

Primljen / Received: 30.11.2024.

Ispravljen / Corrected: 29.3.2025.

Prihvaćen / Accepted: 2.4.2025.

Dostupno online / Available online: 10.7.2025.

Održivi beton modificiran industrijskim otpadom i prirodnim vlaknima

Autori:



Doc.dr.sc. **Manikandan A.**, dipl.ing.građ.
Fakultet strojarstva i tehnologije Dr. Mahalingam,
Indija
Odjel za građevinarstvo
manikandan295010@gmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Murali Karuppusamy**, dipl.ing.građ.
Tehnološki institut Dr. N.G.P, Indija
Odjel za građevinarstvo
murali.k@drngpit.ac.in

Izvorni znanstveni rad

Manikandan A., Murali Karuppusamy

Održivi beton modificiran industrijskim otpadom i prirodnim vlaknima

Cilj ovog istraživanja jest razvoj održivog betona u kojemu je sitni agregat djelomično zamijenjen sa 70 % otpadnoga ljevaoničkog pijeska iz ljevaonica (WFS) i 30 % umjetnog pijeska (M-sand), dok je cement zamijenjen s 10 % metakaolina i stalnim dodatkom od 0,5 % vlakana banane. Ispitana su svojstva svježeg betona, uključujući slijeganje, te mehanička svojstva, uključujući tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću cijepanjem i savijanjem. Modificirana smjesa za beton, oznake F70S30MB, pokazala je usporediva mehanička svojstva u odnosu na referentnu mješavinu, pri čemu je ostvarena savojna čvrstoća bila za 55,6 % veća. Istodobno su utvrđena smanjenja utjelovljene energije i emisije ugljika za 7,39 %, odnosno 7,16 %. Zaključeno je da primjena industrijskog otpada i prirodnih vlakana u betonskim mješavinama doprinosi poboljšanju mehaničkih svojstava te smanjenju negativnog utjecaja na okoliš, što taj pristup čini pogodnim za održivu gradnju.

Ključne riječi:

otpadni ljevaonički pijesak, umjetni pijesak, metakaolin, prirodna vlakna, mehanička svojstva, održivi beton

Original research paper

Manikandan A., Murali Karuppusamy

Sustainable concrete modified with industrial waste and natural fibre

This study aims to develop a sustainable concrete with partial replacement of fine aggregate with 70% waste foundry sand (WFS) and 30 % manufactured sand (M-sand), along with 10 % replacement of cement with metakaolin and a constant 0.5% addition of banana fibre. Fresh properties such as the slump value and mechanical properties such as the compressive strength, split tensile strength, and flexural strength of the mixes were examined. The modified concrete mix, F70S30MB, exhibited comparable mechanical properties, achieving 55.6 % higher flexural strength than the control mix, while reducing the embodied energy and embodied carbon by 7.39 % and 7.16 %, respectively. It was concluded that modifying concrete with industrial waste and natural fibres enhances its mechanical properties and reduces the environmental impact, thereby promoting sustainable construction.

Key words:

waste foundry sand, M-sand, metakaolin, natural fibre, mechanical properties, sustainable concrete

1. Uvod

Beton je jedan od najčešće primjenjivanih i najjednostavnijih građevnih materijala, poznat po svojoj visokoj čvrstoći, trajnosti i prilagodljivosti [1, 2]. Zato ima široku primjenu u svim vrstama građevinskih zahvata [3]. Sastav betona uključuje cement, agregat, vodu i dodatke. Cement se veže za druge komponente betona i tvori gustu matricu reakcijom hidratacije. Nažalost, proizvodnja cementa znatno doprinosi emisiji CO₂ i time globalnome zagrijavanju [4, 5]. Procjenjuje se da je otprilike 8 % ukupnih emisija CO₂ uzrokovano proizvodnjom cementa [6]. Istodobno troškovi proizvodnje cementa neprestano rastu. U skladu s time istraženi su različiti alternativni materijali i ispitana je njihova prikladnost za primjenu u betonu. Takvi materijali uključuju leteći pepeo [7], dodatke na bazi zgure [8, 9], elektronički otpad [10], silicijsku prašinu [11] i pepeo rižinih ljuski [12]. Istraživači aktivno ispituju primjenu navedenih materijala kao djelomične zamjene za cement u cilju smanjenja njegove potrošnje s ekonomskoga gledišta i gledišta održivosti. Osim cementa u građevinskom se sektoru bilježi i znatan porast opsega upotrebe prirodnih resursa od početka 20. stoljeća [13]. Prekomjerno iskorištavanje prirodnih resursa poput šljunka i riječnog pijeska u građevinskim projektima glavni je uzrok njihova iscrpljivanja [14]. Riječni pijesak, kao sirovina za proizvodnju betona, na rubu je nestanka. Istodobno odlaganje industrijskog otpada na odlagališta negativno utječe na okoliš [15]. U većini zemalja potrošnja raznih vrsta agregata raste znatno brže od gospodarskog rasta ili širenja građevinskog sektora. Zato se umjetni ili reciklirani agregati poput umjetnog pijeska (engl. *manufactured sand* ili *M-sand*) primjenjuju sve češće [16-18]. Umjetni pijesak proizvodi se drobljenjem tvrdoga granita do veličine sitnih čestica kako bi se stvorio materijal sličan prirodnome pijesku. Umjetni pijesak široko je prihvaćen kao održiva zamjena za riječni pijesak, osobito u betonskim radovima, zidanju i žbukanju. Umjetni pijesak dobro je poznata i održiva alternativa sitnim agregatima u betonu. Povećava čvrstoću betona i pruža prednosti poput smanjenog onečišćenja i lake dostupnosti. Unatoč tome što primjena umjetnog pijeska u betonu ima brojne prednosti, ima i određene nedostatke. Beton koji se sastoji od umjetnog pijeska obično pokazuje manju obradivost u usporedbi s betonom koji u svom sastavu ima prirodne agregate te je zato za postizanje bolje obradivosti potrebno dodavati superplastifikatore [19]. Budući da su troškovi proizvodnje umjetnih agregata poput umjetnog pijeska relativno visoki, a proizvodna postrojenja mogu biti udaljena od gradilišta, dodatni troškovi prijevoza dodatno povećavaju ukupne troškove [20]. Međutim, ljevaonički sektor stvara veliku količinu nusproizvoda tijekom lijevanja. Otprilike 70 % toga nusproizvoda čini pijesak, jer se kalupi obično izrađuju od pijeska za kalupljenje, koji je jeftin, lako dostupan i dobro se veže s vezivima i drugim organskim komponentama u kalupu [21]. Za potrebe kalupljenja i lijevanja ljevaonice primjenjuju visokokvalitetni pijesak određene veličine od silicijske prašine. Nakon što se pijesak uspješno reciklira i ponovno upotrijebi više puta, ljevaonice ga uklanjaju iz

proizvodnog procesa. Takav se pijesak naziva ljevaonički pijesak i više se ne može upotrebljavati u njihovim procesima. Također se naziva otpadni ljevaonički pijesak (engl. *Waste Foundry Sand - WFS*). Riječ je o nusproizvodu industrije lijevanja crnih i obojenih metala. Prema izvješćima, kvaliteta ljevaoničkog pijeska koji se primjenjuje u građevinskim projektima obično je bolja od kvalitete riječnog pijeska. U različitim dijelovima Indije postoji približno 100 do 700 ljevaonica, uključujući gradove Howrah, Rajkot, Agra, Jamnagar, Belagavi, Kolhapur, Coimbatore i Hyderabad [22]. Brojna istraživanja [19, 23-28] ispitala su svojstva svježeg i očvrslog betona proizvedenog uz primjenu WFS-a kako bi se procijenila njegova prikladnost kao zamjene za sitne agregate. Zaključili su da je zamjena sitnih agregata WFS-om moguća, no razina zamjene varira. Mehta [28] je utvrdio da zamjena sitnih agregata WFS-om u udjelima od 20 % do 30 % znatno poboljšava volumen šupljina, gustoću i specifičnu težinu betona. U istom je istraživanju zaključeno da zamjena u udjelu većem od 30 % dovodi do povećane karbonatizacije i smanjene otpornosti na sumporov trioksid. Bhardwaj i Kumar [19] izvijestili su da dodatak WFS-a uzrokuje smanjenje tlačne čvrstoće u usporedbi s referentnim betonom zbog smanjene dostupnosti paste za vezivanje. Zaključili su da je dodatak WFS-a do razine zamjene od 20 % optimalan za postizanje tlačne čvrstoće usporedive s konvencionalnim betonom. Bilal i sur. [27] ustanovili su da upotreba WFS-a iznad razine zamjene od 30 % povećava potrebu za vodom kako bi se postigla potrebna obradivost betona. Utvrđeno je da zamjena od 40 % rezultira smanjenjem vrijednosti slijezanja za 31 % u usporedbi s konvencionalnim betonom. Prabhu i sur. [23] utvrdili su da upotreba WFS-a kao finog agregata u betonskoj mješavini pri razini zamjene od 20 % rezultira vlažnom čvrstoćom cijepanjem usporedivom s onom konvencionalnog betona, dok je iznad razine zamjene od 20 % uočen blagi pad vlažne čvrstoće cijepanjem. Najveći pad vlažne čvrstoće na cijepanje, od približno 19,32 %, zabilježen je pri razini zamjene od 50 %. Kavitha i sur. [29] zaključili su da primjena WFS-a kao finog agregata u betonu smanjuje njegovu tlačnu čvrstoću. To je smanjenje ponajprije posljedica veće poroznosti i slabijeg stvaranja veza neobrađenoga otpadnog ljevaoničkog pijeska u usporedbi s prirodnim finim agregatima poput riječnog pijeska ili umjetnog pijeska. Dodatni cementni materijali (engl. *Supplementary Cementitious Materials - SCM*) kao što su mljevena granulirana zgura visoke peći (GGBS), leteći pepeo, metakaolin i silicijska prašina mogu potaknuti razvijanje čvrstoće u betonu s otpadnim ljevaoničkim pijeskom reakcijama sekundarne hidratacije. SCM-ovi imaju visoke udjele aluminijskoga oksida i silicija, koji u interakciji s kalcijevim hidroksidom tvore kalcij-silikatni hidratni (C-S-H) gel, osnovnu vezivnu komponentu koja poboljšava trajnost i čvrstoću betona. Primjena WFS-a u kombinaciji sa SCM-ovima u betonu detaljno je istražena. Reshma i sur. [30] ispitali su svojstva betona klase M40, koji ima udio od 30 % letećeg pepela kao djelomičnu zamjenu za cement, uz zamjenu sitnog agregata WFS-om u udjelu od 0 % do 40 %. Zaključeno je da je optimalni udio zamjene za postizanje boljih svojstava svježeg i mehaničkog betona iznosio 30 %, dok su pri udjelu od 40 % zabilježena blaga smanjenja čvrstoće. Karumanchi

