

Primljen / Received: 22.2.2026.

Ispravljen / Corrected: 20.4.2026.

Prihvaćen / Accepted: 7.5.2026.

Dostupno online / Available online: 10.7.2026.

Valorizacija sedimenta izvađenog iz akumulacije brane kao djelomične zamjene cementa u propusnom betonu

Autori:



¹Farida Amiar, MSc. CE
farida.amiar@ummto.dz



¹Izv.prof.dr..sc. Ourdia Fedaoui-Akmoussi
Ourdia.fedaoui@ummto.dz
Autor za korespondenciju



¹Izv.prof.dr..sc. Ourdia Haddad
Ourdia.haddad@ummto.dz



²Prof. Nordine Leklou
nordine.leklou@univ-nantes.fr



³Dr.sc. Shaswat Kumar Das
shaswat-kumar.das@builders-ingenieurs.fr

¹Sveučilište Mouloud Mammeri u Tizi Ouzou, Alžir
Građevinsk fakultet

²Sveučilište u Nantu, Francuska

³Građevinsko inženjerska škola, Francuska
Istraživačka jedinica "BuildersLAB"

Prethodno priopćenje

[Farida Amiar, Ourdia Fedaoui-Akmoussi, Ourdia Haddad, Nordine Leklou, Shaswat Kumar Das](#)

Valorizacija sedimenta izvađenog iz akumulacije brane kao djelomične zamjene cementa u propusnom betonu

Svrha ovog istraživanja bila je ispitati mehanička i hidraulička svojstva propusnog betona izrađenog s kalciniranim sedimentom izvađenim iz akumulacije brane (eng. *calcined dredged dam sediments* - CDDS) kao djelomičnom zamjenom cementa. Razmatrane su tri temperature kalcinacije (700, 750 i 800 °C), za svaku temperaturu primijenjena su tri udjela dodatka CDDS-a (5, 10 i 15 %), uz jedinstveni vodocementni omjer (v/c) od 0,36. Ocijenjeni su učinci temperature kalcinacije CDDS-a i njegova udjela zamjene na tlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje, propusnost vode i poroznost. Rezultati su pokazali da propusni beton koji sadrži 10 % CDDS-a kalciniranog pri temperaturi od 750 °C pokazuje značajno poboljšanje tlačne čvrstoće uz prihvatljiv koeficijent propusnosti preporučen za propusni beton.

Ključne riječi:

propusni beton, sediment iz akumulacije brane, kalcinacija, pucolanski učinak, zamjena cementa

Research Paper

[Farida Amiar, Ourdia Fedaoui-Akmoussi, Ourdia Haddad, Nordine Leklou, Shaswat Kumar Das](#)

Valorization of dredged dam sediment as partial cement substitute in pervious concrete

The purpose of this study was to investigate the mechanical and hydraulic properties of pervious concrete made with calcined dredged dam sediments (CDDS) as a partial cement replacement. Three calcination temperature scales were considered (700, 750, and 800 °C), for each temperature scale three incorporation rates of (CDDS) were adopted (5, 10, and 15 %), with a single water to cement ratio (E/C) of 0.36. The effects of the (CDDS) calcination temperature and its substitution rate on the compressive strength, flexural strength, water permeability, and porosity were evaluated. The results revealed that pervious concrete containing 10 % of (CDDS) calcined at a temperature of 750 °C shows a notable enhancement in compressive strength with acceptable permeability coefficient recommended for pervious concrete.

Key words:

pervious concrete, dredged dam sediment, calcination, pozzolanic effect, cement replacement

1. Uvod

Građevinski sektor, osobito proizvodnja portlandskog cementa (PC), poznat je po velikom ugljičnom otisku [1]. Odgovoran je za približno 22 % (2,2 Gt) svjetskih emisija stakleničkih plinova iz proizvodnih procesa [2, 3]. Osim toga, zbog brzog rasta građevinske industrije predviđa se da će potražnja za cementom (uključujući niskougljični PC) do 2050. porasti za 12 do 23 % u usporedbi s 2014. [2, 3]. To uzrokuje proporcionalno povećanje emisija ugljika; stoga je potrebno primijeniti učinkovite strategije za postizanje ugljične neutralnosti betona. Među rješenjima koja predlaže tehnološka karta Međunarodne agencije za okoliš (eng. *International Energy Agency* – IAE) za ublažavanje tog izazova jest djelomična zamjena PC-a u betonu pucolanskim materijalima, široko poznatima kao dodatni cementni materijali (eng. *supplementary cementitious materials* – SCM) [3–6].

S druge strane, sedimentacija akumulacija predstavlja veliku prijetnju branama u mnogim dijelovima svijeta [7, 8]. Ona uzrokuje gubitak globalnog kapaciteta akumulacija u rasponu od 13 % do 19 % [7–9]. Zbog toga se taj otpad često uklanja, ali njegovo skladištenje zahtijeva velik prostor koji bi se inače mogao namijeniti drugim aktivnostima. U tom je smislu valorizacija izvađenog sedimenta kao dodatka betonu učinkovito okolišno rješenje koje može pridonijeti održivosti vodoopskrbe, osigurati sigurnost brana, izbjeći potrebu za odlaganjem na odlagališta [7–11] i smanjiti uporabu cementa. U tom su kontekstu mnogi istraživači proučavali uporabu kalciniranih sedimenata izvađenih iz akumulacija brana (eng. *calcined dredged dam sediments* – CDDS) kao djelomičnih zamjena za veziva [9]. U studiji koju su proveli Touhami K. i sur. [7], udio zamjene od 10 % CDDS-a pri 750 °C smatra se idealnim za uporabu CDDS-a kao SCM-a. Druga studija [12] pokazala je da sediment izvađen iz akumulacije brane (eng. *dredged dam sediments* – DDS), zagrijan na 600 °C pri brzini zagrijavanja od 20 °C/min i dodan cementnom klinkeru u udjelu od 10 %, poboljšava čvrstoću veziva.

DDS je pretežno glinovit materijal koji obično sadrži minerale poput kaolinita, smektita, ilita i montmorilonita te nečistoće uključujući kvarc i feldspat s različitim udjelima kaolina [7, 13]. Različite su studije pokazale da se nakon aktivacijskog procesa pri različitim temperaturnim rasponima (između 600 i 900 °C) tijekom određenog vremena te gline ponašaju kao pucolanski materijali. Taj je temperaturni raspon općenito znatno niži od temperature koja se primjenjuje za stvaranje cementnog klinkera, čime se smanjuju naknadne emisije ugljika (CO₂) povezane s energijom kalcinacije [14]. Važno je istaknuti da proces kalcinacije gline stvara procijenjenih 393 kg CO₂ po toni, što iznosi samo 40 % ukupnih emisija povezanih s procesom proizvodnje cementa. To je djelomično posljedica nižih temperatura kalcinacije i nižeg udjela vapna u usporedbi s tipičnim cementnim klinkerima [4, 7, 14, 15].

Do sada se većina istraživanja usredotočila na ponašanje glinenih minerala u cementnoj pasti te je istraživanje koncentrirano na njihov udio kaolina, zbog široko prihvaćenog stajališta da kaolin ima najveću pucolansku reaktivnost među glinenim

mineralima [16–18]. Stoga su mnogi istraživači procijenili da uporaba sedimenata kao SCM-a zahtijeva najmanje 40 % udjela kaolina [4, 7, 13, 15]. Međutim, visokokvalitetne gline iscrpljuju se zbog široke uporabe u keramičkoj i papirnoj industriji jer su ekonomičnije od cementa [7, 13]. Posljednjih je godina uporaba glina s malim udjelom kaolina, poznatih kao heterogene gline ili glineni minerali tipa (2 : 1), kao SCM-a dobila na važnosti zbog malih proizvodnih troškova i znatne dostupnosti u svijetu. Nekoliko je studija istraživalo mogućnost uporabe ležišta manje kvalitete u običnom portlandskom cementu (OPC) [7, 13, 15].

