

Primljen / Received: 7.5.2025.

Ispravljen / Corrected: 6.8.2025.

Prihvaćen / Accepted: 29.9.2025.

Dostupno online / Available online: 10.2.2026.

Eksperimentalno ispitivanje održivog betona za zaštitu od gama-zračenja

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Vadel Murugesan**, dipl.ing.građ.

Tehnološki institut Nehru, Coimbatore, Indija

Odjel za građevinarstvo

vadelnithce@gmail.com

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Senthil Kumar Govindan**, dipl.ing.građ.

Tehnički fakultet SRM Easwari, Chennai, Indija

Odjel za građevinarstvo

govindsenthilme@gmail.comIzv.prof.dr.sc. **Natarajan Seralathan**, dipl.ing.građ.

Tehnički fakultet Madha, Chennai, Indija

Odjel za građevinarstvo

sera.natraj1@gmail.com

Amirtharaj John, dipl.ing.građ.

Sveučilište Anna, Chennai, Indija

Odjel za građevinarstvo

amirthavijay1@gmail.com

Prethodno priopćenje

Vadel Murugesan, Senthil Kumar Govindan, Natarajan Seralathan, Amirtharaj John

Eksperimentalno ispitivanje održivog betona za zaštitu od gama-zračenja

U građevinskom se sektoru sve intenzivnije primjenjuju održiva rješenja kako bi se umanjio negativan utjecaj prekomjerne potrošnje prirodnih agregata na okoliš. U ovom je istraživanju ispitano uključivanje bakrene zgre (CS) i recikliranih keramičkih pločica (RCT) kao djelomične zamjene agregata u betonu, u udjelima od 50 % do 90 %, s težištem na mehaničkim svojstvima i sposobnosti zaštite od gama-zračenja. Utvrđena su poboljšanja u obradljivosti svježeg betona, gustoći, tlačnoj i vlačnoj čvrstoći te čvrstoći na savijanje. Optimalna smjesa, sa 60-postotnom zamjenom, ostvarila je porast gustoće od 45,9 % te poboljšanje koeficijenta prigušenja (μ) od 18,18 %. Jaka korelacija ($R^2 = 0,9743$) između gustoće i koeficijenta μ potvrđuje učinkovitost tih materijala, pri čemu su se CS i RCT pokazali kao održiva i dostojna zamjena agregata u betonu za zaštitu od zračenja.

Ključne riječi:

održivi beton, bakrena zgura, reciklirane pločice, mehanička svojstva, zaštita od zračenja

Research Paper

Vadel Murugesan, Senthil Kumar Govindan, Natarajan Seralathan, Amirtharaj John

Experimental investigation of sustainable gamma radiation shielding concrete

The construction industry is increasingly adopting sustainable practices to mitigate the environmental impact from excessive consumption of natural aggregates. This study investigated the incorporation of copper slag (CS) and recycled ceramic tiles (RCT) as partial aggregate replacements in concrete at levels ranging from 50 % to 90 %, with a focus on both the structural integrity and gamma radiation shielding performance. Results indicated improvements in slump, density, and compressive, tensile, and flexural strengths. The optimal mixture, with 60 % replacement, exhibited a maximum density increase increases of 45.9 % and an 18.18 % enhancement in attenuation coefficient (μ). A strong correlation ($R^2 = 0.9743$) between density and μ confirms the effectiveness of these materials, making CS and RCT viable sustainable aggregate alternatives for radiation shielding concrete.

Key words:

sustainable concrete, copper slag, recycled tiles, mechanical properties, radiation shielding

1. Uvod

Prirodni agregati čine oko 60 do 80 % ukupnog volumena betona [1, 2]. Zbog sve izraženije nestašice tih materijala, građevinska industrija intenzivno istražuje mogućnosti njihove zamjene, osobito jer vađenje prirodnih agregata zahtijeva znatne količine vode [3, 4]. Vađenje i prerada tih sirovina dodatno pridonose uništavanju okoliša i klimatskim promjenama, uz veliku potrošnju električne energije. Osim toga dostupnost sitnih agregata ograničena je sezonskim i okolišnim utjecajima poput obilnih oborina i poplava [5]. Vađenje riječnog pijeska, koji je glavni izvor sitnih agregata, uzrokuje nepovoljne ekološke utjecaje poput erozije i iscrpljivanja prirodnih resursa. Zbog toga se nameće potreba za istraživanjem održivih, ekonomičnih i stalno dostupnih alternativa prirodnim agregatima. Učinkovit pristup predstavlja upotreba otpadnih nusproizvoda u betonu kao zamjene za prirodne agregate. U brojnim istraživanjima razmatrana je mogućnost primjene recikliranih materijala u betonu u cilju povećanja duktilnosti i smanjenja težine [6]. Bakrena zgura (engl. *copper slag* - CS) prepoznata je kao obećavajuća alternativa, ponajprije zbog udjela silicijeva dioksida (SiO_2) i fizikalnih svojstava usporedivih s riječnim pijeskom. Bakrena zgura obično je nepravilnog oblika, staklaste strukture, crne boje i zrnate teksture. Na svaku tonu proizvedenog bakra nastaje oko 2,2 do 3 tone bakrene zgre [7]. Te industrije proizvedu približno 400.000 tona bakra na godinu, pri čemu nastaje gotovo 800.000 tona bakrene zgre. Dosadašnja istraživanja [7-10] pokazala su da primjena bakrene zgre kao sitnog agregata može poboljšati mehanička svojstva betona, što potvrđuje njezinu prikladnost za primjenu u betonskim elementima. Također, rezultati iz ranijih istraživanja [11-14] upućuju na to da djelomična zamjena sitnih agregata bakrenom zgurom može znatno povećati čvrstoću i trajnost betona. Slično tome, upotreba recikliranih keramičkih pločica (engl. *recycled ceramic tiles* - RCT) kao agregata u betonu vrlo je važna jer uvelike smanjuje količinu otpada i doprinosi očuvanju prirodnih agregata. Treća generacija zidne i podne keramike predstavlja najnoviju tehnologiju u obliku porculanske keramike. Porculan se proizvodi kao homogeni materijal oblikovanjem granula pod visokim tlakom i pečenjem na povišenim temperaturama. Oblik granula i njihov udio vlage omogućuju dobro međusobno povezivanje tijekom zbijanja, čime se povećava mehanička čvrstoća porculana. Završna toplinska obrada na visokoj temperaturi od oko 1400 °C omogućuje formiranje stabilnih faza u porculanu, što pridonosi većoj otpornosti na kemijske utjecaje te osigurava njegovu dugotrajnu stabilnost. Završni su proizvodi kompaktni i bijele boje [15]. Visoke temperature žarenja i niska poroznost omogućuju porculanskoj keramici postizanje velike čvrstoće sa stupnjem apsorpcije vode nižim od 0,3 %. Opseg proizvodnje porculana i dalje raste s porastom njegove potražnje na tržištu. Posljednjih se godina proizvodnja keramičkih pločica znatno proširila. Opseg globalne proizvodnje povećao se s 8581 milijun m^2 u 2009. na 16.093 milijuna m^2 u 2020. Unutar Europske unije Španjolska je vodeći proizvođač te zauzima drugo mjesto u svijetu. U 2020. Španjolska je izvezla 415 milijuna kvadratnih

metara, što predstavlja 81,4 % ukupnog opsega proizvodnje keramičkih pločica [16]. Uključivanje otpada od keramičkih pločica (RCT) u praksu recikliranog materijala podržava ciljeve kruznoga gospodarstva smanjenjem potražnje za prirodnim sirovinama te smanjenjem ekološkog otiska povezanog s odlaganjem otpada na najmanju moguću mjeru. Glavni izvori tog otpada jesu industrija keramičkih pločica, ostaci izgradnje novih objekata te ruševine postojećih građevina. U proizvodnji keramičkih pločica nastaju znatni gubici, pri čemu oko 7 % proizvedenih pločica ne zadovoljava propisane standarde kvalitete zbog odstupanja u dimenzijama, nedostataka u glazuri ili pucanja tijekom pečenja. Proizvođači rijetko ponovno upotrebljavaju ili recikliraju pločice koje nisu u skladu s normama [17]. Takav se otpad odlaže na posebna odlagališta u blizini proizvodnih pogona, pri čemu se ne provodi razvrstavanje. Odlaganje keramičkog otpada postaje ozbiljan ekološki problem, osobito u područjima s ograničenim prostorima za odlagališta. Recikliranje otpadne porculanske keramike i vraćanje u proizvodne procese nije izvedivo, zbog čega se takav otpad neizbježno odlaže u okoliš. Upotreba otpadnih keramičkih pločica kao agregata u betonu nije novost u tehnologiji betona, a brojna istraživanja [18-22] bavila su se tom temom.

Različiti izvori zračenja i instrumenti upotrebljavaju se u bolnicama, istraživačkim centrima, petrokemijskoj industriji, rafinerijama i nuklearnim elektranama [23]. Gama-zrake predstavljaju najrazorniji tip zračenja koji se emitira iz radioaktivnog otpada i nuklearnih eksplozija [24, 25]. Dugotrajna izloženost nuklearnome zračenju kod ljudi može uzrokovati poremećaje imunološkog sustava i razvoj malignih bolesti, dok visoke doze mogu dovesti do neposredne smrti [26-28]. Osnovno načelo zaštite od zračenja temelji se na tome da zaštitni materijal apsorbira dio energije upadnih fotona, pri čemu dolazi do njihova raspršenja, promjene smjera i smanjenja energije zračenja. Materijali velike gustoće i visokog atomskog broja osiguravaju dobru sposobnost prigušenja zračenja [29]. Uobičajeni materijali za zaštitu od gama-zračenja uključuju volfram, olovo, željezo, metalne legure te teške agregate poput hematita, barita i magnetita [30, 31]. Među njima najčešće se upotrebljava olovo, jer ima visok atomski broj i veliku gustoću te ima izvrstan fotoelektrični učinak. U zdravstvenim i istraživačkim objektima olovo se u obliku limova ili ploča primjenjuje kao ključni zaštitni materijal.