i sur. [31] izvijestili su da su optimalna mehanička svojstva postignuta u smjesi s 30 % letećeg pepela i 60 % WFS-a. Međutim, zaključili su da povećanje udjela letećeg pepela smanjuje obradivost, što upućuje na kompromis između čvrstoće i jednostavnosti upotrebe. Ashish i Verma [32] ispitali su betonske mješavine u kojima je metakaolin primijenjen umjesto cementa, a WFS je zamijenio 50 % sitnog agregata. Utvrdili su da prisutnost aluminija u metakaolinu ubrzava hidrataciju, što rezultira povećanjem čvrstoće. Zaključili su i da se potreba za superplastifikatorom povećava kako bi se održala obradivost. Gholampour i sur. [33] proučavali su svojstva betona u kojemu su granulirana zgura visokih peći (engl. *ground granulated blast slag* - GGBS) i leteći pepeo primijenjeni kao zamjene za cement, uz dodatak recikliranoga finog agregata i WFS-a kao zamjene za prirodni pijesak. Otkrili su da tlačna čvrstoća betona opada povećanjem udjela zamjene recikliranim finim agregatom i ljevaoničkim pijeskom do 100 %. Također je utvrđeno smanjenje čvrstoće pri zamjeni cementa letećim pepelom. Međutim, kombinirana zamjena cementa s 23 % letećeg pepela i 47 % GGBS-a rezultirala je povećanjem čvrstoće. Shahbaz i Lalotra [34] otkrili su da se uz održavanje koncentracije letećeg pepela na 5 % tlačna čvrstoća povećavala s povećanjem količine ljevaoničkog pijeska. Najveća čvrstoća postignuta je pri omjeru zamjene od 15 %, uz povećanje od 24 %, dok je pri omjeru zamjeni od 20 % zabilježeno smanjenje. Parashar i sur. [35] pokazali su da veći udio GGBS-a u betonskoj mješavini povećava njezinu krutost. Zato se optimalna mješavina sastojala od 30 % WFS-a i 15 % GGBS-a. Međutim, loša vlačna svojstva i duktilnost takve mješavine glavni su izazovi za njezinu primjenu. Pojava vlaknima ojačanog betona (engl. *Fiber Reinforced Concrete* - FRC) riješila je te probleme. Učinke različitih udjela zamjene WFS-om (20 %, 40 % i 60 %), letećim pepelom (10 %, 20 % i 30 %) te dodatka čeličnih vlakana (1 %, 2 % i 3 %) na različita svojstva betona proučavali su Liu i sur. [36]. Utvrđeno je da udio čeličnih vlakana primarno utječe na gustoću, vlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje i modul elastičnosti betona, dok udio WFS-a najviše utječe na obradivost i tlačnu čvrstoću. Selvarani i Prabhavathy [37] istraživali su mehanička svojstva betona klase C 25/30 (stara oznaka M30) s dodatkom 1 kg/m³ polipropilenskih vlakana i zamjenom sitnog agregata WFS-om u udjelu od 0 % do 30 %. Primijetili su da je zamjena ljevaoničkim pijeskom u udjelu od 10 %, uz dodatak polipropilenskih vlakana, povećala vlačnu čvrstoću na savijanje i tlačnu čvrstoću. Prasath i sur. [38] proveli su eksperiment na betonu ojačanome staklenim vlaknima s ljevaoničkim pijeskom kao zamjenom za sitne agregate u udjelu od 10 % do 30 %. DurgaDevi i Chandrasekaran [39] proučavali su utjecaj WFS-a i karbonskih vlakana (CF) na mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona klase C 30/37 (stara oznaka M40). Utvrđeno je da se tlačna čvrstoća povećala za

8,05 % nakon 7 dana odnosno za 4,13 % nakon 28 dana pri dodavanju 0,5 % ugljičnih vlakana (engl. *Carbon Fibre* - CF) . Međutim, pri višim udjelima CF-a (0,75 % i 1,0 %) došlo je do smanjenja čvrstoće zbog lošijeg povezivanja uzrokovanog aglomeracijom vlakana. Deore i sur. zaključili su da optimalna mješavina s 30 % WFS-a i 0,75 % CF-a poboljšava mehanička svojstva i smanjuje stvaranje pukotina u usporedbi s uzorcima bez vlakana. Međutim, viši udio CF-a doveo je do slabijeg vezivanja u betonu, što je rezultiralo smanjenjem ukupne čvrstoće. Abhishekh Soratur i sur. [41] istraživali su mehanička svojstva betona u kojemu je od 10 do 30 % sitnih agregata zamijenjeno WFS-om i s dodatkom od 0,5 % staklenih vlakana. Međutim, nisu provedena istraživanja o kombiniranoj upotrebi WFS-a i metakaolina u betonu ojačanome prirodnim vlaknima. Provedena su istraživanja o kombiniranoj upotrebi WFS-a kao zamjene za sitni agregat i metakaolina kao zamjene za cement [32] te o kombiniranoj upotrebi WFS-a kao zamjene za sitni agregat s dodatkom vlakana banane [42]. Ni jedno istraživanje nije izvijestilo o kombiniranoj upotrebi WFS-a i umjetnog pijeska kao zamjene za sitni agregat te metakaolina kao zamjene za cement, uz dodatak vlakana banane. Kako bi se nadoknadila nedovoljna istraženost navedenih svojstava betona, cilj ovog istraživanja bio je razviti održivi beton modificiran industrijskim otpadom i prirodnim vlaknima, koji sadržava WFS i umjetni pijesak kao zamjenu za sitni agregat te metakaolin kao djelomičnu zamjenu za cement, uz neprekidno dodavanje 0,5 % vlakana od banane.

2. Materijal i metodologija

2.1. Materijali

U ovome istraživanju materijali poput cementa, krupnog agregata, WFS-a, umjetnog pijeska, metakaolina i vlakana banane upotrijebljeni su kao sastav za proizvodnju betona.

2.1.1. Cement

Za izradu betonskih uzoraka primijenjen je obični portland cement (OPC) razreda 53, proizvođača *Ultratech*, koji udovoljava zahtjevima norme IS:12269-1987 [43]. Finoća čestica cementa iznosila je 309 m²/kg, što je omogućilo bržu hidrataciju i razvoj čvrstoće [44]. Fizikalna svojstva cementa prikazana su u tablici 1. Kemijski sastav cementa prikazan je u tablici 2.

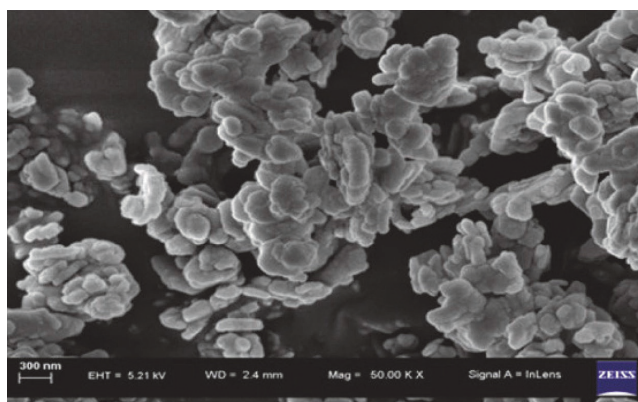
2.1.2. Metakaolin

U ovome istraživanju za pripremu betonskih uzoraka kao djelomična zamjena za cement upotrijebljen je komercijalno

Tablica 1. Fizikalna svojstva cementa

Svojstva	Finoća čestica [m ² /kg]	Normirana konzistencija [%]	Vrijeme vezanja		Tlačna čvrstoća [MPa]		
			Početno [min]	Konačno [min]	7 dana	14 dana	28 dana
OPC53	309	32	37	460	35,4	45,7	62,4

dostupan metakaolin kao mineralni dodatak. Udio metakaolina kao zamjene za cement u betonskoj mješavini iznosio je približno 10 %. Mnoga istraživanja [45, 46] izvijestila su da zamjena cementa metakaolinom u udjelu od 10 % znatno poboljšava svojstva betona. Uzeti uzorak metakaolina sušen je u peći na temperaturi od 100 do 110 °C radi uklanjanja vlage. Zatim je sitno smljeven i prosijan kako bi se omogućila jednolika raspodjela veličine čestica. Manja količina uzorka postavljena je na aluminijski stalak pomoću obostrane karbonske ljepljive trake radi stabilnosti. Za postizanje električne vodljivosti nanesen je tanki sloj zlata ili ugljika. Na kraju je uzorak postavljen u komoru skenirajućega elektronskog mikroskopa (SEM), a snimanje je provedeno u uvjetima visokog vakuumu. Mikroskopska slika metakaolina (slika 1.) pokazuje da ima uglatu, višeslojnu i mikroporoznu površinu, koja pokazuje veliku površinu i time potiče visoku pucolansku reaktivnost. Različita svojstva metakaolina određena su prema preporukama u skladu s normom IS:4031-1985 [47]. Kemijski sastav metakaolina prikazan je u tablici 2.