Drugi okolišni problem jesu urbane poplave. Godine 2001. intenzivne kiše prouzročile su 781 smrtni slučaj i imale razoran utjecaj na gospodarstvo glavnog grada Alžira [19]. Ta je katastrofa bila posljedica kombinacije klimatskih promjena, širenja nepropusnih površina u urbanim područjima i neučinkovitog konvencionalnog sustava odvodnje [20]. Stoga je, kako bi se izbjegla takva katastrofa, potrebno uvesti propusni beton u alžirske urbane prostore, primjerice pri popločavanju nogostupa, parkirališta i kolnika [21]. Taj porozni materijal karakterizira mreža međusobno povezanih pora koja omogućuje vodi da velikim brzinama prodire u slojeve podloge [22]. Osim toga, poboljšava obnavljanje podzemnih voda, smanjuje onečišćenje vode i tla te ublažava učinak toplinskog otoka [23, 24], uz druge okolišne koristi zbog kojih je održiv materijal preporučen za uporabu u kolničkim konstrukcijama. Nadalje, propusni beton čini ključnu komponentu kolnika koji se primjenjuju u programima spužvastih gradova u Kini [22, 25, 26]. Također ga je američka Agencija za zaštitu okoliša (EPA) odabrala kao jednu od najboljih praksi urbanog upravljanja [27, 28].

Propusni beton dobiva se miješanjem krupnog agregata uske raspodjele veličine zrna i pažljivim nadzorom količine cementa, vode i pijeska [21, 28, 29]. Njegova je poroznost obično u rasponu od 15 % do 35 % volumena, dok mu tlačna čvrstoća iznosi između 2,8 i 28 MPa [21–24, 28, 30, 31]. Zbog velike poroznosti taj održivi materijal ima slabija mehanička svojstva u usporedbi s običnim betonom, što ograničava njegovu primjenu na površine s manjim opterećenjem [20, 28, 30, 31]. S druge strane, na mehanička svojstva i propusnost PC-a znatno utječu čimbenici poput vodovezivnog omjera. Stoga se za postizanje optimalnog oblaganja agregata i stabilnosti paste u propusnom betonu preporučuje vodocementni omjer od 0,26 do 0,45 [23, 24]. Cjelovitost propusnih mješavina uglavnom ovisi o debljini sloja cementne paste koji oblaže čestice i o povezanosti čestica agregata [20, 32]. U tom je kontekstu kvaliteta sloja cementne paste znatno pod utjecajem reoloških svojstava veziva [33]. Kako bi se poboljšale čvrstoća, obradljivost i trajnost PC-a, uz istodobno održavanje prihvatljive propusnosti, istraživači su ispitali brojne strategije, poput uključivanja kemijskih i mineralnih dodataka. Različite su studije istražile učinke dodavanja SCM-a propusnom betonu te su pokazale da djelomična zamjena cementa letećim pepelom (FA) i silicijskom prašinom (SF) poboljšava obradljivost svježeg betona, kao i mehaničku čvrstoću i trajnost propusnog betona [34, 35]. U međuvremenu je u [36] zabilježeno umjereno povećanje poroznosti mješavina propusnog betona pri uporabi



Slika 1. Geografski položaj brane K'sob prema Google Earthu

mljevene granulirane zgre visokih peći i FA-a kao djelomične zamjene cementa. Nadalje, studija provedena u [37] pokazala je da dodavanje 2 % metakaolina propusnom betonu znatno povećava gustoću i mehaničku čvrstoću, uz smanjenje poroznosti. Kwabena i sur. [38] istraživali su svojstva propusnog betona koji sadrži kalcinirani glineni pucolan te su utvrdili da optimalni udio tih SCM-a, koji može poboljšati čvrstoću i održati odgovarajuću propusnost, iznosi 20 % mase.

U ovom istraživanju razvijene su prikladne mješavine propusnog betona uporabom lokalno dostupnih resursa, poput sedimenta izvađenih iz akumulacija brana. Istraživanje je usmjereno na moguću uporabu naslaga iz brane K'sob kao SCM-a za razvoj sastava propusnog betona. Ta se brana nalazi na rijeci K'sob u Hammanu, između planina Kef El Ouerad i Djebel El Gruon, 15 km sjeverno od M'sile, pokrajine smještene na visokim visoravnima sjeverno-središnjeg Alžira (slika 1.). Brana obuhvaća površinu od 1460 km², s opsegom od približno 180 km [12]. Prema ANB-u (Nacionalnoj agenciji za brane), brana K'sob imala je 2011. stupanj sedimentacije od 59,90 %. Godišnja sedimentacija te građevine iznosi oko 8105 m³ sedimenata. Mulj se obično vadi jaružanjem i pumpa u taložne bazene na neobrađenom zemljištu. Ta praksa štetno djeluje na okolni okoliš i zahtijeva dodatne skladišne resurse, pa se nameće hitna potreba za njegovom uporabom na ekološki i održiv način. U ovom je istraživanju DDS najprije kalciniran, a zatim uključen u sastave propusnog betona kao djelomična zamjena veziva (PC), s ciljem optimizacije mehaničkih karakteristika uzoraka propusnog betona uz održavanje odgovarajućeg koeficijenta propusnosti. Time ne samo da se smanjuje uporaba PC-a, i pripadajući ugljični otisak, nego se osigurava i održiv način uporabe lokalno dostupnih sekundarnih resursa, čime se otvara put prema integriranijem kružnom gospodarstvu [39].

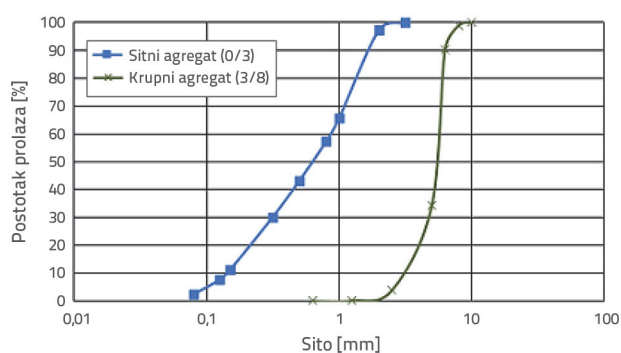
2. Eksperimentalni dio

2.1. Materijali

U ovom je istraživanju upotrijebljen čisti PC CEM I 42,5 R iz tvornice cementa Lafarge Algeria, poznat pod nazivom Matine. Korišteni PC imao je Blaineovu specifičnu površinu od 4290 cm²/g prema normi NF EN 196-6 [40] i gustoću od 3,0 g/cm³; njegov je kemijski sastav prikazan niže, u tablici 1.

Agregati upotrijebljeni u ovom istraživanju bili su drobljeni vapnenački agregati bez nečistoća, veličine zrna 3 do 8 mm, koji zadovoljavaju zahtjeve ASTM D448 [41]. Upotrijebljen je i udio od 10 % sitnog agregata 0/3 mm (prema masi krupnog agregata). Granulometrijska krivulja agregata, određena prema ASTM C 33 [42], prikazana je na slici 2.

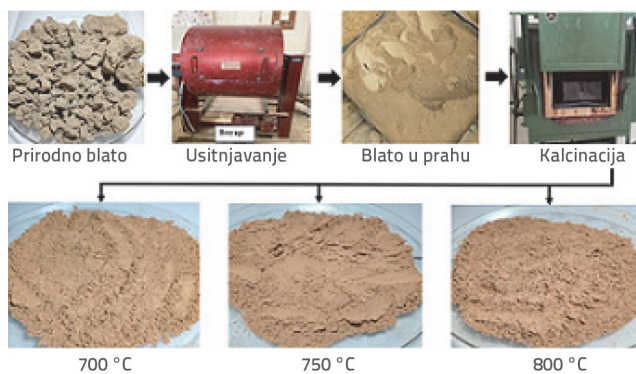
Radi poboljšanja obradljivosti mješavina propusnog betona kao sredstvo za smanjenje vode upotrijebljen je superplastifikator (SP) pod trgovačkim nazivom "Sicaplast 40 Pro" (Sica Algeria).