Beton je učinkovit materijal za zaštitu od zračenja [32-34]. Specijalizirani beton ključan je za zaštitu ljudi od štetnih učinaka ionizirajućeg zračenja u visokorizičnim okruženjima poput nuklearnih elektrana, bolnica s radiološkom opremom te zrakoplovnih i svemirskih sustava u kojima zračenje predstavlja znatan zdravstveni rizik. Primjenom tog betona umanjuje se djelovanje zračenja, što doprinosi sprječavanju radijacijske bolesti i zloćudnih oboljenja te povećava razinu sigurnosti korisnika i okolnog stanovništva. Osim toga betoni za zaštitu od zračenja od ključne su važnosti za sigurno rukovanje i skladištenje radioaktivnih materijala u istraživačkome i industrijskome sektoru. Inovacija i poboljšanje betona za zaštitu od zračenja ključni su za poboljšanje zaštitnih mjera i smanjenje

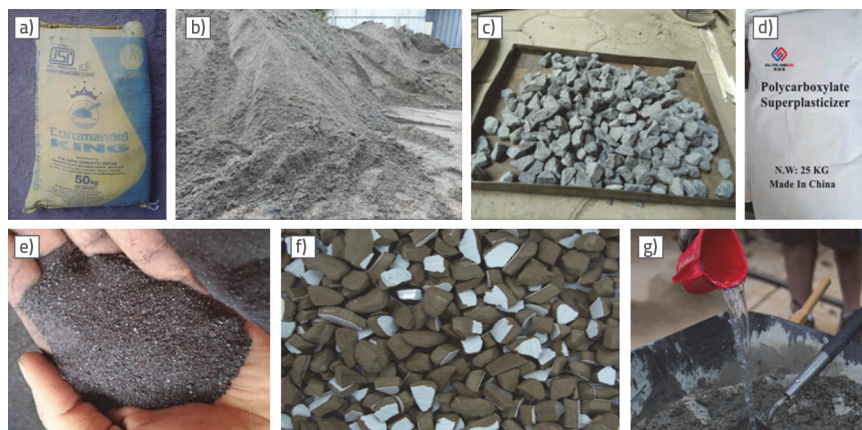
rizika povezanih sa zračenjem. Od svoje pojave sredinom 20. stoljeća, taj je materijal prošao znatan razvoj, ponajprije potaknut napretkom nuklearne tehnologije i medicinske dijagnostike. Tradicionalno se beton za zaštitu od zračenja (RSC) naziva betonom velike gustoće, koji sadržava teške agregate poput magnetita, barita i ilmenita, kako bi se postigla veća gustoća i poboljšala zaštita od zračenja, odnosno učinkovito smanjenje neutrona i fotona [35, 36]. Gustoća teškog betona ponajprije ovisi o specifičnoj težini upotrijebljenog betona. Općenito, beton sa specifičnom težinom većom od 2,6 naziva se teškim betonom, dok se agregat sa specifičnom težinom većom od 3 naziva teškim agregatom. González-Ortega i sur. [37] primijenili su baritni prah i agregat u teškome betonu za potrebe zaštite u nuklearnim objektima i zdravstvenim ustanovama. Ouda i Abdel-Gawwad [38] analizirali su fizikalna i mehanička svojstva te svojstva prigušenja gama-zraka kod teškog betona s agregatima magnetita, getita i barita. Cullu i Bakirhan [39] utvrdili su da čvrstoća betona znatno utječe na koeficijent apsorpcije zračenja u betonu visoke specifične težine na bazi olova i cinka. Papachristoforou i Papayianni [40] razvili su beton za zaštitu od zračenja s agregatima zgre iz elektrolyne peći (EAF) ojačan čeličnim vlaknima. Uočili su da linearni koeficijenti prigušenja betona, izmjereni pri energijama fotona od 244, 344, 779, 964, 1112 i 1408 keV, pokazuju porast od 10 do 15 % u odnosu na obični beton, ovisno o energiji fotona. Ti rezultati upućuju na to da se zgura iz elektrolyne peći u kombinaciji s čeličnim vlaknima može upotrijebiti za izradu učinkovitog i održivog betona za zaštitu od zračenja, koji zadovoljava i veće zahtjeve za čvrstoću. Dezhampahanah i sur. [41] ispitivali su utjecaj nanočestica TiO_2 na svojstva betona i utvrdili da one povećavaju tlačnu čvrstoću za 15,5 %. Pri udjelu od 8 % nanočestica TiO_2 koeficijent prigušenja μ za energije fotona 1332, 1170 i 662 keV povećan je za 7,8 %, 5,4 % odnosno 8,9 %. Slično tome, Rawat i sur. [42] istražili su utjecaj ugradnje nanočestica TiO_2 na svojstva betona. Abo-El-Enein i sur. [43] izvijestili su da je dodavanjem 2 % nanočestica hematita tlačna čvrstoća povećana za približno 20 %. Uz to linearni koeficijenti prigušenja poboljšani su za 6 %, 3 % i 11 % nakon 3, 28 i 90 dana. Otpadni materijali također se primjenjuju u razvoju betona za zaštitu od zračenja (RSC). Te su inicijative u skladu s ciljevima održivog razvoja (SDG) koje su uspostavili Ujedinjeni narodi (UN), a koji predstavljaju viziju održivog razvoja u različitim sektorima. Težište se stavlja na ciljeve usmjerene na gospodarenje otpadom i kružno gospodarstvo. Obuhvaćaju održivu potrošnju i proizvodnju (SDG-12) te djelovanje u vezi s klimatskim promjenama (SDG-13). Ling i Poon [44] ispitivali su mogućnost primjene recikliranoga staklenog lijevka iz katodnih cijevi (CRT) kao agregata u betonu. Primijetili su da je reciklirani CRT agregat primjenjiv kao agregat u

betonu, što je rezultiralo znatnim povećanjem gustoće betona. Međutim, zaključili su da se dodavanjem barita smanjuju tlačna čvrstoća betona i vlažna čvrstoća cijepanjem te istodobno modul elastičnosti. Alwaeli [45] utvrdio je da dodavanje olovno-cinkove zgre povećava tlačnu čvrstoću betona za 20 % te poboljšava prigušenje gama-zračenja za 23,1 %. Baalamurugan i sur. [46] utvrdili su da dodavanje agregata čelične zgre iz visokih peći povećava tlačnu čvrstoću za 7 % te poboljšava zaštitna svojstva, pri čemu se faktor prigušenja gama-zračenja povećao za 14,5 % i 5,8 %. S obzirom na to da je primjena otpadnih materijala kao agregata u zaštitnim betonima nedovoljno istražena, u ovom je radu analiziran beton za zaštitu od gama-zračenja s bakrenom zgurum i keramičkim otpadom.

2. Materijali i metodologija

2.1. Materijali

Sirovine upotrijebljene u ovome istraživanju prikazane su na slici 1. U ovom je istraživanju kao osnovno vezivo primijenjen portlandski cement razreda 53 (OPC) proizvođača *Coromandela*, u skladu sa zahtjevima norme IS: 12269-1987 [47]. Kemijski sastav i svojstva cementa prikazani su u tablicama 1. i 2. Kao sitni agregat u betonu upotrijebljen je industrijski proizvedeni pijesak, u skladu s normom IS: 383-1970 [48]. Svojstva industrijski proizvedenog pijeska navedena su u tablici 3. Kao krupni agregat u betonu primijenjen je pravilno granulirani uglati granit, veličine čestica od 12,5 mm do 20 mm. Svojstva krupnog agregata navedena su u tablici 4. Upotrijebljena je pitka voda iz vodovoda, bez prisutnosti ulja, soli, organskih nečistoća i lužnatih sastojaka. Voda je imala pH-vrijednost 7, što je u skladu s normom IS: 456-2000 [49]. Kao kemijski dodatak betonu upotrijebljena je visokoučinkovita kemikalija za smanjenje udjela vode. Primijenjen je superplastifikator na bazi polikarboksilatnog etera, koji zadovoljava zahtjeve norme ASTM C 494-13 [50], u udjelu od 0,5 % mase cementa. U ovom istraživanju upotrijebljena je bakrena zgura pribavljena od društva *Sterlite Industries India Limited* (SIIL), Tutikorin. Iz



Slika 1. Sirovine za proizvodnju betona: a) cement; b) sitni agregat; c) krupni agregat; d) superplastifikator; e) bakrena zgura; f) reciklirane keramičke pločice; g) voda

Tablica 1. Kemijski sastav cementa i bakrene zgure

Sastavni dio	Cement [%]	Bakrena zgura [%]
SiO ₂	22,02	31,92
Fe ₂ O ₃	5,12	59,11
Al ₂ O ₃	5,59	2,52
CaO	60,84	1,25
MgO	122	1,65
Na ₂ O	0,29	1,40
K ₂ O	0,67	0,81
SO ₃	-	1,34

Tablica 2. Svojstva cementa

Svojstva	Vrijednosti	Zahtjevi prema normi IS: 12269-1987 [47]
Normirana konzistencija	31 %	25 % - 35 %
Specifična težina	3,15	3,15
Početak vremena vezivanja	40 minuta	Ne kraće od 30 minuta
Završetak vremena vezivanja	345 minuta	Ne više od 600 minuta
Finoća sitnog agregata	330 m ² /kg	Ne manje od 225 m ² /kg
Postojanost volumena	2,50 mm	Manje od 10 mm



Slika 2. Otpad od keramičkih pločica



Slika 3. Reciklirane keramičke pločice (RCT)

dostupne literature [51-54] proizlazi da pri zamjenama većeg udjela sitnog agregata bakrenom zgurinom beton i mort mogu postići veću razinu čvrstoće od referentnih uzoraka. Zato je bakrena zgura primijenjena kao alternativa sitnim agregatima (proizvedeni pijesak) u udjelima od 50 %, 60 %, 70 %, 80 % i 90 %. Njezina su svojstva prikazana u tablici 3. Kao otpadni keramički materijal upotrijebljene su drobljene porculanske

pločice prikupljene iz građevnog otpada. Pločice su prvo ručno usitnjene, a potom i mehanički do veličine čestica između 4,75 i 12,5 mm, kako bi bile prikladne za primjenu kao krupni agregat (slike 2. i 3.). Svojstva recikliranih keramičkih pločica prikazana su u tablici 4. Reciklirane keramičke pločice upotrijebljene su kao zamjena krupnog agregata u udjelima od 50 %, 60 %, 70 %, 80 % i 90 %.

