

Primljen / Received: 27.6.2025.

Ispravljen / Corrected: 18.11.2025.

Prihvaćen / Accepted: 22.1.2026.

Dostupno online / Available online: 10.3.2026.

Karakteristike hidratacije cementnih pasta s miješanim cementima: istraživanje pomoću Taguchijeve analize

Autori:



Doc.dr.sc. **Shanmugapriya Jayaraman**, dipl.ing.građ.
Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala Institut
za istraživanje i razvoj u području znanosti i
tehnologije, Chennai, Indija
priyasudhakar06@gmail.com
Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Krishna Kumar Palaniappan**, dipl.ing.građ.
Fakultet inženjerstva i tehnologije SRM Madurai,
Sivaganga, Indija
Odjel za građevinarstvo
krishnakumarpalaniappan1991@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Kandasamy Asohan**, dipl.ing.građ.
Medicinski i tehnički institut Saveetha, Indija
Odjel za građevinarstvo
kandasamy.sse@saveetha.com



Prof.dr.sc. **Geetha Selvakumar**, dipl.ing.građ.
Tehnički fakultet Rajalakshmi, Indija
Odjel za građevinarstvo
geetha.s@rajalakshmi.edu.in

Prethodno priopćenje

Shanmugapriya Jayaraman, Krishna Kumar Palaniappan, Kandasamy Asohan, Geetha Selvakumar

Karakteristike hidratacije cementnih pasta s miješanim cementima: istraživanje pomoću Taguchijeve analize

Sustavi miješanih cementnih pasta pokazuju znatnu složenost zbog raznovoljnih fizikalnih morfologija i kemijskih struktura njihovih sastavnih sirovina. Unatoč toj složenosti, sve su cjenjeniji zbog poboljšanih dugoročnih svojstava i doprinosa održivosti. Ovo istraživanje ispituje hidratacijska svojstva ternarnih miješanih cementnih pasta primjenom Taguchijeve analize, robusnoga statističkog alata za proučavanje višefaktorskih interakcija u materijalnim sustavima. Sustavnom procjenom utjecaja dodatnih cementnih materijala, omjera vode i veziva, doze superplastifikatora i uvjeta njege studija nastoji optimirati svojstva cementne paste. Primjenom dizajna ortogonalnih nizova Taguchijeve metode analiziran je utjecaj navedenih parametara na kemijsko skupljanje, kinetiku hidratacije i pucolansku aktivnost. Statistički rezultati ističu relativnu važnost svakog faktora u upravljanju mehanizmima hidratacije te pružaju vrijedne spoznaje za razvoj naprednih cementnih materijala usmjerenih na visoka svojstva.

Ključne riječi:

Taguchijeva analiza, miješana cementna pasta, kemijsko skupljanje, pucolanska aktivnost, kinetika hidratacije

Research Paper

Shanmugapriya Jayaraman, Krishna Kumar Palaniappan, Kandasamy Asohan, Geetha Selvakumar

Hydration characteristics of ternary blended cement pastes: A study employing Taguchi analysis

Blended cement paste systems are considerably complex owing to the diverse physical morphologies and chemical compositions of the constituent raw materials. Despite this complexity, these systems are increasingly recognised for their enhanced long-term performance and contribution to sustainability. This study examines the hydration characteristics of ternary blended cement pastes employing Taguchi Analysis, a robust statistical tool for investigating multifactorial interactions in material systems. This study systematically evaluates the effects of supplementary cementitious materials, water-to-binder ratio, superplasticiser dosage, and curing conditions to optimise cement paste performance. An orthogonal array design based on the Taguchi method was employed to quantify the influence of these parameters on the chemical shrinkage, hydration kinetics, and pozzolanic activity. Statistical analyses highlight the relative significance of each factor in governing the hydration mechanisms, thereby providing valuable insights for the development of advanced performance-driven cementitious materials.

Key words:

Taguchi analysis, blended cement paste, chemical shrinkage, pozzolanic activity, hydration kinetics

1. Uvod

Optimiranje ternarnih miješanih cementnih sustava složeni je izazov [1] u tehnologiji betona zbog brojnih međusobno povezanih čimbenika koji utječu na njihovu hidratacijsko ponašanje. Razumijevanje i kontrola tih interakcija ključni su za razvoj održivih cementnih materijala visokih svojstava. Na svojstva tih miješanih sustava, osobito u pogledu hidratacijskog ponašanja, znatno utječu različiti parametri sastava mješavine i uvjeti njege [2]. Međutim, tradicionalni eksperimentalni pristupi koji ispituju jedan faktor zahtijevaju mnogo vremena i resursa te često ne uspijevaju obuhvatiti složene međuodnose između pojedinih varijabli [3, 4].

Taguchijeva metoda pojavljuje se kao snažan statistički alat za optimiranje takvih višparametarskih sustava putem sustavnoga i učinkovitoga eksperimentalnog dizajna [5]. Ta je metoda osobito vrijedna pri proučavanju složenih sustava u kojima više čimbenika istodobno utječe na ukupna svojstva [6-8]. Prednost je Taguchijeve analize [9, 10] u njezinoj sposobnosti da odredi relativnu važnost svakog faktora i identificira optimalne kombinacije uz minimalan broj eksperimentalnih ispitivanja. U Taguchijevoj analizi primjenjuju se izrazi omjera signala i šuma (S/N) kroz sustavni postupak optimiranja robusnosti procesa [11]. Najprije se odabire odgovarajući S/N izraz prema ispitivanome obilježju kvalitete:

- **"veće je bolje"** (S/N) $L = -10 \times \log_{10}(1/y^2/n)$ primjenjuje se za maksimiranje odgovora poput čvrstoće
- **"manje je bolje"** (S/N) $S = -10 \times \log_{10}(y^2/n)$ primjenjuje se pri minimiziranju odgovora poput defekata
- **"nominalno je najbolje"** ($10 \log_{10}(\bar{y}^2/s^2)$) primjenjuje se kada se cilja određena vrijednost.

Nakon planiranih eksperimenata omjer S/N izračunava se za svaku eksperimentalnu probu odabranim izrazom. Zatim se izračunava prosječni omjer S/N za svaku razinu faktora te se optimalne postavke određuju odabirom razina s najvećim omjerima S/N [12]. Primjenom ortogonalnih nizova i omjera S/N Taguchijev pristup omogućuje kvantificiranje utjecaja svake varijable na proces hidratacije uz istodobno poštovanje eksperimentalne varijabilnosti. Ta sustavna metodologija ne samo da pomaže u razumijevanju pojedinačnih i kombiniranih učinaka različitih parametara, nego i omogućuje razvoj održivijih i učinkovitijih cementnih mješavina optimiranjem njihova sastava i zahtjeva za njom.

U ovome istraživanju procijenjena su svojstva ternarnih miješanih cementnih pasta u pogledu kemijskog skupljanja, indeksa pucolanske aktivnosti i stupnja hidratacije. Kontrolirani čimbenici uključivali su stupanj zamjene cementa, potrebu za vodom i dozu superplastifikatora. Kao dodatni cementni materijali odabrani su leteći pepeo i mljevena granulirana zgura visoke peći. Ugradnja mljevene granulirane zgure visoke peći (GGBS) i letećeg pepela u miješane cementne sustave donosi višestruke sinergijske prednosti koje znatno poboljšavaju svojstva betona, uz istodobno

rješavanje pitanja održivosti. Djelomična zamjena običnoga portlandskog cementa (OPC) tim dodatnim cementnim materijalima znatno smanjuje ugljični otisak proizvodnje betona korištenjem industrijskih nusproizvoda koji bi inače završili na odlagalištima, uz istodobno smanjenje energetske intenzivnog udjela klinkera [13].