Slika 2. Granulometrijska krivulja agregata

2.1.1. Priprema kalciniranog DDS-a

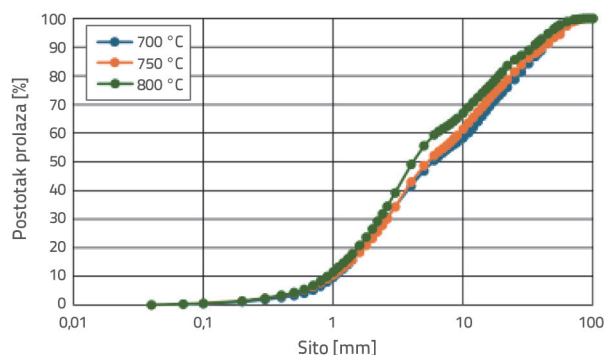
Izmuljeni sediment (engl. *Dam Dredged Sediments* – DDS) iz brane prikupljen je nizvodno od brane K'sob, u zoni odlagališta. Nakon homogenizacije sediment je sušen pri 105 °C tijekom 24 h. Zatim je ručno usitnjen, a potom intenzivno mljeven u mlinu s diskovima (*disc mill*) prije prosijavanja kroz sito od 80 µm. Kalcinacija je provedena u statičkoj peći pri brzini porasta temperature od 5 °C/min tijekom 5 h. Razmatrane su tri temperature kalcinacije, tj. 700, 750 i 800 °C. Kalcinirani sediment prije uporabe čuvan je zaštićen od zraka i vlage u hermetički zatvorenom spremniku. Slika 3. daje slikovni prikaz metoda upotrijebljenih za dobivanje kalciniranog DDS-a.



Slika 3. Postupak obrade DDS-a prije uporabe u betonskim mješavinama

2.1.2. Granulometrijska analiza

Laserska granulometrijska ispitivanja provedena su radi utvrđivanja mogućih promjena u raspodjeli veličine čestica gline (PSD). Analiza je provedena uređajem CILAS 1180 SEC u načinu mokre disperzije s deioniziranom vodom. Približna masa od 0,1 do 1,0 g suhog praškastog uzorka unesena je u lijevak i dispergirana komprimiranim zrakom pri 200 do 300 kPa radi smanjenja aglomeracije i dobivanja optimalnih rezultata. Prema krivuljama granulometrijske raspodjele (engl. *Particle Size Distribution curves* – PSD), promjer se postupno smanjivao s porastom temperature. Najveća vrijednost finoće dobivena je za temperaturu aktivacije od 800 °C, s relativnim povećanjem od oko 3,57 % u usporedbi sa sedimentom izvađenim iz akumulacije brane kalciniranim pri 750 °C. Ipak, taj uzorak (750 °C) zabilježio je porast finoće od 0,15 % u usporedbi s muljem kalciniranim pri temperaturi od 700 °C. Slične su činjenice zabilježene u literaturi [43, 44, 45], a dobro je poznato da povećanje finoće osigurava veću specifičnu površinu, ubrzava kinetiku hidratacije i time povećava reaktivnost [46, 12]. Nadalje, iz tih se krivulja može uočiti da je ostatak na situ od 45 mikrona manji od 10 % za sve tri temperature, što predstavlja najveću dopuštenu vrijednost za uporabu pucolana i metakaolina kao SCM-a prema [43].



Slika 4. PSD CDDS-a kalciniranog pri različitim temperaturama

2.1.3. Karakterizacija materijala

Prirodni sedimenti (engl. *Natural Dredged Dam Sediments* – NDDS) i kalcinirani sedimenti (engl. *Calcined Dredged Dam*

Sediments – CDDS) izvađeni iz akumulacije brane proučavani su različitim tehnikama karakterizacije kako bi se odredila njihova fizikalna, kemijska i mineraloška svojstva.

XRF analiza: XRF analiza provedena je analizatorom EPSILON 4 proizvođača Malvern Panalytical. Rezultati različitih sedimenata upotrijebljenih u ovom istraživanju prikazani su u tablici 1.

Relevantna literatura navodi da se glina smatra visokokvalitetnom glinom (s najmanje 40 % kaolina) kada su ispunjeni sljedeći kriteriji: (1) % $\text{Al}_2\text{O}_3 > 18$; (2) % $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 3,0$; (3) $\text{Na}_2\text{O} \leq 3$ [47, 48]. Sastav gline u ovom istraživanju, prema kemijskoj analizi, bio je: NDDS % $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12,21 < 18$; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = 0,3$; $\text{Na}_2\text{O} = 0,29 \leq 3$. Jasno je vidljivo da prvi uvjet nije zadovoljen. Stoga se ova glina može klasificirati kao glina niže kvalitete.

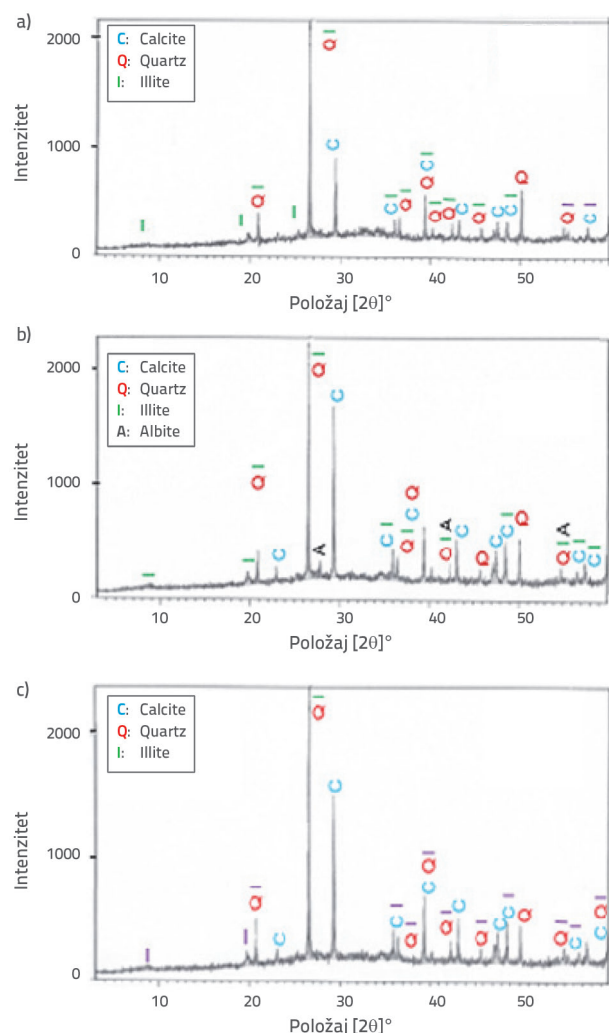
Rezultati laserske analize veličine čestica za tri različita CDDS-a upotrijebljena u ovom istraživanju prikazani su na slici 5. za tri temperature aktivacije (700, 750 i 800 °C). Kalcinacija DDS-a uzrokuje oslobađanje strukturnih hidroksidnih iona (OH^-), što je poznato kao dehidroksilacija. To rezultira gubitkom mase i promjenom boje (slika 3.) te promjerom zrna, kako je prikazano na slici 4. [7, 43].