Tablica 3. Svojstva proizvedenog pijeska i bakrene zgure

Svojstva	Proizvedeni pijesak	Bakrena zgura	IS norme
Nasipna gustoća suhog materijala u zbijenom stanju [kg/m ³]	1646	2150	IS: 2386 (3. dio) [55]
Nasipna gustoća u rastresitom stanju [kg/m ³]	1532	1840	IS: 2386 (3. dio) [55]
Specifična težina	2,6	2,61	IS: 2386 (3. dio) [55]
Modul finoće	2,75	3,17	IS: 2386 (1. dio) [56]
Udio vlage [%]	4	0,01	IS: 2386 (3. dio) [55]

Tablica 4. Svojstva krupnog agregata i recikliranih keramičkih pločica (RCT)

Svojstva	Krupni agregat	Reciklirane keramičke pločice (RCT)	IS norme
Nasipna gustoća suhog materijala u zbijenom stanju [kg/m ³]	1850	1700	IS: 2386 (3. dio) [55]
Nasipna gustoća u rastresitom stanju [kg/m ³]	1600	1550	ISO: 2386 (3. dio) [55]
Specifična težina	2,65	2,45	IS: 2386 (3. dio) [55]
Modul finoće	7,1	6,2	IS: 2386 (1. dio) [56]
Udio vlage [%]	0,2	0,4	IS: 2386 (3. dio) [55]

Tablica 5. Sastav betonske mješavine

Identifikacijska oznaka mješavine	Cement [kg/m ³]	Sitni agregat [kg/m ³]	Bakrena zgura (CS) [kg/m ³]	Krupni agregat [kg/m ³]	Agregat od recikliranih keramičkih pločica (RCT) [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Superplastifikator [kg/m ³]
CC	400	700	0	1050	0	180	2
RSC 1	400	350	350	525	525	180	2
RSC 2	400	280	420	420	630	180	2
RSC 3	400	210	490	315	735	180	2
RSC 4	400	140	560	210	840	180	2
RSC 5	400	70	630	105	945	180	2

2.2. Metodologija

Sastav betona razreda čvrstoće C25/30 (stara oznaka M30) projektiran je u skladu s normom IS: 10262-2019 [57] radi postizanja ciljane čvrstoće. U tablici 5. prikazani su omjeri sastojaka primijenjenih u betonskim mješavinama. Nakon različitih probnih miješanja dobivena je najpovoljnija mješavina s ciljanom čvrstoćom od 38,26 MPa. Potom je optimirana betonska mješavina prilagođena dodavanjem bakrene zgure i otpadnih keramičkih pločica kao sitnog i krupnog agregata u udjelima od 50 %, 60 %, 70 %, 80 % i 90 %.

Cement, proizvedeni pijesak i krupni agregat najprije su miješani u suhume stanju, nakon čega je dodana polovina ukupne količine vode i superplastifikatora te su miješani približno 2 do 3 minute. Uzorci su lijevani u skladu s normom IS: 516-2021 [58] za različita ispitivanja primjenom čeličnih kalupa te zbijanjem u dva jednaka sloja na vibracijskome stolu kako bi se osigurala pravilna zbijenost betona. Izrađeni su uzorci za kontrolnu smjesu (CC). Kod mješavina za zaštitu od zračenja (engl. *Radiation Shielding Concrete* - RSC) bakrena zgura i otpadne keramičke pločice dodavane su u odgovarajućim udjelima kao zamjena za sitni odnosno krupni agregat. Uzorci su pripremljeni i ostavljeni da se stvrdnjavaju približno 7, 14 i 28 dana te su im izmjerena odgovarajuća svojstva. Ispitivanja su provedena u skladu s normama Zavoda za indijske standarde (BIS), Američkog društva za ispitivanje i materijale (ASTM) i preporukama Odbora Američkog instituta za beton. Ukupno su izrađene i ispitane 54 kocke (tri uzorka za svaku mješavinu za ispitivanje nakon 7, 14 i 28 dana), 54 valjka (tri uzorka za svaku mješavinu za ispitivanje nakon 7, 14 i 28 dana), 54 prizme (tri uzorka za svaku mješavinu za ispitivanje nakon 7, 14 i 28 dana) i 18 uzoraka ploča (tri uzorka za svaku mješavinu za ispitivanje nakon 28 dana).

2.3. Metode ispitivanja

2.3.1. Ispitivanje slijeganjem

Ispitivanja slijeganjem najčešće se primjenjuje za procjenu obradljivosti svježeg betona. Ispitivanje slijeganjem provedeno je radi određivanja vrijednosti slijeganja različitih betonskih mješavina: CC, RSC1, RSC2, RSC3, RSC4 i RSC5. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom IS: 1199-1959 [59]. Svježe

pripremljeni beton izliven je u kalup premazan uljem u četiri sloja, pri čemu je svaki sloj nabijan šipkom od 16 mm 25 puta. Nakon što je beton u cijelosti izliven u kalup, pažljivo je podignut, pri čemu je došlo do slijeganja betona. Također su izmjerene visine slijeganja betona.

2.3.2. Ispitivanje gustoće

Gustoća svježeg betona određena je prema metodi ASTM C138/ C138M, uz upotrebu baždarene cilindrične posude poznatog volumena, pri čemu se istodobno može izračunati volumeni udio zraka u betonu. Beton je ugrađen u tri sloja, uz odgovarajuće zbijanje u skladu s normom, radi sprječavanja zaostajanja zraka u smjesi. Gustoća očvršnulog betona naknadno je provjerena omjerom mase i volumena uzoraka u obliku kocke (150 × 150 × 150 mm) nakon 28 dana sušenja.

2.3.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Uzorci oblika kocke dimenzija 100 × 100 × 100 mm izrađeni su za određivanje tlačne čvrstoće nakon 7, 14 i 28 dana njege. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom IS: 516-2021 [58] na univerzalnoj ispitnoj preši (UTM) kapaciteta 1000 kN, uz najmanje očitavanje od 1 kN, kako je to prikazano na slici 4. Za svaku betonsku mješavinu ispitana su tri uzorka, a prosječna tlačna čvrstoća određena je na temelju njihovih rezultata.



Slika 4. Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće

2.3.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Uzorci oblika valjka visine 200 mm i promjera 100 mm izrađeni su za određivanje vlačne čvrstoće cijepanjem nakon 7, 14 i 28 dana njege. Ispitivanje je provedeno u skladu sa smjernicama norme IS: 516-2021 [58] na univerzalnoj ispitnoj preši (UTM) kapaciteta 1000 kN, uz najmanje očitavanje od 1 kN, kako je to prikazano na slici 5. Za svaku betonsku mješavinu ispitana su tri uzorka, a prosječna vlačna čvrstoća cijepanjem određena je na temelju njihovih rezultata.



Slika 5. Uređaj za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

2.3.5. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

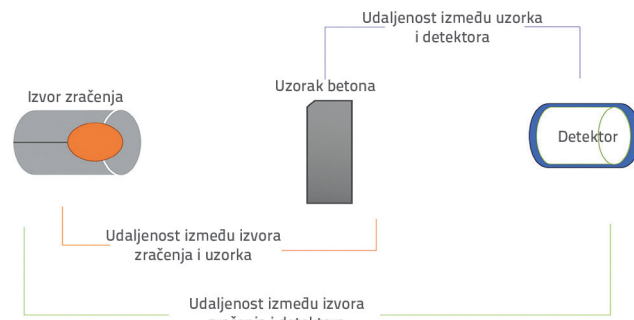
Uzorak prizme dimenzija 100 mm × 100 mm × 500 mm izrađen je i upotrijebljen za ispitivanje čvrstoće na savijanje nakon 7, 14 i 28 dana njege. Ispitivanja čvrstoće na savijanje (modul loma) provedena su u skladu s normom ASTM C78/C78M-21 [60], metodom opterećenja u četiri točke na jednostavno oslonjenome rasponu od 400 mm, primjenom servoupravljanog UTM-a kapaciteta 1000 kN, kao što je to prikazano na slici 6. Uzorci su ispitani pri brzini deformacije od 0,1 mm/min. Za svaku betonsku mješavinu ispitana su po tri uzorka, a prosječna vlačna čvrstoća cijepanjem određena je na temelju njihovih rezultata.

cm⁻¹. Linearni koeficijent prigušenja (μ) predstavlja vjerojatnost interakcije gama-zraka s materijalom po jediničnoj duljini. Vrijednost linearnoga koeficijenta prigušenja (μ) određena je na temelju odnosa intenziteta zračenja nakon prolaska kroz uzorak (I) i početnog intenziteta (I_0), uzimajući u obzir debljinu uzorka (x). Vrijednost linearnoga koeficijenta prigušenja (μ) izračunana je pomoću izraza (1).