Slika 1. Mikroskopska slika metakaolina

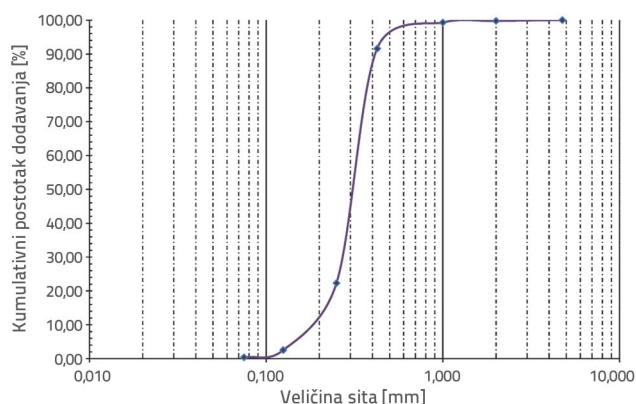
Tablica 2. Kemijski sastav cementa i metakaolina

Sastav	Cement [%]	Metakaolin [%]
SiO ₂	19,35	53,79
Al ₂ O ₃	4,79	40,03
MgO	1,39	0,34
Na ₂ O	0,05	0,09
SO ₃	3,34	-
CaO	68,64	0,14
Fe ₂ O ₃	1,21	1,45
K ₂ O	-	0,69
TiO ₂	-	2,21
P ₂ O ₅	-	0,05
LOI	1,23	1,21

2.1.3. Otpadni ljevaonički pijesak

Otpadni ljevaonički pijesak (WFS) nusproizvod je procesa lijevanja obojenih i crnih metala te je obično poluuglasta

ili zaobljena oblika. WFS primijenjen u betonskoj mješavini zamijenio je umjetni pijesak u udjelu od približno 70 %. Gotovo 50.000 ljevaonica diljem svijeta proizvede oko 69 milijuna metričkih tona odljevaka na godinu [49]. WFS primijenjen u ovoj betonskoj mješavini prikupljen je iz ljevaoničkih pogona u Coimbatoreu, Tamil Nadu u Indiji. Veličina čestica kretala se u rasponu od 4,75 mm do 150 µm, što odgovara granulometrijskoj zoni III. te je upotrijebljen u skladu s normom IS:383-2016 [48]. Raspored veličine čestica uzoraka WFS-a analizirana je prema normi IS:2386 (Dio-2)-1963 [50], kao što je prikazano na slici 2. U tablici 4. prikazana su svojstva WFS-a u skladu s preporukama normi IS:2386 (Dio-2)-1963 [50] i IS:2386 (Dio-3)-1963 [51]. Kemijska svojstva otpadnoga ljevaoničkog pijeska prikazana su u tablici 3.



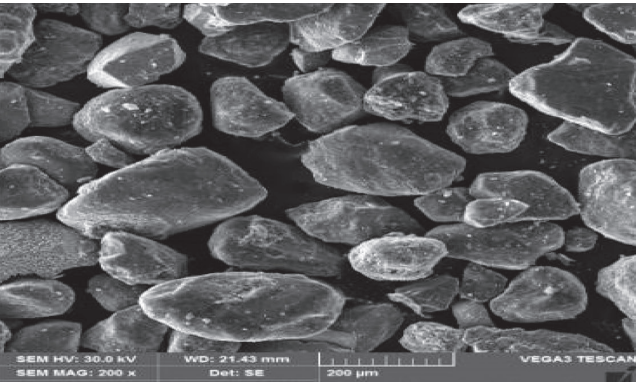
Slika 2. Raspored veličine čestica otpadnoga ljevaoničkog pijeska (engl. *Waste Foundry Sand - WFS*)

Tablica 3. Kemijski sastav WFS-a

Komponente	Sastav [%]
SiO ₂	98
Al ₂ O ₃	1,18
Fe ₂ O ₃	0,5
CaO	0,26
MgO	0,01
SO ₃	0,01
Na ₂ O	0,04

Uzorak otpadnoga ljevaoničkog pijeska (WFS) sušen je u pećnici na temperaturi između 100 i 110 °C kako bi se uklonila vlaga. Zatim je prosijan kako bi se osigurao jednolik raspored veličine čestica. Manja količina uzorka postavljena je na aluminijski stalak pomoću obostrane karbonske ljepljive trake radi stabilnosti. Pripremljeni WFS uzorak zatim je stavljen u komoru SEM-a, a snimanje je provedeno pomoću detektora sekundarnih elektrona (SE) ili povratno raspršenih elektrona (engl. *backscattered electron - BSE*) za analizu površinske

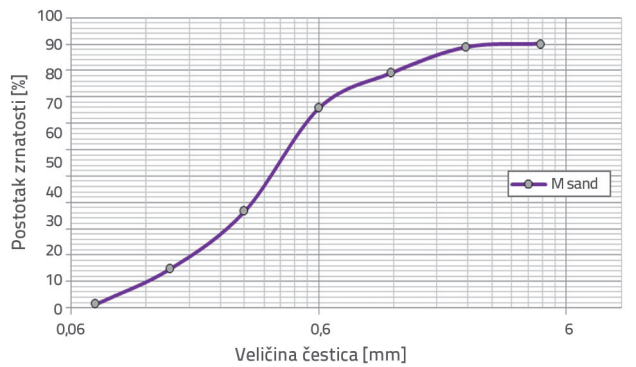
morfologije i karakteristika čestica. Mikroskopska (SEM) slika WFS-a prikazana na slici 3. otkriva da su čestice WFS-a uglate i nepravilne, što može biti posljedica trošenja i toplinskog naprezanja tijekom lijevanja. Ta uglatost može utjecati na svojstva pakiranja i vezivanja pijeska u primjenama kao što je beton. Prisutnost hrapave, neravne površine s porama ili šupljinama upućuje na to da su čestice pijeska bile podvrgnute toplinskome raspucavanju [52]. Ta hrapava tekstura može olakšati bolje vezivanje s cementom kada se primjenjuje u betonu i povećati mehaničko međusobno povezivanje.



Slika 3. Mikroskopska slika WFS-a

2.1.3. Umjetni pijesak (M-sand)

Kao sitni agregat za proizvodnju betona upotrijebljen je lokalno raspoloživ umjetni pijesak. Veličina čestica umjetnog pijeska kreće se od 4,75 mm do 150 mikrona i spada u granulacijsku zonu III. prema normi IS:383-2016 [48]. Analiza rasporeda veličina čestica umjetnog pijeska provedena je u skladu s normom IS:2386 (Dio-2)-1963 [50], što je prikazano na slici 4. U tablici 4. prikazana su svojstva umjetnog pijeska u skladu s preporukama normi IS:2386 (Dio-2)-1963 [50] i IS:2386 (Dio-3)-1963 [51]. Udjeli umjetnog pijeska kao zamjene za prirodni riječni pijesak u betonskoj mješavini iznosili su 100 % i 30 %.



Slika 4. Raspored veličine čestica umjetnog pijeska

Tablica 4. Svojstva umjetnog pijeska i WFS-a

Br.	Svojstva	Umjetni pijesak (M-sand)	Otpadni ljevaonički pijesak (WFS)
1,	Specifična gustoća	2,65	2,7
2,	Modul finoće	2,73	2,72
3,	Upijanje vode [%]	0,67	0,43
4,	Jedinična masa [kg/m³]	2590	2500

2.1.5. Krupni agregat

Krupni agregati koji se primjenjuju kao punila u betonu čine otprilike 90 % njegova ukupnog volumena. U ovome istraživanju za proizvodnju betona upotrijebljeni su krupni agregati s maksimalnom veličinom čestica od 20 mm. Ispitivanja specifične težine i vodoupojnosti provedena su u skladu s normom IS:2386 (Dio-3)-1963 [51], dok su vrijednosti otpornosti na drobljenje, udar i abraziju krupnog agregata ispitane u skladu s normom IS:2386 (Dio-4)-1963 [53], a dobiveni rezultati navedeni su u tablici 5.

Tablica 5. Svojstva krupnih agregata

Svojstva	Vrijednost
Vodoupojnost [%]	1,2
Specifična težina	2,69
Vrijednost otpornosti na drobljenje [%]	16,72
Vrijednost otpornosti na udar [%]	15,63
Vrijednost otpornosti na abraziju [%]	2,61
Modul finoće	5,15

2.1.6. Voda

U ovome istraživanju za proizvodnju betona primijenjena je vodovodna voda bez organskih spojeva, ulja, lužina, kiselina, soli i šećera. pH-vrijednost vode primijenjene za betonsku mješavinu iznosila je 7,1, čime su ispunjeni zahtjevi norme IS:456-2000 [54] za proizvodnju betona.

2.1.7. Vlakna banane

Ugradnjom vlakana banane znatno su poboljšana mehanička svojstva betona, posebno tlačna i vlačna čvrstoća cijepanjem. Vlakna banane primijenjena u ovome istraživanju prikupljena su iz lokalnog sela u indijskoj saveznoj državi Tamil Nadu i podvrgnuta obradi prije dodavanja u beton. Vlakna stabljike banane ekstrahirana su tehnikom namakanja u vodi. Stablo banane, prikazano na slici 5., izrezano je na duljinu od približno 500 mm, zatim je ručno razdijeljeno na manje dijelove (slika 6.) i uronjeno u vodu na 14 dana. Voda prodire u središnji dio stabljike tako da razara vanjski sloj, nakon čega se vlakna odvajaju kao što je to prikazano na slici 7.



Slika 5. Biljka banane



Slika 6. Stabljika banane



Slika 7. Ekstrahirana vlakna banane



Slika 8. Obrađena vlakna

Ekstrahirana vlakna podvrgnuta su alkalnoj obradi kako bi se uklonile necelulozne komponente poput hemiceluloze i lignina. Otopina NaOH pripremljena je razrjeđivanjem 3-postotnog masenog udjela NaOH u 250 ml destilirane vode. Vlakna banane natapala su se u pripremljenoj otopini NaOH tijekom 1 sata na sobnoj temperaturi uz povremeno miješanje kako bi se uklonili celuloza, hemiceluloza, pektin i lignin. Vlakna su zatim nekoliko puta isprana destiliranom vodom kako bi se s njihovih površina uklonila svaka alkalna otopina. Potom su neutralizirana razrijeđenom 5-postotnom (w/v) limunskom kiselinom i više puta očišćena vodom. Zatim su ostavljena da se nekoliko sati suše na otvorenome zraku i dodatna 24 sata na temperaturi od 60 °C u pećnici. Obrađena vlakna banane prikazana su na slici 8. Dobivena vlakna izrezana su na jednake duljine (25 mm dužine i 0,24 mm promjera), kao što je to prikazano na slici 9. Udio vlakana banane primijenjenih u betonskoj mješavini iznosio je 0,5 % mase cementa. Mnoga istraživanja [55, 56] izvijestila su da dodatak od 0,5 % vlakana banane znatno poboljšava svojstva betona. Fizikalna svojstva vlakana banane ispitana su u skladu sa smjernicama ASTM D3822 [57] i prikazana u tablici 6.