Analiza difrakcije rendgenskih zraka: Mineraloški sastav DDS-a pri tri temperature razine određen je XRD analizom difrakcije rendgenskih zraka. Upotrijebljen je difraktometar Empyrean proizvođača Malvern Panalytical. Izvor rendgenskih zraka bio je Cu-K α , a ispitivanje je provedeno od 5 do 60 ° s korakom od 1,2 °/min i brzinom rotacije od 60 o/min. Priprema uzorka uključivala je praškasti uzorak prosijan kroz standardno sito od 75 μm , bez ikakvih dodataka. XRD obrasci triju različitih CDDS-a prikazani su na slici 5. Difraktogram je pokazao da su najzastupljeniji glineni minerali u tim uzorcima kvarc, kalcit i ilit. Rezultati analize upućuju na to da su određeni vrhovi ilita nestali kada je temperatura porasla sa 700 na 750 °C, što je posljedica djelomične dehidroksilacije ilita, odnosno uočenog nestanka vrha pri 25,5 ° (2 θ). To je opažanje u skladu s rezultatima [4]. Osim toga, određeni vrhovi kalcita postali su izraženiji pri povećanju temperature sa 700 na 750 °C, poput vrha pri 29,4 ° (2 θ). Međutim, nije bilo očite promjene u vrhovima kvarcita jer su ostali nepromijenjeni u tom temperaturnom rasponu.

Tablica 1. Kemijski sastav različitih sedimenata i cementa

Komponente	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	MnO	PF
Cement	17,28	3,89	4,38	60,82	3,34	2,03	0,57	0,16	0,14	0,20	0,05	8,67
NDDS	37,87	12,17	2,87	18,98	2,00	0,1	1,34	0,32	0,21	0,58	0,04	22
CDDS 700	45,70	14,03	4,93	20,62	2,39	0,81	1,68	0,39	0,22	0,68	0,06	8,49
CDDS 750	43,69	13,55	4,83	20,13	2,27	0,56	1,61	0,35	0,22	0,66	0,05	12,09
CDDS 800	43,53	13,80	4,81	19,90	2,31	0,65	1,60	0,24	0,22	0,66	0,05	12,23

Napomena: NDDS označava "prirodni sediment iz jarugane brane" (NDDS), a (CDDS) označava "kalcinirani sediment iz jarugane brane". Brojevi pored (CDDS) označavaju temperaturu kalcinacije.



Slika 5. XRD obrasci CDDS-a pri različitim temperaturama: a) 700 °C; b) 750 °C; c) 800 °C

2.1.4. Sastavi mješavina

Omjer mješavine propusnog betona projektiran je prema ACI522R-10 [28]. Kako bi se ispitao utjecaj DDS-a na svojstva propusnog betona, udjeli zamjene cementa CDDS-om za svaku od temperatura (700, 750 i 800 °C) iznosili su 5, 10 i 15 % (prema masi cementa). Za sve uzorke projektirane u ovom istraživanju usvojen je vodovezivni omjer od 0,36 kako bi se postigla dobra povezanost obradljivosti, čvrstoće i propusnosti. Ta je vrijednost unutar raspona od 0,26 do 0,45 koji za propusni beton odbor preporučuje ACI 522R [28].

Udio superplastifikatora održavan je na 1,5 %, uz ciljanu poroznost od 20 %. Što se tiče sitnih agregata, upotrijebljeni udio iznosio je 10 % (prema masi krupnih agregata), a krupni su agregati u mješavinu ugrađeni u stanju zasićene površinski suhe vlažnosti (eng. *saturated surface dry* - SSD). Za ovaj su eksperiment izrađene četiri vrste uzoraka. Prvo, za ispitivanje tlačne čvrstoće nakon 28 dana izrađeni su uzorci oblika valjka promjera Ø100 mm i visine 200 mm. Drugo, za ispitivanje propusnosti pripremljeni su uzorci oblika valjka promjera 100 mm i visine 130 mm. Treće, za određivanje čvrstoće na savijanje upotrijebljeni su uzorci prizme dimenzija 70 × 70 × 280 mm. Naposljetku, poroznost i gustoća određene su na uzorcima oblika kocke dimenzija 100 × 100 × 100 mm. Propusni beton miješan je i njegovan na način sličan običnom betonu. Najprije je miješalica napunjena izvaganim količinama krupnih i sitnih agregata. Nakon dodavanja cementa i CDDS-a tijekom tri minute provedeno je suho miješanje. Dvije trećine izvagane vode dodane su nakon odgovarajućeg suhog i mokrog miješanja. Radi osiguranja odgovarajuće disperzije izvagani superplastifikator pomiješan je s preostalom trećinom vode.

Nakon što su sastojci pravilno izmiješani, svježi beton uliven je u kalupe u dvama slojevima, a svaki je sloj zbijen s 20 udaraca Proctorovim čekićem mase 2,5 kg. Kalupi su zatim postavljeni

Tablica 2. Sastav mješavine [kg/m³]

Vrsta mješavine	Sitni agregat, 0/3 mm	Agregat, 3/8 mm	OPC	Blato	Superplastifikator	Voda
CPC ^a	163,9	1639	222	-	3,33	81
C5MA ^b	163,9	1639	210,9	11,1	3,33	81
C10MA	163,9	1639	199,8	22,2	3,33	81
C15MA	163,9	1639	188,7	33,3	3,33	81
C5MB ^c	163,9	1639	210,9	11,1	3,33	81
C10MB	163,9	1639	199,8	22,2	3,33	81
C15MB	163,9	1639	188,7	33,3	3,33	81
C5MC ^d	163,9	1639	210,9	11,1	3,33	81
C10MC	163,9	1639	199,8	22,2	3,33	81
C15MC	163,9	1639	188,7	33,3	3,33	81

CPC^a: Kontrolni propusni beton bez "CDDS"
 C5MA^b: Propusni beton s 5 % "DDS" kalciniranog na 700 °C
 C5MB^c: Propusni beton s 5 % "DDS" kalciniranog na 750 °C
 C5MC^d: Propusni beton s 5 % "DDS" kalciniranog na 800 °C

na vibracijski stol. Snaga pločastog vibratora iznosila je 750 W, a vrijeme vibriranja kontrolirano je na približno 10 s. Nakon jednog dana uzorci su izvađeni iz kalupa i ostavljeni na njegu u vodi pri temperaturi 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti većoj od 95 %, sve dok nisu dosegli starost od 28 dana. Projekt mješavine PC-a i udjeli sastojaka navedeni su u tablici 2.

2.2. Metode

2.2.1. Mehanička ispitivanja

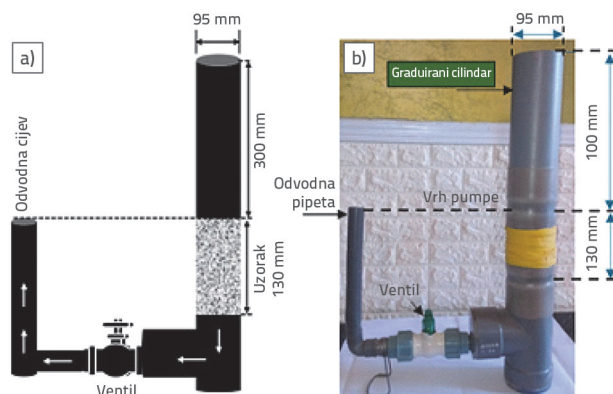
U ovom je istraživanju za ispitivanje tlačne i čvrstoće na savijanje mješavina propusnog betona upotrijebljena računalno upravljana hidraulična preša najvećeg kapaciteta 2000 kN. Ispitivanja tlačne čvrstoće provedena su na uzorcima oblika valjka dimenzija ($\varnothing 100$ do 200 mm) u starosti od 28 dana i pri brzini opterećivanja od 0,5 kN/s. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom NF-EN 12390-3 [49]. Čvrstoća na savijanje određena je ispitivanjima tlačne čvrstoće pri savijanju u trima točkama na prizmama dimenzija $70 \times 70 \times 280$ mm. Prizma je zatim postavljena u računalno upravljaju hidrauličnu prešu. Razmak "L" između oslonaca iznosio je 21 cm. Kako bi se izbjegli parazitski učinci uzrokovani nedostacima paralelnosti i ravnosti gornje plohe uzorka, opterećenje je primijenjeno na bočne plohe uzorka. Uzorak je bio izložen rastućim opterećenjima sve do sloma. Ispitivanja su provedena pri brzini opterećivanja od 0,5 kN/s. Ispitivanje je provedeno prema normi NF-EN 12390-5 [50]. Svako ispitivanje provedeno je na trima uzorcima, a zabilježene su prosječne tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje.