S gledišta svojstava, ternarne mješavine pokazuju jasna poboljšanja u odnosu na obični cement. Primjena letećeg pepela i GGBS-a povećava obradivost jer glatke i zaobljene čestice letećeg pepela olakšavaju tečenje smjese. Te mješavine također razvijaju manju toplinu hidratacije, čime se smanjuje mogućnost pojave pukotina u masivnim betonskim konstrukcijama. Tijekom vremena pucolanska reakcija letećeg pepela i cementolika aktivnost GGBS-a doprinose stvaranju gušće i čvršće mikrostrukture, što rezultira većom dugoročnom čvrstoćom. Osim toga mješavine pokazuju veću trajnost, s manjom propusnošću, većom otpornošću na kemijske utjecaje poput sulfata i klorida te smanjenim rizikom od alkalno-silikatne reakcije. Sveukupno, ti miješani sustavi omogućuju beton koji je lakši za ugradnju, trajniji i dugotrajniji [14, 15]. Ne smiju se zanemariti ni ekonomske prednosti, jer su ti industrijski nusproizvodi u pravilu jeftiniji od OPC-a, a istodobno produljuju vijek trajanja betona zahvaljujući poboljšanoj trajnosti, čime se snažno opravdava njihova primjena u suvremenim održivim građevinskim praksama u kojima se, uz početne troškove, vrednuju i svojstva tijekom cijeloga životnog vijeka konstrukcije [16].

2. Odabir kontrolnih čimbenika i njihovih razina

2.1. Razina zamjene cementa

Razina zamjene cementa smatra se ključnim čimbenikom jer izravno utječe na temeljnu kemiju i razvoj mikrostrukture cementnog sustava. Kada se cement djelomično zamijeni dodatnim cementnim materijalima (eng. *supplementary cementitious materials* - SCM) u ternarnim mješavinama [17], tada dolazi do promjena u nekoliko važnih mehanizama. Razina zamjene cementa utječe na kemijsko skupljanje, ponajprije kroz dva mehanizma. Prvo, djelomičnom zamjenom cementa smanjuje se volumen primarnog C-S-H gela nastalog hidratacijom cementa, jer je dostupno manje cementa za neposrednu reakciju. Drugo, SCM-ovi uvode sekundarne reakcije koje proizvode dodatni C-S-H gel pucolanskom reakcijom, ali različitim brzinom i u drugačijemu volumenu u usporedbi s hidratacijom čistog cementa. Time se stvara složen odnos u kojemu veće razine zamjene u početku mogu smanjiti kemijsko skupljanje zbog učinka razrjeđenja, dok ga kasnije mogu povećati uslijed pojačane pucolanske aktivnosti [18].

Taj čimbenik također određuje potencijal za pucolanske reakcije u sustavu. Veći udio reaktivnih SCM-ova osigurava više silicijskih i aluminijskih komponenti koje mogu reagirati s kalcijevim hidroksidom (CH) nastalim hidratacijom cementa [19-21]. Međutim, postoji optimalna razina zamjene iznad

koje pucolanska aktivnost može biti ograničena nedostatnom količinom CH-a zbog smanjenog udjela cementa. Ta je ravnoteža ključna jer previsoka razina zamjene može rezultirati time da neizreagirani SCM-ovi djeluju samo kao punila, dok preniska razina ne omogućuje potpuno iskorištavanje pucolanskog potencijala.

Razina zamjene cementa utječe na stupanj hidratacije kroz više mehanizama. Ona mijenja omjer vode i cementa u učinkovitoj pasti, jer SCM-ovi obično imaju drugačije zahtjeve za vodom u odnosu na cement. Također mijenja ionsku koncentraciju u pornoj otopini, što utječe na brzinu otapanja i taloženja te može promijeniti obrazac razvoja topline, što posljedično utječe na kinetiku hidratacije. U ovome istraživanju razmatrane su tri razine zamjene cementa, od 30, 50 i 70 %, pri čemu su sve mješavine imale udjele letećeg pepela i GGBS-a u različitim omjerima.

2.2. Potreba za vodom

Potreba za vodom ključan je čimbenik u ternarnim miješanim cementnim sustavima jer ona izravno utječe na količinu vode dostupne za hidrataciju cementa i pucolanske reakcije [22]. Količina raspoložive vode utječe na stupanj kemijskog vezivanja, što je izravno povezano s veličinom skupljanja. Veći udio vode može dovesti do povećanoga kemijskog skupljanja zbog potpunije hidratacije, ali također može uzrokovati stvaranje većih kapilarnih pora. S druge strane, nedostatan udio vode može ograničiti opseg kemijskih reakcija, smanjujući ukupno skupljanje.

Voda također djeluje kao transportni medij za otopljene ione, osobito kalcijeve i silikatne ione. Ona osigurava neophodan medij za otapanje CH-a i stvaranje sekundarnog C-S-H gela. Raspoloživa količina vode utječe na pokretljivost reaktivnih vrsta i kinetiku pucolanskih reakcija. Optimalan udio vode omogućuje kontinuiranu pucolansku aktivnost bez pretjeranog razrjeđenja porne otopine [23].

U ovome istraživanju optimalna potreba za vodom svake mješavine cementne paste određena je Puntke testom, a kao razine kontrolnog čimbenika potrebe za vodom korišteni su višci od 5, 10 i 15 %. Optimalna potreba za vodom dobivena Puntke testom [24] osigurava da su zadovoljeni osnovni zahtjevi za pakiranje čestica. Višak od 5 % donja je granica pri kojoj udio vode može biti ograničavajući, ali još uvijek omogućuje osnovnu hidrataciju, dok je višak od 15 % gornja granica koja osigurava dovoljnu količinu vode za potpunu hidrataciju uz izbjegavanje pretjeranog razrjeđenja.

Svježi uzorci cementne paste pripremani su postupnim dodavanjem destilirane vode u 300 g cementnog praha, uz kontinuirano miješanje radi postizanja ujednačene konzistencije. Male količine vode dodavane su pipetom, nakon čega su se uzorci temeljito ručno miješali približno dvije minute nakon svakog dodavanja. Pasta je zatim lagano zbijana blagim tapkanjem posude. Postupak se nastavljao dok cementna pasta nije postigla kritično stanje koje se očitovalo sjajnim izgledom

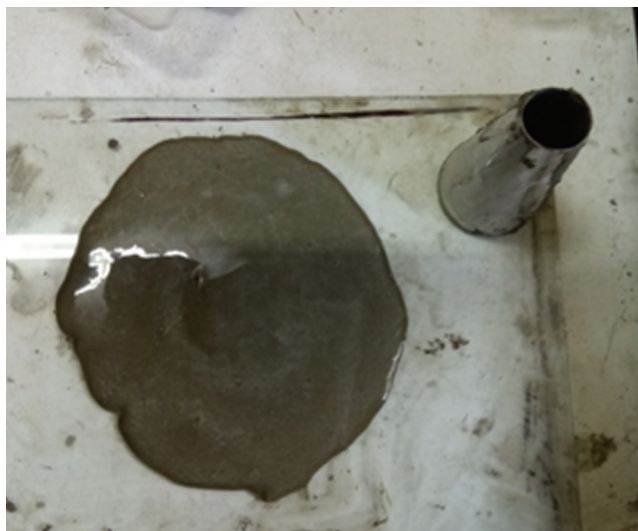
i glatkom površinom bez izdvajanja vode, što je upućivalo na optimalan udio vode. U tom je stanju pasta pokazivala kohezivno ponašanje, bez segregacije pri naginjanju. Potreba za vodom izračunana je kao omjer ukupne mase vode i mase veziva, izražen u postocima. Provedena su tri ponovljena ispitivanja radi osiguranja ponovljivosti, a kao konačna vrijednost uzeta je ona srednja. Utvrđeno je da optimalna potreba za vodom za čistu cementnu pastu (OPC) iznosi 27,5 %. Za ternarne mješavine optimalne potrebe za vodom određene Puntke testom iznosile su 28,5 % za 30 % zamjene (10 % FA + 20 % GGBS), 28,9 % za 50 % zamjene (20 % FA + 30 % GGBS) te 29,3 % za 70 % zamjene (30 % FA + 40 % GGBS). Te su vrijednosti korištene kao osnovna vrijednost W_0 za svaku odgovarajuću mješavinu radi definiranja eksperimentalnih razina u istraživanju, označenih kao $W_0 + 5 \%$, $W_0 + 10 \%$ i $W_0 + 15 \%$.

