcijev hidroksid (Ca(OH)_2) i kalcij-silikat-hidrat (C-S-H). Ukupni mineralni sastav bio je vrlo sličan u obje skupine, dok su se intenziteti difrakcijskih vrhova pojedinih produkata hidratacije mijenjali s vremenom njegovanja.

Kao što je to prikazano na slici 16., kvarc je uvelike prisutan u obje skupine uzoraka. Nakon 28 i 56 dana intenzitet njegovih difrakcijskih vrhova bio je znatno veći u drugoj skupini nego u prvoj, dok su nakon 3 i 7 dana razlike bile zanemarive. Druga skupina imala je veće udjele letećeg pepela, pustinskog pijeska i bazaltnih vlakana. Pustinski pijesak i bazaltne vlakna ne sudjeluju izravno u reakcijama hidratacije, dok leteći pepeo pokazuje izraženu pucolansku aktivnost. Analiza rezultata pokazala je da je tijekom ranih faza hidratacije koncentracija kalcijeva hidroksida u cementnoj pasti bila relativno niska. S produljenjem vremena njegovanja pucolanska reakcija letećeg pepela postajala je sve izraženija [51], pri čemu je reakcijom s

kalcijevim hidroksidom nastajala dodatna količina C-S-H gela, što je rezultiralo zbijenijom mikrostrukturom.

U prvoj skupini difrakcijski vrhovi kalcijeva hidroksida gotovo su potpuno nestali nakon 28 dana, jer je kalcijev hidroksid reagirao s atmosferskim ugljikovim dioksidom stvarajući kalcit. U drugoj skupini ista transformacija zabilježena je već nakon 7 dana.

5. Zaključak

U ovome istraživanju pripremljen je beton s pustinjским pijeskom i bazaltnim vlaknima (DSBFC) korištenjem cementa, letećeg pepela, riječnog pijeska, pustinskog pijeska i bazaltnih vlakana kao osnovnih sastojaka. Mehanička svojstva betona ispitana su i analizirana primjenom 16 ortogonalno planiranih pokusnih mješavina. Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje i vlačna čvrstoća cijepanjem DSBFC-a postupno su se smanjivale s povećanjem omjera vode i cementa (W/C), udjela letećeg pepela (FA), udjela pustinskog pijeska (DS) i količine bazaltnih vlakana (BF). Od analiziranih čimbenika najveći utjecaj na mehanička svojstva imali su omjer vode i cementa te udio letećeg pepela, dok je najmanji utjecaj imao udio pustinskog pijeska.
- Tijekom miješanja betona snopovi bazaltnih vlakana postupno su se razdvajali u pojedinačna vlakna, koja su se ravnomjerno rasporedila unutar cementne matrice. Pod djelovanjem vanjskog opterećenja pukotine su se najprije razvijale u matrici, a zatim širile prema površini loma, pri čemu je dolazilo do izvlačenja pojedinačnih bazaltnih vlakana iz matrice, što je u konačnici dovelo do gubitka nosivosti i loma uzorka.
- Kao optimalan sastav betonske mješavine utvrđeni su sljedeći parametri: W/C = 0,50, FA = 5 %, DS = 10 % i BF = 0,5 kg/m³. Pri navedenom sastavu ostvarena je tlačna čvrstoća od 61,1 MPa, savojna čvrstoća od 3,77 MPa te vlačna čvrstoća cijepanjem od 5,01 MPa. U usporedbi s običnim betonom, tom se mješavinom smanjuje potrošnja

riječnog pijeska za približno 10 %, uz istodobno znatno veću primjenu pustinskog pijeska, čime se doprinosi očuvanju riječnih ekosustava i smanjuje negativan utjecaj eksploatacije prirodnog pijeska.