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{x} \quad (1)$$



Slika 6. Uređaj za ispitivanje čvrstoće na savijanje



Slika 7. Shema ispitivanja zaštite od zračenja

2.3.6. Ispitivanje zaštite od zračenja

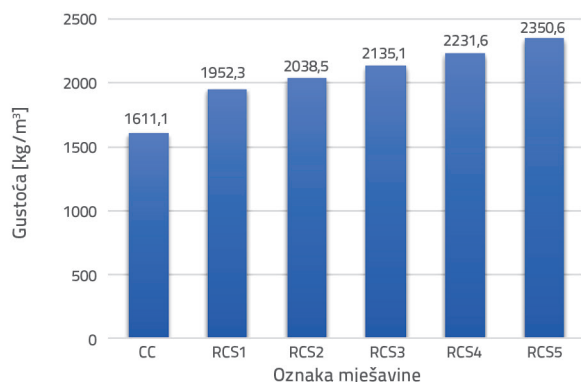
Ispitivanje zaštite od zračenja provedeno je radi određivanja linearnoga koeficijenta prigušenja (μ) kontrolne mješavine (CC) te RSC mješavina s bakrenom zguram i otpadnim keramičkim pločicama kao agregatima. Betonska ploča debljine 15 cm podvrgnuta je djelovanju gama-zraka emitiranih iz radioizotopa cezij-137 (Cs-137), energije 0,662 MeV. Tijekom ispitivanja primijenjen je uskopojasni postav kako bi se osigurala točna izmjera prigušenja zračenja. Scintilacijski detektor NaI(Tl) postavljen je na fiksnoj udaljenosti od približno 200 cm od izvora zračenja, u osi snopa, kako je to prikazano na slici 7. Betonska ploča bila je izložena gama-zračenju tijekom 60 sekundi. Intenzitet zračenja koji je prošao kroz betonske uzorke izmjeren je detektorom, a linearni koeficijent prigušenja (μ) izračunan je u

3. Rezultati i rasprava

3.1. Gustoća

Na slici 8. prikazano je povećanje gustoće betona s dodatkom bakrene zgre (CS) i recikliranih keramičkih pločica (RCT) u odnosu na mješavinu za konvencionalni beton (CC). Uočeno je da se gustoća betonskih mješavina postupno povećava s povećanjem udjela zamjene agregata bakrenom zguram i recikliranim keramičkim pločicama, što je potvrđeno kod svih mješavina (CC i RSC1 do RSC5). Mješavina za obični beton sa stopostotnim udjelom prirodnih agregata (CC) imala je najmanju gustoću, 1611,1 kg/m³. Mješavina RSC1, u kojoj je 350 kg/m³ bakrene zgre primijenjeno kao sitni agregat, a 525 kg/m³ recikliranih keramičkih pločica kao krupni agregat, postigla je gustoću od 1952,3 kg/m³, što je približno 21,2 %

više u odnosu na kontrolnu mješavinu. To povećanje gustoće ponajprije je posljedica veće gustoće (specifične mase) CS-a i RCT-a u usporedbi s proizvedenim pijeskom i prirodnim krupnim agregatom. Isti trend zamijećen je kod svih ostalih modificiranih mješavina: RSC2, RSC3, RSC4 i RSC5. Najveća gustoća, 2350,6 kg/m³, postignuta je kod mješavine RSC5 koja ima 630 kg/m³ bakrene zgure kao sitni agregat i 945 kg/m³ recikliranih keramičkih pločica kao krupni agregat, što predstavlja povećanje od približno 45,9 % u odnosu na mješavinu za konvencionalni beton.



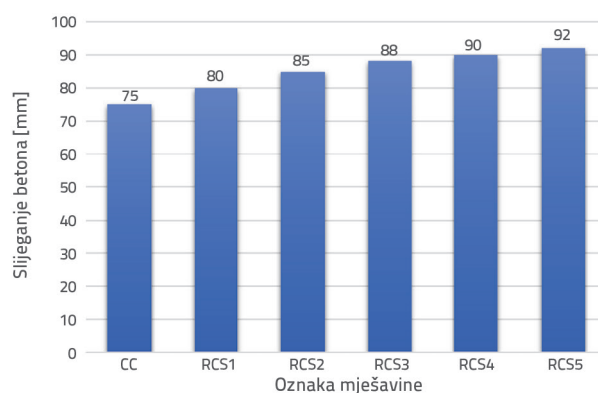
Slika 8. Gustoća betonske mješavine

Gustoća mješavine CC (1611,1 kg/m³) bila je manja u odnosu na sve mješavine u kojima je primijenjen reciklirani agregat od keramičkih pločica. Povećanjem udjela tog agregata od RSC1 do RSC5 gustoća se postupno povećavala i dosegla vrijednost od 2350,6 kg/m³. Takvo povećanje gustoće može se pripisati gušćoj mikrostrukтури keramičkih agregata, koji imaju manju poroznost i veću tvrdoću zrna u odnosu na prirodne krupne agregate. Osim toga veća gustoća bakrene zgure (CS) i recikliranih keramičkih pločica (RCT) doprinijela je učinkovitijemu pakiranju čestica u betonskoj matrici, čime se smanjuje udio šupljina između čestica. Uglati oblik i kruta struktura čestica RCT-a omogućuju učinkovito mehaničko povezivanje, smanjujući volumen šupljina te poboljšavajući zbijanje tijekom miješanja i ugradnje. Zajedničkim djelovanjem tih čimbenika formira se kompaktnija betonska matrica veće jedinične težine i manje poroznosti, čime se poboljšava ukupna gustoća nasipnog materijala. Dobiveni nalazi potvrđuju istraživanja Sivakumara i sur. [61] te Nepomucena i sur. [62], koji su utvrdili da zamjena krupnog agregata RCT-om rezultira povećanjem gustoće betona u odnosu na konvencionalni beton (CC). Hosen i Barbulescu [63] također su utvrdili da veća zamjena prirodnoga krupnog agregata otpadnim keramičkim agregatima može rezultirati povećanjem volumenske mase betona zbog manjeg udjela šupljina u takvome agregatu. Agregati od keramičkih pločica pokazuju malu poroznost, bolje zbijanje i snažnije mehaničko zahvaćanje čestica, što dovodi do smanjenja volumena šupljina i povećane gustoće pakiranja. Zato je ugradnja agregata od recikliranih keramičkih pločica povećala gustoću betona, što potvrđuje njihovu učinkovitost u proizvodnji kompaktnijih i gušćih betonskih mješavina. Takvo povećanje

gustoće ne doprinosi samo poboljšanju mehaničkih svojstava, već i čini te mješavine prikladnijima za specifične primjene poput zaštite od zračenja.

3.2. Vrijednost slijeganja

Na slici 9. prikazana je obradljivost betonskih mješavina koje imaju udjele CS-a i RCT-a kao sitnog i krupnog agregata u različitim stupnjevima zamjene, određenu putem vrijednosti slijeganja.

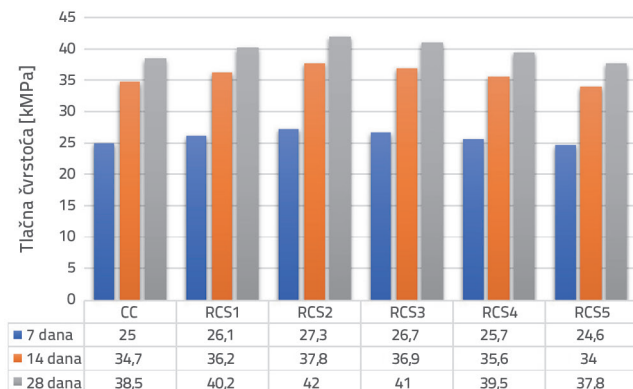


Slika 9. Slijeganje betona

Za konvencionalni beton zabilježeno je slijeganje od 75 mm, dok su modificirane mješavine (RCS1, RCS2, RCS3, RCS4, i RCS5) s udjelima zamjene agregata bakrenom zgurou i recikliranim keramičkim pločicama od 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, i 90 % ostvarile veća slijeganja od 80, 85, 88, 90 i 92 mm. Takvi rezultati pokazuju da dodatak CS-a i RCT-a kao zamjene za prirodne agregate znatno poboljšava slijeganje betona. Porast opsega slijeganja ponajprije se može pripisati svojstvima bakrene zgure. Zbog velike gustoće i glatke, staklaste površine bakrene zgure smanjuje se unutarnje trenje među česticama te ona u smjesi djeluje poput kugličnoga ležaja, što olakšava protjecanje betona. Osim toga manja sposobnost apsorpcije vode kod bakrene zgure u odnosu na proizvedeni pijesak omogućuje veću količinu raspoložive vode u mješavini [64], čime se poboljšava obradljivost betona. Slično tome, ugate, nepravilne, relativno glatke i manje porozne površine keramičkih pločica apsorbiraju manje vode u odnosu na granitni kamen koji se upotrebljava kao krupni agregat [65]. Time se u mješavini zadržava veća količina slobodne vode, što dodatno povećava njezinu fluidnost. Istodobna primjena bakrene zgure i otpadnih keramičkih pločica stvara sinergijski učinak na obradljivost betona. Bakrena zgura doprinosi boljoj protočnosti matrice morta i istodobno ublažava izraženu uglatost čestica RCT-a, smanjujući ukupnu grubost smjese. Zahvaljujući tome, beton je postao kohezivniji i obradljiviji, čak i pri većim udjelima zamjene. To potvrđuje da su i CS i RCT održive alternative prirodnim agregatima, sposobne poboljšati obradljivost i učiniti beton prikladnim za primjene koje zahtijevaju umjerene do visoke vrijednosti slijeganja kao što su to pumpani ili predgotovljeni beton.