2.3. Doziranje superplastifikatora

Optimiranje doziranja superplastifikatora ključno je jer preniski udio ne osigurava dovoljnu disperziju, što dovodi do aglomeracije čestica i smanjene učinkovitosti reakcija, dok prevelik udio može uzrokovati znatno usporavanje hidratacije i moguću segregaciju. Učinkovitost superplastifikatora snažno je povezana s udjelom vode i specifičnim površinskim svojstvima korištenih SCM-ova.

U ovom je istraživanju za određivanje optimalne doze superplastifikatora za sve ispitivane mješavine korišten je test minisljeganja (engl. *mini-slump test*) [25, 26], pri čemu je za razine kontrolnog čimbenika razmatran raspon s gornjom i donjom granicom. Optimiranje doziranja provedeno je metodom mjerenja minisljeganja (engl. *mini-slump*) radi procjene svojstava tečenja cementne paste. U početku su pripremljeni uzorci paste s konstantnim omjerom vode i veziva, određenim Puntke testom, dok je doza superplastifikatora varirana od 0,1 do 2,0 % mase cementa u koracima od 0,1 %. Pasta je miješana tri minute miješalicom kako bi se osigurala ujednačena disperzija superplastifikatora.

Kalup u obliku krnjeg stošca, s promjerom baze 60 mm, visinom 70 mm i promjerom vrha 40 mm, postavljen je na čistu staklenu ploču i ispunjen svježom cementnom pastom. Nakon punjenja kalup je pažljivo podignut okomito, omogućujući pasti slobodno razlijevanje pod vlastitom težinom. Promjer razlijevanja mjeren je u dva međusobno okomita smjera nakon što je pasta dosegla konačni položaj, obično unutar dvije-tri minute. Vrijednosti razlijevanja ucrtane su u odnosu na odgovarajuće doze superplastifikatora kako bi se dobila krivulja tečenja. Optimalna doza identificirana je kao točka nakon koje nije zabilježen znatan porast promjera razlijevanja, tzv. točka zasićenja, koja označava maksimalnu učinkovitost superplastifikatora bez pojave segregacije ili izdvajanja vode. Utvrđeno je da se optimalan udio superplastifikatora za sve mješavine nalazi u rasponu od 0,6 % do 1,0 % mase veziva. Na slici 1. prikazan je test minisljeganja za određivanje optimalnog udjela superplastifikatora.



Slika 1. Test minislijeganja za određivanje optimalnog udjela superplastifikatora

2.4. Uvjeti njege

Uvjeti njege smatraju se ključnim čimbenikom jer izravno kontroliraju dostupnost vlage i temperature za hidratacijske reakcije, osobito utječući na dugoročna svojstva. Velike varijacije u temperaturi i relativnoj vlažnosti mogu dovesti do nepravilnih obrazaca skupljanja, rizika od nepotpunih pucolanskih reakcija zbog gubitka vlage i sličnih pojava [27, 28]. Ipak, ujedno predstavljaju realne uvjete na gradilištu.

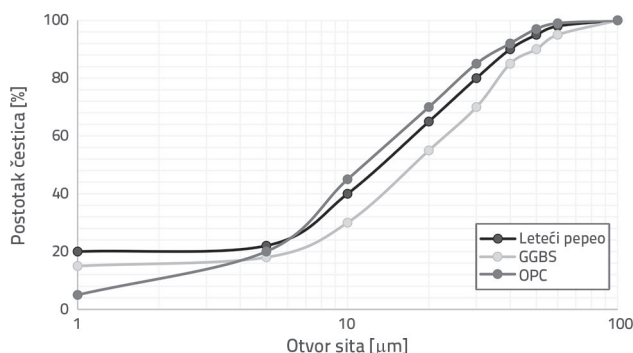
Zato su u ovome istraživanju razmatrana tri uvjeta njege: simulirani kontrolirani uvjeti C1 s temperaturom prostora od 30 ± 2 °C i relativnom vlagom od 50 ± 5 %, održavanom zasićenim otopinama, ambijentalni laboratorijski uvjeti C2 te nekontrolirani vanjski uvjeti C3, izloženi promjenama za sve mješavine. Ternarne miješane mortne kocke njegovane su u sva tri okolišna uvjeta (C1, C2 i C3) kako bi se procijenio utjecaj uvjeta njege na pucolanska svojstva. Međutim, referentna OPC mješavina bila je njegovana isključivo u vodi, što predstavlja standardnu vodenu njegu potrebnu za osiguravanje dosljedne referentne osnove. Kontrolni čimbenici i njihove razine prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Kontrolni čimbenici i njihove razine

Red. br.	Naziv i opis kontrolnog čimbenika	Razina 1.	Razina 2.	Razina 3.
1.	Razina zamjene cementa (R)	30 (10F+20G) (R1)	50 (20F+30G) (R2)	70 (30F + 40G) (R3)
2.	Potreba za vodom (optimalna W_0 +) (W)	$W_0 + 5$ % (W1)	$W_0 + 10$ % (W2)	$W_0 + 15$ % (W3)
3.	Udio superplastifikatora (% mase veziva) (S)	0,6 (S1)	0,8 (S2)	1 (S3)
4.	Uvjeti njege (C)	Simulirani kontrolirani uvjeti (C1)	Ambijentalni laboratorijski uvjeti (C2)	Ambijentalni vanjski uvjeti (C3)

3. Materijali i metode

U ovome istraživanju pozorno su odabrani i korišteni različiti materijali za provedbu eksperimentalnog ispitivanja. Kao primarno vezivo korišten je obični portlandski cement (OPC) razreda 53, u skladu s važećim industrijskim normama. Dodatni cementni materijali uključivali su leteći pepeo klase F, poznat po svojim pucolanskim svojstvima, te mljevenu granuliranu zguru visoke peći (GGBS), koji zajedno doprinose poboljšanoj trajnosti i razvoju čvrstoće. Na slici 2. prikazana je raspodjela veličine čestica OPC-a, letećeg pepela i GGBS-a.



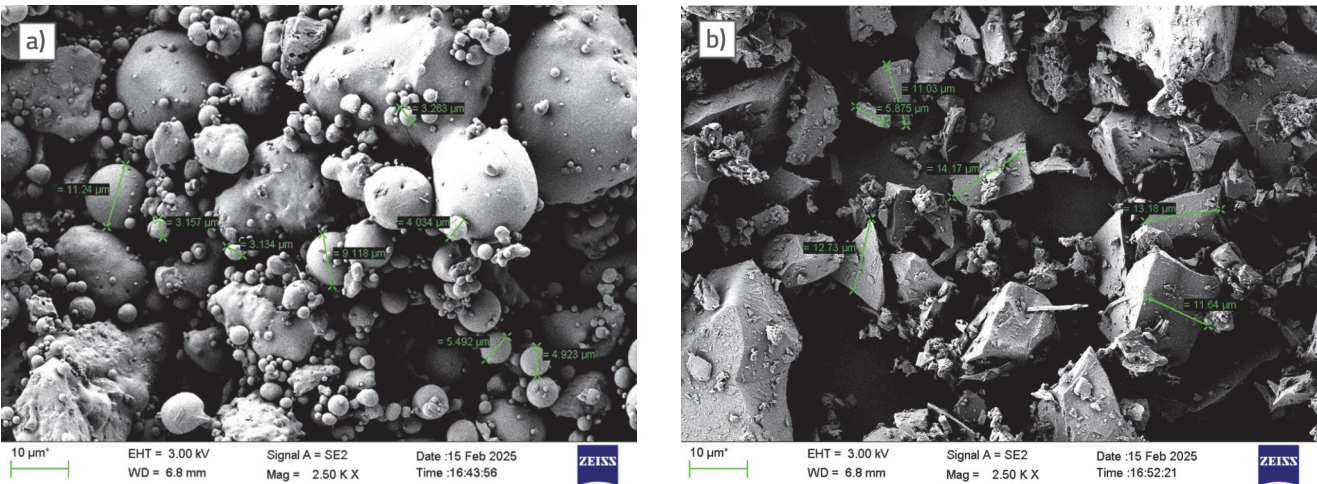
Slika 2. Raspodjela veličine čestica OPC-a, letećeg pepela i GGBS-a

