

Primljen / Received: 30.9.2024.

Ispravljen / Corrected: 23.8.2025.

Prihvaćen / Accepted: 1.9.2025.

Dostupno online / Available online: 10.1.2026.

Ispitivanje mehaničkih svojstava betona sa zgurom iz ugljena pomoću ortogonalnoga eksperimentalnog plana

Autori:



Jianpeng Zhang, dipl.ing.građ.
Sveučilište Yili, Yining, Kina
Fakultet za fiziku i tehnologiju
17041@ylnu.edu.cn



Prof.dr.sc. **Gang Li**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Shihezi, Kina
Fakultet za očuvanje voda i arhitekturu
gangli@shzu.edu.cn
Autor za korespondenciju



Jiamin Liu, dipl.ing.građ.
Akademija za poljoprivredu i melioraciju u Xinjiangu, Logistički uslužni centar, Kina
liujiamin1205@163.com



Ling Li, dipl.ing.građ.
Zhongming Engineering Design Consulting Co., Ltd., Aksu, Kina
m15099196374@163.com

Prethodno priopćenje

[Jianpeng Zhang, Gang Li, Jiamin Liu, Ling Li](#)

Ispitivanje mehaničkih svojstava betona sa zgurom iz ugljena pomoću ortogonalnoga eksperimentalnog plana

Kako bi se poboljšala ugradnja zgure iz ugljena u beton, u ovom su istraživanju ortogonalnim eksperimentalnim planom ispitani učinci nekoliko ključnih čimbenika na mehanička svojstva betona sa zgurama od izgaranja ugljena. Proučavani parametri uključivali su vodocementni omjer (0,45, 0,475, 0,5 i 0,525), omjer zamjene letećim pepelom (0, 10, 20 i 30 %), omjer pijeska (37,5, 40, 42,5 i 45 %) i omjer zamjene zgurom iz ugljena (0, 33,33, 66,67 i 100 %). Ispitani su učinci tih čimbenika na tlačnu čvrstoću nakon 7, 14 i 28 dana te na vlačnu čvrstoću cijepanjem nakon 28 dana. Mikroskopska analiza provedena je pomoću SEM-a kako bi se istražile karakteristike površine betona. Rezultati su pokazali postupno smanjenje čvrstoće betona s povećanjem omjera vode i veziva te omjera zamjene zgurom iz ugljena. Omjer vode i veziva znatno je utjecao i na tlačnu i vlačnu čvrstoću. Mješavina betona s najboljim svojstvima, koja se sastoji od omjera vode i veziva od 0,45, omjera zamjene letećim pepelom od 10 %, omjera pijeska od 45 % i omjera zamjene zgurom iz ugljena od 66,67 %, rezultirala je tlačnom čvrstoćom od 42,18 MPa nakon 28 dana i vlačnom čvrstoćom od 3,21 MPa. Vrijednosti su u skladu sa zahtjevima razreda čvrstoće C30 za nosive građevinske konstrukcije, što pridonosi većoj gospodarskoj vrijednosti zgure od izgaranja ugljena i širi mogućnosti primjene betona sa zgurom.

Ključne riječi:

ortogonalni eksperimentalni plan, beton sa zgurom iz ugljena, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, mikrostruktura

Research Paper

[Jianpeng Zhang, Gang Li, Jiamin Liu, Ling Li](#)

Orthogonal test-based study on mechanical properties of coal-fired slag concrete

To improve the incorporation of coal-fired slag into concrete, this study investigated the effects of several key factors on the mechanical properties of coal-fired slag concrete using orthogonal testing. The parameters studied included water-binder ratio (0.45, 0.475, 0.5, and 0.525), fly ash replacement ratio (0, 10, 20, and 30 %), sand ratio (37.5, 40, 42.5, and 45 %), and coal-fired slag replacement ratio (0, 33.33, 66.67, and 100 %). The effects of these factors on the seventh, 14th, and 28th-day compressive strengths, as well as the 28th day splitting tensile strength, were examined. A microscopic analysis was performed via SEM to explore the surface characteristics of the concrete. The results revealed a gradual decrease in concrete strength as the water-binder ratio and coal-fired slag replacement ratio increased. The water-binder ratio significantly affected both the compressive and splitting tensile strengths. The optimal concrete mix, consisting of a water-binder ratio of 0.45, fly ash replacement ratio of 10%, sand ratio of 45%, and coal-fired slag replacement ratio of 66.67 %, resulted in a 28-day compressive strength of 42.18 MPa and splitting tensile strength of 3.21 MPa. These values satisfy the C30 strength requirements for structural building applications, enhancing the economic value of coal-fired slag and broadening the potential uses of slag concrete.

Key words:

orthogonal test, coal-fired slag concrete, compressive strength, splitting tensile performance, microstructure

1. Uvod

Prema Izvješću o energetsom razvoju Kine za 2023., proizvodnja sirova ugljena u Kini znatno se povećala, dosegnuvši opseg od 4,56 milijardi tona do 2022., što čini povećanje od 10,5 % u odnosu na prethodnu godinu [1, 2]. Osim toga do 2022. proizvodnja električne energije u termoelektranama dosegla je opseg od 5077 milijardi kilovatsati, što čini gotovo 70 % ukupne proizvodnje električne energije u Kini. Ti podaci upućuju na daljnju dominaciju termoelektrana u proizvodnji električne energije u Kini [3, 4].

Izgaranje ugljena dovodi do nastanka velikih količina zgure, što predstavlja opterećenje za okoliš. Naime, tek se manji udio te zgure ponovno iskorištava u svrhe kao što su nasipavanje cesta i izrada opeke [5–7]. Većina zgure odlaže se na otvorene hrpe ili na odlagalištima, što uzrokuje znatno onečišćenje zraka i tla u okolišu [8, 9].

Usprkos sve većoj zabrinutosti za okoliš, učinkovita upotreba industrijskoga krutog otpada, uključujući zguru iz ugljena, postala je važna tema istraživanja. Stijanović i Memiš istraživali su mogućnosti dodavanja industrijskog otpada u građevne materijale [10, 11]. Brojni radovi istražili su učinkovite strategije upravljanja i primjene tog materijala [12–15]. Itaru i sur. [16] ispitivali su mogućnost primjene zgure iz rasplinjavanja ugljena kao zamjene za sitni agregat u betonu. Otkrili su da, kada je beton obogaćen zgurum u udjelu do 25 %, njegova mehanička svojstva ostaju nepromijenjena ili se poboljšavaju u odnosu na standardni beton. Zhang i sur. [17] proizveli su beton razreda čvrstoće C20 za cestovne površine, u kojemu je 80 % tradicionalnih materijala zamijenjeno zgurum iz ugljena. Geçkil i sur. [18] istraživali su pripremu cestovnog betona s dodatkom zgure iz visokih peći, pri čemu je beton s udjelom od 20 % troske pokazao poboljšana svojstva. Murko i sur. [19] analizirali su sastav pepela iz termoelektrana na ugljen i ispitali njegov potencijal za primjenu kao sirovine u proizvodnji cementa. Guo i sur. [20] ispitali su primjenu zgure iz ugljena u podzemnome inženjerstvu, posebno povezanost fraktalne dimenzije betona s njegovom tlačnom čvrstoćom primjenom skenirajućega elektronskog mikroskopa. Rezultati su pokazali postupno smanjenje tlačne čvrstoće s povećanjem udjela zgure iz ugljena. Sandip i sur. [21] ispitivali su djelomičnu zamjenu cementa pepelom s dna kotla i zgure od izgaranja ugljena, pri čemu je beton s udjelom od 10 % pepela s dna kotla pokazao poboljšanu vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti i trajnost. Slično tome, Zhang i sur. [22] razvili su samozbijajući beton s upotrebom zgure od izgaranja ugljena kao agregata, koji je postigao prividnu gustoću od 1645,5 kg/m³ i tlačnu čvrstoću od 16,3 MPa, čineći ga prikladnim za nestrukturalne sastavne dijelove u građevinarstvu. Liu i sur. [23–25] razvili su beton s visokim udjelom zgure iz ugljena od 85,8 % kao zamjenom. Time je postignuta tlačna čvrstoća od 15 MPa, što ga čini pogodnim za primjenu u, naprimjer, podovima u rudnicima ugljena Yangchangwan.

Unatoč znatnome napretku u primjeni zgure iz ugljena u betonu, niska razina čvrstoće tog materijala i dalje ograničava njegovu

upotrebu. Primjena betona sa zgurum većinom je ograničena na specifične sektore poput cestogradnje i unutarnjih pregradnih zidova, posebno nestrukturalnih sastavnih dijelova [17, 18, 22, 25], što znatno smanjuje njegovu primjenu u građevinarstvu.