Slika 9. Vlakna banane

Tablica 6. Fizikalna svojstva vlakana banane

Svojstva	Vrijednost
Duljina	25 mm
Promjer	0,24 mm
Omjer duljine i promjera	104
Youngov modul	3,5 MPa
Maksimalna čvrstoća	56 MPa
Postotak izduženje	10,35
Udio vlage	11 %

2.2. Metodologija

Ovo istraživanje ispituje kombinirani učinak zamjene sitnog agregata otpadnim ljevaoničkim pijeskom (WFS) i umjetnim pijeskom te zamjene cementa s 10 % metakaolina, uz dodatak 0,5 % vlakana banane, na mehanička svojstva betona. Prema

Tablica 7. Sastav mješavine

Oznaka	Cement [kg/m³]	Voda [kg/m³]	Metakaolin [kg/m³]	Umjetni pijesak [kg/m³]	Otpadni ljevaonički pijesak [kg/m³]	Krupni agregat [kg/m³]	Vlakna banane [kg/m³]
CC	413	185,85	-	682	-	1167	-
F100	413	185,85	-	-	682	1167	-
F70S30	413	185,85	-	204,6	477,4	1167	-
F70S30M	371,7	185,85	41,3	204,6	477,4	1167	-
F70S30MB	371,7	185,85	41,3	204,6	477,4	1167	2.065

normi IS:10262-2019 [58] izrađen je omjer sastojaka za beton klase C 20/25 (stara oznaka M25), a pripremljeno je oko 15 pokusnih mješavina s varijacijama u udjelima cementa, umjetnog pijeska, krupnog agregata i vode u cilju postizanja ciljne čvrstoće od 31,6 MPa nakon 28 dana. Referentna mješavina koja je zadovoljila ciljne zahtjeve čvrstoće i obradivosti zatim je modificirana prema predloženi zamjenama. Brojna ispitivanja osmišljena su i provedena u skladu s preporukama *Bureau of Indian Standards* (BIS) i *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Betonske mješavine izrađene u ovome istraživanju prikazane su u tablici 7.

3. Eksperimentalna ispitivanja

3.1. Priprema uzoraka betona

Za CC mješavinu cement, umjetni pijesak i krupni agregat mjereni su i dozirani u potrebnim količinama prema projektiranome omjeru mješavine. Zatim su materijali stavljeni u betonsku miješalicu i miješani suho tijekom 1 minute. Nakon toga dodavana je voda uz neprekidno miješanje. Ukupno vrijeme miješanja iznosilo je 90 sekundi da se postigne homogena smjesa cementa, vode, sitnog i krupnog agregata u svakoj seriji. Svježe pripremljeni beton, kao što je to prikazano na slici 10., ispitan je na obradivost pomoću Abramsova stošca za mjerenje slijeganja u skladu s normom IS:1199.-1959. [59].



Slika 10. Betonska smjesa



Slika 11. Ispitni uzorci

Testiranje obradivosti provedeno je primjenom stošca visine 300 mm, s gornjim promjerom od 100 mm i donjim promjerom od 200 mm. Istodobno je beton ulijevan u kockasti kalup dimenzija 100 × 100 × 100 mm, cilindrični kalup od 200 mm visine i 100 mm promjera te kalup u obliku prizme od 100 × 100 × 500 mm, a kako je to prikazano na slici 11. Uzorci su izrađeni u čeličnim kalupima prema normi IS:516-2021 [60] i zbijeni u dva ravnomjerna sloja pomoću stola za vibraciju radi izazivanja vanjskih vibracija prema preporukama ACI 544-1996 [61] kako bi se postigla odgovarajuća zbijenost betona. Nakon 24 sata sušenja vlagom uzorci za ispitivanje izvađeni su iz kalupa i uronjeni u spremnik za sušenje na 7, 14 i 28 dana od dana lijevanja. Postupak je primijenjen na betonske mješavine CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB prema njihovim specifičnim omjerima sastojaka navedenima u tablici 7. Ukupno je izrađeno po 45 uzoraka u obliku prizme nakon 7, 14 i 28 dana kako bi se odredile tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje za mješavine CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB.

3.2. Mehanička svojstva i metode ispitivanja

Tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje betonskih mješavina CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB mjerene su nakon 7, 14 i 28 dana očvršćivanja, pri čemu su uzorci u obliku kocke, cilindra i prizme prema IS:516-2021 [60] testirani pomoću uređaja za ispitivanje tlačne čvrstoće (CTM) i univerzalnog stroja za ispitivanje (UTM), a kao što je to prikazano na slikama 12. – 14. Tri uzorka ispitana su kako bi se izmjerile prosječna tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem i čvrstoća na savijanje svih mješavina u tri starosti.



Slika 12. Postavka za ispitivanje tlačne čvrstoće



Slika 13. Postavka za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem



Slika 14. Postavka za ispitivanje čvrstoće na savijanje

4. Rezultati i rasprave

4.1. Obradivost betona

Obradivost betonskih mješavina CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB u vezi sa slijeganjem prikazana je u tablici 8. U skladu s normama IS:1199-2018 [59] i IS:456-2000 [54], vrijednosti slijeganja pripremljenih mješavina spadaju u kategorije visokog i srednjeg stupnja obradivosti. Mješavina CC imala je slijeganje od 150 mm, što je omogućilo visok

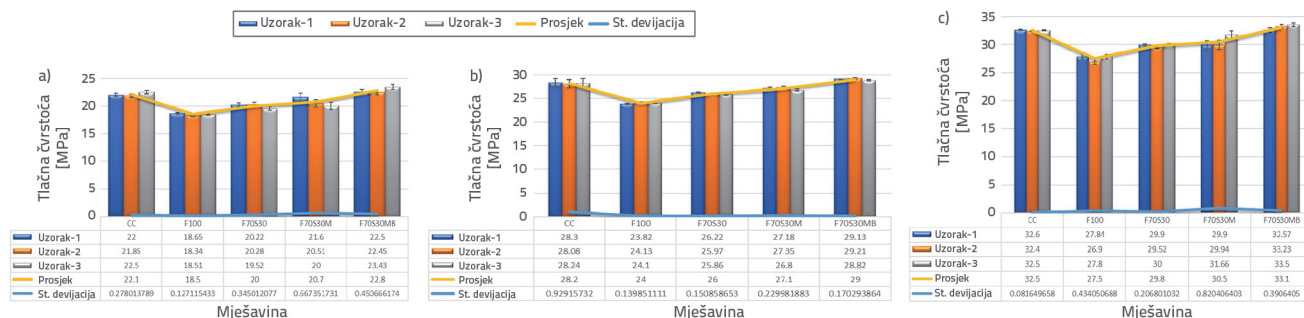
stupanj obradivosti i olakšalo zbijanje betona. Mješavina F100 postigla je slijeganje od 115 mm, što također označava visok stupanj obradivosti, ali je bio za 23,33 % manji od vrijednosti CC mješavine zbog uglata oblika čestica WFS-a. Taj rezultat potvrđuje zaključke Parashara i suradnika [62], koji su također istaknuli da upotreba čestica WFS-a smanjuje slijeganje betona zbog svoje uglatosti. Sličan rezultat zabilježili su Akmal i sur. [63], koji su izvijestili da primjena čestica uglata oblika u betonu negativno utječe na protočnost smjese. Mješavina F70S30 imala je slijeganje od 100 mm, što je za 33,33 % niže od vrijednosti CC mješavine, no i dalje je zadržala visok stupanj obradivosti. Mješavina F70S30M imala je slijeganje od 110 mm, što je bilo za 26,67 % niže od CC mješavine, što upućuje na visok stupanj obradivosti unatoč udjelu metakaolina, koji obično smanjuje fluidnost smjese. Mješavina F70S30MB postigla je slijeganje od 75 mm, što je za 50 % niže od CC mješavine i 34,78 % niže od F100 mješavine. Smanjenje slijeganja u mješavini F70S30 u odnosu na F100 posljedica je hrapavije teksture i veće vodoupojnosti umjetnog pijeska. Najniža vrijednost slijeganja zabilježena je kod mješavine F70S30MB, ponajprije zbog veće vodoupojnosti uzrokovane vlaknima i njezina učinka međusobnog povezivanja, što dodatno ograničava obradivost. Unatoč tome mješavina F70S30MB zadržala je srednji stupanj obradivosti.

Tablica 8. Vrijednosti slijeganja različitih mješavina

Betonska smjesa	Vrijednost slijeganja [mm]	Stupanj obradivosti
CC	150	Visok
F100	115	Visok
F70S30	100	Visok
F70S30M	110	Visok
F70S30MB	75	Srednji

4.2. Tlačna čvrstoća betona

Na slikama 15.a do 15.c grafički su prikazane promjene tlačnih čvrstoća betonskih mješavina CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB tijekom različitih dana sušenja. Tlačne čvrstoće mješavine F100 bile su za 16,3 %, 14,9 % i 15,4 % niže od onih CC mješavine nakon 7, 14 i 28 dana. Drugim riječima, potpuna zamjena umjetnog pijeska WFS-om u betonu smanjila je njegovu tlačnu čvrstoću za 15 %. To smanjenje može biti posljedica grube teksture čestica WFS-a, što može spriječiti odgovarajuće zbijanje. Gruba tekstura, posebno ona nepravilnih ili uglatih čestica, sprječava stvaranje gusto zbijene betonske strukture tijekom zbijanja. Zatvorene zračne šupljine nastale nepravilnim zbijanjem djeluju kao slabe točke, čime smanjuju tlačnu čvrstoću betona. Tlačne čvrstoće mješavine F70S30 bile su za 9,5 %, 7,8 % i 8,3 % niže od onih CC mješavine nakon 7, 14 i 28 dana. Međutim, tlačne čvrstoće mješavine F70S30 bile su za 8,1 %, 8,3 % i 8,4 % veće od onih mješavine F100 nakon 7, 14 i 28 dana. Mješavina F70S30 postigla je gotovo 94 % tlačne čvrstoće CC-a nakon 28