Na slikama 3.a i 3.b prikazana je SEM analiza korištenoga letećeg pepela i GGBS-a. Morfologija i veličina čestica letećeg pepela i mljevene granulirane zgre visoke peći ispitivane su pomoću skenirajućega elektronskog mikroskopa (SEM) marke Zeiss, pri naponu od 3,0 kV, s detektorom SE2 i povećanjem od 2,50 KX. Prije snimanja uzorci su sušeni u sušioniku kako bi se uklonila vlaga, montirani na aluminijske nosače ugljičnom trakom te prevučeni tankim vodljivim slojem kako bi se spriječilo nabijanje. SEM mikrostrukture snimljene su u uvjetima visokog vakuumu, a dimenzije čestica određene softverom instrumenta. Leteći pepeo pokazao je pretežno sferične čestice veličine 3 do 11 μm, dok je GGBS pokazao nepravilne, uglate čestice veličine 5 do 17 μm.

Za postizanje željenih svojstava obradivosti korišten je superplastifikator *Auramix 400* kao kemijski dodatak. Fini agregat sastojao se od prirodnoga riječnog pijeska s nazivnom

Tablica 2. Fizikalna i kemijska svojstva korištenih sirovina

Sastavni oksid [%]	OPC	Leteći pepeo	GGBS
SiO ₂	23,2	59	36
CaO	64,8	2,3	41
Al ₂ O ₃	5		
Fe ₂ O ₃	3,9	3,6	0,4
MgO	3	-	6,8
Na ₂ O	0,2	-	-
K ₂ O	0,8	-	-
Fizikalna svojstva			
Specifična površina [m ² /kg]	334	420	425
Specifična masa	3,15	2,2	2,24
Gubitak žarenjem [%]	0,4	0,3	0,2
Mineraloški sastav OPC-a [%] (prema Bogueovim izrazima)			
C ₃ S		39,75	
C ₂ S		36,54	
C ₃ A		6,65	
C ₄ AF		11,87	
Ostali manji sastojci		5,19	



Slika 3. SEM analiza: a) letećeg pepela; b) GGBS-a

maksimalnom veličinom zrna od 4,75 mm, čime je osigurana odgovarajuća granulacija za optimalna svojstva mješavine. Fizikalna svojstva i oksidni sastav OPC-a, letećeg pepela i GGBS-a, određeni XRF analizom, prikazani su u tablici 2.

4. Odabir parametara svojstava

4.1. Određivanje kemijskog skupljanja

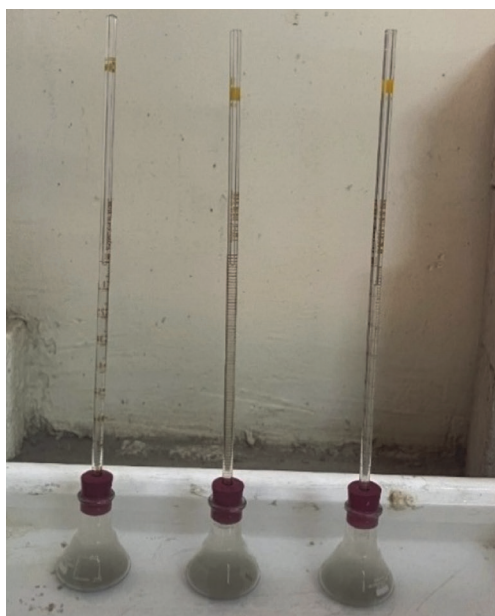
Kemijsko skupljanje cementne paste određeno je gravimetrijskom metodom u skladu s normom ASTM C1608 [29, 30]. Svježa cementna pasta pripremljena je s optimalnim omjerom vode i cementa te temeljito miješana tri minute radi

osiguravanja homogenosti. Oko 3 g paste pažljivo je stavljeno u cilindrične staklene bočice unutarnjeg promjera 25 mm i visine 50 mm, pri čemu je debljina uzorka iznosila približno 5 do 10 mm. Pasta je lagano vibrirana kako bi se uklonili zarobljeni mjehurići zraka i izravnala površina. Preostali prostor u bočici ispunjen je deioniziranom vodom temperature 23 °C pomoću šprice, uz oprez da se ne poremeti površina paste. Bočica je zatvorena gumenim čepom s umetnutom graduiranom pipetom, čime je omogućeno praćenje razine vode.

Sastavljeni uzorci uronjeni su u vodenu kupelj održavanu na 23 ± 0,1 °C tijekom cijelog trajanja ispitivanja. Razina vode u pipeti bilježena je u pravilnim vremenskim razmacima: svakih 30 minuta tijekom prvih osam sati, zatim svakih sat vremena

tijekom sljedećih 16 sati, a potom svakodnevno do 28 dana. Kemijsko skupljanje izračunano je kao volumen apsorbirane vode po gramu cementa, uzimajući u obzir početnu masu cementa u pasti. Tri paralelna uzorka ispitivana su istodobno, a prikazane su srednje vrijednosti radi osiguranja pouzdanosti mjerenja. Na slici 4. prikazan je eksperimentalni postav za mjerenje kemijskog skupljanja.

U skladu sa zahtjevima norme ASTM C1608, sva mjerenja kemijskog skupljanja provedena su isključivo u tome kontroliranom okruženju vodene kupelji te se zato uvjeti njege (C1, C2 i C3) primijenjeni u ostalim ispitivanjima nisu primjenjivali za kemijsko skupljanje. Takav standardizirani pristup osigurava da izmjerena promjena volumena odražava isključivo unutarnje skupljanje uzrokovano hidratacijom veziva, bez utjecaja vanjskih varijacija temperature ili vlažnosti.



Slika 4. Postav za mjerenje kemijskog skupljanja

Radi usporedbe, rezultati kemijskog skupljanja ternarnih mješavina analizirani su u odnosu na referentnu OPC pastu pripremljenu s omjerom vode i cementa od 0,40, koja je pokazala kemijsko skupljanje od 0,40 mL/g. Mješavine s 30 % udjela zamjene pokazale su vrijednosti od 0,40 do 0,45 mL/g, što upućuje da djelomična zamjena letećim pepelom i GGBS-om nije smanjila volumen skupljanja u odnosu na referentni OPC. To ponašanje pripisuje se kontinuiranoj hidrataciji GGBS-a i sekundarnoj pucolanskoj reakciji letećeg pepela, koje doprinose dodatnome vezanju vode u ranoj dobi. Mješavine s 50 % udjele zamjene pokazale su kemijsko skupljanje u rasponu 0,37 do 0,42 mL/g, što je smanjenje od približno 5 do 8 % u odnosu na referentnu pastu. To se može povezati s manjim udjelom klinkera i sporijim ranim hidratacijskim reakcijama dodatnih cementnih materijala. Mješavine s razinom zamjene od 70 % zabilježile su vrijednosti od 0,34 do 0,36 mL/g, što odgovara smanjenju od 10 do 15

% u odnosu na OPC pastu. Veći udio letećeg pepela i GGBS-a smanjuje količinu brzohidratizirajućih klinkerskih faza, što rezultira nižom stopom kemijski vezane vode i posljedično manjim kemijskim skupljanjem.