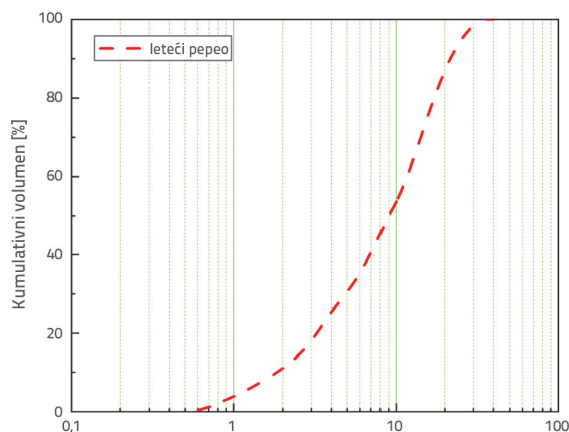
Beton s visokim udjelom zgure često pokazuje smanjenu razinu čvrstoće, što smanjuje i njegovu učestalost primjene u građevinarstvu. Kako bi se osiguralo da beton sa zgurum zadovoljava zahtjeve za čvrstoću u kontekstu građevinskih projekata, udio zgure obično se smanjuje, čime se smanjuje i njezina upotreba. Zato je od ključne važnosti odrediti optimalan udio zgure u betonskoj smjesi koja omogućuje povećanu iskorištenost, a istodobno osigurava zadovoljavajuću razinu čvrstoće za širu primjenu.

Glavni cilj ovog istraživanja bio je prevladati problem niske razine čvrstoće betona sa zgurum iz ugljena ispitivanjem mogućnosti upotrebe znatnog udjela zgure iz ugljena u proizvodnji betona razreda čvrstoće C30 namijenjenog niskogradnji. Primjenom ortogonalnoga eksperimentalnog plana istraženi su različiti čimbenici poput vodocementnog omjera, zamjene letećim pepelom, pijeska i omjera zgure iz ugljena kao zamjene za cement. Cilj je bio kroz sveobuhvatna eksperimentalna ispitivanja analizirati utjecaj tih čimbenika na mehanička svojstva betona sa zgurum te identificirati optimalni sastav betona koja pruža smjernice za poboljšanje njegove primjene u građevinskim projektima, povećavajući njegovu učinkovitost i prikladnost za primjene u građevinarstvu.

2. Materijali i metode

2.1. Materijali

U ovome istraživanju primijenjen je cement portland (P-O, 42.5), što ga je isporučila cementara *Xinjiang Shihezi Nanshan*. Fizikalna, mehanička i kemijska svojstva cementa, kako je to detaljno opisano u tablici 1., u skladu su s kineskim nacionalnim standardom GB175-2007 [26]. Leteći pepeo (engl. *Fly Ash* - FA) isporučila je tvrtka *Xinjiang Yue Long Da Renewable Resources Technology Co*. Parametri letećeg pepela navedeni su u tablici 2. Raspodjela veličine čestica letećeg pepela prikazana je na slici 1.



Slika 1. Krivulje raspodjele veličine čestica letećeg pepela

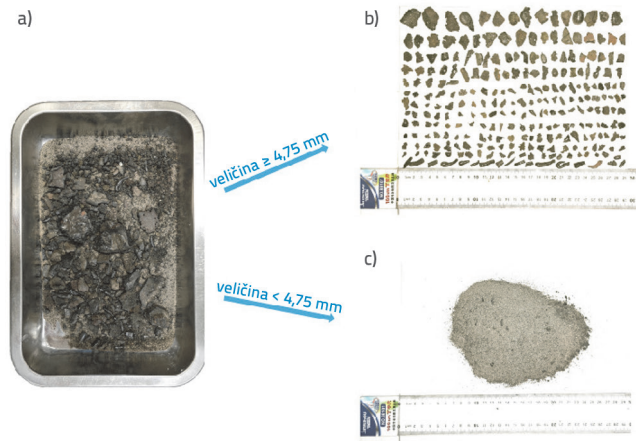
Tablica 1. Svojstva cementa primijenjenog u istraživanju

Svojstva	Cement	Ograničenje u skladu s GB175-2007
Specifična površina [m²/kg]	356,4	Najmanje 300
Čvrstoća: pat-test	Prolazno	Nema pukotina ili savijanja
Početno vrijeme vezivanja [min]	178	Najmanje 45
Vrijeme konačnog vezivanja [min]	228	Najviše 600
Tlačna čvrstoća trećeg dana [MPa]	30,6	Najmanje 22,0
Savojna čvrstoća trećeg dana [MPa]	6,4	Najmanje 4,0
MgO [%]	2,13	Najviše 5,0
SO ₃ [%]	2,58	Najviše 3,5
LOI [%]	1,10	Najviše 5,0

Tablica 2. Parametri letećeg pepela

Razred	Finoća [%]	Gubitak pri izgaranju [%]	Udio potrebe za vodom [%]	Udio vlage [%]
I	7,7	2,1	94	0,3

Kao sitni agregat primijenjen je srednjezrnati pijesak s modulom finoće zrnatosti od 2,84. Kao krupni agregat upotrijebljen je šljunak s najvećom veličinom čestica od 20 mm, a kao sredstvo za smanjenje količine vode primijenjena je HSC polikarboksilna kiselina, pri čemu je postignut omjer smanjenja vode od 15 % masenog udjela. Za sva je ispitivanja upotrijebljena gradska voda iz slavine.

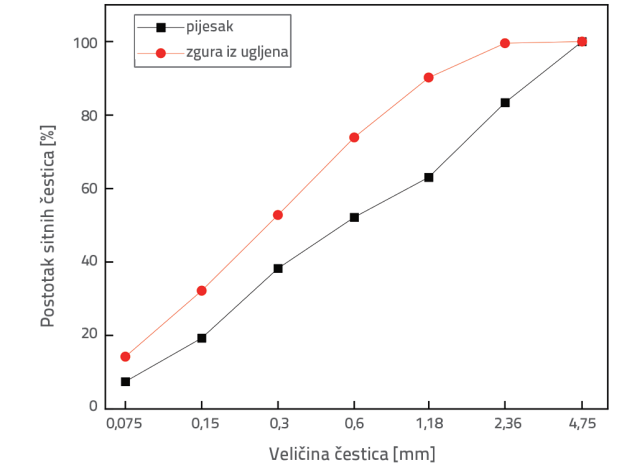


Slika 2. Zgura iz peći za izgaranje ugljena u termoelekttranama

Zgura iz ugljena iz termoelektrana pojavljuje se u raznim oblicima, uključujući velike i male blokove, prahove i čestice raznih veličina, a kao što je to prikazano na slici 2.a. Zbog šupljina milimetarskih i mikrometarskih veličina struktura tih materijala porozna je te zato ne zadovoljava zahtjeve za izravnu primjenu u betonu. Kako bi se zgura ugljena pripremila za dodavanje u beton, potrebni su

prethodno drobljenje i prosijavanje. Čestice veće od 4,75 mm, zbog svoje porozne i lagane strukture, mogu se upotrijebiti kao potpuna ili djelomična zamjena za krupni agregat u betonu, što je prikazano na slici 2.b. Ta zamjena poboljšava propusnost, toplinsku izolaciju i lagana svojstva betona. Nasuprot tome, čestice zgure iz ugljena manje od 4,75 mm mogu zamijeniti fine agregate u standardnim betonskim mješavinama kao što je to prikazano na slici 2.c.

Za potrebe ovog istraživanja prethodno drobljena zgura nabavljena je iz termoelektrane Shihezi South. Odabrane čestice zgure bile su manje od 5 mm, s modulom finoće od 2,34, nasipnom gustoćom od 834 kg/m³ i udjelom vlage od 5,4 %. Kemijski sastav zgure prikazan je u tablici 3. Raspodjele veličina čestica zgure iz ugljena i pijeska prikazane su na slici 3.