3.3. Tlačna čvrstoća

Na slici 10. prikazane su tlačne čvrstoće betona s bakrenom zgurom i recikliranim keramičkim pločicama kao djelomičnom zamjenom agregata nakon 7, 14 i 28 dana sušenja. Nakon 7 dana tlačne čvrstoće mješavina RCS1, RCS2 i RCS3 bile su veće od tlačnih čvrstoća CC mješavine; RCS2 je imao tlačnu čvrstoću od 27,3 MPa, što je približno za 9,25 % više od tlačnih čvrstoća CC mješavine. Uočeni porast tlačne čvrstoće rezultat je učinkovitije hidratacije koju omogućuje CS, jer popunjava prazne prostore u strukturi i povećava kompaktnost smjese.



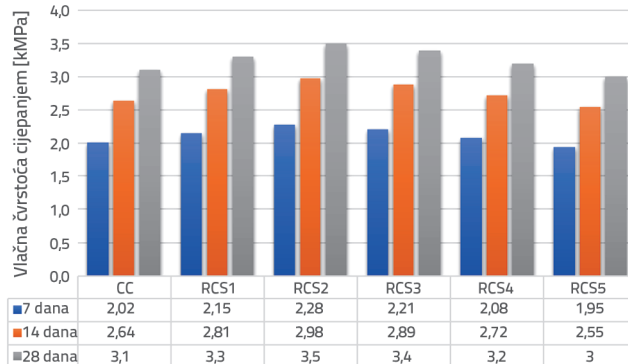
Slika 10. Tlačna čvrstoća betona

Nasuprot tome, mješavina RCS5 pokazala je smanjenje tlačne čvrstoće od 1,6 %, što upućuje na to da veliki udio zamjene može negativno utjecati na razvoj rane čvrstoće zbog slabijeg povezivanja i manje učinkovite hidratacije. Nakon 14 dana trend se nastavio, pri čemu je RCS2 pokazao najveći porast čvrstoće, koji je bio za oko 8,9 % veći od onog CC mješavine. Dodavanje CS-a i RCT-a pridonijelo je kvaliteti betonske matrice, pri čemu nije došlo do negativnog učinka zbog prevelikog udjela zamjene. Nakon 14 dana sušenja mješavina RCS5 postigla je tlačnu čvrstoću od 37,8 MPa, odnosno vrijednost približno 2 % manju u odnosu na obični beton. Trend se nastavio i nakon 28 dana, pri čemu je mješavina RCS2 pokazala najveći porast čvrstoće, približno 9,1 % veći u odnosu na mješavinu za obični beton, a mješavina RCS5 imala je manju tlačnu čvrstoću, oko 1,8 % manju u odnosu na CC. Navedeni rezultati upućuju na to da pozitivni učinci CS-a i RCT-a na čvrstoću betona vrijede ponajprije pri umjerenim razinama zamjene, dok veliki udjeli (više od 60 %) mogu narušiti sastav betona te uzrokovati smanjenje čvrstoće uslijed povećane poroznosti ili neravnoteže agregata i veziva. Rezultati su pokazali da je zamjenom finog i grubog agregata bakrenom zgurom i RCT-om na razini zamjene od 60 % (RCS2) postignuta najveća tlačna čvrstoća. Ti su rezultati u skladu s rezultatima koje navode Ouda i Abdelgader [66], prema kojima je optimalni udio zamjene agregata za postizanje veće tlačne čvrstoće betona za zaštitu od zračenja oko 60 %. Takva poboljšana svojstva rezultat su toga što zamjenski materijali poboljšavaju hidrataciju, gustoću i vezivanje u betonu. Utvrđeno je da je betonska mješavina predložena u ovome istraživanju

primjenom CS-a i RCT-a pokazala bolje rezultate tlačne čvrstoće u odnosu na postojeća istraživanja. Badarloo i sur. [67] razvili su beton za zaštitu od zračenja s baritnim agregatima i utvrdili da zamjena baritnog agregata smanjuje tlačnu čvrstoću za 20,82 - 27,52 %. Najimi i sur. [68] te Mirhossein i sur. [69] utvrdili su da se tlačna čvrstoća betona s bakrenom zgurom smanjuje s povećanjem količine bakrene zgre u agregatima, osobito kada se dodaje udjelu zamjene od 30 %. Međutim, u ovom je istraživanju zabilježeno povećanje tlačne čvrstoće od 9,1 % pri kombiniranoj zamjeni agregata s 60 % CS-a i RCT-a.

3.4. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Na slici 11. prikazane su vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem za mješavine s djelomičnom zamjenom agregata bakrenom zgurom i recikliranim keramičkim pločicama nakon 7, 14 i 28 dana.



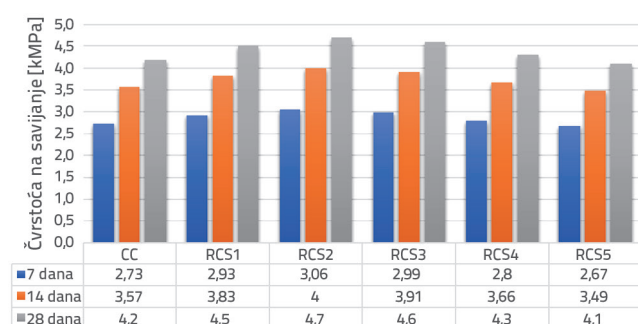
Slika 11. Vlačna čvrstoća betona cijepanjem

Nakon 7 dana vlačne čvrstoće betonskih mješavina RCS1, RCS2, RCS3 i RCS4 cijepanjem, koje imaju udjele od 50 %, 60 %, 70 % i 80 % CS-a i RCT-a, bile su za 6,44 %, 12,87 %, 9,41 % odnosno 2,97 % veće u odnosu na čvrstoću mješavine običnog betona. Nakon 14 dana vlačne čvrstoće cijepanjem betonskih mješavina RCS1, RCS2, RCS3 i RCS4, koje imaju udjele od 50 %, 60 %, 70 % i 80 % CS-a i RCTA-a, bile su za 6,44 %, 12,88 %, 9,47 % odnosno 3,03 % veće u odnosu na čvrstoću mješavine običnog betona. Nakon 28 dana vlačne čvrstoće cijepanjem betonskih mješavina RCS1, RCS2, RCS3 i RCS4, koje imaju udjele od 50 %, 60 %, 70 % i 80 % CS-a i RCTA-a, bile su za 6,45 %, 12,9 %, 9,68 % odnosno 3,23 % veće u odnosu na čvrstoću mješavine običnog betona. Rezultati su pokazali da je dodavanje bakrene zgre i otpadnih keramičkih pločica poboljšalo vlačnu čvrstoću cijepanjem pri udjelima zamjene od 60 % do 80 %. Taj porast čvrstoće povezan je s povećanom gustoćom pakiranja, svojstvima punila i pucolanskom aktivnosti bakrene troske [70, 71], čime se poboljšavaju zona sučeljka i raspodjela vlačnih naprezanja. Zahvaljujući čvrstoj i kutnoj morfologiji, otpadne keramičke pločice doprinose boljim mehaničkim vezama unutar betona te time povećavaju njegovu čvrstoću [72-74]. Međutim, pri većim razinama zamjene, osobito pri 90 % u mješavini RCS5, zabilježeno je smanjenje čvrstoće, vjerojatno zbog izraženije

izduljenosti čestica, većeg udjela pora te slabijeg prijanjanja između paste i agregata, što smanjuje vlačnu otpornost betonske matrice. Taj je rezultat u skladu s nalazima Oude i Abdelgadera [66], koji su utvrdili da se vlačna čvrstoća povećava za 1,90 %, 8,25 % i 11,74 % pri zamjeni prirodnog agregata vapnenačkim agregatom u udjelima od 20 %, 40 % i 60 %. Međutim, u ovom je istraživanju najveće poboljšanje, ono od 12,95 %, postignuto pri 60-postotnoj zamjeni agregata CS-om i RCT-om.

3.5. Čvrstoća na savijanje

Čvrstoće na savijanje betona s djelomičnom zamjenom agregata bakrenom zgurom i recikliranim keramičkim pločicama nakon 7, 14 i 28 dana prikazane su na slici 12.