4.2. Određivanje indeksa pucolanske aktivnosti

Indeks pucolanske aktivnosti (eng. *Pozzolanic Activity Index* - PAI) određen je prema normi ASTM C311 radi procjene reaktivnosti pucolanskog materijala s cementom [31]. Pripremljene su dvije skupine uzoraka cementne paste: referentna mješavina sa 100 % običnoga portlandskog cementa i ispitna mješavina u kojoj je određeni postotak cementa maseno zamijenjen pucolanskim materijalom. Obje mješavine pripremljene su s istim omjerom vode i veziva te istim postupkom miješanja. Paste su miješane pet minuta kako bi se osigurala jednolika disperzija svih sastojaka. Iz svake mješavine izrađeni su kubični uzorci dimenzija 50 × 50 × 50 mm, koji su zbijani u dva sloja nabijalom radi uklanjanja zarobljenog zraka. Nakon vađenja iz kalupa referentni uzorci njegovani su u vodi, dok su ternarne mješavine njegovane u odgovarajućim uvjetima njege definiranim u ortogonalnome nizu. Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je nakon 28 dana prešom za tlačna ispitivanja pri brzini opterećenja od 0,25 MPa/s. Indeks pucolanske aktivnosti izračunan je kao omjer tlačne čvrstoće ispitne mješavine i referentne mješavine, izražen u postocima. Za svaku mješavinu ispitana su tri uzorka, a prikazane su srednje vrijednosti radi osiguravanja statističke pouzdanosti.

4.3. Određivanje stupnja hidratacije pomoću udjela neisparive vode

Stupanj hidratacije cementne paste određen je mjerenjem udjela neisparive vode primjenom rigoroznoga gravimetrijskog postupka [32]. Uzorci cementne paste pripremljeni su s unaprijed određenim optimalnim omjerom vode i cementa te njegovani u različitim uvjetima. U određenim vremenskim razmacima (1, 3, 7, 14 i 28 dana) oko 2 g očvrstnule paste usitnjeno je na komade veličine 1 do 2 mm te uronjeno u izopropanol na 24 sata radi zaustavljanja hidratacije, nakon čega je uslijedilo vakuumsko sušenje u trajanju od 24 sata radi uklanjanja otapala. Zatim su osušeni uzorci samljeveni u fini prah koji prolazi sito od 75 µm. Dio tog praha (približno 1 g) stavljen je u prethodno izvagane keramičke lončice i sušen u sušioniku na 105 ± 5 °C tijekom 24 sata radi uklanjanja isparive vode, nakon čega je zabilježena masa (M_{105}). Uzorci su potom 3 sata zagrijavani u mufelnoj peći na 1000 ± 50 °C radi uklanjanja neisparive vode, a konačna masa zabilježena je kao M_{1000} . Udio neisparive vode izračunan je kao razlika između M_{105} i M_{1000} te izražen kao postotak mase bezvodnog cementa. Stupanj hidratacije izračunan je dijeljenjem udjela neisparive vode s teorijskim udjelom neisparive vode za potpunu hidrataciju (23,1 % za obični portlandski cement). Sva mjerenja provedena su u tri ponavljanja radi pouzdanosti rezultata.

Tablica 3. L9 ortogonalna matrica pokusa i pripadajuća mjerenja

Mješavina	Zamjena cementa [%] (leteći pepeo + GGBS) (R)	Potreba za vodom (optimalno + %) (W)	Doziranje superplastifikatora (% veziva) (S)	Uvjeti njege (C)	Kemijsko skupljanje [ml/g]	Indeks pucolanske aktivnosti [%]	Stupanj hidratacije [%]
1	30 (10F + 20G)	W0 + 5 %	0,6	C1	0,4	83,2	77,9
2	30 (10F + 20G)	W0 + 10 %	0,8	C2	0,43	82,6	75,8
3	30 (10F + 20G)	W0 + 15 %	1	C3	0,45	81,3	80,1
4	50 (20F + 30G)	W0 + 5 %	0,8	C3	0,37	85,2	95,2
5	50 (20F + 30G)	W0 + 10 %	1	C1	0,4	84,7	93,1
6	50 (20F + 30G)	W0 + 15 %	0,6	C2	0,42	83,3	86,6
7	70 (30F + 40F)	W0 + 5 %	1	C2	0,34	83,4	82,3
8	70 (30F + 40G)	W0 + 10 %	0,6	C1	0,36	81,3	77,9
9	70 (30F + 40G)	W0 + 15 %	0,8	C3	0,35	82,6	77,9

5. Taguchijeva analiza

Taguchijeva metoda primijenjena je za optimiranje udjela sastojaka mješavine korištenjem L9 ortogonalne matrice eksperimentalnog plana, koja je obuhvatila četiri neovisna faktora na tri razine. Eksperimentalni plan sastojao se od devet različitih kombinacija mješavina, određenih rasporedom ortogonalne matrice. Utjecaj svakog faktora na odzivne varijable sustavno je analiziran izračunom omjera signala i šuma (S/N), pri čemu je kriterij "manje je bolje" primijenjen za kemijsko skupljanje, dok je kriterij "veće je bolje" primijenjen za pucolansku aktivnost i stupanj hidratacije. Glavni učinci pojedinih faktora procijenjeni su izračunom srednjih vrijednosti omjera S/N za svaku razinu. Optimalna kombinacija razina faktora određena je na temelju najvećih vrijednosti omjera S/N, a provedeni su i potvrdni pokusi radi provjere predviđenih optimalnih uvjeta. Delta-vrijednosti i rang-analiza korištene su za procjenu relativnog utjecaja svakog faktora na odzivne varijable, čime su identificirani najvažniji parametri koji utječu na svojstva betona. Ortogonalna matrica i pripadajuće izmjerene vrijednosti prikazani su u tablici 3. Dobivene vrijednosti mjerenja pokazuju da optimalna mješavina s razinom zamjene cementa od 50 % (20 % letećeg pepela + 30 % GGBS-a) osigurava najuravnoteženija svojstva, kombinirajući manje kemijsko skupljanje, veću pucolansku reaktivnost i povećani stupanj hidratacije, što odražava učinkovito korištenje dodatnih veziva bez narušavanja razvoja hidratacije.

6. Rezultati i rasprava

Analiza omjera signala i šuma (S/N) te dijagrami učinka faktora temeljne su komponente Taguchijeve metodologije robusnog dizajna za optimiranje procesnih parametara. Omjer S/N, koji objedinjuje srednju vrijednost odziva i varijabilnost u jedinstvenu metriku, izračunava se transformacijom niza eksperimentalnih opažanja u konsolidiranu vrijednost koja odražava željeni signal (srednju vrijednost) i neželjeni šum (varijacije). Za karakteristike

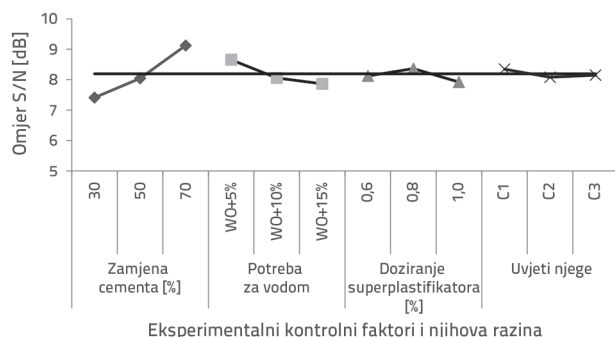
kvalitete koriste se tri standardna oblika omjera S/N: "veće je bolje", "manje je bolje" i "nominalno je najbolje". Biraju se ovisno o cilju optimiranja procesa. Nakon izračuna omjera S/N dijagrami učinka faktora dobivaju se prosječivanjem vrijednosti S/N za svaku razinu faktora, kroz sva eksperimentalna ispitivanja. Ti dijagrami pružaju vizualni prikaz utjecaja različitih razina faktora na performanse procesa, pri čemu nagib linija između razina označava veličinu učinka pojedinog faktora. Optimalna kombinacija parametara identificira se odabirom razina faktora koje maksimiraju omjer S/N, čime se postižu poboljšana srednja vrijednost i smanjena varijabilnost.