Dobiveni rezultati potvrđuju da primjena bazaltnih vlakana predstavlja učinkovitu metodu poboljšanja svojstava betona za hidrotehničke građevine te potvrđuju mogućnost primjene pustinskog pijeska u proizvodnji betona za hidrotehničke namjene. Korištenje pustinskog pijeska iz opustošenih područja Xinjianga pri izgradnji vodnogospodarskih sustava i sustava za navodnjavanje može smanjiti ovisnost o eksploataciji riječnog pijeska te doprinijeti smanjenju troškova gradnje. S obzirom

na specifične prirodne uvjete područja Xinjianga, buduća istraživanja trebala bi biti usmjerena na ispitivanje trajnosti DSBFC-a u uvjetima visokog saliniteta okoliša, smrzavanja te velikih temperaturnih oscilacija. Takva istraživanja pružit će znanstvenu osnovu za širu primjenu tog materijala u projektima sanacije i ublažavanja posljedica pustošenja u toj regiji.

Zahvala

Ovo istraživanje financirano je u sklopu Posebnog programa za jačanje sveobuhvatne znanstvene izvrsnosti Sveučilišta Yili (*Yili Normal University Special Project for Enhancing Comprehensive Disciplinary Strength*), projekt 22XKZY25.

LITERATURA

- [1] Niu, H.: Research on Water and Soil Conservation and Ecological Landscape Planning Measures in Arid Desert Area of Xinjiang - A Case Study on Reservoir Project of Poplar River Town of Tacheng, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, China, 2017.
- [2] Han, Q.: Evaluation of Fragile Environment and Study of Topical Region, Xinjiang University, Urumi, China, 2005.
- [3] Abudourousuli, D.: Analysis of the Bacteria and Archaea Diversity of Saline-Alkaline Soil of Four Sites in Xinjiang, Xinjiang Normal University, Urumqi, China, 2022.
- [4] Yao, Y., Zhang, C., Luo, G., Lin, T.: Research on water supply and agricultural water use forecasting in arid regions: a case study of Xinjiang, *Frontiers in Environmental Science*, 13 (2025), <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1578528>.
- [5] Yang, Y., Wen, Y., Liu, X., Zhao, J., Liu, Q.: Case studies of earthen structures for hydraulic projects damaged under low confining stress during earthquake, *Yantu Lixue / Rock and Soil Mechanics*, 33 (2012) 9, pp. 2729-2735, 2742.
- [6] Weng, Q., Lin, Y., Qin, W.: Recent researches on damage mechanism and penetrability of concrete structure subjected to hydraulic pressure, *Cailiao Daobao / Materials Review*, 30 (2016) 12, pp. 104-108, 133, <https://doi.org/10.11896/j.issn.1005-023X.2016.23.015>.
- [7] Shao, K., Wang, T., Wu, M.: Abrasion Damage of Concrete for Hydraulic Structures after Exposure to Freeze-Thaw Cycles, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1450 (2025), Article 012001, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1450/1/012001>.
- [8] Ma, Y., Jiang, X., Li, J., Li, G., Huang, W., Chang, W., Cao, G., Yu, Z.: Research on the Classification of Concrete Sulfate Erosion Types in Tumushuke Area, Xinjiang, *Buildings*, 14 (2024) 3, Article 729, <https://doi.org/10.3390/buildings14030729>.
- [9] Liu, Q., Andersen, L.V., Zhang, M., Wu, M.: Abrasion damage of concrete for hydraulic structures and mitigation measures: A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, 422 (2024), Article 135754, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135754>.
- [10] Prasad, P., Tumu, D.B.N., Singh, A., Singh, M.: Effect of different parameters on mechanical properties of basalt fiber based green composites - A critical review, *AIP Conference Proceedings*, 2962 (2024) 1, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1063/5.0192248>.
- [11] Jamshaid, H., Mishra, R.: A green material from rock: basalt fiber—a review, *Journal of the Textile Institute*, 107 (2016) 7, pp. 923-937, <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>.
- [12] Li, Y., Shen, A., Guo, Y.: Effect of the addition of basalt fiber on life-cycle anti-cracking behavior of concrete, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23 (2023) 2, Article 92, <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00621-x>.
- [13] Liang, N., Geng, S., Mao, J., Liu, X., Zhou, X.: Investigation on cracking resistance mechanism of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete based on SEM test, *Construction and Building Materials*, 411 (2024), Article 134102, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134102>.
- [14] Wang, X., He, J., Mosallam, A.S., Li, C., Xin, H.: The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC), *Advances in Materials Science and Engineering*, (2019), Article ID 7520549, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1155/2019/7520549>.
- [15] Huang, J., Chen, H.: The influence of basalt fiber length on the mechanical properties and frost resistance of concrete, *Journal of Functional Materials*, 56 (2025) 3, pp. 3194-3201, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9731.2025.03.025>.
- [16] Qin, S., Wu, L.: Study on mechanical properties and mechanism of new basalt fiber reinforced concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 22 (2025), Article e04290, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04290>.
- [17] Krassowska, J.: Fracture behavior and mechanical properties of basalt chopped fibers and minibars fiber-reinforced concrete, *Structures*, 75 (2025), Article 108808, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108808>.
- [18] Wang, X., Li, L., Wei, M., Xiang, Y., Wu, Y., Zhou, B., Sun, Y., Cheng, W.: Experimental study on the mechanical properties of short-cut basalt fiber reinforced concrete under large eccentric compression, *Scientific Reports*, 15 (2025) 1, Article 10845, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94964-5>.
- [19] Bao, S., Wang, S., Xia, H., Liu, K., Tang, X., Jin, P.: Enhancing the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete: A Comparative Study of Basalt- and Glass-Fiber Reinforcements, *Buildings*, 15 (2025) 10, Article 1718, <https://doi.org/10.3390/buildings15101718>.