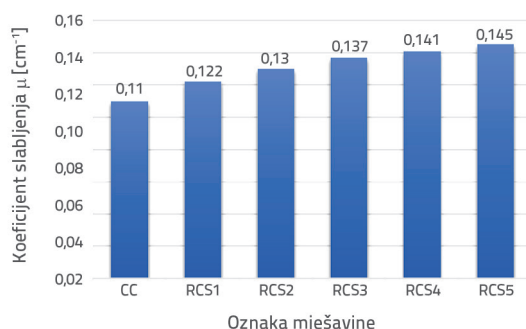
Slika 12. Čvrstoća na savijanje betona

Nakon 7 dana mješavine RSC1, RSC2, RSC3 i RSC4 pokazale su veće čvrstoće na savijanje u odnosu na konvencionalni beton, čija je vrijednost iznosila 2,73 MPa. Nakon 7 dana mješavine RSC1, RSC2, RSC3 i RSC4 imale su čvrstoće na savijanje veće za oko 7,33 %, 12,09 %, 9,52 % i 2,56 % u odnosu na konvencionalni beton. RSC2 (60 % zamjene) pokazao je najveći porast čvrstoće na savijanje, što potvrđuje da takav udio zamjene osigurava povoljniju gustoću pakiranja i bolji razvoj čvrstoće u ranoj starosti zbog svojstva punila i pucolanske reakcije CS-a [70, 71]. Kod mješavine RSC5 zabilježeno je smanjenje čvrstoće na savijanje od oko 2,20 %, što upućuje na to da veliki udio zamjene (90 %) može oslabiti razvoj čvrstoće u ranoj starosti zbog slabijeg prijanjanja i povećane poroznosti. Nakon 14 dana uočen je isti trend; modificirane mješavine RSC1, RSC2, RSC3 i RSC4 imale su veće čvrstoće na savijanje u odnosu na obični beton, čija je čvrstoća na savijanje iznosila 3,57 MPa. Čvrstoće na savijanje mješavina RSC1, RSC2, RSC3 i RSC4 bile su za 7,28 %, 12,03 %, 9,53 % odnosno 2,20 % veće u odnosu na obični beton. Čvrstoća na savijanje mješavine RSC5 bila je za 2,24 % manja u odnosu na obični beton, zbog oslabljene cementne matrice i slabijeg vezivanja agregata uslijed prevelikog udjela zamjene. Nakon 28 dana uočen je isti trend; modificirane mješavine RSC1, RSC2, RSC3 i RSC4 imale su veću čvrstoću na savijanje u odnosu na obični beton. Mješavina RSC2 ostvarila je čvrstoću na savijanje od 4,70 MPa, što predstavlja povećanje od 11,90 % u odnosu na obični beton (4,20 MPa). Mješavine RSC3 i RSC1 ostvarile su povećanja od 9,52 % odnosno 7,14 % u odnosu na

obični beton. RSC4 je zabilježio umjeren porast od 2,38 %, dok je RSC5 zabilježio smanjenje čvrstoće na savijanje od 2,38 % u odnosu na obični beton. Dosljedno najbolji rezultati mješavine RSC2 tijekom svih razdoblja njege potvrđuju da udio zamjene od 60 % predstavlja optimalnu ravnotežu između mehaničkih svojstava i održivosti. Suprotno tome, smanjenje čvrstoće kod RSC5 ukazuje na to da pretjerano velik udio CS-a i RCT-a može narušiti kvalitetu betona zbog povećane uglatosti zrna, lošije obradljivosti i oslabljenog integriteta cementne matrice [75]. Može se zaključiti da primjena CS-a i RCT-a kao agregata znatno povećava čvrstoću na savijanje betona. Slični rezultati zabilježeni su u istraživanju koje su proveli Shahid i sur. [76], koji su upotrijebili otpad od rezanja željeza kao agregat u betonu.

3.6. Koeficijent prigušenja

Koeficijent prigušenja (μ) temeljni je pokazatelj učinkovitosti betonskog materijala u zaštiti od zračenja. Na slici 13. prikazani su koeficijenti prigušenja za betone s djelomičnom zamjenom agregata CS-om i RCT-om.



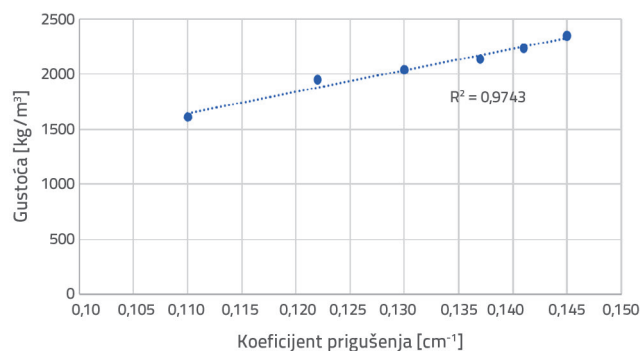
Slika 13. Koeficijent prigušenja betonske mješavine

Rezultati ispitivanja zaštite od zračenja pokazali su da s porastom udjela CS-a i RCT-a u betonskoj mješavini dolazi do povećanja koeficijenta prigušenja, što upućuje na poboljšanu sposobnost prigušivanja gama-zračenja. Mješavina običnog betona ostavila je koeficijent prigušenja od 0,110 cm⁻¹. Dodavanjem bakrene zgure i recikliranih keramičkih pločica vrijednosti koeficijenta prigušenja postupno su se povećavale. U mješavinama RSC1, RSC2, RSC3, RSC4 i RSC5 s udjelima CS-a i RCT-a od 50 %, 60 %, 70 %, 80 % i 90 % zabilježen je koeficijent prigušenja od 0,122 cm⁻¹, 0,130 cm⁻¹, 0,137 cm⁻¹, 0,141 cm⁻¹ i 0,145 cm⁻¹, što je otprilike za 10,9 %, 17,27 %, 24,55 %, 28,18 % i 31,82 % više u odnosu na mješavinu konvencionalnog betona. To potvrđuje da dodavanje CS-a i RCT-a, koji imaju različite gustoće i atomske strukture u odnosu na prirodne agregate, doprinosi poboljšanoj zaštitnoj sposobnosti betona. To je najvjerojatnije posljedica optimalne ravnoteže fizikalnih svojstava CS-a i RCT-a. Veći koeficijent prigušenja pri većim udjelima zamjene upućuje na to da CS i RCT ne samo da poboljšavaju mehanička svojstva betona, već i povećavaju njegovu sposobnost blokiranja odnosno smanjenja prodora gama-zračenja. Taj je zaključak u skladu s nalazima Azeeza i

sur. [77], koji su utvrdili da linearni koeficijent prigušenja raste s povećanjem udjela otpadnog materijala u betonu. Azeez i sur. [78] zabilježili su znatno poboljšanje zaštitnih svojstava betona, i to u rasponu od 20 % do 25 %, primjenom željeznog otpada kao ispune u udjelima od 5 % do 30 %. Ibrahim i sur. [79] utvrdili su da zamjena prirodnog agregata s 30 % hematita i 30 % zgure željeza dovodi do povećanja koeficijenta prigušenja od 1,9 % do 9,32 %. U ovom je istraživanju, međutim, postignuto poboljšanje zaštitnih svojstava betona od 28,18 % dodavanjem CS-a i RCT-a. Betonska mješavina s dodatkom bakrene zgure i otpadnih keramičkih pločica pokazala je poboljšana zaštitna svojstva uz vrhunska mehanička svojstva, pri čemu je mješavina RSC2 (sa 60 % zamjene) ostvarila najbolji učinak u pogledu koeficijenta prigušenja. Sastav mješavine RSC2 pokazao se najprikladnijim za primjene u kojima je neophodna zaštita od zračenja kao što su to gradnje nuklearnih laboratorija, prostorija za medicinsku radiologiju te zaštitnih barijera za rendgensko zračenje.

3.7. Korelacija između koeficijenta prigušenja i gustoće

Na slici 14. prikazana je izražena pozitivna linearna korelacija između koeficijenta prigušenja (cm^{-1}) i gustoće (kg/m^3) betonske mješavine s različitim udjelima CS-a i RCT-a.



Slika 14. Korelacija između koeficijenta prigušenja i gustoće

Koeficijent determinacije ($R^2 = 0,9743$) upućuje na vrlo visoku razinu korelacije, što potvrđuje da su zaštitna svojstva betona od gama-zračenja uvelike određena njegovom gustoćom. Gustoća betonskih mješavina povećala se s 1611 kg/m^3 na $2350,6 \text{ kg/m}^3$ dodavanjem CS-a i RCT-a kao sitnog odnosno krupnog agregata pri udjelu zamjene od 90 %. U skladu s time, porast gustoće prati i porast koeficijenta prigušenja, što ukazuje na to da gušće betonske mješavine učinkovitije apsorbiraju odnosno prigušuju gama-zračenje. Slični rezultati zabilježeni su u prethodnim istraživanjima [80-83]. Taj je trend znanstveno utemeljen jer gušći materijali posjeduju veću masu po jedinici volumena, odnosno veći broj atomskih

jezgara s kojima gama-zrake mogu biti u interakciji. Bakrena zgura, zbog svoje visoke gustoće i znatnog udjela metalnih komponenti, znatno doprinosi učinku zaštite. Slično tomu reciklirane keramičke pločice povećavaju zbijenost i gustoću betona te time poboljšavaju njegova svojstva prigušivanja zračenja. Zato betoni s dodatkom CS-a i RCT-a ne samo da doprinose održivoj primjeni sirovina, nego i unapređuju funkcionalna svojstva poput zaštite od zračenja, što ih čini prikladnima za primjenu u nuklearnim, medicinskim i industrijskim okružjima izloženima zračenju.