6.1. Kemijsko skupljanje

Analiza omjera S/N kemijskog skupljanja pokazuje jasne trendove za četiri ispitana kontrolna faktora. Kod zamjene cementa uočava se snažna pozitivna korelacija s povećanjem postotka [32, 33], pri čemu optimalne performanse ostvaruje razinu zamjene od 70 %, s najvećim omjerom S/N od približno 9 dB. Faktor potrebe za vodom pokazuje blago negativan trend [34], s najboljim rezultatom pri optimalnoj potrebi za vodom + 5 %, dok se omjer S/N smanjuje s povećanjem potrebe za vodom do 15 %. Doziranje superplastifikatora pokazuje minimalne varijacije omjera S/N između različitih razina (od 0,6 % do 1 %), s vrijednostima oko 8 dB, što upućuje na relativno mali utjecaj tog faktora. Slično tome, uvjeti njege (C1, C2 i C3) pokazuju zanemarive promjene omjera S/N, zadržavajući vrijednosti oko 8 dB, što upućuje na to da različiti uvjeti njege imaju minimalan utjecaj na kemijsko skupljanje. Na temelju tih rezultata, optimalna kombinacija parametara uključuje razinu zamjene cementa od 70 % i 5 % dodatne potrebe za vodom, dok se doziranje superplastifikatora i uvjeti njege mogu odabrati prema praktičnim razlozima jer nemaju znatan utjecaj na promatranu varijablu. Na slici 5. prikazan je dijagram učinka faktora za kemijsko skupljanje, a u tablici 4. iznesene su delta-vrijednosti i rang srednjih omjera S/N za svaki faktor.

Tablica 4. Tablica odziva omjera S/N za kemijsko skupljanje

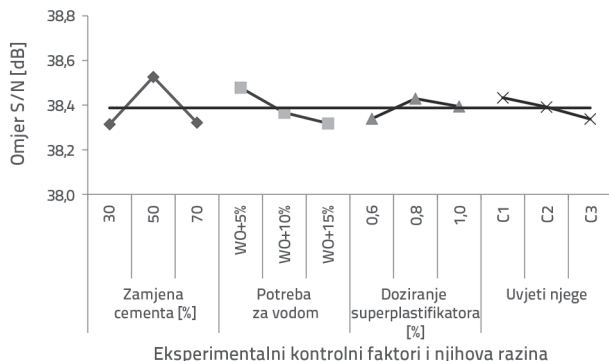
Kontrolni faktor	Omjer signala i šuma S/N [dB]			Maks. do Min. [dB]	Rang
	Razina 1.	Razina 2.	Razina 3.		
Zamjena cementa (R)	7,40	8,04	9,12	1,71	1
Potreba za vodom (W)	8,65	8,05	7,86	0,79	2
Superplastifikator (S)	8,12	8,36	7,92	0,44	3
Uvjeti njege (C)	8,34	8,07	8,14	0,19	4



Slika 5. Grafikon utjecaja faktora za kemijsko skupljanje

6.2. Indeks pucolanske aktivnosti

Na slici 6. prikazan je dijagram učinka faktora za indeks pucolanske aktivnosti, koji otkriva nekoliko važnih trendova u utjecaju kontrolnih faktora na pucolansku reakciju.



Slika 6. Grafikon utjecaja faktora za indeks pucolanske aktivnosti

Postotak zamjene cementa pokazuje izražen maksimum pri 50 %, što upućuje na to da je to optimalna razina za maksimiranje pucolanske aktivnosti. Krivulja pokazuje niže omjere S/N pri razinama zamjene cementa od 30 i 70 %, što sugerira da premala

Tablica 5. Odziva omjera S/N za indeks pucolanske aktivnosti

Kontrolni faktor	Omjer signala i šuma S/N [dB]			Maks. do Min. [dB]	Rang
	Razina 1.	Razina 2.	Razina 3.		
Zamjena cementa (R)	38,31	38,52	38,32	0,21	1
Potreba za vodom (W)	38,47	38,36	38,31	0,16	2
Superplastifikator (S)	38,33	38,42	38,39	0,09	3
Uvjeti njege (C)	38,43	38,39	38,33	0,095	4

ili prevelika razina zamjene cementa može umanjiti pucolansku učinkovitost [35]. Potreba za vodom pokazuje opadajući trend s povećanjem udjela vode od WO + 5 % do WO + 15 %, pri čemu se najveći omjer S/N postiže pri WO + 5 %. To upućuje na to da blago povećanje udjela vode u odnosu na osnovnu razinu pogoduje pucolanskoj aktivnosti, dok prekomjerno dodavanje vode može usporiti reakciju [36]. Doziranje superplastifikatora pokazuje blagi pozitivan učinak do 0,8 %, nakon čega slijedi blagi pad pri 1 %, što upućuje na postojanje optimalne doze iznad koje se učinak smanjuje ili postaje negativan [37]. Uvjeti njege (C1, C2, C3) pokazuju vrlo male razlike u utjecaju na indeks pucolanske aktivnosti, što upućuje na to da je taj faktor manje kritičan za optimiranje u usporedbi sa zamjenom cementa i potrebom za vodom. Analiza ističe važnost pravilnog uravnoteženja razine zamjene cementa i potrebe za vodom za postizanje optimalne pucolanske aktivnosti, dok doziranje superplastifikatora i uvjeti njege imaju sekundarnu ulogu. U tablici 5. prikazani su odzivi omjera S/N za indeks pucolanske aktivnosti.

Analiza odziva omjera S/N za indeks pucolanske aktivnosti pokazuje da je razina zamjene cementa imala najveći utjecaj među svim kontrolnim faktorima, s delta-vrijednošću od 0,21 dB, čime je zauzela prvo mjesto. Potreba za vodom rangirana je kao drugi najutjecajniji faktor, s delta-vrijednošću od 0,16 dB. Uvjeti njege i doziranje superplastifikatora imali su minimalan utjecaj, s vrlo sličnim delta-vrijednostima. Relativno male razlike u delta-vrijednostima (0,09 do 0,21 dB) upućuju na to da je indeks pucolanske aktivnosti relativno stabilan u širokome rasponu parametara, iako zamjena cementa ostaje ključni faktor optimiranja.

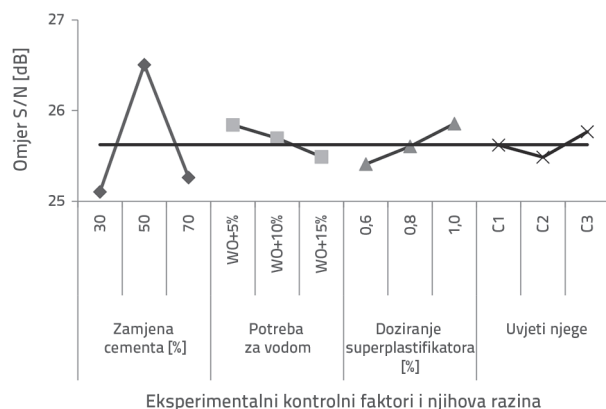
6.3. Stupanj hidratacije

Na slici 7. prikazan je dijagram učinka faktora za stupanj hidratacije, a u tablici 6. izneseni su omjeri S/N odziva. Analiza omjera S/N pokazuje izražen maksimum pri razini zamjene cementa od 50 %, s vrijednošću oko 26,5 dB, dok pri razinama

Tablica 6. Tablica odziva omjera S/N za stupanj hidratacije

Kontrolni faktor	Omjer signala i šuma S/N [dB]			Maks. do Min. [dB]	Rang
	Razina 1.	Razina 2.	Razina 3.		
Zamjena cementa (R)	25,10	26,50	25,26	1,40	1
Potreba za vodom (W)	25,84	25,69	25,48	0,35	2
Superplastifikator (S)	25,41	25,60	25,85	0,44	3
Uvjeti njege (C)	25,61	25,48	25,76	0,28	4

od 30 i 70 % pokazuju niže vrijednosti, što potvrđuje da je 50 % optimalna razina za hidrataciju [38]. Potreba za vodom pokazuje opadajući trend, pri čemu niža potreba za vodom pogoduje hidrataciji [37]. Doziranje superplastifikatora pokazuje rastući trend, s optimalnom vrijednošću pri 1 %, što upućuje na pozitivan utjecaj većeg udjela superplastifikatora na hidrataciju [38]. Uvjeti njege pokazuju male razlike, s blagom prednošću uvjeta C3. Optimalna kombinacija parametara za maksimiranje stupnja hidratacije uključuje razinu zamjene cementa od 50 %, 5 % dodatne vode i 1 % superplastifikatora.