Slika 3. Krivulje raspodjele veličine čestica zgure iz ugljena i pijeska

Tablica 3. Kemijski sastav zgure iz ugljena [%]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
42,16	16,85	12,64	10,12	0,86	9,96	3,78	1,15	1,92	0,56

Tablica 4. Vrijednosti eksperimentalnih čimbenika

Razina	Vodocementni omjer A	Omjer zamjene letećim pepelom B	Omjer pijeska C	Omjer zamjene zgurom iz ugljena D	Prazan stupac E
1.	0,45	0	37,5 %	0	1
2.	0,475	10 %	40 %	33,33 %	2
3.	0,5	20 %	42,5 %	66,67 %	3
4.	0,525	30 %	45 %	100 %	4

Tablica 5. Omjeri sastava betonske smjese

Broj	Razmatranja					Voda [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	Leteći pepeo [kg/m ³]	Zgura [kg/m ³]	Pijesak [kg/m ³]	Agregat [kg/m ³]	Sredstvo za smanjenje količine vode [kg/m ³]
	A	B	C	D	E							
1 [#]	1	1	1	1	1	175	389	0	0	700	1166	7
2 [#]	1	2	2	2	2	175	350	39	249	498	1120	7
3 [#]	1	3	3	3	3	175	311	78	528	265	1073	7
4 [#]	1	4	4	4	4	175	272	117	840	0	1026	7
5 [#]	2	1	2	3	4	175	368	0	503	252	1132	7
6 [#]	2	2	1	4	3	175	332	37	707	0	1179	7
7 [#]	2	3	4	1	2	175	295	74	0	849	1038	7
8 [#]	2	4	3	2	1	175	258	111	267	535	1085	7
9 [#]	3	1	3	4	2	175	350	0	810	0	1095	6
10 [#]	3	2	4	3	1	175	315	35	571	286	1048	6
11 [#]	3	3	1	2	4	175	280	70	238	476	1191	6
12 [#]	3	4	2	1	3	175	245	105	0	762	1143	6
13 [#]	4	1	4	2	3	175	333	0	288	577	1057	6
14 [#]	4	2	3	1	4	175	300	33	0	817	1105	6
15 [#]	4	3	2	4	1	175	267	67	769	0	1153	6
16 [#]	4	4	1	3	2	175	233	100	480	241	1201	6

2.2. Ortogonalni eksperimentalni plan

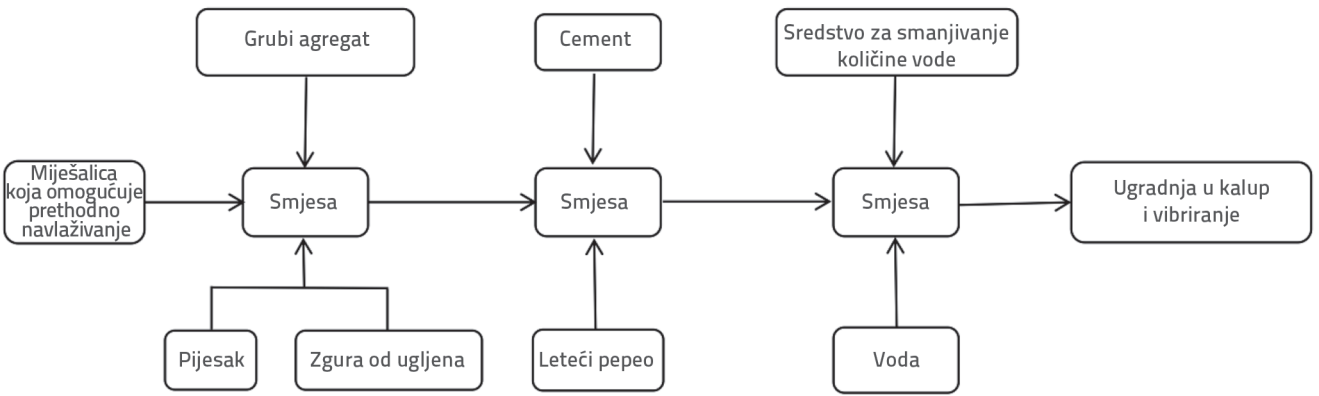
U ovome istraživanju projektiranje sastava betona sa zgurom iz ugljena provedeno je u skladu sa smjernicama navedenima u normi JGJ 55-2011 Specifikacija za projektiranje sastava običnog betona [27]. Tlačna i vlačna čvrstoća betona cijepanjem odabrane su kao kriteriji za procjenu eksperimentalnih rezultata. Ortogonalni eksperimentalni pristup primijenjen je za istraživanje utjecaja četiriju ključnih čimbenika, i to vodocementnog omjera (čimbenik A), udjela zamjene letećim pepelom (čimbenik B), udjela pijeska (čimbenik C) i udjela zgure iz ugljena kao zamjene za cement (čimbenik D). Granica odstupanja za čimbenik A utvrđena je jednosmjernim testom i iznosila je od 0,45 do 0,525. Čimbenik B razlikovao se između 0 % i 30 %, čimbenik C između 37,5 % i 45 %, a čimbenik D, glavni fokus ortogonalnog ispitivanja, iznosio je između 0 % i 100 %. Eksperimenti su organizirani prema ortogonalnoj tablici L16 (4⁵), s jednim praznim stupcem koji se upotrebljavao kao kontrola (stupac E). Za svaki čimbenik utvrđene su četiri različite razine, kao što je to navedeno u tablici 4. Omjeri navedeni u tablici 4. izraženi su u masenim udjelima.

U ovome eksperimentu razine zamjene zgurom iz ugljena definirane su na sljedeći način: razina 1. predstavljala je 0 % zamjene zgurom, gdje je kao sitni agregat primijenjen samo pijesak, a razina 4. odgovarala je 100-postotnoj zamjeni zgurom iz ugljena, pri čemu se zgura iz ugljena upotrebljavala isključivo kao sitni agregat.

Za ovo ispitivanje određeno je 16 smjesa projektiranog sastava betona, koje odgovaraju specifičnim razinama svakog ključnog čimbenika navedenog u tablici 5. Omjeri su sustavno izračunani analizom i kombiniranjem različitih omjera vode i cementa, zamjene letećim pepelom, pijeska i zamjene zgurom iz ugljena primijenjenog u eksperimentu.

2.3. Priprema uzoraka i metode ispitivanja

Postupak pripreme betona prikazan je na slici 4. Nakon miješanja beton je izliven u kalupe kako bi se dobili ispitni blokovi dimenzija 100 × 100 × 100 mm. Nakon jednog dana sušenja kalupi su uklonjeni, a betonski blokovi prebačeni u standardnu prostoriju za njegu pri temperaturi od 20±1 °C i relativnoj vlažnosti od 90±5 % tijekom 28 dana daljnjeg sušenja.



Slika 4. Priprema uzorka

Tablica 6. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava i obradivosti betona sa zgurom

Broj	Tlačne čvrstoće [MPa]			Vlačna čvrstoća cijepanjem nakon 28 dana [MPa]	Slijeganje [mm]
	7 dana	14 dana	28 dana		
1 [#]	35,40	38,58	45,39	3,35	256
2 [#]	33,41	36,88	43,50	3,29	238
3 [#]	30,48	33,16	41,28	3,17	155
4 [#]	28,72	31,62	40,15	3,11	52
5 [#]	29,19	33,61	39,96	3,00	187
6 [#]	28,63	31,74	37,14	2,91	22
7 [#]	32,59	36,52	41,12	3,08	197
8 [#]	30,52	34,82	39,71	2,98	216
9 [#]	28,08	30,36	35,92	2,70	23
10 [#]	28,03	31,08	36,93	2,76	146
11 [#]	29,20	31,73	39,02	3,00	223
12 [#]	30,58	32,21	38,20	3,08	184
13 [#]	26,86	30,11	35,28	2,74	207
14 [#]	28,59	31,97	37,24	2,81	219
15 [#]	25,87	28,11	32,90	2,30	18
16 [#]	26,44	29,01	34,03	2,36	120

U skladu sa Standardom za ispitivanje svojstava obične betonske smjese GB/T 50080-2016 [28] ocijenjena je obradivost svježe pripremljenog betona. Tlačna čvrstoća betona mjerena je nakon 7, 14 i 28 dana, dok je vlačna čvrstoća cijepanjem ispitana nakon 28 dana u skladu sa Standardom za ispitivanje svojstava obične betonske smjese GB/T 50081-2019 [29]. Za svako ispitivanje pripremljena su tri uzorka dimenzija 100 × 100 × 100 mm za mjerenje tlačne i vlačne čvrstoće betona cijepanjem. Aritmetička sredina ispitnih vrijednosti triju uzoraka smatrana je vrijednošću čvrstoće konačnog uzorka. U slučaju da je razlika između najveće ili najmanje izmjerene vrijednosti i srednje vrijednosti prelazila 15 % srednje vrijednosti, najveća i najmanja vrijednost isključene su, a rezultat ispitivanja bila je srednja vrijednost. S obzirom na to da su primijenjeni nestandardni uzorci za ispitivanje,

tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća kocke cijepanjem pomnožene su odgovarajućim faktorima pretvorbe veličine. Faktori za pretvorbu dimenzija iznosili su 0,95 za tlačnu čvrstoću uzoraka i 0,85 za vlačnu čvrstoću cijepanjem. Za proučavanje površine materijala primijenjen je skenirajući elektronski mikroskop (SEM; ZEISS Gemini, Njemačka). Skenirajući mikroskop omogućio je detaljnu analizu i karakterizaciju sučelja betonskih uzoraka i pružio vrijedne uvide u njihova mikrostrukturalna svojstva. Reakcija hidratacije betona sa zgurom istražena je pomoću rendgenskog difraktometra (D8 ADVANCE; Bruker AXS, Njemačka) kako bi se ispitala fizikalne faze produkata hidratacije nakon 7 i 28 dana. Primjena toga naprednog instrumenta omogućila je detaljnu karakterizaciju produkata hidratacije te pružila uvid u kemijske procese koji se događaju unutar betona sa zgurom.