Slika 15. Razlika u tlačnoj čvrstoći različitih betonskih mješavina: a) nakon 7 dana; b) nakon 14 dana; c) nakon 28 dana

dana. Uključivanje umjetnog pijeska u omjeru od 30 % zajedno s WFS-om poboljšalo je čvrstoću poboljšanjem pakiranja i vezivanja čestica unutar mješavine, čime se ublažavaju nekih od nedostataka primjene samo WFS-a u betonu. Uočeno je da je tlačna čvrstoća mješavine F70S30M, koja ima udio od 70 % WFS-a, 30 % umjetnog pijeska i 10 % metakaolina za cement, nakon 28 dana bila slična tlačnoj čvrstoći CC mješavine nakon 28 dana, s razlikom od samo 6 %. Međutim, tlačna čvrstoća mješavine F70S30M bila je veća od čvrstoće mješavina F100 i F70S30 zbog dodatka metakaolina. Tlačne čvrstoće mješavine F70S30M bile su za 11,9 %, 12,9 % i 10,9 % veće od čvrstoća mješavine F100 nakon 7, 14 i 28 dana. To pokazuje da udio metakaolina može nadoknaditi neke od gubitaka čvrstoće povezanih s upotrebom 100 % WFS-a. Metakaolin, pucolanski materijal, povećava čvrstoću na tlak potičući stvaranje dodatnoga kalcij-silikatnog hidrata (C-S-H) koji zgušnjava betonsku matricu i time doprinosi povećanju tlačne čvrstoće. Mješavina F70S30MB, koja ima udio od 70 % vodene trske i 30 % umjetnog pijeska, zajedno s 10 % metakaolina kao zamjene za cement i 0,5 % dodatka vlakana banane, postigla je tlačnu čvrstoću od 22,8 MPa nakon 7 dana, 29 MPa nakon 14 dana i 33,1 MPa nakon 28 dana. Utvrđeno je da je tlačna čvrstoća mješavine F70S30MB bila za 1,8 % odnosno 20,4 % veća od tlačnih čvrstoća mješavina CC i F100 nakon 28 dana, što dodatno premašuje ciljanu tlačnu čvrstoću betona razreda C 20/25 (stara oznaka M25). Kavitha i sur. [29] zaključili su da upotreba više od 40 % WFS-a kao sitnog agregata u betonu smanjuje tlačnu čvrstoću. Nasuprot tomu ovo je istraživanje dokazalo da je uključivanje 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska kao zamjene za sitni agregat, zajedno s 10 % metakaolina kao zamjene za cement i 0,5 % dodatka vlakana banane, dovodi do blagog poboljšanja čvrstoće na tlak i postizanja čvrstoće koja je jednaka onoj kod CC mješavine. To znači da se WFS može upotrebljavati u visokim udjelima, a da se ne ugrozi čvrstoća, ako se upotrebljavaju metakaolin i vlakna banane. Zato ovaj pristup poboljšava održivost betona i doprinosi primjeni otpada u građevinskoj industriji. Reshma i sur. [30] izvijestili su da je nakon zamjene više od 40 % sitnog agregata WFS-om u betonu tlačna čvrstoća betona s letećom pepelom opadala, no da je bila za 8,32 % veća od čvrstoće referentne mješavine nakon 90 dana. Za razliku od prethodnih rezultata, ovo istraživanje pokazalo je da je mješavina s 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska kao zamjene za prirodni sitni

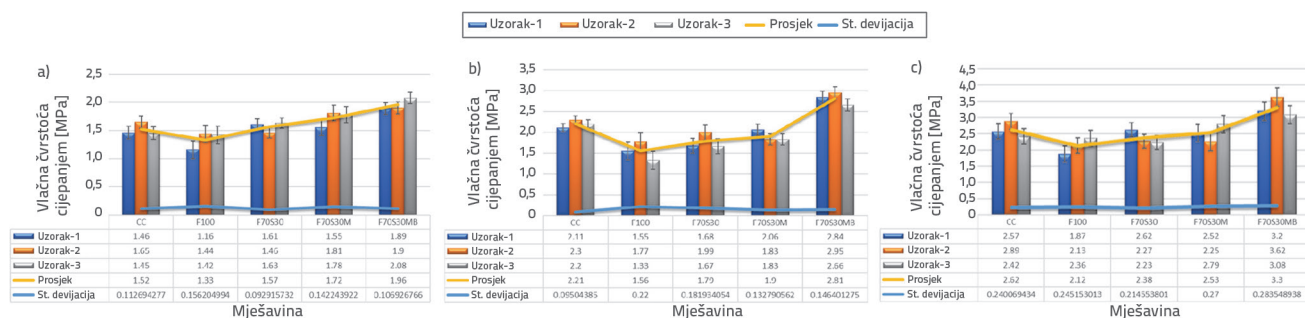
agregat, uz dodatak 10 % metakaolina umjesto cementa i 0,5 % vlakana banane, dovela do poboljšanja rane tlačne čvrstoće, koja je bila za 1,8 % viša od čvrstoće kontrolne mješavine nakon 28 dana. To pokazuje da kombiniranje WFS-a s umjetnim pijeskom, metakaolinom i vlaknima banane poboljšava čvrstoću u kraćemu razdoblju sušenja, potičući brža, održiva betonska rješenja, a da se pritom ne ugrozi izvedba. Kombinirani dodatak metakaolina i vlakana banane ima sinergijski učinak na svojstva čvrstoće betona. Pucolanska reakcija povećava cementnu matricu, dok vlakna banane mogu premostiti mikropukotine nastale tijekom opterećenja [64, 65], čime se poboljšava žilavost materijala. Zai i sur. [66] izvijestili su da je upotreba 50 % WFS-a kao zamjene za sitni agregat uz dodatak 1 % stakla uzrokovala smanjenje tlačne čvrstoće za 9,51 %. Međutim, tlačna čvrstoća koja je bila za približno 1,8 % veća od čvrstoće referentne mješavine postignuta je upotrebom 0,5 % vlakana banane zajedno s 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska kao zamjena za sitni agregat te 10 % metakaolina umjesto cementa nakon 28 dana. Ovo istraživanje ističe potencijal primjene vlakana banane kao održive alternative tradicionalnim sintetičkim vlaknima poput staklenih vlakana u betonu. Osim toga kombinirana upotreba alternativnih sitnih agregata poput WFS-a i umjetnog pijeska zajedno s dodatnim materijalima poput metakaolina predstavlja učinkovitu strategiju za održivu proizvodnju betona. Taj pristup ne samo da poboljšava izvedbu betona, već i smanjuje utjecaj na okoliš smanjenjem ovisnosti o prirodnim materijalima. Zaključeno je da dodavanje WFS-a i umjetnog pijeska u beton bez uključivanja SCM-ova poput metakaolina i banana vlakana rezultira smanjenjem čvrstoće. Slične rezultat imali su Safiuddin i sur. [67] te Raman i sur. [68], koji su izvijestili da dodavanjem kamenolomske prašine kao zamjene za sitni agregat u betonu, bez uvođenja SCM-ova poput letećeg pepela, dovodi do smanjenja čvrstoće.

4.3. Vlačna čvrstoća betona pri cijepanju

Na slikama 16.a do 16.c grafički su prikazane vlačne čvrstoće cijepanjem betonskih mješavina CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB tijekom različitih dana očvršćivanja. Vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine F100 koja ima udio od 100 % WFS-a bile su za 12,5 %, 11,3 % i 11,5 % niže od čvrstoće CC mješavine nakon 7, 14 i 28 dana. Uočeno je da 100-postotna zamjena umjetnog pijeska WFS-om smanjuje vlačnu čvrstoću cijepanjem, pri

čemu mješavina F100 pokazuje za 12,5 %, 11,3 % i 11,5 % niže vrijednosti od mješavine CC. Neravne i hrapave površine čestica WFS-a s vidljivim porama, kao što je to prikazano na mikroskopskoj slici (slika 2.), uzrokovane toplinskim raspucavanjem tijekom procesa lijevanja, mogle bi poboljšati njihovo mehaničko povezivanje s cementnom pastom u betonu. Međutim, hrapavost agregata može poboljšati određena svojstva vezivanja koja su odsutna kod učinkovitosti pakiranja i kohezije umjetnog pijeska [69]. Ta pojava zabilježena je i u ovome istraživanju, gdje je uočeno smanjenje vlačne čvrstoće cijepanjem pri upotrebi otpadnoga ljevaoničkog pijeska (WFS) kao sitnog agregata u betonu. Međutim, mješavina F70S30 pokazala je vlačne čvrstoće cijepanjem koje su bile za 9,5 %, 7,8 % i 8,3 % više od onih referentne mješavine (CC) nakon 7, 14 i 28 dana. Uključivanje sitnijih i glatkijih čestica umjetnog pijeska ublažilo je te učinke popunjavanjem praznina između čestica WFS-a. Time su poboljšani kohezija i zbijenost mješavine, što je rezultiralo većom vlačnom čvrstoćom cijepanjem. Slično tomu vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine F70S30 bile su za 18 %, 14,74 % i 12,24 % više od vrijednosti mješavine F100 nakon 7, 14 i 28 dana. Mješavina F70S30M postigla je vlačnu čvrstoću cijepanjem od 1,72 MPa nakon 7 dana, 1,90 MPa nakon 14 dana i 2,53 MPa nakon 28 dana. Vlačne čvrstoće cijepanjem mješavine F70S30M bile su za 29,32 %, 21,7 % i 19,33 % veće od čvrstoća mješavine F100 nakon 7, 14 i 28 dana. Visoka čvrstoća mješavine F70S30M posljedica je kombiniranog učinka metakaolina i umjetnog pijeska. Umjetni pijesak, zahvaljujući sitnijim česticama, poboljšava pakiranje i gustoću betonske strukture, dok metakaolin svojom pucolanskom reakcijom s kalcijevim hidroksidom stvara dodatni kalcij-silikatni hidrat (C-S-H gel), čime se poboljšava cementna matrica i povećava vlačna čvrstoća cijepanjem. Mješavina F70S30MB postigla je vlačnu čvrstoću cijepanjem od 1,96 MPa nakon 7 dana, 2,81 MPa nakon 14 dana i 3,3 MPa nakon 28 dana. Vlačna čvrstoća cijepanjem mješavine F70S30MB bila je za 25,9 % odnosno 55,6 % veća od čvrstoće mješavina CC i F100 nakon 28 dana. Ta veća vlačna čvrstoća uzrokovana je kombiniranim učinkom metakaolina, umjetnog pijeska i banana vlakana. Sitnije čestice umjetnog pijeska ispunile su praznine između čestica WFS-a, čime su poboljšale gustoću i koheziju betonske mješavine. Pucolanskom reakcijom s kalcijevim hidroksidom metakaolin je stvorio dodatni C-S-H gel, koji je ojačao cementnu matricu