2.2.2. Ispitivanje koeficijenta propusnosti

U ovom je istraživanju ispitivanje propusnosti provedeno uređajem s padajućom razinom vode na cilindričnim uzorcima njegovanima 28 dana, promjera 100 mm i visine 130 mm. Uređaj upotrijebljen u ovom istraživanju prikazan je na slici 6. Izrađen je prema preporukama ACI522R-10 [28]. Bočna površina svakog uzorka omotana je plastičnom folijom. Uzorak je u uređaju postavljen između dviju cijevi. Zatim je pažljivo obuhvaćen lateks steznicima kako bi se spriječilo istjecanje vode. Time je omogućeno da voda ulazi kroz gornju površinu. Voda je zatim dodana u graduirani cilindar i puštena da teče kroz cijelu cijev, a ventil je ostavljen otvoren kako bi se uklonio zrak i provelo ispitivanje propusnosti. Nakon zatvaranja ventila, voda je ulivena u permeametar do razine označene standardnim dimenzijama (početna visina $h_1 = 290$ mm). Nakon otvaranja ventila izmjereno je vrijeme potrebno da se vođeni tlak spusti s te razine na konačnu visinu ($h_2 = 70$ mm). To je vrijeme zabilježeno i upotrijebljeno u sljedećoj jednadžbi prema Darcyjevom zakonu:

$$K = \frac{\alpha \cdot L}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

U ovom izrazu K je koeficijent propusnosti (mm/s), A (mm²) i L (mm) su poprečna ploština, odnosno duljina uzorka, "a" je poprečna ploština gornje graduirane cijevi, a t (s) je vrijeme potrebno da se razina vode spusti s h_1 na h_2 .



Slika 6. a) shematski; b) slikovni prikaz uređaja za određivanje koeficijenta propusnosti

2.2.3. Poroznost

Poroznost propusnog betona određena je prema ASTM C1754-12 [51] na uzorcima oblika kocke dimenzija ($100 \times 100 \times 100$ mm). Najprije su uzorci sušeni do stalne mase u sušioniku pri 60 °C. Zatim je izmjerena masa uzoraka (W_1) na zraku. Nakon toga, kako bi se pore ispunile vodom, uzorci su 24 h uronjeni u vodu. Zatim su uzorci postavljeni na hidrostatsku vagu. Nakon toga izmjerene su potopljene mase (W_2) uzoraka propusnog betona. Ukupna poroznost (P%) uzoraka određena je kako slijedi:

$$(P\%) = \left[1 - \frac{W_1 - W_2}{V \cdot \rho_w} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

gdje je W_1 suha masa uzoraka (g), W_2 potopljena masa istih uzoraka (g), V volumen (cm³), a ρ_w gustoća vode (1 g/cm³).

3. Rezultati i rasprava

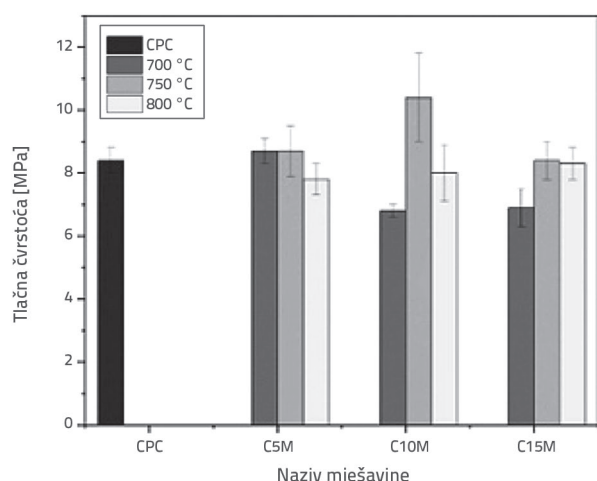
3.1. Tlačna čvrstoća

Razvoj tlačne čvrstoće uzoraka propusnog betona s različitim udjelima CDDS-a (5, 10 i 15 % mase PC-a), kalciniranima pri različitim temperaturnim rasponima (700, 750 i 800 °C), prikazan je na slici 7. Iz tih je rezultata jasno da DDS kalciniran pri 750 °C daje najveću tlačnu čvrstoću za sva tri uzastopna udjela gline. To opažanje naglašava činjenicu da je najbolji pucolanski karakter pripisan glini kalciniranoj pri 750 °C, u usporedbi s ostalim ispitanim temperaturama (700 i 800 °C). Taj je rezultat u skladu s prethodno objavljenim rezultatima [7, 52, 53]. Naime, ta temperatura nalazi se u rasponu u kojem se sediment djelomično dehidroksilira i prelazi u optimalno amorfnu stanje, u kojem je njegova reaktivnost najveća [7]. Za temperaturu

kalcinacije od 800 °C uočeno je smanjenje tlačne čvrstoće. To bi moglo biti posljedica smanjenja reaktivnosti materijala, povezane s nastankom staklastih struktura u kalciniranoj glini zbog izloženosti visokoj temperaturi.

Vrijednosti tlačnih čvrstoća uzoraka propusnog betona s 0, 5, 10 i 15 % CDDS-a pri 750 °C iznosile su 8,4, 8,7, 10,4 i 8,4 MPa. Čvrstoća je povećana za 3,57 % odnosno 23,81 % za udjele CDDS-a od 5 i 10 % u usporedbi s referentnom mješavinom. Nadalje, za udio CDDS-a od 15 % zabilježena tlačna čvrstoća bila je jednaka onoj kontrolne mješavine.

Modificirani propusni beton postigao je veću čvrstoću od kontrolne mješavine za 5 i 10 % CDDS-a. Taj postupni porast, ovisno o udjelu zamjene CDDS-om, vjerojatno je posljedica pucolanske reakcije i učinka punila. Prvo, toplinski aktivirani DDS sadrži aktivne SiO_2 i Al_2O_3 koji reagiraju s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (slobodnim vapnom) stvarajući dodatne gel-proizvode tipa kalcijeva silikatnog hidrata (C-S-H) i kalcijeva aluminosilikatnog hidrata (C-A-S-H). Ti hidratacijski proizvodi ispunjavaju pore i čine materijal gušćim, što dovodi do poboljšane mehaničke čvrstoće [54]. Međutim, čvrstoća se smanjila kada je udio zamjene iznosio 15 %. Važno je istaknuti da je 10 % zamjene bio optimalan udio zamjene za kalciniranu glinu. Taj je rezultat u skladu s prethodnim nalazima [7, 12, 52]. Drugo, nereaktivne faze poput kristalnog kalcita i kvarca mogle bi djelovati kao mjesta nukleacije i faze punila koje zgušnjavaju matricu, što može poboljšati mehaničku čvrstoću. Za mješavinu s 10 % CDDS-a taj mogući dvojni učinak mogao bi sinergijski biti odgovoran za uočeno poboljšanje čvrstoće. Iznad tog udjela zamjene svako daljnje povećanje CDDS-a u mješavini dovodi do smanjenja udjela cementa (reaktivne frakcije) i posljedičnog smanjenja hidratacijskih produkata (gelova tipa C-S-H/C-A-S-H), što dovodi do preopterećenja mješavine nereaktivnim $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ i drugim nereaktivnim fazama. To ograničava mehaničku čvrstoću [7, 38, 56].