U tablici 6. navedeni su rezultati različitih ispitivanja provedenih na svježe zamiješanim betonskim kockama, uključujući tlačne čvrstoće nakon 7, 14 i 28 dana, vlačnu čvrstoću cijepanjem nakon 28 dana i slijeganje. Ti rezultati pružaju dragocjen uvid u mehanička svojstva uzoraka betona.

3. Rezultati analize

3.1. Analiza radne uspješnosti

Rezultati ispitivanja slijeganja prikazani u tablici 6. upućuju na znatne razlike u obradivosti betona sa zgurom iz ugljena u različitim betonskim smjesama. U smjesama s omjerima zamjene zgurom iz ugljena od 0 % i 33,33 % (1#, 2#, 7#, 8#, 11#, 12#, 13# i 14#) zabilježeno je slijeganje veće od 180 mm, što upućuje na povoljnu obradivost. Suprotno tome, u smjesama s udjelom zamjene zgurom iz ugljena od 66,67 % (3#, 5#, 10# i 16#) zabilježeno je slijeganje u rasponu od 120 do 180 mm, što upućuje na normalnu obradivost. Važno je da je u smjesama u kojima je cement u 100-postotnom omjeru zamijenjen zgurom iz ugljena (4#, 6#, 9# i 15#) zabilježeno slijeganje manje od 60 mm, što upućuje na znatno lošu obradivost.

Smjese 4#, 6#, 9# i 15#, u kojima je primijenjen beton sa zgurom iz ugljena koji je u 100-postotnom omjeru zamijenio cement, imale su rahlu strukturu i slabu vezu između agregata. Tijekom prebacivanja u ispitne kalupe i vibriranja smjese došlo je do odvajanja vode, što upućuje na slabu koheziju. To opažanje može se pripisati visokome kapacitetu apsorpcije vode i prisutnosti mikropora u česticama zgre iz ugljena, koje apsorbiraju znatne količine vode i djeluju kao sredstvo za smanjenje količine vode. Zato cementni materijali nisu apsorbirali dovoljne količine vode i sredstava za smanjenje količine vode, što je uzrokovalo vrlo lošu koheziju betona. Tijekom početnih faza stvrdnjavanja voda apsorbirana u česticama zgre iz ugljena ispušta se u okoliš, što dovodi do smanjenoga kapaciteta zadržavanja vode. Ti rezultati u skladu su s rezultatima ispitivanja koje su proveli Malkit i sur. [30].

Na temelju zabilježene izvedbe betona sa zgurom postupak oblikovanja zahtijeva posebno precizno izvođenje kada se priprema beton u kojemu je krupni agregat u cijelosti zamijenjen zgurom.

3.2. Analiza varijance pomoću ekstrema

Za procjenu osjetljivosti čimbenika na utjecaj pojedinih pokazatelja primijenjena je analiza varijance pomoću ekstrema. Osjetljivosti čimbenika određene su izračunom veličine razlike ekstrema R. Veličina R odražava promjene u ispitnim pokazateljima koje proizlaze iz razlika u razinama čimbenika, pri čemu veći R upućuje na znatniji utjecaj faktora na ispitne pokazatelje. U analizi rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava primijenjen je računalni program SPSS, kao što je to prikazano u tablici 6. R-vrijednosti za ekstremne razlike izračunate su kako bi se procijenio utjecaj svakog čimbenika na eksperimentalne ishode. U tablici 7. sažeti su rezultati analize ekstremnih razlika. Analiza ekstremnih razlika pokazala je da svaki čimbenik različito utječe na tlačnu i vlačnu čvrstoću betona sa zgurom u različitim fazama sušenja.

Nakon sedam dana tlačna čvrstoća betona sa zgurom iz ugljena ponajprije je bila pod utjecajem vodocementnog omjera (A), zatim omjera zamjene zgurom iz ugljena (D), omjera pijeska (C) i omjera zamjene letećim pepelom (B). Do 14. dana vodocementni omjer (A) i dalje je bio najvažniji čimbenik koji utječe na tlačnu čvrstoću, a slijedili su ga udio zgre (D), udio letećeg pepela (B) i udio pijeska (C). Nakon 28 dana i tlačna i vlačna čvrstoća cijepanjem bile su najviše pod utjecajem vodocementnog omjera (A), zatim omjera zamjene zgurom iz ugljena (D), omjera zamjene letećim pepelom (B) i omjera pijeska (C).

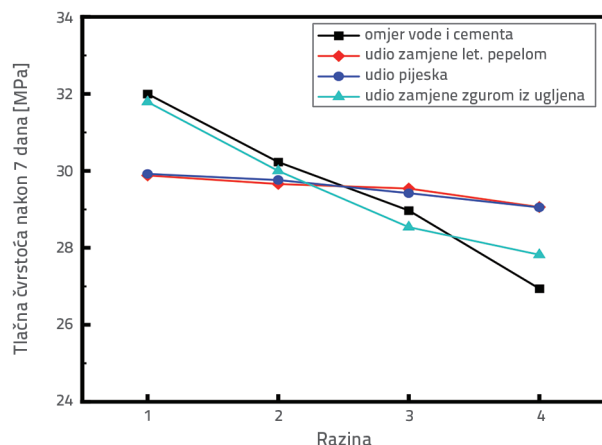
Ti rezultati ističu važnost pravilnog upravljanja vodocementnim omjerom i optimiranja omjera zamjene zgre iz ugljena kako bi se poboljšale karakteristike čvrstoće betona sa zgurom tijekom različitih razdoblja sušenja. Prilagođavanje omjera zamjene letećim pepelom i pijeska također može doprinijeti postizanju željenih svojstava betona sa zgurom.

3.3. Određivanje optimalnog omjera

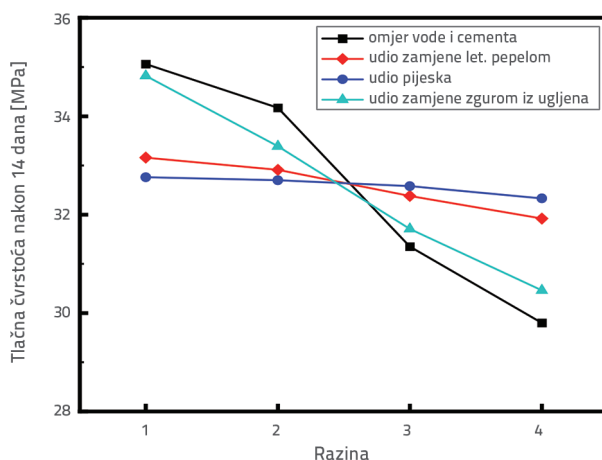
Provedeno je nekoliko analiza kako bi se prikazao učinak različitih razina čimbenika na mehanička svojstva betona sa zgurom iz ugljena. Grafikoni prikazuju odnos između razina čimbenika (horizontalna os) i tlačne čvrstoće nakon 7, 14 i 28 dana te vlačne čvrstoće cijepanjem nakon 28 dana (vertikalna os). Na slikama 5. do 8. prikazani su navedeni odnosi, što omogućuje vizualnu interpretaciju podataka.