Eksperimentalni kontrolni faktori i njihova razina

Slika 7. Grafikon utjecaja faktora na stupanj hidratacije

Analiza pokazuje da je razina zamjene cementa dominantan faktor koji utječe na stupanj hidratacije, s delta-vrijednošću znatno većom od ostalih faktora, dok ostali parametri imaju sekundarnu ulogu.

7. Zaključak

Na temelju sveobuhvatne Taguchijeve analize triju ključnih parametara, kemijskog skupljanja, indeksa pucolanske aktivnosti i stupnja hidratacije, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Razina zamjene cementa pokazala se kao ključni čimbenik u svim promatranim parametrima. Zamjena u udjelu od 70 % pokazala je optimalne rezultate u pogledu kemijskog skupljanja, dok je zamjena u udjelu od 50 % bila optimalna za pucolansku aktivnost i stupanj hidratacije. To upućuje na zaključak da je umjereno do visoko smanjenje udjela cementa (50 do 70 %) povoljno za ukupna svojstva materijala.
- Potreba za vodom dosljedno je pokazivala bolje rezultate pri nižim razinama (WD-5 %) za sva tri parametra, što upućuje

na to da je minimalan udio vode povoljan za postizanje optimalnih svojstava materijala.

- Doziranje superplastifikatora pokazalo je varijabilne učinke: iako je imalo zanemariv utjecaj na kemijsko skupljanje i pucolansku aktivnost, pokazalo je pozitivnu korelaciju sa stupnjem hidratacije, što sugerira da veće doze (1 %) mogu biti korisne za procese hidratacije.
- Uvjeti njege i relativna vlažnost pokazali su minimalan utjecaj na promatrane parametre, što upućuje na to da su ti čimbenici manje presudni u određivanju konačnih svojstava materijala. Ti rezultati pružaju vrijedne smjernice za optimiranje betonskih mješavina s visokim postotkom zamjene cementa, naglašavajući da je precizna kontrola potrebe za vodom i doziranja superplastifikatora ključna za postizanje željenih svojstava, dok uvjeti njege omogućuju veću fleksibilnost u proizvodnome procesu.
- Na temelju analize tablica odziva omjera signala i šuma (S/N) za kemijsko skupljanje indeks pucolanske aktivnosti i stupanj hidratacije uočeni su dosljedni obrasci koji omogućuju donošenje sveobuhvatnih zaključaka o optimiranju sastava betonske mješavine.
- Razina zamjene cementa dosljedno se pokazala kao najutjecajniji kontrolni čimbenik za sva tri ispitivana svojstva. U svim analizama zauzela je prvo mjesto, s delta-vrijednostima od 1,71 dB za kemijsko skupljanje, 0,21 dB za indeks pucolanske aktivnosti i 1,40 dB za stupanj hidratacije. Time se potvrđuje da je pažljiv odabir razine zamjene cementa presudan za istodobno optimiranje više svojstava betona. Optimalna razina zamjene cementa odgovara približno razini 2. (50 %), kako pokazuju omjeri S/N za pucolansku aktivnost i stupanj hidratacije, dok su više razine (razina 3.) učinkovitije u kontroli kemijskog skupljanja.
- Potreba za vodom dosljedno je rangirana kao drugi najvažniji čimbenik za kemijsko skupljanje i indeks pucolanske aktivnosti, dok je za stupanj hidratacije pala na treće mjesto. To upućuje na to da udio vode ima važnu, ali sekundarnu ulogu u određivanju svojstava betona, pri čemu se njegov utjecaj razlikuje ovisno o optimiranome svojstvu. Općenito, niža potreba za vodom (razina 1.) pokazala je bolje rezultate.
- Doziranje superplastifikatora pokazalo je promjenjiv utjecaj: rangirano je na treće mjesto po utjecaju na kemijsko skupljanje, na četvrto po utjecaju na pucolansku aktivnost, ali se popelo na drugo mjesto po utjecaju na stupanj hidratacije. Ta varijabilnost upućuje na to da učinkovitost superplastifikatora uvelike ovisi o ciljanome svojstvu, čineći ga važnim parametrom za selektivno optimiranje.

- Uvjeti njege dosljedno su pokazali najmanji utjecaj na kemijsko skupljanje i stupanj hidratacije, gdje su rangirani na četvrto mjesto, dok su po utjecaju na indeks pucolanske aktivnosti zauzeli nešto višu poziciju (treće mjesto). Mala varijacija omjera S/N među različitim uvjetima njege upućuje na ograničen utjecaj tog parametra u usporedbi s ostalim čimbenicima.
- Također je važno istaknuti da se volumetrijsko ponašanje cementne paste uvelike razlikuje od ponašanja betona zbog ograničavajućeg utjecaja agregata, prisutnosti prijelazne zone sučelja i kompozitne prirode materijala. Iako su kemijsko skupljanje i karakteristike hidratacije u ovome istraživanju dobivene na razini paste, ti su rezultati ključni za razumijevanje intrinzične reaktivnosti vezivnog sustava i za predviđanje volumetrijskih promjena betona u ranijoj dobi. Mjerenja na razini paste daju temeljne ulazne podatke za modeliranje autogenog skupljanja, razvoja unutarnje

relativne vlažnosti i stupnja hidratacije u betonu. Zato, iako se rezultati dobiveni na razini paste ne mogu izravno vjerno prenijeti na ponašanje betona, utvrđeni trendovi nude vrijedne smjernice za projektiranje i optimiranje ternarnih miješanih betona koji imaju udjele letećeg pepela i GGBS-a.

- Sveukupno, ovi rezultati pružaju jasne smjernice za projektiranje betonskih mješavina: prioritet treba dati optimiranju razine zamjene cementa, zatim potrebi za vodom i doziranju superplastifikatora, uz saznanje da uvjeti njege, iako važni, imaju relativno manji utjecaj na ispitivana svojstva.

Zahvala

Ovaj rad financijski je podržao Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala Institut za istraživanje u znanosti i tehnologiji, Seed Fund [broj projekta: VTU/Seed Fund/FY 2024-2025/014].