4. Zaključak

U ovom je istraživanju razvijen beton za zaštitu od gama-zračenja, pri čemu su kao agregati primijenjeni bakrena zgura (CS) i reciklirane keramičke pločice (RCT). Glavni zaključci provedenog istraživanja mogu se sažeti kako slijedi:

- Ugradnja CS-a i RCT-a u beton znatno poboljšava njegova zaštitna svojstva od zračenja, uz zadržavanje ili povećanje mehaničkih svojstava.
- Mješavina RSC2 pokazala je optimalnu kombinaciju čvrstoće i svojstava prigušivanja gama-zračenja, pri čemu je ostvarila čvrstoću na savijanje od $4,70 \text{ MPa}$, vlačnu čvrstoću cijepanjem za 12,9 % veću u odnosu na obični beton te koeficijent prigušenja od $0,130 \text{ cm}^{-1}$, što predstavlja povećanje zaštite od gama-zračenja od 17,27 % u odnosu na obični beton.
- Veći udjeli zamjene sitnog i krupnog agregata CS-om i RCT-om dodatno su povećali koeficijent prigušenja do najviše $0,145 \text{ cm}^{-1}$, što predstavlja poboljšanje od 31,82 %. Međutim, udjeli zamjene veći od 60 %, kao što je to zabilježeno kod mješavina RSC3 i RSC5, doveli su do neznatnog smanjenja mehaničke čvrstoće.
- Mješavina RSC5 imala je najveću gustoću među svim mješavinama, $2350,6 \text{ kg/m}^3$, te je pokazala snažnu korelaciju između gustoće ($R^2 = 0,9743$) i učinkovitosti zaštite od zračenja.
- Dobiveni rezultati potvrđuju da upotreba CS-a i RCT-a kao agregata pri udjelu zamjene od 60 % omogućuje razvoj trajnog i učinkovitog betona za zaštitu od gama-zračenja, prikladnog za primjenu u nuklearnim laboratorijima, prostorijama za medicinsku radiologiju i kao zaštite od rendgenskog zračenja.
- Mješavina RSC2 pruža optimalna svojstva i ekonomsku isplativost, osiguravajući beton koji istodobno poboljšava mehaničku otpornost i zaštitu od zračenja, uz zadržavanje konstruktivne cjelovitosti.

Nedostatak izravnih podataka o poroznosti ograničenje je ovog istraživanja, jer poroznost znatno utječe na gustoću, apsorpciju vode, čvrstoću i trajnost betona. Buduća istraživanja trebala bi uključivati izravno ispitivanje poroznosti kako bi se omogućila cjelovitija procjena učinkovitosti materijala.

LITERATURA

- [1] Oluwasola, E.A., Afolayan, A., Ipindola, O.O., Popoola, M.O., Oginni, A.O.: Effect of aggregate shapes on the properties of concrete, *LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies*, 5 (2020), pp. 1-10.
- [2] Hemalatha, T., Sangoju, B., Muthuramalingam, G.: A study on copper slag as fine aggregate in improving the electrical conductivity of cement mortar, *Sādhanā*, 47 (2020), p. 141.
- [3] Akbulut, H., Güler, C.: Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements, *Building and environment*, 42 (2007), pp. 1921-1930.
- [4] Aliabdo, A.A., Abd-Elmoaty, A.E.M., Hassan, H.H.: Utilization of crushed clay brick in concrete industry, *Alexandria Engineering Journal*, 53 (2014), pp. 151-168.
- [5] Tripathi, E., Patowari, P.K., Pati, S.: Assessment of mixing performance in a spiral micromixer with different inlet path configurations. *Sādhanā*, 47 (2022), p. 240.
- [6] Wu, K., Chen, F., Chen, C., Lin, S., Nan, Y.: Study of basic mechanical properties of recycled concrete with various recycled coarse aggregate mixes, *Građevinar*, 75 (2023) 1, pp. 1-12, <https://doi.org/10.14256/JCE.2244.2017>
- [7] Shi, C., Meyer, C., Behnood, A.: Utilization of copper slag in cement and concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (2008), pp. 1115-1120.
- [8] Brindha, D., Baskaran, T., Nagan, S.: Assessment of corrosion and durability characteristics of copper slag admixed concrete, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1 (2010), p. 192.
- [9] Lye, C.Q., Koh, S.K., Mangabhai, R., Dhir, R.K.: Use of copper slag and washed copper slag as sand in concrete: a state-of-the-art review, *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015), pp. 665-679.
- [10] Soni, M.M., Mangroliya, J.R.: Performance of copper slag on strength as partial replacement of fine aggregate in concrete, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 7 (2015), p. 347.
- [11] Silva, Y.F., Burbano-Garcia, C., Araya-Letelier, G., Gonzalez, M.: Short-and long-term experimental performance of concrete with copper slag: Mechanical and physical properties assessment, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024), p. e03302.
- [12] Al-Jabri, K.S., Al-Saidy, A.H., Taha, R.: Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 933-938.
- [13] Gupta, N., Siddique, R.: Durability characteristics of self-compacting concrete made with copper slag, *Construction and Building Materials*, 247 (2020), p. 118580.
- [14] Divya, S., Praveenkumar, S.: An integrated evaluation of graphene-based concrete mixture with copper slag and quarry dust using response surface methodology, *Journal of Building Engineering*, 86 (2024), p. 108876
- [15] Sanchez, E., García-Ten, J., Sanz, V., Moreno, A.: Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution, *Ceramics International*, 36 (2010), pp. 831-845.
- [16] Baraldi, L.: World Production and Consumption of Ceramic Tiles, *Ceramic World*, 41 (2021), pp. 26-40.
- [17] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S.: Reusing ceramic wastes in concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (2010), pp. 832-838.
- [18] Tawfeeq, W.M., Alsaidi, M., Al-Kamzari, A., Al-Shibli, M., Al-Mamari, Z.: Using Crushed Tiles as Coarse Aggregate in Concrete Mix, In 3rd International Conference on Civil, Environment and Waste Management (2016), pp. 12-14.
- [19] Al-Labban, S.N.Y., Abdullah, F.A., Karagoly, Y.H., Shubber, M.S., Hasan, S.A., Jabal, Q.A.: Waste aggregate concrete properties using waste tiles as coarse aggregate and modified with PC superplasticizer, *Open Engineering*, 12 (2022), pp. 1089-1096.
- [20] Keshavarz, Z., Mostofinejad, D.: Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete, *Construction and Building Materials*, 195 (2019), pp. 218-230.
- [21] Tawfik, T.A., Sičáková, A., Kuzielová, E., Kušník, Š., Eštoková, A., Bálintová, M., Junáková, N.: Sustainable reuse of waste ceramic tiles powder and waste brick powder as a replacement for cement on green high strength concrete properties, *Innovative Infrastructure Solutions*, 9 (2024), p. 166.
- [22] Priya, S.A., Ray, S., Haque, M., Mita, A.F., Hossain, Z.: Experimental and numerical investigation of the properties of concrete with ceramic tile waste and stone dust as substitutes for natural aggregates, *Discover Civil Engineering*, 1 (2024), p. 120.
- [23] Baričević, A., Kovač, D., Didulica, K.: Construction of a new day hospital in Zadar using recycled aggregate concrete, *Građevinar*, 73 (2021) 8, pp. 833-844, <https://doi.org/10.14256/JCE.3233.2021>.
- [24] Lawrence, D.J., Feldman, W.C., Gold, R.E., Goldsten, J.O., McNutt, R.L.: The neutron, gamma-ray, X-ray spectrometer (NGXS): A compact instrument for making combined measurements of neutrons, gamma-rays, and X-rays, *Acta Astronautica*, 93 (2014), pp. 524-529.
- [25] Zayed, A.M., Masoud, M.A., Rashad, A.M., El-Khayatt, A.M., Sakr, K., Kansouh, W.A., Shahien, M.G.: Influence of heavyweight aggregates on the physico-mechanical and radiation attenuation properties of serpentine-based concrete, *Construction and Building Materials*, 260 (2020), p. 120473.
- [26] Portugal-Pereira, J., Ferreira, P., Cunha, J., Szklo, A., Schaeffer, R., Araújo, M.: Better late than never, but never late is better: Risk Assessment of Nuclear Power Construction Projects, *Energy Policy*, 120 (2018), pp. 158-166.
- [27] Jin, T., Kim, J.: What is better for mitigating carbon emissions- Renewable energy or nuclear energy? A panel data analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91 (2018), pp. 464-471.
- [28] Mahmood, N., Wang, Z., Zhang, B.: The role of nuclear energy in the correction of environmental pollution: Evidence from Pakistan, *Nuclear Engineering and Technology*, 52 (2020), pp. 1327-1333.
- [29] Ustabas, I., Demirci, M., Baltas, H., Demir, Y., Erdogdu, S., Kurt, Z., Cakmak, T.: Mechanical and radiation attenuation properties of conventional and heavy concrete with diverse aggregate and water/cement ratios, *Građevinar*, 74 (2022) 8, pp. 635-645, <https://doi.org/10.14256/JCE.3382.2021>.
- [30] Al-Tersawy, S.H., El-Sadany, R.A., Sallam, H.E.M.: Experimental gamma-ray attenuation and theoretical optimization of barite concrete mixtures with nanomaterials against neutrons and gamma rays, *Construction and Building Materials*, 289 (2021), p. 123190.
- [31] Aygün, B., Şakar, E., Agar, O., Sayyed, M. I., Karabulut, A., Singh, V. P.: Development of new heavy concretes containing chrome-ore for nuclear radiation shielding applications, *Progress in Nuclear Energy*, 133 (2021), p. 103645.
- [32] AbuAlRoos, N.J., Amin, N.A.B., Zainon, R.: Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review, *Radiation Physics and Chemistry*, 165 (2019), p. 108439.