Tablica 7. Analiza varijance pomoću ekstrema mehaničkih svojstava betona sa zgurom

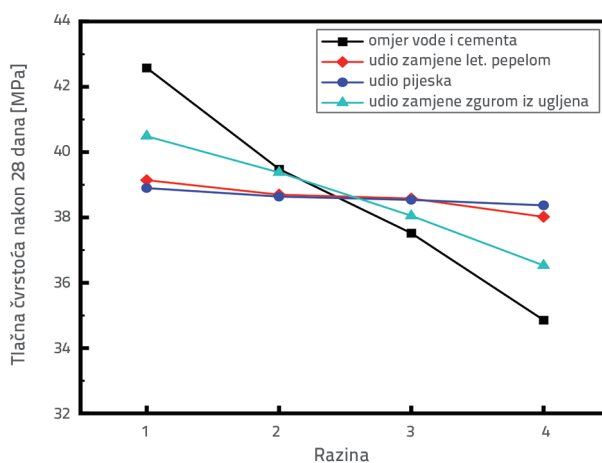
Broj	7-dnevna tlačna čvrstoća [MPa]				14-dnevna tlačna čvrstoća [MPa]				28-dnevna tlačna čvrstoća [MPa]				Vlačna čvrstoća cijepanjem nakon 28 dana [MPa]			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
k1j	32,00	29,88	29,92	31,79	35,06	33,16	32,76	34,82	42,58	39,14	38,90	40,49	3,23	2,94	2,91	3,08
k2j	30,23	29,66	29,76	30,00	34,17	32,91	32,70	33,39	39,48	38,70	38,64	39,38	2,99	2,94	2,92	3,00
k3j	28,97	29,54	29,42	28,54	31,35	32,38	32,58	31,71	37,52	38,58	38,54	38,05	2,88	2,89	2,91	2,82
k4j	26,94	29,06	29,05	27,82	29,80	31,92	32,33	30,46	34,86	38,02	38,37	36,53	2,55	2,88	2,92	2,76
R	5,06	0,82	0,87	3,97	5,26	1,25	0,43	4,36	7,72	1,11	0,53	3,96	0,68	0,06	0,02	0,32
Napomena: k1j predstavlja srednju vrijednost rezultata testova u stupcu j u odnosu na razinu čimbenika 1, a R je ekstremna varijanca.																



Slika 5. Utjecaj različitih čimbenika na tlačnu čvrstoću betona sa zgurom iz ugljena nakon 7 dana



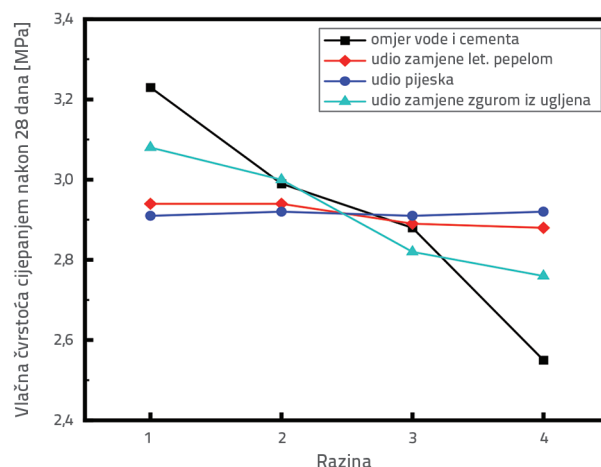
Slika 6. Utjecaj različitih čimbenika na tlačnu čvrstoću betona sa zgurom iz ugljena nakon 14 dana



Slika 7. Utjecaj različitih čimbenika na tlačnu čvrstoću betona sa zgurom iz ugljena nakon 28 dana

Na temelju podataka iz tablice 6. i trendova prikazanih na slikama 5. do 8. tlačna čvrstoća betona sa zgurom nakon 7, 14 i 28 dana i vlačna čvrstoća cijepanjem nakon 28 dana smanjivale

su se s povećanjem vodocementnog omjera i omjera zgure iz ugljena kao zamjene. Utjecaji omjera pijeska i zamjene letećeg pepela na čvrstoću betona bio je relativno malen.



Slika 8. Utjecaj različitih čimbenika na vlačnu čvrstoću cijepanjem betona sa zgurom iz ugljena nakon 28 dana

U ispitivanju primijenjen je relativno visok vodocementni omjer zbog visokog stupnja apsorpcije vode zgure iz ugljena. Kada se doda u betonsku smjesu, zgura iz ugljena apsorbira vodu, a da je ne troši. Tijekom procesa sušenja apsorbirana se voda gubi, čime se stvaraju pore unutar betona. Smanjenje gustoće smjese dovelo je do pada čvrstoće betona sa zgurom s porastom omjera vode i cementa.

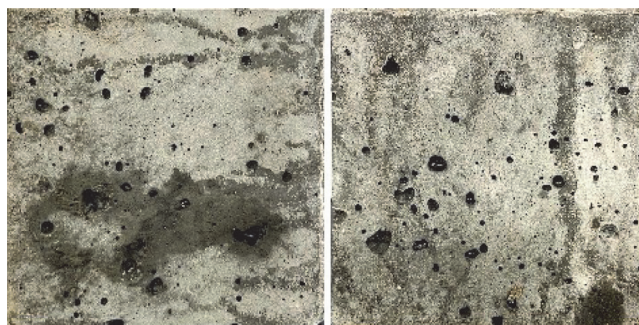
Rahla struktura čestica zgure iz ugljena ugrozila je ukupnu strukturnu čvrstoću betona. S povećanjem udjela zamjene zgurom iz ugljena te su strukturne slabosti postajale sve izraženije, što je dovelo do postupnog smanjenja čvrstoće. Viši omjer zamjene zgurom dodatno pogoršava te nedostatke. Dodavanje nanovlakana u smjesu može ublažiti te probleme povećanjem gustoće matrice, čime se povećavaju i trajnost i održivost betona.

Kako se povećava omjer zamjene zgurom iz ugljena, tako se pogoršavaju i radna svojstva i zbijenost betona. Kao što je to prikazano na slici 9., pri omjeru zamjene od 100 % na bočnim stijenkama oblikovanih uzoraka pojavile su se brojne šupljine. Ti unutarnji nedostaci dodatno su ugrozili čvrstoću betona.

Omjer zamjene letećim pepelom uglavnom utječe na mehanička svojstva betona sa zgurom iz ugljena u kasnijim fazama razvoja čvrstoće. Iako je njegov utjecaj na tlačnu čvrstoću nakon 7 dana bio relativno malen, postao je znatniji 14. i 28. dana. Razlog je vjerojatno pucolanska reakcija letećeg pepela, gdje njegove čestice reagiraju s kalcijevim hidroksidom u betonu stvarajući hidratizirani kalcijev silikat i aluminat, čime se s vremenom povećava čvrstoća [31]. Ti produkti reakcije ispunjavaju praznine između agregata u betonu, povećavajući gustoću betonske strukture i poboljšavajući njezinu čvrstoću u kasnijim fazama. Kao što je to vidljivo na slikama 5. – 8., čvrstoća betona sa zgurom ostaje relativno nepromijenjena pri udjelu letećeg

pepela do 10 % ili manjem. Međutim, kada je udio zamjene premašio 10 %, čvrstoća betona smanjila se. Do tog smanjenja čvrstoće došlo je jer je pri većim udjelima zamjene samo mali dio letećeg pepela sudjelovao u reakciji hidratacije. Preostali leteći pepeo nije pridonio reakciji, što je smanjilo ukupnu aktivnost cementne paste i dovelo do smanjenja čvrstoće [32].

Naposljetku, omjer pijeska imao je najmanji utjecaj na čvrstoću betona, iako je i dalje pridonosio njegovu smanjenju. Kako se povećavao udio pijeska, povećavala se i ukupna površina betonskih agregata. Fiksni udio cementnog materijala doveo je do smanjene veze između agregata, što je smanjilo čvrstoću betona. Međutim, učinak je bio ograničen. U rasponu ispitivanja povećanje udjela pijeska s 37,5 % na 45 % rezultiralo je smanjenjem tlačne čvrstoće za 1,4 %.



Slika 9. Karakteristična bočna stijenka betona sa 100-postotnom zamjenom zgurom

Analiza slika 5. do 8. pokazala je da je razina 1. odabranih čimbenika pokazala najbolje rezultate u različitim ispitnim pokazateljima. Međutim, na toj razini omjeri zamjene letećim pepelom i zgurom iz ugljena iznosili su 0 %, što nije u skladu s ciljem primjene industrijskoga krutog otpada. Zato je potrebna sveobuhvatnija analiza rezultata ispitivanja.

Za vodocementni omjer iznos od 0,45 pokazao je optimalan učinak na pokazatelje ispitivanja. Što se tiče omjera zamjene letećim pepelom, 1. razina isključena je. Na slici 7. 2. i 3. razina imaju zanemariv utjecaj na tlačnu čvrstoću, a na slici 8. 2. razina nadmašuje 3. razinu u vlačnoj čvrstoći cijepanjem. Zato je 2. razina prikladnija za zamjenu letećim pepelom. Omjer pijeska imao je zanemariv utjecaj na rezultate ispitivanja. Međutim, 4. razina, koja je dopuštala veći udio sitnog agregata, pokazala se prikladnijom jer je omogućavala veći udio zguure iz ugljena.