i poboljšao vezivanje. Dodavanje vlakana banane dodatno je povećalo vlačnu čvrstoću u usporedbi s betonskom mješavinom bez vlakana premošćivanjem mikropukotina nastalih tijekom opterećenja. Dobiveni rezultati u skladu su s nalazima prethodnih istraživanja [30, 36, 42, 70, 71]. Liu i sur. [36] izvjestili su o povećanju vlačne čvrstoće cijepanjem od 33,5 % upotrebom 34 % WFS-a, 20 % letećeg pepela i 2,3 % čeličnih vlakana, dok je u ovome istraživanju postignuto povećanje od 55,6 % dodavanjem 70 % WFS-a, 30 % umjetnog pijeska, 10 % metakaolina i 0,5 % vlakana banane. Salim i sur. [70] procijenili su utjecaje usitnjenoga primijenjenog ljevaoničkog pijeska (engl. *Pulverised Used Foundry Sand* - PUFs) kao mineralnog dodatka u omjeru od 5 %, 10 %, 15 % i 20 %. Dodatak od 5 %, 10 %, 15 % i 20 % PUFs-a u betonsku mješavinu povećao je vlačnu čvrstoću cijepanjem za 4,68 %, 9,72 %, 11,46 % i 7,99 %. Nasuprot tomu u ovom je istraživanju dokazano da dodavanje 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska za sitni agregat, zajedno s 10 % metakaolina kao zamjene za cement i 0,5 % dodatka vlakana banane, dovodi do povećanja vlačne čvrstoće cijepanjem za 55,6 %. To znatno poboljšanje vlačne čvrstoće cijepanjem ističe učinkovitost kombiniranja visokog udjela WFS-a i umjetnog pijeska kao sitnog agregata umjesto primjene WFS-a kao mineralnog dodatka u betonu. Sandhu i Siddique [71] izvjestili su da je dodavanje WFS-a u rasponu od 5 % do 30 % smanjilo vlačnu čvrstoću betona s dodatkom letećeg pepela za od 3,63 % do 11,03 % u usporedbi s referentnom mješavinom nakon 28 dana. Za razliku od istraživanja Reshme i sur. [30], koji su zabilježili porast vlačne čvrstoće cijepanjem od 8,91 % dodavanjem 40 % WFS-a, u ovom je istraživanju zabilježeno najveće povećanje od 55,6 % pri upotrebi 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska kao sitnih agregata, uz dodatak 10 % metakaolina i 0,5 % vlakana banane nakon 28 dana. Dobiveni rezultati upućuju na to da se primjenom većeg udjela WFS-a, u kombinaciji s umjetnim pijeskom, metakaolinom i vlaknima banane, može znatno poboljšati vlačna čvrstoća cijepanjem betona, nadmašujući rezultate modificiranih mješavina iz prethodnih istraživanja te doprinoseći razvoju održive gradnje. Mouli i sur. [42] upotrijebili su 15 % metakaolina kao zamjenu za cement, a dodavanjem 3 % vlakana banane povećana je vlačna čvrstoća cijepanjem za 43,39 % nakon 28 dana. Ovo istraživanje pokazalo je da se već dodavanjem samo 0,5 % vlakana banane, uz 70 % WFS-a, 30



Slika 16. Razlika u vlačnoj čvrstoći cijepanjem različitih betonskih mješavina: a) nakon 7 dana; b) nakon 14 dana; c) nakon 28 dana

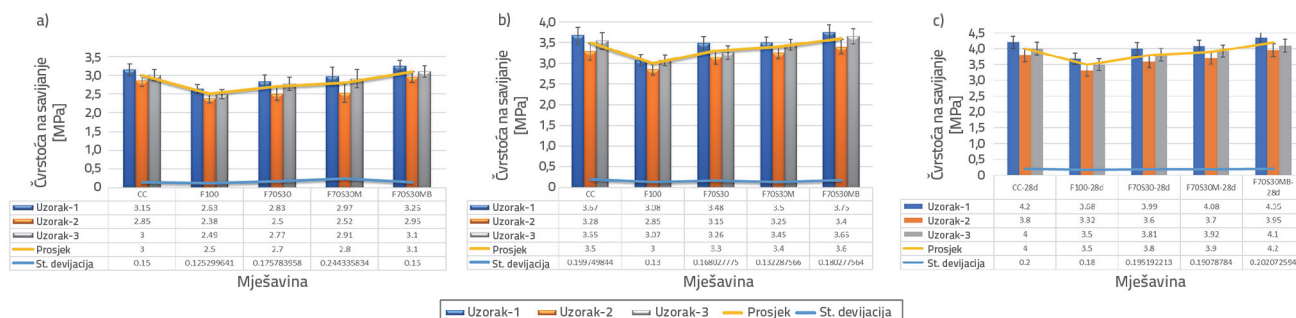
% umjetnog pijeska i 10 % metakaolina, može postići povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem od čak 55,6 % nakon 28 dana. Rezultati pokazuju da čak i niži postotak vlakana banane (0,5 %) može znatno doprinijeti vlačnoj čvrstoći. Nadalje, rezultati pokazuju da primjena WFS-a i umjetnog pijeska kao sitnog agregata, zajedno s metakaolinom i vlaknima banane kao dodacima, potiče održive prakse u gradnji.

4.4. Čvrstoća betona na savijanje

Na slikama 17.a do 17.c grafički su prikazane čvrstoće na savijanje betonskih mješavina CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB nakon različitog broja dana sušenja. Čvrstoće mješavine F70S30 bile su za 10 %, 5,7 % i 5 % niže od čvrstoća CC mješavine nakon 28 dana. Za razliku od toga Kumar i sur. [72] utvrdili su da je čvrstoća na savijanje betonske mješavine koja ima udio od 50 % WFS-a i 50 % umjetnog pijeska kao sitnog agregata bila za 12,86 % veća od čvrstoće CC mješavine koja sadržava 100 % umjetnog pijeska kao sitnog agregata nakon 90 dana. To upućuje na to da visok udio WFS-a može poboljšati čvrstoću betona na savijanje, posebno pri duljim razdobljima sušenja. Međutim, ovo je istraživanje pokazalo da su čvrstoće na savijanje F70S30 bile za 8 %, 10 % i 8,57 % više od čvrstoća mješavine F100. Ta veća čvrstoća mješavine F70S30 u odnosu na mješavinu F100 posljedica je boljeg zbijanja uzrokovanog sinergijskim učinkom umjetnog pijeska i WFS-a u betonskoj mješavini. Utvrđeno je da je savojna čvrstoća mješavine F70S30M bila za 6,7 %, 2,9 % i 2,5 % niža od čvrstoće CC mješavine. Međutim, čvrstoće na savijanje mješavine F70S30M bile su za 8 %, 10 % i 8,6 % veće od čvrstoća mješavine F100 nakon 6, 14 i 28 dana. Slično tome utvrđeno je da je čvrstoća mješavine F70S30M nešto veća (3,7 %, 3,03 % i 2,63 %) od čvrstoće mješavine F70S30 nakon 7, 14 i 28 dana. To blago povećanje čvrstoće na savijanje mješavine F70S30M u odnosu na mješavinu F70S30 posljedica je pucolanske reakcije metakaolina, koja je poboljšala betonsku matricu stvaranjem više C-S-H gela, što je dovelo do boljeg vezivanja i kohezije. To upućuje na to da metakaolin djelomično kompenzira smanjenu čvrstoću na savijanje uzrokovanu WFS-om.

Čvrstoće na savijanje mješavine F70S30MB, koje su imale udjele od 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska kao sitnog agregata, 0,5 % vlakana banane i 10 % metakaolina kao zamjene za cement, bile su za 3,3 %, 2,9 % i 5 % veće od čvrstoća na savijanje CC

mješavina nakon 7, 14 i 28 dana. Dodavanjem vlakana banane poboljšavaju se svojstva na savijanje premošćivanjem mikropukotina, poboljšavajući apsorpciju energije i povećavajući otpornost na širenje pukotina. Slično tome čvrstoće na savijanje mješavine F70S30MB bile su za 24 %, 20 % i 20 % veće od čvrstoća mješavine F100 nakon 7, 14 i 28 dana. Reshma i sur. [30] uočili su da zamjena 30 % sitnog agregata WFS-om može povećati čvrstoću na savijanje za 7,57 % nakon 90 dana, dok je u ovome istraživanju zabilježeno 5-postotno povećanje čvrstoće na savijanje dodavanjem 70 % WFS-a, 30 % umjetnog pijeska, 10 % metakaolina i 0,5 % vlakana banane nakon 28 dana. Iako je u ovome istraživanju zabilježeno umjereno povećanje čvrstoće na savijanje, optimirana mješavina koja ima veći udio WFS-a u kombinaciji s umjetnim pijeskom, metakaolinom i vlaknima banane pokazala se kao održivo rješenje koje omogućuje rano poboljšanje svojstava betona na savijanje, potvrđujući njezinu prikladnost za ekološki prihvatljivu gradnju uz zadovoljavajuća mehanička svojstva. Selvarani i Prabhavathy [37] primijetili su da je zamjena 10 % sitnog agregata WFS-om uz dodatak 1 % polipropilenskih vlakana rezultirala povećanjem čvrstoće na savijanje od 4,1 % nakon 28 dana očvršćivanja. Za usporedbu, u ovom je istraživanju upotrijebljeno 70 % WFS-a, 30 % umjetnog pijeska, 10 % metakaolina i 0,5 % vlakana banane u betonu kako bi se povećala čvrstoća na savijanje za 5 % nakon 28 dana. U skladu s time čvrstoća na savijanje može se još učinkovitije povećati kombiniranjem visokog udjela WFS-a, prirodnih vlakana (vlakna banane) i dodatnih materijala poput metakaolina nego kombiniranjem nižeg udjela WFS-a s ojačanjem poput sintetičkih vlakana. Nasuprot tomu Aggarwal i Siddique [73] izvijestili su da je zamjena sitnog agregata kombinacijom WFS-a i letećeg pepela rezultirala smanjenjem čvrstoće na savijanje od 7,66 % do 18,92 % nakon 28 dana. Za razliku od njega ovo je istraživanje pokazalo da se dodavanjem 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska kao zamjene za sitni agregat, 10 % metakaolina i 0,5 % vlakana banane u beton čvrstoća na savijanje poboljšava za 5 % nakon 28 dana. Usporedbom rezultata ovog istraživanja s rezultatima istraživanja koje su proveli Aggarwal i Siddique [73] utvrđeno je da primjena visokog udjela WFS-a u betonu, uz dodavanje metakaolina i vlakana banane, poboljšava njegovu čvrstoću na savijanje, čime se nadmašuju rezultati Aggarwala i Siddiquea [73] dobiveni kombinacijom WFS-a i letećeg pepela.