- [33] Zhao, H., Jiang, K., Yang, R., Tang, Y., Liu, J.: Experimental and theoretical analysis on coupled effect of hydration, temperature and humidity in early-age cement-based materials, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146 (2020), p. 118784.
- [34] Liu, J., Tian, Q., Wang, Y., Li, H., Xu, W.: Evaluation method and mitigation strategies for shrinkage cracking of modern concrete, *Engineering*, 7 (2021), pp. 348-357.
- [35] Akkurt, İ., Başıyigit, C., Akkaş, A., Kılınçarslan, Ş., Mavi, B., Günoğlu, K.: Determination of some heavyweight aggregate half value layer thickness used for radiation shielding, *Acta Physica Polonica A*, 121 (2012), pp. 138-140.
- [36] Monte, F.L., Gambarova, P.G.: Thermomechanical behaviour of baritic concrete exposed to high temperature, *Cement and Concrete Composites*, 53 (2014), pp. 305-315.
- [37] González-Ortega, M.A., Cavalero, S.H.P., Aguado, A.: Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 74 (2015), pp. 169-175.
- [38] Ouda, A.S., Abdel-Gawwad, H.A.: The effect of replacing sand by iron slag on physical, mechanical and radiological properties of cement mortar. *HBRC Journal*, 13 (2017) 3, 255-261.
- [39] Cullu, M., Bakirhan, E.: Investigation of radiation absorption coefficients of lead-zinc mine waste rock mixed heavy concrete at 662-1460 keV energy range, *Construction and Building Materials*, 173 (2018), pp. 17-27.
- [40] Papachristoforou, M., Papayianni, I.: Radiation shielding and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) produced with EAF slag aggregates, *Radiation Physics and Chemistry*, 149 (2018), pp. 26-32.
- [41] Dezhampannah, S., Nikbin, I.M., Mehdipour, S., Mohebbi, R., Moghadam, H.: Fiber-reinforced concrete containing nano-TiO₂ as a new gamma-ray radiation shielding materials, *Journal of Building Engineering*, 44 (2021), pp. 102542.
- [42] Rawat, G., Gandhi, S., Murthy, Y.I.: A critical assessment on the effect of nano-titanium dioxide on the properties of concrete, *Građevinar*, 74 (2022) 7, pp. 553-560.
- [43] Abo-El-Enein, S.A., El-Hosiny, F.I., El-Gamal, S.M.A., Amin, M.S., Ramadan, M.: Gamma radiation shielding, fire resistance and physicochemical characteristics of Portland cement pastes modified with synthesized Fe₂O₃ and ZnO nanoparticles, *Construction and Building Materials*, 173 (2018), pp. 687-706.
- [44] Ling, T.C., Poon, C.S.: Feasible use of recycled CRT funnel glass as heavyweight fine aggregate in barite concrete, *Journal of Cleaner Production*, 33 (2012), pp. 42-49.
- [45] Alwaeli, M.: Investigation of gamma radiation shielding and compressive strength properties of concrete containing scale and granulated lead-zinc slag wastes, *Journal of Cleaner Production*, 166 (2017), pp. 157-162.
- [46] Baalamurugan, J., Kumar, V.G., Chandrasekaran, S., Balasundar, S., Venkatraman, B., Padmapriya, R., Raja, V. B.: Utilization of induction furnace steel slag in concrete as coarse aggregate for gamma radiation shielding, *Journal of Hazardous Materials*, 369 (2019), pp. 561-568.
- [47] IS: 12269-1987, Ordinary Portland Cement, 53 grades - Specifications.
- [48] IS: 383-1970, Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete.
- [49] IS: 456-2000, Plain and reinforced concrete, Code of Practice.
- [50] ASTM C 494-13, Standard specifications for chemical admixtures for concrete.
- [51] Hwang, C.L., Lai, J.C.: Properties of concrete using copper slag as a substitute for fine aggregate, *Special Publication*, 114 (1989), pp. 1677-1696.
- [52] Madheswaran, C.K., Ambily, P.S., Dattatreya, J.K., Rajamane, N.P.: Studies on use of copper slag as replacement material for river sand in building constructions, *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 95 (2014), pp. 169-177.
- [53] Raman, J.V.M., Rajesh, R., Velswaran, P.S.: Study on strength of high-performance concrete by partial replacement of fine aggregate by copper slag, *International Journal of Applied Engineering Research*, 14 (2019), pp. 2795-2798.
- [54] Maharishi, A., Singh, S.P., Gupta, L.K.: Strength and durability studies on slag cement concrete made with copper slag as fine aggregates, *Materials Today: Proceedings*, 38 (2021), pp. 2639-2648.
- [55] IS: 2386 (Part 3)-1963, Methods of test for aggregates for concrete.
- [56] IS: 2386 (Part 1)- 1963, Methods of test for aggregates for concrete.
- [57] IS: 10262-2019, Concrete mix design.
- [58] IS: 516-2021, Hardened concrete methods of test part 1 testing of strength of hardened concrete section-1 compressive, flexural, and split tensile strength.
- [59] IS: 1199-1959, Methods of sampling and analysis of concrete.
- [61] ASTM C78/C78M-21, Standard test method for flexural strength of concrete (using a simple beam with third-point loading)
- [62] Sivakumar, A., Srividhya, S., Sathiyamoorthy, V., Seenivasan, M., Subbarayan, M.R.: Impact of waste ceramic tiles as partial replacement of fine and coarse aggregate in concrete, *Materials Today: Proceedings*, 61 (2022), pp. 224-231.
- [63] Nepomuceno, M.C., Isidoro, R.A., Catarino, J.P.: Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste, *Construction and Building Materials*, 165 (2018), pp. 284-294.
- [64] Hosen, K., Bărbulescu, A.: Sustainable concrete using ceramic tile waste as a substitute for brick aggregate, *Materials*, 18 (2025), p. 3093.
- [65] Jin, Q., Chen, L.: A review of the influence of copper slag on the properties of cement-based materials, *Materials*, 15 (2022), p. 8594.
- [66] Anderson, D.J., Smith, S.T., Au, F.T.: Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate, *Construction and Building Materials*, 117 (2016), pp. 20-28.
- [67] Ouda, A.S., Abdelgader, H.S.: Assessing the physical, mechanical properties, and γ -ray attenuation of heavy density concrete for radiation shielding purposes, *Geosystem Engineering*, 22 (2019), pp. 72-80.
- [68] Badarloo, B., Lehner, P., Bakhtiari Doost, R.: Mechanical properties and gamma radiation transmission rate of heavyweight concrete containing barite aggregates, *Materials*, 15 (2022), p. 2173.
- [69] Najimi, M., Sobhani, J., Pourkhorshidi, A.R.: Durability of copper slag contained concrete exposed to sulfate attack, *Construction and Building materials*, 25 (2011), pp. 1895-1905.
- [70] Mirhosseini, S.R., Fadaee, M., Tabatabaei, R., Fadaee, M.J.: Mechanical properties of concrete with Sarcheshmeh mineral complex copper slag as a part of cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 134 (2017), pp. 44-49.

- [71] Casagrande, C.A., Santos, D.D.D., Jochem, L.F., Nóbrega, A.C.D.: Evaluation of copper slag as aggregate addition on properties of cementitious matrix, *Matéria* (Rio de Janeiro), 25 (2020), p. e-12889.
- [72] Moura, W.A., Gonçalves, J.P., Lima, M.B.L.: Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete, *Journal of Materials Science*, 42 (2007), pp. 2226-2230
- [73] Cabalar, A.F., Hassan, D.I., Abdulnaffa, M.D.: Use of waste ceramic tiles for road pavement subgrade. *Road Materials and Pavement Design*, 18 (2017), pp. 882--96.
- [74] Zhang, P., Zhang, P., Wu, J., Guo, Z., Zhang, Y., Zheng, Y.: Mechanical properties and durability of sustainable concrete manufactured using ceramic waste: A review, *Journal of Renewable Materials*, 11 (2023), pp. 1-18.
- [75] Nasare, R., Shah, V., Joshi, T., Dave, U., Ghaffar, S.H.: Exploring sustainable utilization of ceramic waste in heat-resistant concrete: A comprehensive review, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 22 (2025), p. e15021
- [76] Arif, R., Javed, M.F., Asghar, R., Iqtidar, A., Ahmed, B., Alyousef, R., Khan, M.A.: A scientometric review on the utilization of copper slag as a substitute constituent of ordinary Portland cement concrete, *Reviews on Advanced Materials Science*, 64 (2025), p. 20240082.
- [77] Shahid, S., Amjad, R., Ali, S.: Evaluation of mechanical and shielding properties of normal weight concrete by incorporating iron cutting waste (ICW), *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46 (2022), pp. 117-132.
- [78] Azeez, A.B., Mohammed, K.S., Al Bakri, A.M., Hasan, H.I., Abdulkareem, O.A.: Radiation shielding characteristics of concretes incorporates different particle sizes of various waste materials, *Advanced Materials Research*, 925 (2014), pp. 190-194.
- [79] Azeez, A.B., Mohammed, K.S., Abdullah, M.M.A.B., Hussin, K., Sandu, A.V., Razak, R.A.: The effect of various waste materials' content on the attenuation level of anti-radiation shielding concrete, *Materials*, 6 (2013), pp. 4836-4846.
- [80] Ibrahim, A.M., Mohamed, A.R., El-Khatib, A.M., Alabsy, M.T., Elsalamawy, M.: Effect of hematite and iron slag as aggregate replacement on thermal, mechanical and gamma-radiation shielding properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 310 (2021), p. 125225.
- [81] Akyuz, S.: Heavyweight concrete with barite aggregate for protecting structures against gamma rays, *ITU J*, 35 (1977), pp. 59-69.
- [82] González-Ortega, M.A., Segura, I., Cavalaro, S.H.P., Toralles-Carbonari, B., Aguado, A., Andrello, A.C.: Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags *Construction and Building Materials*, 51 (2014), 432-438.
- [83] Ouda, A.S.: Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding, *HBRC Journal*, 11 (2015), pp. 328-338.
- [84] Ozen, S., Şengül, C., Erenoğlu, T., Çolak, Ü., Reyhancan, I.A., Taşdemir, M.A.: Properties of heavyweight concrete for structural and radiation shielding purposes, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016), pp. 1573-1584.