- [20] Chang, C., Ning, H., Song, M., Ma, Y., Wang, X., Ketekun, B.T., Kawkabi, K.W., Long, X.: Enhancing mechanical properties of high-strength recycled concrete with basalt fiber and nano-calcium carbonate: Experimental and numerical investigations, *Construction and Building Materials*, 489 (2025), Article 142264, [https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2025.142264](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142264).
- [21] Lei, T., Qiu, J., Li, L., Huo, Y., Zhang, T.: Study on properties of basalt fiber coal gangue concrete modified by supplementary cementitious materials: Mechanics, durability, microstructure, *Journal of Building Engineering*, 104 (2025), Article 112271, [https://doi.org/ 10.1016/j.jobe.2025.112271](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112271).
- [22] Xiao, J., Zhou, Y., Deng, Z., Yang, H., Mei, J., Jiang, J., Wei, T.: Investigation of biaxial compressive mechanical properties and strength criteria of basalt fiber-reinforced coral aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 475 (2025), Article 141199, [https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2025.141199](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141199).
- [23] Bodur, B., Benli, A., Bayraktar, O.Y., Alcan, H.G., Kaplan, G., Aydın, A.C.: Impact of attapulgite and basalt fiber additions on the performance of pumice-based foam concrete: mechanical, thermal, and durability properties, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25 (2025) 2, pp. 1-25, [https://doi.org/ 10.1007/s43452-025-01128-3](https://doi.org/10.1007/s43452-025-01128-3).
- [24] Chen, J.: The Experimental Research on Mix Proportion of Sand Concrete in Gurbantunggut Desert, Shihezi University, Shihezi, China, 2017.
- [25] Hamada, H.M., Abed, F., Al-Sadoon, Z.A., Elnassar, Z., Hassan, A.: The use of treated desert sand in sustainable concrete: A mechanical and microstructure study, *Journal of Building Engineering*, 79 (2023), Article 107843, [https://doi.org/ 10.1016/j.jobe.2023.107843](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107843).
- [26] Liao, T., Huang, X., Yuan, J., Ren, S., Cai, H., Chen, X.: Effects of Desert Sand Substitution on Concrete Properties Using Desert Sand-doped Artificial Sand as the Fine Aggregate, *Ceramics-Silikáty*, 66 (2022) 4, pp. 540-554, [https://doi.org/ 10.13168/cs.2022.0050](https://doi.org/10.13168/cs.2022.0050).
- [27] Zhang, M., Hu, P., Sun, S., Yao, J., Sun, Y., Zhong, J.: Ultra-high-performance alkali-activated concrete produced with desert sand incorporations, *Construction and Building Materials*, 476 (2025), Article 141240, [https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2025.141240](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141240).
- [28] Xu, W., Liu, H., Qin, D., Doh, S.I.: Study on the mechanical properties of desert sand concrete under dry-wet cycles with sulfate erosion, *Physics and Chemistry of the Earth*, 138 (2025), Article 103852, [https://doi.org/ 10.1016/j.pce.2025.103852](https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103852).
- [29] Munir, M.J., Kazmi, S.M.S., Wu, Y.-F.: High-strength compression-cast desert sand concrete: Stress-strain behavior, durability, microstructure, and cement savings, *Journal of Building Engineering*, 111 (2025), Article 113284, [https://doi.org/ 10.1016/j.jobe.2025.113284](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113284).
- [30] Rahmani, F., Kaci, S., Ouali, M.O.: On the use of self-compacting concrete based on desert sand and granite powder, *Cement, Wapno, Beton*, 29 (2024) 3, pp. 171-187, [https://doi.org/ 10.32047/CWB.2024.29.3.2](https://doi.org/10.32047/CWB.2024.29.3.2).
- [31] Hou, L., Jian, S., Huang, W.: The Effect of Polypropylene Fiber and Glass Fiber on the Frost Resistance of Desert Sand Concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28 (2024) 1, pp. 342-353, [https://doi.org/ 10.1007/s12205-023-0694-8](https://doi.org/10.1007/s12205-023-0694-8).