Slika 17. Razlika u čvrstoći na savijanje različitih betonskih mješavina: a) nakon 7 dana; b) nakon 14 dana; c) nakon 28 dana

Tablica 9. Ugrađena energija i ugljik betonskih mješavina CC i F70S30MB

Komponenta	Ugrađena energija [MJ/m ³]		Ugrađeni ugljik [kg CO ₂ -eq/m ³]	
	Mješavina CC	Mješavina F70S30MB	Mješavina CC	Mješavina F70S30MB
Cement	2416,05	2174,44	384,09	345,68
Voda	0	0	0	0
Metakaolin	0	53,69	0	10,32
Umjetni pijesak	55,24	16,57	2,73	0,82
Krupni agregat	98,86	96,86	5,83	5,83
WFS	0	38,67	0	1,91
Vlakna banane	0	0	0	0
Ukupno	2570,15	2380,23	392,65	364,56

4.5. Ugrađena energija i ugljik betona

Svrha ovog istraživanja bila je unaprijediti proizvodnju betona s težištem na održivosti. Zato je mjerenje ugrađene energije i ugljika u modificiranim betonskim mješavinama bilo ključno. Analizom mehaničkih svojstava betonskih mješavina CC, F100, F70S30, F70S30M i F70S30MB utvrđeno je da je mješavina F70S30MB najpovoljnije rješenje, jer postiže uravnotežen odnos između čvrstoće i održivosti, pri čemu dodatak otpadnoga ljevaoničkog pijeska kao sitnog agregata doprinosi poboljšanim mehaničkim svojstvima. Zato su utvrđene vrijednosti ugrađene energije i emisije ugljika za betonsku mješavinu F70S30MB te su uspoređene s odgovarajućim vrijednostima za referentnu CC mješavinu. Ugrađena energija jest ukupna energija utrošena na vađenje, proizvodnju, transport i obradu svih materijala primijenjenih u betonskoj mješavini. Ugrađene emisije ugljika definirane su kao emisije CO₂ povezane s tim procesom. Procjena tih čimbenika olakšava određivanje utjecaja svake proizvedene betonske mješavine na okoliš. Ugrađena energija i ugljik betonske mješavine F70S30MB određeni su prema bazi podataka Inventara ugljika i energije (ICE) i u usporedbi s ugrađenom energijom i ugljikom mješavine CC. Ugrađena energija i ugljik betonskih mješavina CC i F70S30MB navedeni su u tablici 9.

Ugrađena energija i ugljik betonske mješavine F70S30MB bili su za 7,39 % odnosno 7,16 % niži od onih mješavine CC. Upotreba betonske mješavine F70S30MB u građevinskim projektima važan je korak prema održivoj proizvodnji betona. Smanjenje ugrađene energije i ugljika rezultat je inovativnih sastava materijala koji potiču upotrebu SCM-ova i recikliranih agregata. Ta su smanjenja doprinijela ne samo smanjenju utjecaja na okoliš, već su u skladu sa širim ciljevima održivosti unutar građevinske industrije, otvarajući put ekološki prihvatljivim građevinskim praksama. Modificirana betonska mješavina F70S30MB podržava i usklađena je s Ciljevima održivog razvoja (engl. *Sustainable Development Goals* - SDG) Ujedinjenih naroda 9, 11, 12 i 13. Usvajanjem održivih materijala i smanjenjem negativnog utjecaja građevinskih aktivnosti na okoliš ovaj pristup doprinosi izgradnji otpornije, resursno učinkovitije i ekološki prihvatljivije infrastrukture.

5. Zaključak

U ovome radu ispitana su mehanička svojstva održivog betona koji sadržava otpadni ljevaonički pijesak i umjetni pijesak kao sitne agregate, s djelomičnom zamjenom cementa metakaolinom i neprekidnim dodavanjem 0,5 % vlakana banane. Zaključci izvedeni iz ovog istraživanja jesu:

- Vrijednosti slijeganja mješavine F70S30MB smanjile su se zbog uglatog oblika čestica WFS-a i dodavanja vlakana banane. Međutim, smjesa zadržava srednji stupanj obradivosti, što je pogodno za primjenu u gradnji.
- Dodavanje 70 % WFS-a, 30 % umjetnog pijeska, 10 % metakaolina i 0,5 % vlakana banane u beton rezultiralo je održivom mješavinom čiji su mehanička svojstva bila jednaka ili bolja od svojstava konvencionalnog betona.
- U ovom je istraživanju pokazano da mješavina F70S30MB, koja se sastoji od 70 % WFS-a i 30 % umjetnog pijeska kao zamjene za sitni agregat, 10 % metakaolina kao zamjene za cement i 0,5 % banana vlakana, poboljšava ranu čvrstoću. Ona je postigla za 1,8 %, 5 % i 55,6 % veću tlačnu, vlačnu i čvrstoću na savijanje u odnosu na referentnu mješavinu nakon 28 dana.
- Ugrađena energija i ugljik betonske mješavine F70S30MB bili su za 7,39 % odnosno 7,16 % niži od onih mješavine CC. To upućuje na to da upotreba WFS-a, umjetnog pijeska, metakaolina i vlakana banane u betonskoj mješavini smanjuje negativan utjecaj na okoliš te podržava razvoj održivih građevinskih praksi.
- Rezultati su pokazali da upotreba industrijskog otpada i prirodnih vlakana u betonu može dovesti do poboljšanja mehaničkih svojstava i smanjenja negativnog utjecaja na okoliš, čime se potiče razvoj održivih građevinskih materijala.

Razvijeni beton (F70S30MB), koji se odlikuje poboljšanom čvrstoćom na savijanje i smanjenim utjecajem na okoliš, prikladan je za upotrebu u kolnicima, industrijskim podovima, gotovim betonskim dijelovima i laganim konstrukcijama koje zahtijevaju visoku čvrstoću na savijanje, dok istodobno doprinosi održivoj gradnji.

LITERATURA

- [1] Guneyisi, E., Atewi, Y.R., Hasan, M.F.: Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended, *Construction and Building Materials*, 211 (2019), pp. 349-362.
- [2] Zhang, P., Gao, Z., Wang, J., Guo, J., Hu, S., Ling, Y.: Properties of fresh and hardened fly ash/slag-based geopolymer concrete: A review, *Journal of Cleaner Production*, 270 (2020), Paper No. 122389.
- [3] Kumar, A., Pratheba, S., Rajendran, R., Perumal, K., Lingeshwaran, N., Sambaraju, S.: An experimental study on the mechanical properties of concrete replacing sand with quarry dust and waste foundry sand, *Materials Today: Proceedings*, 33 (2020), pp. 828-832.
- [4] Seth, D., Shrivastava, R.L., Shrivastava, S.: An empirical investigation of critical success factors and performance measures for green manufacturing in cement industry, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27 (2016) 8, pp. 1076-1101.
- [5] Iswarya, G., Beulah, M.: Use of zeolite and industrial waste materials in high-strength concrete – A review, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021), pp. 116-123.
- [6] Bhuvaneshwari, S., Ravi, A.: Development of sustainable green repair material using fibre-reinforced geopolymer composites, *Journal of Green Engineering*, 10 (2020) 2, pp. 494-510.
- [7] Ayyadurai, A., Muthuchamy Maruthai, S., Muthu, D.: Impact of fly ash and banana fibre on mechanical performance of paver block concrete, *Građevinar*, 76 (2024) 3, pp. 211-222.
- [8] Tangadagi, R.B., Shruthi, V.A., Ganesh, B., Vasudev, M.V., Nagendra, R., Ranganath, C.: Creep characteristics of high strength self-compacting concrete, In *Recent Trends in Civil Engineering: Select Proceedings of ICRTICE*, pp. 625-635, 2019.
- [9] Shruthi, V.A., Tangadagi, R.B., Shwetha, K.G., Nagendra, R., Ranganath, C., Ganesh, B., Mahesh Kumar, C.L.: Strength and drying shrinkage of high strength self-consolidating concrete, In *Recent Trends in Civil Engineering: Select Proceedings of ICRTICE*, pp. 615-624, 2021
- [10] De la Colina Martínez, A.L., Barrera, G.M., Díaz, C.E.B., Córdoba, L.I., Núñez, F.U., Hernández, D.J.D.: Recycled polycarbonate from electronic waste and its use in concrete: Effect of irradiation, *Construction and Building Materials*, 201 (2019), pp. 778-785.
- [11] Kapoor, K., Singh, S.P., Singh, B.: Evaluating the durability properties of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24 (2020) 14, pp. 2383-2399.
- [12] Alnahhal, M.F., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Abutaha, F., Alqedra, M.A., Nayaka, R.R.: Assessment of engineering properties and CO₂ emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 203 (2018), pp. 822-835.
- [13] Gurumoorthy, N., Arunachalam, K.: Durability studies on concrete containing treated used foundry sand, *Construction and Building Materials*, 201 (2019), pp. 651-661.
- [14] Zito, S.V., Irassar, E.F., Rahhal, V.F.: Recycled construction and demolition waste as supplementary cementing materials in eco-friendly concrete, *Recycling*, 8 (2023) 4, Paper No. 54.
- [15] Carevic, I., Naletilic, H., Stirmer, N.: Life cycle analysis of reinforced concrete floor slab through three different waste management scenarios, *Građevinar*, 75 (2023) 8, pp. 765-773, <https://doi.org/10.14256/JCE.3696.2023>
- [16] Baricevic, A., Kovac, D., Didulica, K.: Construction of a new day hospital in Zadar using recycled aggregate concrete, *Građevinar*, 73 (2021) 8, pp. 833-844.
- [17] Gaur, A., Mathur, N., Somani, P.: Experimental investigation of bottom ash as a capable soil stabiliser, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872 (2020) 1, Paper No. 012138.
- [18] Polaju, K.K., Anil, V., Manchiryal, R.K.: Properties of concrete as influenced by shape and texture of fine aggregate, *American Journal of Applied scientific research*, 3 (2017) 3, pp. 28-36.
- [19] Bhardwaj, B., Kumar, P.: Waste foundry sand in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 156 (2017), pp. 661-674.
- [20] Sastry, G.K., Ravitheja, A., Reddy, C.S.: Effect of foundry sand and mineral admixtures on mechanical properties of concrete, *Archives of Civil Engineering*, 64 (2018) 1, pp. 117-131.
- [21] Fiore, S., Zanetti, M.C.: Foundry waste reuse and recycling in concrete production, *American Journal of Environmental Sciences*, 3 (2007) 3, pp. 135-142.
- [22] Vignesh, P., Manikandan, M.: Experimental investigation on concrete by using partial substitution of fine aggregate with waste foundry sand, *International Journal of Advances in Engineering and Management*, 6 (2024) 6, pp. 402-408.
- [23] Prabhu, G.G., Hyun, J.H., Kim Y.Y.: Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production, *Construction and Building Materials*, 70 (2014), pp. 514-521.
- [24] Siddique, R., Singh, G., Belarbi, R., Ait-Mokhtar, K.: Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete, *Construction and Building Materials*, 83 (2015), pp. 216-222.
- [25] Joy, J.S., Mathew, M.: Experimental study on geopolymer concrete with partial replacement of fine aggregate with foundry sand, *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 3 (2015) 1, pp. 559-69.
- [26] Thaarrini, J., Ramasamy, V.: Properties of foundry sand, ground granulated blast furnace slag and bottom ash-based geopolymers under ambient conditions, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60 (2016) 6, pp. 159-168.
- [27] Bilal, H., Yaqub, M., Rehman, S.K.U., Abid, M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Aslam, F.: Performance of foundry sand concrete under ambient and elevated temperatures, *Materials*, 12 (2019) 16, Paper No. 2645.
- [28] Mehta, V.: Sustainable approaches in concrete production: An in-depth review of waste foundry sand utilization and environmental considerations, *Environmental Science and Pollution Research*, 31 (2024) 16, pp. 23435-23461.
- [29] Kavitha, O.R., Shyamala, G., Akshana, V.: Study of sustainable concrete property containing waste foundry sand, *Materials Today: Proceedings*, 39 (2021), pp. 855-860.
- [30] Reshma, T.V., Manjunatha, M., Sankalpasri, S., Tanu, H.M.: Effect of waste foundry sand and fly ash on mechanical and fresh properties of concrete, *Materials Today: Proceedings*, 47 (2021), pp. 3625-3632.
- [31] Karumanchi, M., Bellum, R.R., Chennupati, M., Kunchala, V., Regulagunta, M.: Influence on mechanical properties of concrete of cement replacement with fly ash and river sand replacement with foundry sand, *Materials Today: Proceedings*, 65 (2022), pp. 3547-3551.