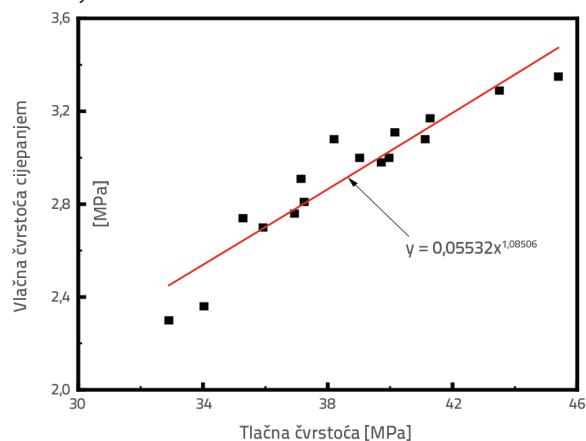
Na temelju prethodne rasprave, iako je 4. razina u početku smatrana prikladnom za udio zamjene zgurom iz ugljena, imala je lošu obradivost. Isključujući 1. i 4. razinu, analiza slike 7. pokazuje da je na 2. razini tlačna čvrstoća iznosila 39,38 MPa, a na 3. razini 38,05 MPa, što pokazuje smanjenje čvrstoće od samo 3,4 %. S obzirom na znatno povećanje omjera zamjene zgurom iz ugljena s 2. razine na 3. razinu, 3. razina smatra se prikladnijom za povećanje iskorištenja zguure.

Ukratko, najprikladniji omjeri za projektiranje betona sa zgurom iz ugljena su sljedeći: vodocementni omjer od 0,45, omjer zamjene letećim pepelom od 10 %, omjer pijeska od 45 % i omjer zamjene

zgurom iz ugljena od 66,67 %. Kod optimalnog omjera sastava betona svježe pripremljeni beton sa zgurom iz ugljena zabilježio je slijeganje od 187 mm, tlačnu čvrstoću od 42,18 MPa te vlačnu čvrstoću cijepanjem od 3,21 MPa nakon 28 dana očvršćivanja. Te vrijednosti zadovoljavaju zahtjev da stupanj čvrstoće betona za armiranobetonske konstrukcijske elemente ne smije biti niži od C25, a kako je to navedeno u Općim specifikacijama za betonske konstrukcije GB55008-2021 [33]. U odnosu na standardni beton, nova formulacija smjese omogućuje smanjenje primjene riječnog pijeska za oko 66,67 %, čime se umanjuje utjecaj na riječni ekosustav. Osim toga time se znatno povećava udio zguure u betonu, čime se poboljšava gospodarska isplativost njezine upotrebe. Međutim, ta mješovita formulacija uzrokuje smanjenje čvrstoće od približno 7,1 %.

3.4. Izraz za izračun tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem

Na temelju rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava iz tablice 6. provedena je regresijska analiza kako bi se istražio odnos između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem betona sa zgurom iz ugljena nakon 28 dana. Tom analizom dobiven je empirijski izraz koji opisuje povezanost između dvaju ključnih parametara čvrstoće. Krivulja prilagodbe koja ilustrira taj odnos prikazana je na slici 10.

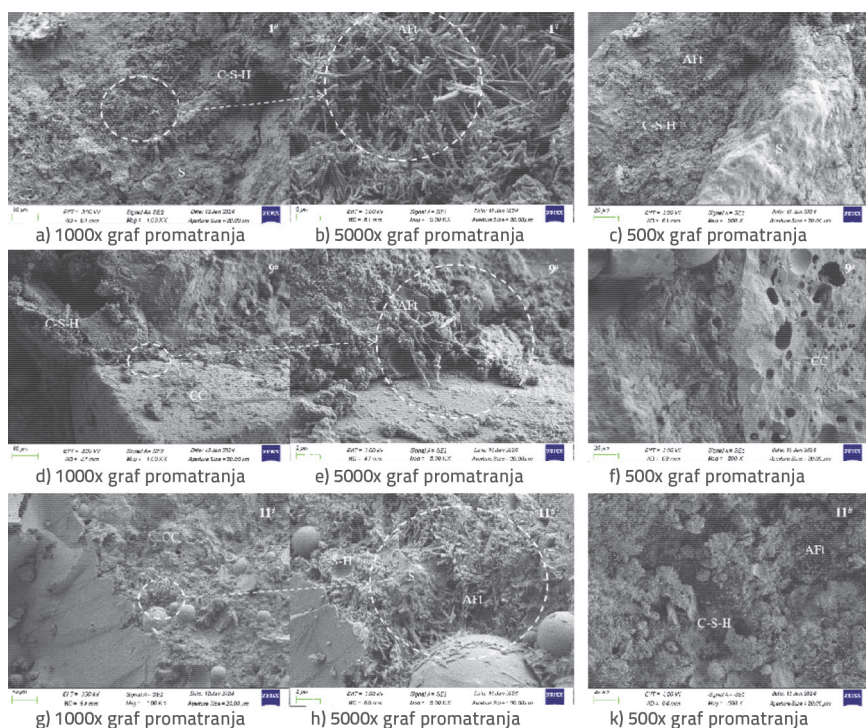


Slika 10. Odnos između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem

3.5. Analiza mikrostrukture skenirajućom elektronskom mikroskopijom

Kako bi se dobio dublji uvid u mehanizme promjene čvrstoće betona sa zgurom iz ugljena, mikrostruktura svake komponente ispitana je skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM). Uzorci iz betonskih smjesa 1#, 9# i 11# odabrani su za analizu. U smjesi 1# primijenjen je riječni pijesak kao sitni agregat, u smjesi 9# primijenjena je zgura iz ugljena kao sitni agregat, a u smjesi 11# primijenjena je mješavina riječnog pijeska (66,67 %) i zguure iz ugljena (33,33 %).

Pratranja pomoću SEM-a provedena su radi ispitivanja mikromorfologija triju skupina uzoraka, s posebnim težištem na međufaznome sučelju osnovne matrice betona sa zgurom



Slika 11. SEM snimka međufaznog sučelja betona sa zgurom iz ugljena (uzorci 1#, 9# i 11#)

iz ugljena. Na slici 11. prikazane su SEM snimke mikrosučelja uzoraka iz betonskih smjesa 1#, 9# i 11# nakon 28 dana sušenja.

SEM analiza uzorka 1# (slike 11.a i 11.b) prikazuje guste formacije igličastoga i štapičastoga kalcita (AFt) i nakupine kalcij-silikat-hidrata (CSH) oko agregata. Ti minerali ispunjavaju praznine između agregata, čime se povećavaju gustoća i čvrstoća betonskih konstrukcija. U uzorku 9# (slike 11.d i 11.e) kalcit je također bio prisutan oko čestica zgre iz ugljena, ali u manjim količinama u usporedbi s onim u uzorku 1#, što rezultira slabijom povezanošću i smanjenom hidratacijom cementa. U uzorku 11# (slike 11.g i 11.h) prisutni su znatni udjeli kalcita i kalcij-silikat-hidrata oko agregata. Sučelje oštećenih čestica zgre (CC) pokazuje nejednoliko raspoređene mikropore. Stupanj hidratacije cementa u uzorku 11# bio je posredan uzorcima 1# i 9#.

Pri povećanju od $500\times$ (slike 11.c, 11.f i 11.k) SEM mikrofotografije uzoraka 1# i 11# pokazali su dobro hidratizirane produkte u odnosu na odabrane skupine uzoraka koji su analizirani. Nasuprot tome, uzorak 9# ima vidljivije mikropore na granici oštećenih čestica zgre iz ugljena. Agregati u uzorku 9# ostali su relativno netaknuti u odnosu na uzorak 1#, što upućuje na to da je do loma betona sa zgurom iz ugljena ponajprije došlo zbog loma i oštećenja čestica zgre iz ugljena. Tijekom stvrdnjavanja betona vlaga oslobođena iz čestica zgre pokrenula je hidratacijsku reakciju s cementnim materijalima na njihovim površinama, što je uzrokovalo stvaranje etringita i kalcijeva silikat-hidrata na površini čestica zgre iz ugljena. Time se povećala čvrstoća čestica zgre u usporedbi s izvornim, neobrađenim česticama

zgre iz ugljena [34]. Međutim, u uvjetima krajnjeg opterećenja čestice zgre iz ugljena najprije su se slomile i uzrokovala oštećenja, što je dovelo do potpunog loma betona.

Mikroskopskom analizom dokazano je da je čvrstoća betona sa zgurom iz ugljena usko povezana sa stupnjem hidratacije i količinom upotrijebljene zgre. Viši stupanj hidratacije rezultirao je gušćom betonskom matricom s manje šupljina, čime se povećavala čvrstoća betona. S druge strane, manji udio zgre smanjio je prisutnost slabih zona unutar betona, što je rezultiralo većom čvrstoćom. To opažanje je u skladu s mehaničkim svojstvima betona. Naprimjer, 1. uzorak s najpotpunijom reakcijom hidratacije zabilježio je najvišu čvrstoću. Nasuprot tome, 11. uzorak pokazao je nešto manje učinkovitu reakciju hidratacije i odgovarajuće smanjenje čvrstoće, dok je 9. uzorak pokazao najmanji stupanj hidratacije i najnižu čvrstoću.