- [32] Qin, Y., Zhang, L., Qu, C., Luo, L.: Flexural mechanical properties of steel fiber desert sand concrete beams, *Acta Materiae Compositae Sinica*, 39 (2022) 11, pp. 5599-5610, [https://doi.org/ 10.13801/j.cnki.fhclxb.20211206.002](https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211206.002).
- [33] Yu, R., Huang, Y., Sun, J., Liu, Y., Li, S., Luo, S., Liu, Z.: Properties of Steel Fiber Reinforced Desert Sand Concrete, *Materials Science Forum*, 1131 (2024), pp. 85-98.
- [34] Natarajan, R.G., Shanmugamoorthy, S., Veerasamy, S., John, A.: Flexural behavior of sustainable high volume fly ash reinforced concrete beam, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 1, pp. 13-25, [https://doi.org/ 10.14256/JCE.3830.2023](https://doi.org/10.14256/JCE.3830.2023).
- [35] Ayyadurai, A., Muthuchamy Maruthai, S., Muthu, D.: Impact of fly ash and banana fiber on mechanical performance of paver block concrete, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 3, pp. 211-222, [https://doi.org/ 10.14256/JCE.3873.2023](https://doi.org/10.14256/JCE.3873.2023).
- [36] Zehra, F.A., Soner, G.: Structural self-compacting lightweight concrete: Effects of fly ash and basalt fibers on workability, thermal and mechanical properties under ambient conditions and high temperatures, *Construction and Building Materials*, 481 (2025), Article 141658, [https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2025.141658](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141658).
- [37] Li, Y., Liu, Y., Zhang, W.: Mechanical, chloride resistance, and microstructural properties of basalt fiber-reinforced fly ash-silica fume composite concrete, *Minerals*, 15 (2025) 4, Article 348, [https://doi.org/ 10.3390/min15040348](https://doi.org/10.3390/min15040348).
- [38] Hamada, H., Abed, F.: Optimization and modeling of 7-day ultra-high-performance concrete comprising desert sand and supplementary cementitious materials using response surface methodology, *Buildings*, 14 (2024) 7, Article 2058, [https://doi.org/ 10.3390/buildings14072058](https://doi.org/10.3390/buildings14072058).
- [39] Zhang, S., Yuan, K., Zhang, J., Guo, J.: Experimental study on performance influencing factors and reasonable mixture ratio of desert sand ceramicsite lightweight aggregate concrete, *Advances in Civil Engineering*, (2020), Article ID 8613932, pp. 1-9, [https://doi.org/ 10.1155/2020/8613932](https://doi.org/10.1155/2020/8613932).
- [40] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China: standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete, *JGJ 52*, Beijing, 2006.
- [41] ASTM International: Standard Specification for Concrete Aggregates, *ASTM C33/C33M*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [42] Gu, B., Li, Q., Li, C., Zhao, P., Hou, P., Chen, H., Wang, Y., Zhao, P., Cheng, X.: Optimization design of ultra-fine supplementary cementitious materials ultra-high performance concrete mix proportion based on orthogonal experiment, *Construction and Building Materials*, 453 (2024), Article 139018, [https://doi.org/ 10.1016/j.conbuildmat.2024.139018](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139018).
- [43] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China: specification for mix proportion design of ordinary concrete, *JGJ 55*, Beijing, 2011.
- [44] Ministry of Water Resources of China: Test Code for Hydraulic Concrete, *SL/T 352*, Beijing, 2020.
- [45] Standardization Administration of China: Standard for Test Method of Performance on Ordinary Fresh Concrete, *GB/T 50080*, Beijing, 2016.
- [46] Hamada, H.M., Abed, F., Al-Sadoon, Z.A., Hassan, A.: Enhancing concrete strength and microstructure with basalt and steel fibers in acid and base environments incorporating desert sand, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19 (2025) 1, pp. 1-18, [https://doi.org/ 10.1186/s40069-024-00741-5](https://doi.org/10.1186/s40069-024-00741-5).