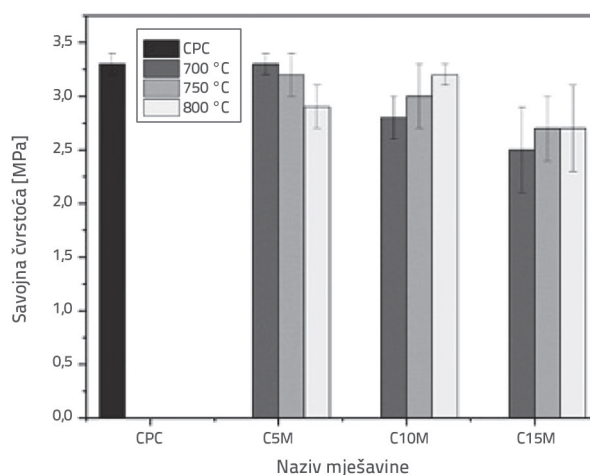
Slika 7. Rezultati tlačne čvrstoće kontrolnog i propusnog betona s različitim postotkom DDS-a kalciniranog pri različitim temperaturama

3.2. Čvrstoća na savijanje

Rezultati čvrstoće na savijanje propusnog betona s različitim udjelima zamjene CDDS-om prikazani su na slici 8. Opći trend čvrstoće na savijanje slijedio je rezultate tlačne čvrstoće; međutim, s obzirom na to da je beton inherentno slab pri vlačnom opterećenju, uočene su određene anomalije. Primjerice, iako je mješavina koja sadrži 10 % CM-a kalciniranog pri 750 °C pokazala najveću tlačnu čvrstoću među svim sastavima, uključujući referentnu mješavinu, njezina odgovarajuća čvrstoća na savijanje pokazala je veću varijabilnost, što potvrđuju širi raspon pogrešaka za mješavinu CM10(750). Takva se odstupanja mogu pripisati heterogenoj prirodi propusnog betona i različitim mehanizmima raspodjele naprezanja pri savijanju u usporedbi s tlakom [55].

Za mješavine koje sadrže DDS kalciniran pri 700 °C zabilježene vrijednosti čvrstoće na savijanje za 5, 10 i 15 % zamjene CDDS-om iznosile su 3,3, 2,8 i 2,5 MPa. Uočen je jasan trend smanjenja s povećanjem udjela CDDS-a. Slično ponašanje zabilježeno je za DDS kalciniran pri 750 °C, pri čemu su odgovarajuće čvrstoće na savijanje iznosile 3,2, 3,0 i 2,5 MPa za udjele zamjene od 5, 10 i 15 %. Za mješavine s DDS-om kalciniranim pri 800 °C odgovarajuće vrijednosti iznosile su 2,9, 3,2 i 2,7 MPa, što upućuje na to da bi 10 % zamjene CDDS-om moglo predstavljati optimalnu dozu za mehanička svojstva.

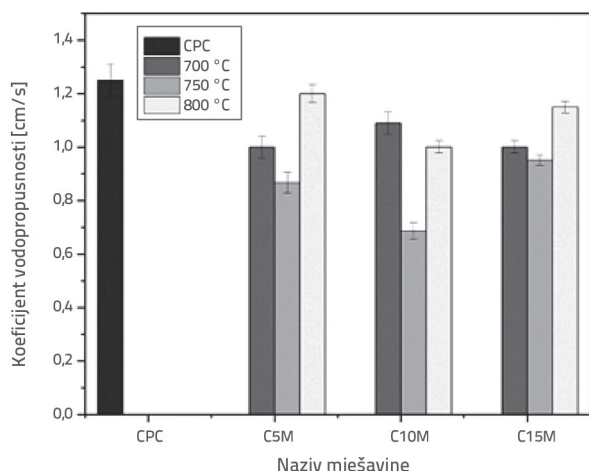
Općenito, sve mješavine modificirane CDDS-om pokazale su nešto manju čvrstoću na savijanje od kontrolnog uzorka. Ipak, zabilježene vrijednosti ostale su unutar prihvatljivog raspona za propusni beton namijenjen površinama s malim prometnim opterećenjem, kako je navedeno u prethodnim studijama [55]. Prema literaturi, propusni beton obično pokazuje čvrstoće na savijanje između 2 i 4 MPa, što je prikladno za pješačke zone, parkirališta i kolnike za laka prometna opterećenja [58].



Slika 8. Čvrstoća na savijanje kontrolnog i propusnog betona s različitim postotkom CDDS-a kalciniranog pri različitim temperaturama

3.3. Propusnost

Slika 9. prikazuje rezultate koeficijenta propusnosti propusnog betona s različitim udjelima zamjene CDDS-om (5, 10 i 15 %) i različitim temperaturama kalcinacije (700, 750 i 800 °C). Očito je da i udio zamjene CDDS-om i temperatura kalcinacije značajno utječu na koeficijent propusnosti propusnog betona.



Slika 9. Koeficijent propusnosti vode kontrolnog i propusnog betona s različitim postotkom CDDS-a kalciniranog pri različitim temperaturama

Pri temperaturi kalcinacije od 700 °C mješavine s 5, 10 i 15 % zamjene CDDS-om pokazale su gotovo jednake vrijednosti propusnosti od približno 1,0 cm/s, što odgovara smanjenju od 20 % u usporedbi s kontrolnom vrijednošću (1,25 cm/s). Mješavina s 10 % CDDS-a zabilježila je nešto veću vrijednost od 1,09 cm/s, iako je i dalje bila manja od kontrolne. Takvo se ponašanje može pripisati učinku punjenja CDDS-a i njegovoj umjerenoj pucolanskoj reaktivnosti, što rezultira blagim zgusnjavanjem strukture pora bez znatnog ometanja međusobno povezane mreže pora ili povećanja njezine tortuoznosti [59].

Pri temperaturi kalcinacije od 750 °C, koeficijent propusnosti znatno se smanjio u svim udjelima zamjene. Najmanja zabilježena vrijednost iznosila je 0,69 cm/s za mješavinu s 10 % CDDS-a, što odgovara smanjenju od 44,8 % u usporedbi s kontrolnim uzorkom, zatim 0,87 cm/s za 5 % CDDS-a (smanjenje od 30,4 %) i 0,95 cm/s za 15 % CM-a (smanjenje od 24 %). To izraženo smanjenje upućuje na pojačanu pucolansku aktivnost pri 750 °C, koja dovodi do gušće mikrostrukture i smanjene povezanosti pora, čime se ograničava protok vode kroz matricu. Ti nalazi podupiru ranije opažanje da kalcinacija pri 750 °C daje najreaktivniju pucolansku fazu u CDDS-u.

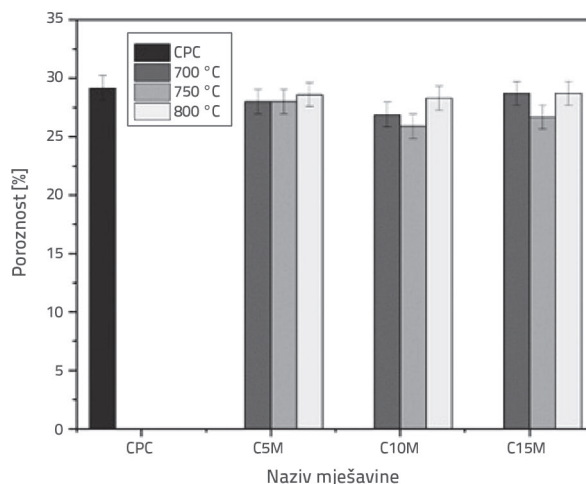
Nasuprot tome, propusni beton s DDS-om kalciniranim pri 800 °C pokazao je koeficijente propusnosti od 1,20 cm/s i 1,15 cm/s za udjele zamjene od 5 i 15 %, što odgovara smanjenjima od samo 4 i 8 % u odnosu na kontrolnu mješavinu. Mješavina s 10 % CDDS-a pokazala je izraženije smanjenje propusnosti od 20 %, što se može pripisati optimalnoj gustoći pakiranja postignutoj

pri tom udjelu zamjene, što rezultira gušćom mikrostrukturom i smanjenom povezanošću pora.