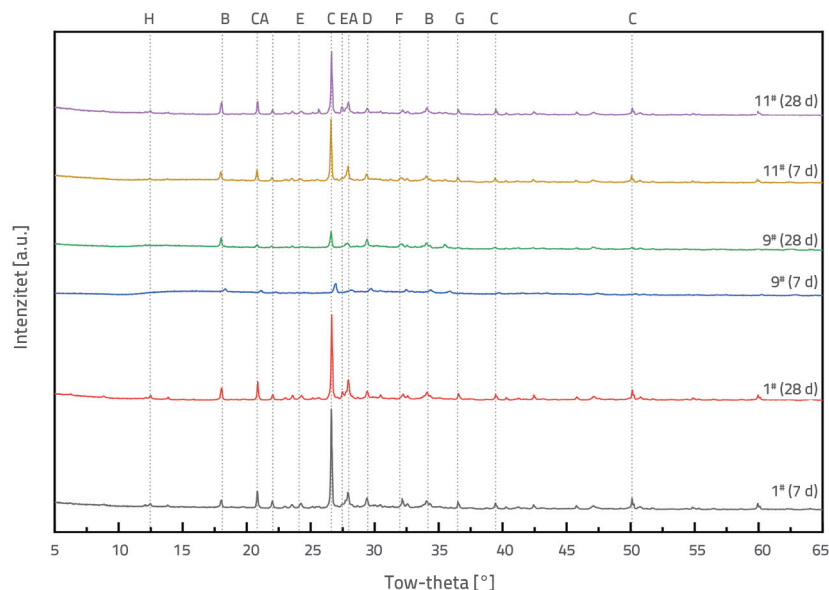
3.6. Analiza produkata rendgenskom difrakcijskom analizom

Na slici 12. prikazani su rezultati ispitivanja rendgenskom difrakcijskom analizom (XRD), koji otkrivaju slične produkte hidratacije u skupinama 1#, 9# i 11# nakon očvršćivanja betona tijekom 7 i 28 dana. Ti su proizvodi pretežito imali udjele kalcita (CaCO_3), kalcijeva hidroksida (Ca(OH)_2), etringita (AFt), kvarca (SiO_2) i kalcijeva silikat-hidrata (CSH). Međutim, razlike u intenzitetu i izgledu difrakcijskih vrhova povezanih sa specifičnim produktima hidratacije bile su uočljive među skupinama.

Usporedba XRD rezultata za uzorak 1# nakon 7 i 28 dana pokazale su male promjene u uzorcima difrakcijskih vrhova za svaku fazu, što upućuje na brze reakcije hidratacije tijekom prvih 7 dana. Do 28. dana vrhovi Ca(OH)_2 postali su izraženiji, vjerojatno zbog trajnih reakcija CaO . Osim toga, pojava difrakcijskih vrhova C-S-H nakon 28 dana upućivala je na znatno formiranje C-S-H u kasnijim fazama.

Nasuprot tome, intenziteti difrakcijskih vrhova za različite faze u uzorku 9# nakon 7 i 28 dana uglavnom su bili niži nego u uzorcima 1# i 11#, što upućuje na manje izražene produkte hidratacije. To odgovara nižoj čvrstoći uočenoj u uzorku betona 9# tijekom ispitivanja čvrstoće uzoraka betona.

U uzorku 11# difrakcijski vrhovi svake faze pokazali su trend sličan onome koji ima uzorak 1# i nakon 7 i nakon 28 dana. Međutim, intenziteti tih difrakcijskih vrhova bili su niži u odnosu na one u uzorku 1#. Izraženiji difrakcijski vrhovi u 1. uzorku upućuju na bolju reakciju hidratacije, što je u skladu s rezultatima SEM-a. Ti



Slika 12. XRD produkata hidratacije betona sa zgurom (uzorci 1*, 9* i 11*) (A: Aft; B: $\text{Ca}(\text{OH})_2$; C: SiO_2 ; D: CaCO_3 ; E: C-S-H; F: CASH; G: CaSiO_3 ; H: NaAlSiO_4)

kombinirani rezultati SEM i XRD analize snažno podupiru uočene trendove u mehaničkim svojstvima betona sa zgurom. Važno je da su u svim uzorcima zabilježeni izraženi difrakcijski vrhovi SiO_2 , što je uglavnom posljedica prisutnosti letećeg pepela, pri čemu nehidratizirani leteći pepeo doprinosi formiranju kvarcne faze. SEM slike dodatno pokazuju da dio neaktiviranoga letećeg pepela djeluje kao punilo dodano u unutarnje mikropukotine i razne pore u betonu, čime se povećava gustoća njegove unutarnje strukture.

Prisutnost difrakcijskih vrhova CaCO_3 u svim XRD rezultatima pripisuje se pretvorbi slobodnih kalcijevih iona u $\text{Ca}(\text{OH})_2$ u alkalnome okruženju tijekom očvršćivanja. Osim toga, alkalni proces stvrdnjavanja olakšava stvaranje CaCO_3 faze [35–37].

4. Rasprava o gospodarskim i društvenim koristima

Prema sveobuhvatnim podacima o cijenama građevinskih projekata u Shiheziju od travnja 2024. [38], cijena srednje veličine pijeska iznosila je 13,68 američkih dolara po kubnome metru. Cijena zgure iz termoelektrane Shihezi South iznosila je 3,53 američka dolara po toni, a cijena jednostavnog drobljenja i prosijavanja zgure iznosila je 2,54 američka dolara po toni.

Pri optimalnome udjelu zamjene zgurom iz ugljena od 66,67 % količina pijeska po kubnome metru betona iznosila je 280 kg, a količina zgure 560 kg. U usporedbi sa standardnim komercijalnim betonom C30, čija je cijena 47,24 američka dolara po kubnom metru, trošak betona sa zgurom iz ugljena smanjen je za približno 1,71 američki dolar po kubnome metru, što odražava smanjenje troškova od približno 3,62 %.

Primjena zgure iz ugljena u građevinarstvu održiva je praksa koja može znatno smanjiti potražnju za riječnim pijeskom, čime se štite vodeni ekosustavi i stabiliziraju riječna korita. Također, primjenom se upotrebljava znatna količina zgure, čime se povećava njezina ekonomska vrijednost, smanjuje onečišćenje tla i zraka te se otpad učinkovito pretvara u vrijedan resurs.

5. Zaključak

Ovo istraživanje usmjereno je na proizvodnju betona sa zgurom iz ugljena primjenom zgure iz elektrana na ugljen, letećeg pepela, cementa, pijeska i kamena. Mehanička svojstva pripremljenih betona procijenjena su na temelju 16 ortogonalnih ispitivanja na uzorcima kocaka. Na temelju provedenih analiza ključni rezultati mogu se sažeti kako slijedi:

- Analiza varijance pomoću ekstreme otkrila je da su tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem betona sa zgurom nakon 28 dana ponajprije ovisila o vodocementnome omjeru (A), a u manjoj mjeri o omjeru zamjene zgurom iz ugljena (D), zamjene letećim pepelom (B) i udjelu pijeska (C). Povećanjem vodocementnog omjera te udjela zamjene zgurom iz ugljena dolazi do postupnog smanjenja tlačne i vlačne čvrstoće.
- XRD i SEM analize pokazale su da su primarni produkti hidratacije u betonu sa zgurom iz ugljena bili Aft, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, SiO_2 , CaCO_3 , C-S-H, C-S-H, CaSiO_3 i NaAlSiO_4 . Tijekom procesa očvršćivanja produkti hidratacije postupno su ispunjavali pore unutar čestica zgure, što je rezultiralo gušćom mikrostrukturom i većom čvrstoćom betona. Međutim, dodavanje čestica zgure iz ugljena uzrokovalo je slabljenje betonske matrice. Uslijed naprezanja pukotine su se u početku razvijale oko čestica zgure i širile se prema van, što je rezultiralo smanjenjem čvrstoće betona s povećanim udjelom zgure iz ugljena.
- Optimalna smjesa uključivala je vodocementni omjer od 0,45, udio letećeg pepela od 10 %, udio pijeska od 45 % te udio zgure iz ugljena od 66,67 %. Taj projektirani sastav rezultirao je betonom izvrsnih svojstava, sa slijeganjem od 187 mm, tlačnom čvrstoćom od 42,18 MPa i vlačnom čvrstoćom cijepanjem od 3,21 MPa. Dobiveni rezultati zadovoljavaju zahtjeve čvrstoće razreda C30, što omogućuje njegovu primjenu u nosivim građevinskim konstrukcijama. Osim toga, trošak betona po kubnome metru smanjen je za oko 3,62 % u odnosu na standardni beton, čime se povećava gospodarska isplativost zgure iz ugljena i istodobno smanjuje eksploatacija riječnog pijeska i podupire zaštita okoliša.