LITERATURA

- [1] Agrawal, V.M., Savoikar, P.P.: Optimization of ternary concrete made using slag and fly ash in ultra-fine form using desirability function approach, *Mater. Today Proc.*, 93 (2023), pp. 370-376, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.345>.
- [2] Venkata Rao, M., Sivagamasundari, R., Vamsi Nagaraju, T.: Achieving strength and sustainability in ternary blended Concrete: Leveraging industrial and agricultural By-Products with controlled Nano-SiO₂ content, *Clean. Mater.*, 9 (2023), Paper 100198, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100198>.
- [3] Belarmin Xavier, C.S., Abdul Rahim, A.: Optimization and characterization of the ternary blended iron rich natural binder concrete system, *Constr. Build. Mater.*, 363 (2023), Paper 129838, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129838>.
- [4] Subhash Chandran, N., Manikandan, P., Vasugi, V., Narendra, S.: Application of Taguchi approach to optimize the waste glass powder in developing eco-friendly ternary blended aluminosilicate matrix, *Case Stud. Constr. Mater.*, 21 (2024), Paper e03398, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03398>.
- [5] Wang, X.Y.: Analysis of hydration and strength optimization of cement-fly ash-limestone ternary blended concrete, *Constr. Build. Mater.*, 166 (2018), pp. 130-140, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.058>.
- [6] Pundir, R., Chary, G.H.V.C., Dastidar, M.G.: Application of Taguchi method for optimizing the process parameters for the removal of copper and nickel by growing *Aspergillus* sp., *Water Resour. Ind.*, 20 (2018), pp. 83-92, <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.05.001>.
- [7] Ahmad, M.N., et al.: Application of Taguchi Method to Optimize the Parameter of Fused Deposition Modeling (FDM) Using Oil Palm Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, *Polymers (Basel)*, 14 (2022) 11, <https://doi.org/10.3390/polym14112140>.
- [8] Hisam, M.W., Dar, A.A., Elrasheed, M.O., Khan, M.S., Gera, R., Azad, I.: The Versatility of the Taguchi Method: Optimizing Experiments Across Diverse Disciplines, *J. Stat. Theory Appl.*, 23 (2024) 4, pp. 365-389, <https://doi.org/10.1007/s44199-024-00093-9>.
- [9] Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H., Liu, Y.: A review on mixture design methods for geopolymer concrete, *Compos. Part B Eng.*, 178 (2019), Paper 107490, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107490>.
- [10] Maghsoodloo, S., Ozdemir, G., Jordan, V., Huang, C.H.: Strengths and limitations of taguchi's contributions to quality, manufacturing and process engineering, *J. Manuf. Syst.*, 23 (2024) 2, pp. 73-126, [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(05\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(05)00004-X).
- [11] Jamali, H.U., et al.: On the Use of Taguchi Method in the Analysis of the Dynamic Response of Variable Bearing Design under Impact Load, *Adv. Tribol.*, (2024) 1, Paper 7260336, <https://doi.org/10.1155/2024/7260336>.
- [12] Rashid, K.: Optimize the Taguchi method, the signal-to-noise ratio, and the sensitivity, *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 8 (2023) 6, pp. 64- 700, <https://doi.org/10.22271/math.2023.v8.i6a.1406>.
- [13] Panda, R., Sahoo, T.K.: Effect of Replacement of GGBS and Fly Ash with Cement in Concrete, Springer, 2021., pp. 811-818, https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_68.
- [14] Maske, M.M., Sayyed, S.S., More, S.K., Patil, S.K., Chandak, P.G.: Influence of Partial Replacement of Ordinary Portland Cementitious System with Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) on Concrete Strength and Durability, 2024., <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4413223/v1>.
- [15] Radwan, M.K.H., Onn, C.C., Mo, K.H., Yap, S.P., Chin, R.J., Lai, S.H.: Sustainable ternary cement blends with high-volume ground granulated blast furnace slag-fly ash, *Environment, Development and Sustainability*, (2021), pp. 1-35, <https://doi.org/10.1007/S10668-021-01633-4>.
- [16] Tahir, F., Al-Zahrani, S.M., Noori, Y., Al-Ghamdi, S.G.: Environmental impacts and the future prospects of waste utilization in the concrete production, *Materials Today: Proceedings*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.150>.

- [17] Ateş, K.T., Şahin, C., Kuvvetli, Y., Küren, B.A., Uysal, A.: Sustainable production in cement via artificial intelligence - based decision support system: Case study, *Case Stud. Constr. Mater.*, 15 (2021), Paper e00628, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00628>.
- [18] Zhuang, W., Li, S., Yu, Q.: The effect of supplementary cementitious material systems on dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete paste, *Constr. Build. Mater.*, 321 (2022), Paper 126361, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126361>.
- [19] Zhang, S., Niu, D., Wang, Y., Tian, W., Luo, D. Zhang, L.: Insight into mechanical properties and microstructure of concrete containing steel slag and ground-granulated blast-furnace slag, *J. Sustain. Cem. Mater.*, 12 (2023) 9, pp. 1169-1180, <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2180103>.
- [20] Ahmad, J., et al.: A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production, *Sustainability*, 14 (2022) 14, <https://doi.org/10.3390/su14148783>.
- [21] Mo, K.H., Chin, T.S., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z.: Material and structural properties of waste-oil palm shell concrete incorporating ground granulated blast-furnace slag reinforced with low-volume steel fibres, *J. Clean. Prod.*, 133 (2016), pp. 414-426, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.162>.
- [22] Samson, G., Cyr, M., Gao, X.X.: Thermomechanical performance of blended metakaolin-GGBS alkali-activated foam concrete, *Constr. Build. Mater.*, 157 (2017), pp. 982 - 993, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.146>.
- [23] Chen, W., Shen, P., Shui, Z.: Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement, *Constr. Build. Mater.*, 34 (2012), pp. 306-312, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.073>.
- [24] Nanthagopalan, P., Santhanam, M.: Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of Self-Compacting Concrete, *Constr. Build. Mater.*, 23 (2009) 11, pp. 3443-3449, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.029>.
- [24] Tan, Z., Bernal, S.A., Provis, J.L.: Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes, *Mater. Struct.*, 50 (2017) 6, Paper 235, <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1103-x>.
- [25] Ajay, A., Ramaswamy, K.P., Nazeer, M.: A study on compatibility of superplasticizers with high strength blended cement paste, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 491 (2020) 1, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/491/1/012043>.
- [26] Wang, Y., Xiao, R., Lu, H., Hu, W., Jiang, X., Huang, B.: Effect of curing conditions on the strength and durability of air entrained concrete with and without fly ash, *Clean. Mater.*, 7 (2023), Paper 100170, <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100170>.
- [27] Anwar, A., Tariq, H., Adil, S., Ahsan Iftikhar, M.: Effect of curing techniques on compressive strength of concrete, *World J. Adv. Res. Rev.*, 16 (2022) 3, pp. 694-710, <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.16.3.1379>.
- [28] Kheir, J., Hilloulin, B., Loukili, A., De Belie, N.: Chemical Shrinkage of Low Water to Cement (w/c) Ratio CEM I and CEM III Cement Pastes Incorporating Silica Fume and Filler, *Mater. (Basel, Switzerland)*, 14 (2021) 5, <https://doi.org/10.3390/ma14051164>.
- [29] Ghanem, H., Ramadan, R., Khatib, J., Elkordi, A.: A Review on Chemical and Autogenous Shrinkage of Cementitious Systems, *Materials (Basel)*, 17 (2024) 2, <https://doi.org/10.3390/ma17020283>.
- [30] Fares, G., Alhozaimy, A.M.: Assessment of Pozzolan Activity of Ground Scoria Rocks under Low- and High-Pressure (Autoclave) Steam Curing, *Materials (Basel)*, 15 (2022) 13, <https://doi.org/10.3390/ma15134666>.
- [31] Liu, X., Wang, P., Ding, M.: Hydration process in Portland cement blended with activated coal gangue, *J. Zhejiang Univ. A*, 12 (2011) 7, pp. 503 - 510, <https://doi.org/10.1631/jzus.A1000479>.
- [32] Khatib, J.M., Ramadan, R., Ghanem, H., Elkordi, A., Sonebi, M.: Effect of limestone fines as a partial replacement of cement on the chemical, autogenous, drying shrinkage and expansion of mortars, *Mater. Today Proc.*, 58 (2022), pp. 1199-1204, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.336>.
- [33] Ayub, M., et al.: Promoting sustainable cleaner production paradigms in palm oil fuel ash as an eco-friendly cementitious material: A critical analysis, *J. Clean. Prod.*, 295 (2021), p. 126296, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126296>.
- [34] Hasani, M., Tarighat, A.: Proposing new pozzolanic activity index based on water adsorption energy via molecular dynamics simulations, *Constr. Build. Mater.*, 213 (2019), pp. 492-504, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.073>.
- [35] Alaka, H.A., Oyedele, L.O., Toriola-Coker, O.L.: Effect of excess dosages of superplasticizer on the properties of highly sustainable high-volume fly ash concrete, *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.*, 7 (2016) 2, pp. 73-86, <https://doi.org/10.1080/2093761X.2016.1167643>.
- [36] Lesovik, V. et al.: Improving the behaviors of foam concrete through the use of composite binder, *J. Build. Eng.*, 31 (2020) 3, p. 101414, <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2020.101414>.
- [37] Chard, A.N., Trinies, V., Edmonds, C.J., Sogore, A., Freeman, M.C.: The impact of water consumption on hydration and cognition among schoolchildren: Methods and results from a crossover trial in rural Mali, *PLoS One*, 14 (2019) 1, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210568>.
- [38] Heikal, M., Morsy, M.S., Aiad, I.: Effect of polycarboxylate superplasticizer on hydration characteristics of cement pastes containing silica fume, *Ceram. - Silikaty*, 50 (2006) 1, pp. 5 - 14