- [47] Huynh, P.T., Ogawa, Y., Kawai, K., Bui, P.T.: Effect of cement type and water-to-binder ratio on k-value of low-calcium fly ash for concrete compressive strength, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35 (2023) 11, pp. 1-10, [https://doi.org/ 10.1061/JMCEE7.MTENG-15517](https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15517).
- [48] Nayak, D.K., Abhilash, P.P., Singh, R., Kumar, R., Kumar, V.: Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies, *Cleaner Materials*, 6 (2022), Article 100143, [https://doi.org/ 10.1016/j.clema.2022.100143](https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143).
- [49] Mohammed, B.H., Sherwani, A.F.H., Faraj, R.H., Qadir, H.H., Younis, K.H.: Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: Effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers, *Ain Shams Engineering Journal*, 12 (2021) 2, pp. 1557-1567, [https://doi.org/ 10.1016/j.asej.2020.11.008](https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.008).
- [50] Trezos, K.G., Sfikas, I.P., Pasios, C.G.: Influence of water-to-binder ratio on top-bar effect and on bond variation across length in self-compacting concrete specimens, *Cement and Concrete Composites*, 48 (2014), pp. 127-139, [https://doi.org/ 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.012).
- [51] He, J., Sun, C., Wang, X.: Study on the effect of fly ash on mechanical properties and seawater freeze-thaw resistance of seawater sea sand concrete, *Buildings*, 14 (2024) 7, Article 2191, [https://doi.org/ 10.3390/buildings14072191](https://doi.org/10.3390/buildings14072191).
- [52] Wang, Y., Liu, J.: Theoretical investigation on elastic property evolutions of low volume fly ash concrete, *Journal of the American Ceramic Society*, 108 (2025) 1, [https://doi.org/ 10.1111/jace.20127](https://doi.org/10.1111/jace.20127).
- [53] Guo, Y., Zhou, H., Zhang, J., Han, C., Wang, H.: Effects of curing temperature and desert sand replacement rate on compressive strength and pore structure of manufactured sand concrete, *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 43 (2025) 1, pp. 45-52, [https://doi.org/ 10.3969/j.issn.1674-8530.23.0241](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.23.0241).