- Ovo istraživanje usmjereno je isključivo na ispitivanje tlačne i vlačne čvrstoću betona sa zgurom, što nije dovoljno za širu primjenu. Buduća istraživanja trebala bi obuhvatiti detaljnu analizu ponašanja tijekom naprezanja i deformacije te trajnosti betona sa zgurom u uvjetima opterećenja. Izrada temeljnog modela i teorije disipacije energije za beton sa zgurom može poslužiti kao temelj za unapređenje seizmičke teorije i njezine primjene u armiranome betonu sa zgurom.

Zahvala

Ovo istraživanje financirali su Istraživački projekt Normalnog sveučilišta Yili (2022YSYY002), Projekt znanosti i tehnologije prefekture Yili (YZ2022YD008) te Projekt znanstvenog i tehničkog plana Osme divizije (2024GY03).

LITERATURA

- [1] Institute CEPPE, China Energy Development Report 2023, People's Daily Press, Beijing, 2024
- [2] Zhang, M., Lv, T., Deng, X., Dai, Y., Sajid, M.: Diffusion of China's coal-fired power generation technologies: historical evolution and development trends, *Natural Hazards*, 95 (2018), 1-2, 7-23, <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3524-4>
- [3] Jayaranjan, M.L.D., van Hullebusch, E.D., Annachhatre, A.P.: Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13 (2014), 467-486, <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9336-4>
- [4] Mohammed, S.A., Koting, S., Katman, H.Y.B., Babalghaith, A.M., Abdul Patah, M.F., Ibrahim, M.R., Karim, M.R.: A review of the utilisation of coal bottom ash (CBA) in the Construction Industry, *Sustainability*, 13 (2021), <https://doi.org/10.3390/su13148031>
- [5] Andreev, V., Bryukhan, F.: Some Prospects for the use of ash and slag wastes of coal power plants for production of building materials, *MATEC Web of Conferences*, 86 (2016), <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168604004>
- [6] Ashish, D.K., Verma, S.K., Singh, J., Sharma, N.: Strength and durability characteristics of bricks made using coal bottom and coal fly ash, *Advances in Concrete Construction*, 6 (2018), 407422, <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.407>
- [7] Siddique, R.: Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials, *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (2010), 1060-1066, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.011>
- [8] Skoko, B., Babić, D., Marović, G., Papić, S.: Environmental radiological risk assessment of a coal ash and slag disposal site with the use of the ERICA Tool, *Journal of Environmental Radioactivity*, 208-209 (2019), 106018, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106018>
- [9] Saha, D., Chatterjee, D., Chakravarty, S., Roychowdhury, T.: Investigation of environmental-concern trace elements in coal and their combustion residues from thermal power plants in Eastern India, *Natural Resources Research*, 28 (2019), 1505-1520, <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09451-2>
- [10] Stojanović, M., Radonjanin, V., Malešev, M., Milović, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilisations containing recycled and waste materials, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021), 791-804, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>
- [11] Memiş, S., Ramroom, A.A.: Investigation of the use of waste mineral additives in ultra-high-performance concrete, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 75 (2023) 06, 539-553, <https://doi.org/10.14256/JCE.3305.2021>
- [12] Argiz, C., Menéndez, E., Moragues, A., Sanjuán, M.Á.: Recent advances in coal bottom ash use as a new common Portland cement constituent, *Structural Engineering International*, 24 (2014), 503-508, <https://doi.org/10.2749/101686613X13768348400518>
- [13] Orna Carmona, M., González Paules, J., Sánchez Catalán, J.C., Fernández Pousa, L., Ade Beltrán, R., Quero Sanz, F.: Recycling power plant slag for use as aggregate in precast concrete components, *Materiales de Construcción*, 60 (2010), 99-113, <https://doi.org/10.3989/mc.2010.52109>
- [14] Singh, M., Siddique, R.: Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 50 (2014), 246-256, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.026>
- [15] Verapathran, M., Palanisamy, M.: High performance concrete with steel slag aggregate, *Gradevinar*, 66 (2014) 7, 605-612, 10.14256/JCE.1052.2014
- [16] Horiguchi, I., Shirai, A., Watanabe, M., Sugihara, S.: Fundamental study on concrete with coal gasification slag, *Cement Science and Concrete Technology*, 66 (2012), 615-621, <https://doi.org/10.14250/cement.66.615>
- [17] Rui, Z., Tao, Z.: Experimental research on compressive strength of waste incineration bottom ash concrete, *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 29 (2010) 02, 352-356 + 360, 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2010.02.044
- [18] Geçkil, T., Tanyıldızı, M.M., İnce, C.B.: Benefit-cost relationship of using concrete with blast furnace slag as road pavement, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 75 (2023), 23-37, <https://doi.org/10.14256/JCE.3570.2022>
- [19] Murko, V., Khyamyalyainen, V., Baranova, M.: Use of ash-and-slag wastes after burning of fine-dispersed coal-washing wastes, *E3S Web of Conferences*, 41 (2018), 10.1051/e3sconf/20184101042
- [20] Guo, Z., Liu, W., Wang, C., He, C., Zhang, F.: Fractal characteristics of mesostructure and optimisation of axial compression constitutive model of coal-fired slag concrete, *Materials Today Communications*, 28 (2021), 102686, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102686>
- [21] Poudel, S., Menda, S., Useldinger-Hoefs, J., Guteta, L.E., Dockter, B., Gedafa, D.S.: The use of ground coal bottom ash/slag as a cement replacement for sustainable concrete infrastructure, *Materials*, 17 (2024), 2316, 10.3390/ma17102316
- [22] Jianpeng, Z., Gang, L., Yuwei, M., Hua, T., Haifeng, X., Fangfang, Y., Pengfei, S., Yangmei, Z.: Experimental study on the performance of the self-compacting slag concrete, *New Building Materials*, 44 (2017) 1010-0043-03, 43-45 + 76, 1001-1702X

- [23] Liu, W., Niu, S.: Energy evolution properties and strength failure criterion of coal-fired slag concrete based on energy dissipation, *Case Studies in Construction Materials*, 17 (2022), e01369, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01369>
- [24] Weizhen, L., Zhongping, G., Weisheng, H., Shuhong, H., Wenbo, H.: Experimental study on the ratio and strength characteristics of coal-fired slag concrete, *Mining Research and Development*, 40 (2020) 05, 56-59, 10.13827/j.cnki.kyyk.2020.05.011
- [25] Liu, W., Guo, Z., Niu, S., Hou, J., Zhang, F., He, C.: Mechanical properties and damage evolution behaviour of coal-fired slag concrete under uniaxial compression based on acoustic emission monitoring technology, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (2020), 9537-9549, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.071>
- [26] Common Portland Cement, 2007, GB175-2007
- [27] Specification for mix proportion design of ordinary concrete, 2011, JGJ 55-2011
- [28] Standard for test methods for properties of ordinary concrete mixes, 2016, GB/T 50080-2016
- [29] Standard of test methods for physical and mechanical properties of concrete, 2019, GB/T 50081-2019
- [30] Singh, M., Siddique, R.: Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), 620-630, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.001>
- [31] Juntao, H., Xiangdong, S.: Experimental study on early mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete with external mixing fly ash, *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 31 (2012) 04, 847-851, 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2012.04.011
- [32] Kou, S.C., Poon, C.S., Chan, D.: Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (2007), 709-717, 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(709)
- [33] General code for concrete structures, 2021, GB 55008-2021
- [34] Licheng, W., Lei, Z.: Research progress on concrete internal curing technology *journal of building materials*, 23 (2020) 06, 1471-1478, 10.3969/j.issn.10079629.2020.06028
- [35] Ma, X., He, T., Xu, Y., Yang, R., Sun, Y.: Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix, *Case Studies in Construction Materials*, 16 (2022), e00989, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00989>
- [36] Chanda, S.S., Patel, S.K., Nayak, A.N., Mohanty, C.R.: Performance evaluation on bond, durability, micro-structure, cost effectiveness and environmental impacts of fly ash cenosphere based structural lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 397 (2023), 132429, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132429>
- [37] Raju, S., Dharmar, B.: Durability characteristics of copper slag concrete with fly ash, *Građevinar*, 69 11 (2017), 1031-1040, 10.14256/jce.1229.2015
- [38] Compilation Explanation of Comprehensive Price Information for Construction Projects in Shihezi Area in April 2024 <http://www.shz.gov.cn/govxxgk/014/2024-05-17/c3f7f9d9-1c3e-431a-8842-2c31f4d284c3.html>, 17.05.2024