Općenito, izmjereni koeficijenti propusnosti kretali su se između 0,63 i 1,28 cm/s, što je znatno unutar granica preporučenih u ACI 522R-10 [28], prema kojima prihvatljiva propusnost za propusni beton treba biti veća od 0,1 cm/s radi odgovarajuće odvodne učinkovitosti [28]. Ti rezultati potvrđuju da se djelomična zamjena cementa CDDS-om može optimizirati kako bi se uravnotežila mehanička svojstva i karakteristike propusnosti prikladne za primjenu na kolnicima s malim prometnim opterećenjem.

3.4. Poroznost

Slika 10. prikazuje rezultate poroznosti propusnog betona pod utjecajem udjela zamjene CDDS-om (5, 10 i 15 %) i temperatura kalcinacije (700, 750 i 800 °C). Rezultati jasno pokazuju da oba parametra značajno utječu na strukturu pora i ukupnu poroznost mješavina.



Slika 10. Prosječna poroznost kontrolnog i propusnog betona s različitim postotkom CDDS-a kalciniranog pri različitim temperaturama; koeficijent propusnosti vode

Blago smanjenje poroznosti uočeno je kod mješavina koje sadrže CDDS kalciniran pri 700 °C. Smanjenja za udjele zamjene od 5, 10 i 15 % iznosila su približno 4,0, 7,9 i 1,6 % u usporedbi s kontrolnim uzorkom. To se neznatno smanjenje može pripisati nešto gušćoj cementnoj pasti nastaloj uključivanjem CDDS-a. Međutim, razlike u odnosu na kontrolnu mješavinu ostaju umjerene, vjerojatno zato što DDS kalciniran pri 700 °C pokazuje nižu pucolansku reaktivnost u usporedbi s onim pri 750 °C, što ograničava njegovu sposobnost znatnog pročišćavanja strukture pora.

Izraženije smanjenje poroznosti uočeno je kod mješavina koje sadrže DDS kalciniran pri 750 °C, osobito pri udjelu zamjene od 10 %, pri kojem je zabilježena poroznost od 25,86 %, što predstavlja smanjenje od 11,3 % u usporedbi s kontrolom. Za mješavine s 5 i 15 % CDDS-a odgovarajuće vrijednosti poroznosti iznosile su 28 i 26,66 %, što upućuje na smanjenja od 4, odnosno

8,6 %. To značajno smanjenje poroznosti u skladu je s uočenim smanjenjem propusnosti pri istoj temperaturi kalcinacije i pripisuje se pojačanoj pucolanskoj aktivnosti kalciniranog DDS-a pri 750 °C. Povećana reaktivnost pridonosi gušćoj mikrostrukturi nastaloj stvaranjem sekundarnog kalcijeva silikatnog hidrata (C-S-H/C-A-S-H), koji učinkovito pročišćava mrežu pora i smanjuje ukupnu poroznost [52].

Za propusni beton koji sadrži DDS kalciniran pri 800 °C smanjenje poroznosti bilo je manje izraženo nego ono opaženo pri 750 °C, što je u skladu sa smanjenom pucolanskom reaktivnošću DDS-a izloženog višim temperaturama kalcinacije. Kao što je prethodno navedeno, smanjena reaktivnost pri 800 °C rezultira manje izraženim učinkom zgušnjavanja mikrostrukture.

Općenito, vrijednosti poroznosti dobivene u ovom istraživanju iznosile su između 25,87 do 29,17 %, nešto iznad ciljane vrijednosti od 20 %. Taj je razlika vjerojatno posljedica segregacije cementa prema dnu kalupa uslijed vibriranja. Posljedično, donji dio postaje gušći, a gornji dio ostaje porozan, što iskrivljuje mjerenja. Međutim, ti rezultati ostaju unutar preporučenog raspona od 15 do 35 % prema ACI 522R-10 [28]. Ovi nalazi potvrđuju da su sve mješavine zadržale razine poroznosti kompatibilne s funkcionalnim zahtjevima propusnog betona, osiguravajući odgovarajuću propusnost za odvodne primjene uz postizanje poboljšane kompaktnosti i mehaničkih svojstava.

4. Zaključak

Ovo je istraživanje ispitalo potencijalnu uporabu kalciniranih sedimenata izvađenih iz brane K'sob (Alžir) kao SCM-a za djelomičnu zamjenu cementa u propusnom betonu. Na osnovi eksperimentalnih nalaza mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Veličina čestica CDDS-a postupno se smanjivala s povećanjem temperature kalcinacije, kako je pokazala granulometrijska analiza. Ostatak zadržan na situ od 45 µm ostao je ispod 10 % za sve temperature kalcinacije, što upućuje na to da finoća materijala zadovoljava prihvatljive kriterije za pucolanske ili metakaolinske SCM-ove.

- Rezultati difrakcije rendgenskih zraka (XRD) pokazali su da kalcinacija pri 750 °C učinkovito dehidroksilira fazu ilita, stvarajući amorfnu alumosilikatne faze s povećanom reaktivnošću. Stoga je 750 °C identificirana kao optimalna temperatura kalcinacije za poticanje pucolanske aktivnosti.
- Propusni beton s DDS-om kalciniranim pri 750 °C pokazao je najveću tlačnu čvrstoću, a najmanja je čvrstoća zabilježena za DDS kalciniran pri 700 °C. Udio zamjene od 10 % pokazao se optimalnim, što se pripisuje kombiniranim učincima povećane pucolanske reaktivnosti i poboljšane gustoće pakiranja čestica unutar cementne matrice.
- Koeficijent propusnosti smanjuje se s povećanjem udjela CDDS-a i snažno je pod utjecajem temperature kalcinacije. Najmanja propusnost ($\approx 0,69$ cm/s) zabilježena je za mješavinu s 10 % DDS-a kalciniranog pri 750 °C, što pokazuje smanjenje od 45 % u odnosu na kontrolnu mješavinu zbog povećane pucolanske aktivnosti i zgušnjavanja mikrostrukture. Unatoč tom smanjenju, sve vrijednosti propusnosti (0,63 – 1,28 cm/s) ostale su znatno iznad minimalnog zahtjeva ACI 522R-10 [28] od 0,1 cm/s, osiguravajući dostatan odvodni kapacitet za primjene propusnog betona.
- Uključivanje CDDS-a rezultiralo je smanjenjem ukupne poroznosti, osobito pri 10 % DDS-a kalciniranog pri 750 °C, gdje je zabilježeno smanjenje od 11 % u usporedbi s kontrolnom mješavinom. Općenito, zabilježene vrijednosti poroznosti (25,9 do 29,2 %) bile su u skladu s preporučenim rasponom ACI 522R-10 [28] od 15 do 35 %, održavajući funkcionalnu ravnotežu između propusnosti i mehaničke cjelovitosti.

Rezultati pokazuju da se kalcinirani sedimenti izvađeni iz brane K'sob mogu učinkovito valorizirati kao djelomična zamjena cementa u propusnom betonu. Razvijene mješavine zadovoljile su mehaničke i hidrauličke zahtjeve uz smanjenje potrošnje cementa i uporabu lokalnih otpadnih resursa. Ova strategija valorizacije ne rješava samo izazove odlaganja sedimenata s kojima se suočavaju nadležna tijela za brane, nego i promiče održive građevinske prakse, učinkovitost resursa i načela kružnoga gospodarstva.