- [32] Ashish, D.K., Verma, S.K.: Robustness of self-compacting concrete containing waste foundry sand and metakaolin: A sustainable approach. *Journal of Hazardous Materials*, 401 (2021), Paper No. 123329.
- [33] Gholampour, A., Zheng, J., Ozbakkaloglu, T.: Development of waste-based concretes containing foundry sand, recycled fine aggregate, ground granulated blast furnace slag and fly ash, *Construction and Building Materials*, 267 (2021), 121004, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121004>
- [34] Shahbaz, M., Lalotra, S.: To study the effect on mechanical behaviour of concrete using Fly Ash and Foundry Sand, *International Journal of Recent Research Aspects*, 5 (2018) 4, , pp. 14-20.
- [35] Parashar, A.K., Sharma, P., Sharma, N.: A study of GGBS based cement concrete with the inclusion of waste foundry sand on mechanical properties, *Materials Today: Proceedings*, (2022), pp. 4134-4139.
- [36] Liu, S., Zheng, W., Wang, Y.: Utilisation of waste foundry sand and fly ash in the production of steel fibre-reinforced concrete, *Journal of Cleaner Production*, 433 (2023), 139872.
- [37] Selvarani, B., Prabhavathy, R.A.: Ecofriendly polypropylene fibre-reinforced concrete using foundry sand: Experimental investigation, *Research and Developments in Engineering Research*, 67 (2023).
- [38] Prasath, C.R., Ilakkiya, P., Kumar, R.Y., Kumar, S.S.: Experimental studies on glass fibre-reinforced concrete with partial replacement of fine aggregate by foundry sand, *Global Journal of Engineering Science and Research*, 3 (2016) 12, pp. 1-6.
- [39] DurgaDevi, S., Chandrasekaran, P.: Mechanical and Durability Properties of Waste Foundry Sand Concrete with Carbon Fibres, *International Journal of Science and Engineering Research* (2015).
- [40] Deore, S.M., Bodke, J.S., Aware, R.V., Ahire, C.V., Kamble, P.M., Pendhari, A.R.: Addition of carbon fibre in concrete with partial replacement of sand by waste foundry sand, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4 (2017) 4, pp. 2017-2079.
- [41] Abhishekh Soratur, A.B., Hiremath, S.P., Maganur, T.P., Rajesh, S.J.: An experimental investigation on properties of concrete with foundry sand and glass fibre, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5 (2018) 5, pp. 2176-2179.
- [42] Mouli, K.C., Pannirselvam, N., Anitha, V., Kumar, D.V., Rao, S. V.: Strength studies on banana fibre concrete with metakaolin, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10 (2019), pp. 684-689.
- [43] IS: 12269-1987, Ordinary Portland Cement, 53 grade specifications
- [44] Bentz, D.P., Bognacki, C.J., Riding, K.A., Villarreal, V.H.: Hotter cements, cooler concretes, *Concrete international*, 33 (2011) 1, pp. 41-48.
- [45] Dinakar, P., Sahoo, P., Sriram, G.: Effect of metakaolin content on the properties of high-strength concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7 (2013), pp. 215-223.
- [46] Agboola, S.A., Abbas, K.A., Musa, A.K., Shabi, M.O., Abdulwaheed, A.A., Zakari, A.: Performance of Concrete Using Metakaolin as Cement Partial Replacement Material, *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 20 (2024), pp. 749-759.
- [47] IS: 4031-1985, Method of Chemical Analysis of Hydraulic Cement
- [48] IS: 383-2016, Coarse and fine aggregates for concrete specifications
- [49] Bandal, A.A., Patil, S.L., Latpate, R.R., Bhand, S.P., Darade, M.M.: Utilisation of waste foundry sand in conventional concrete. *International Journal of Scientific Development and Research*, 5 (2020), pp. 394-404.
- [50] IS: 2386 (Part-2)-1963, Methods of Testing for Aggregates for Concrete
- [51] IS 2386 (Part-3)-1963, Methods of Test for Aggregates for Concrete Part III Specific Gravity, Density, Voids, Absorption, and Bulking.
- [52] Sithole, N.T., Tsotetsi, N.T., Mashifana, T., Sillanpää, M.: Alternative cleaner production of sustainable concrete from waste foundry sand and slag, *Journal of Cleaner Production*, 336 (2022), Paper No. 130399.
- [53] IS 2386 (Part-4)-1963, Methods of Test for Aggregates for Concrete Part IV: Mechanical Properties
- [54] IS: 456-2000, Plain and Reinforced Concrete Codes of Practice
- [55] Al-Massri, G., Ghanem, H., Khatib, J., Elkordi, A.: Influence of adding banana fibres on the mechanical properties and volume stability of mortar for paving block applications, *Journal of Natural Fibers*, 22 (2025), Paper No. 2464152.
- [56] Ali, B., Azab, M., Ahmed, H., Kurda, R., El Ouni, M.H., Elhag, A.B.: Investigation of physical, strength, and ductility characteristics of concrete reinforced with banana (*Musaceae*) stem fibre, *Journal of Building Engineering*, 61 (2022), Paper No. 105024.
- [57] ASTM D3822 Standard Test Method for Tensile Properties of Single Fibres.
- [58] IS:10262-2019, Concrete Mix Proportioning Guidelines
- [59] IS:1199-1959, Methods of sampling and analysis of concrete
- [60] IS: 516-2021, Methods of Tests for Strength of Concrete
- [61] ACI 544-1996, State-of-the-Art report on fibre-reinforced concrete
- [62] Parashar A, Aggarwal P., Saini B., Aggarwal Y., Bishnoi S.: Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand, *Construction and Building Materials*, 251 (2020), Paper No. 118875.
- [63] Akmal, U., Fatima, S., Khurram, N., Shaikat Khan, Q., Ahmed, T., Alabduljabbar, H., Ahmed Awad, Y.: Performance of concrete developed by enhanced gradation of natural fine river sand by partial replacement of waste quarry dust, *Advances in Civil Engineering*, 1 (2023), Paper No. 5508001.
- [64] Mostafa, M., Uddin, N.: Effect of banana fibres on the compressive and flexural strength of compressed earth blocks Buildings, 5 (2015) 1, pp. 282-296.
- [65] Attia M.M., Shawky S.M.: Banana fibre-reinforced concrete: A review. *NY Sci. J*, 14 (2021) 1, pp. 48-57.
- [66] Zai, A.A.R., Salhotra, S.: Effect of waste foundry sand and glass fibre on mechanical properties and fire resistance of high-strength concrete, *Materials Today: Proceedings*, 33 (2020), pp. 1733-1740.
- [67] Safiuddin, M., Zain, M.F.M., Mahmud, M.F., Naidu, R.S.: Effect of quarry dust and mineral admixtures on the strength and elasticity of concrete, In *Proceedings of the Conference on Construction Technology*, pp. 68-80, 2021.
- [68] Raman, S N.M., Zain, F.M., Mahmud, H.B., Tan, K.S.: Influence of quarry dust and fly ash on the concrete compressive strength development, In *Proceedings of the AEESEAP International Conference*, 2005.
- [69] Arulmoly, B., Konthesingha, C.: Pertinence of alternative fine aggregates for concrete and mortar: A brief review on river sand substitutions, *Australian Journal of Civil Engineering*, 20 (2022) 2, pp. 272-307.
- [70] Salim, P.M., Prasad, B.S.R.K.: Mechanical properties of concrete with pulverised used foundry sand as mineral admixture, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9 (2018) 3, pp. 158-169.
- [71] Sandhu, R.K., Siddique, R.: Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand, *Construction and Building Materials*, 225 (2019), pp. 371-383.
- [72] Kumar, K.A., Rajasekhar, K., Sashidhar, C.: Experimental research on the effects of waste foundry sand on the strength and microstructural properties of concrete, *Civil Engineering Journal*, 8 (2022) 10, pp. 2172-2189.
- [73] Aggarwal, Y., Siddique, R.: Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates, *Construction and Building Materials*, 54 (2014), pp. 210-223.