LITERATURA

- [1] Das, S.K., Mustakim, S.M., Adesina, A., Mishra, S., Mishra, J.: Solid wastes: alternative materials for cementitious composites production, In: Hussain, C.M., Velasco-Muñoz, J.F. (eds.), Sustainable Resource Management, Elsevier, 2021, pp. 199–220, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824342-8.00012-2>.
- [2] Hu, Y., Xiong, L., Yan, Y., Geng, G.: Performance of limestone calcined clay cement (LC3) incorporating low-grade marine clay, Case Studies in Construction Materials, 20 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03283>.
- [3] IEA: Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2018, www.wbcsdcement.org.
- [4] Dixit, A., Du, H., Pang, S.D.: Performance of mortar incorporating calcined marine clays with varying kaolinite content, Journal of Cleaner Production, 282 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124513>.
- [5] Rezzoug, A., Leklou, N., Ayed, K., Houhou, M.: Enhancing geopolymers mortars for environmental sustainability: A novel approach using frits and ceramic waste, Next Research, 1 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100024>.
- [6] Houhou, M., Leklou, N., Ranaivomanana, H., Penot, J.D., de Barros, S.: Durability and microstructural evolution of metakaolin-based geopolymers under various coupled temperature and relative humidity conditions, Journal of Building Engineering, 120 (2026), <https://doi.org/10.1016/j.job.2026.115625>.

- [7] Touhami, K., Chihouai, R., Nefoussi, A.M., Mouli, M.: Investigation of the potential use of dredged dam sediments as supplementary cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 422 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135730>.
- [8] Yao, F., Minear, J.T., Rajagopalan, B., Wang, C., Yang, K., Livneh, B.: Estimating reservoir sedimentation rates and storage capacity losses using high-resolution Sentinel-2 satellite and water level data, *Geophysical Research Letters*, 50 (2023) 16, <https://doi.org/10.1029/2023GL103524>.
- [9] Hadj Sadok, R., Hadj Sadok, F., Belas Belaribi, N., Belaribi, O.: State-of-the-art valorization of calcined dredged sediments as construction materials to substitute cement: characterization, treatment, mechanical strength, and life cycle assessment, *Discover Concrete and Cement*, 2 (2026) 1, Paper No. 12, <https://doi.org/10.1007/s44416-026-00054-8>.
- [10] Perera, D., Williams, S., Smakhtin, V.: Present and future losses of storage in large reservoirs due to sedimentation: A country-wise global assessment. *Sustainability*, 15 (2023) 1, <https://doi.org/10.3390/su15010219>.
- [11] Laoufi, L., Senhadji, Y., Benazzouk, A.: Valorization of mud from Fergoug dam in manufacturing mortars, *Case Studies in Construction Materials*, 5 (2016), pp. 26–38, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.06.002>.
- [12] Chikouche, M.A., Ghorbel, E., Bibi, M.: The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement, *Construction and Building Materials*, 106 (2016), pp. 330–341, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.128>.
- [13] Overmann, S., Vollpracht, A., Matschei, T.: Reactivity of calcined clays as SCM-A review, *Materials*, 17 (2024) 2, <https://doi.org/10.3390/ma17020312>.
- [14] Meddah, M.S., Al Owaisi, M., Abedi, M., Hago, A.W.: Mortar and concrete with lime-rich calcined clay pozzolana: A sustainable approach to enhancing performances and reducing carbon footprint, *Construction and Building Materials*, 393 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132098>.
- [15] Vallina, D., Rodríguez-Ruiz, M.D., Santacruz, I., Cuesta, A., Aranda, M.A.G., De la Torre, A.G.: Supplementary cementitious material based on calcined montmorillonite standards, *Construction and Building Materials*, 426 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136193>.
- [16] Leklou, N., Das, S.K.: Effect of curing temperatures on hydration, mechanical and microstructural properties of metakaolin-blended cement mortars, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12228-8>.
- [17] Said-Mansour, M., Kadri, E.-H., Kenai, S., Ghrici, M., Bennaceur, R.: Influence of calcined kaolin on mortar properties, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 5, pp. 2275–2282, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.017>.
- [18] Vu, D.D., Stroeven, P., Bui, V.B.: Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete, *Cement and Concrete Composites*, 23 (2001) 6, pp. 471–478, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00091-3).
- [19] Menad, W., Douvinet, J., Beltrando, G., Arnaud-Fassetta, G.: Evaluating the influence of urbanised areas face to a remarkable meteorological hazard: The flood event of 9–10 November 2001 at Bab-el-Oued (Alger, Algeria), *Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 3 (2012), pp. 337–350, <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.9954>.
- [20] Mohammed, B.S., Liew, M.S., Alaloul, W.S., Khed, V.C., Hoong, C.Y., Adamu, M.: Properties of nano-silica modified pervious concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 8 (2018), pp. 409–422, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.009>.
- [21] Krishnan Soundararajan, E., Vaiyapuri, R.: Geopolymer binder for pervious concrete, *GRADEVINAR*, 73 (2021) 3, pp. 209–218, <https://doi.org/10.14256/JCE.2440.2018>.
- [22] Debnath, B., Sarkar, P.P.: Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate, *Construction and Building Materials*, 213 (2019), pp. 643–651, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.099>.
- [23] Li, T., Tang, X., Xia, J., Gong, G., Xu, Y., Li, M.: Investigation of mechanical strength, permeability, durability and environmental effects of pervious concrete from travertine waste material, *Construction and Building Materials*, 426 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136175>.
- [24] Seeni, B.S., Madasamy, M.: Factors influencing performance of pervious concrete, *Građevinar*, 73 (2021) 10, pp. 1017–1030, <https://doi.org/10.14256/JCE.2997.2020>.
- [25] Guan, X., Wang, J., Xiao, F.: Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city, *Journal of Cleaner Production*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127022>.
- [26] Xie, X., Zhang, T., Yang, Y., Lin, Z., Wei, J., Yu, Q.: Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste, *Construction and Building Materials*, 168 (2018), pp. 732–746, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.128>.
- [27] Ansari, A., Mahajan, M.M.: Performance based simulation of pervious concrete using discrete element method, *Građevinar*, 72 (2020) 8, pp. 693–701, <https://doi.org/10.14256/JCE.2424.2018>.
- [28] ACI Committee 522-10: Report on pervious concrete. American Concrete Institute, 2010.
- [29] Chen, Y., Wang, K., Wang, X., Zhou, W.: Strength, fracture and fatigue of pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 42 (2013), pp. 97–104, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006>.
- [30] Mrakovčić, S., Čeh, N., Jugovac, V.: Effect of aggregate grading on pervious concrete properties, *Građevinar*, 66 (2014) 2, pp. 107–113, <https://doi.org/10.14256/JCE.977.2013>.
- [31] Mahalingam, R. et al.: Analysis of pervious concrete properties. *Građevinar*, 68 (2016) 6, pp. 493–501, <https://doi.org/10.14256/JCE.1434.2015>.
- [32] Zhong, R., Wille, K.: Compression response of normal and high strength pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 109 (2016), pp. 177–187, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>.
- [33] Oinam, Y., Ju, S., Gwon, S., Shin, M., Pyo, S.: Characteristics of GGBFS-based pervious concrete considering rheological properties of the binder. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16 (2022) 1, <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00551-7>.
- [34] López-Carrasquillo, V., Hwang, S.: Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost, *Construction and Building Materials*, 139 (2017), pp. 148–158, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.052>.

- [35] Nazeer, M., Kapoor, K., Singh, S.P.: Strength, durability and microstructural investigations on pervious concrete made with fly ash and silica fume as supplementary cementitious materials, *Journal of Building Engineering*, 69 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106275>.
- [36] Lee, J.W., Jang, Y.I., Park, W.S., Kim, S.W.: A study on mechanical properties of porous concrete using cementless binder, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10 (2016) 4, pp. 527–537, <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0166-3>.
- [37] Saboo, N., Shivhare, S., Kori, K.K., Chandrappa, A.K.: Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties, *Construction and Building Materials*, 223 (2019), pp. 322–328, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.185>.
- [38] Boakye, K., Khorami, M.: Influence of calcined clay pozzolan and aggregate size on the mechanical and durability properties of pervious concrete, *Journal of Composites Science*, 7 (2023) 5, <https://doi.org/10.3390/jcs7050182>.
- [39] Rezzoug, A., Leklou, N., Ayed, K.: Enhancing geopolymers mortars for environmental sustainability: A novel approach using frits and ceramic waste, *Ceramics International*, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.414>.
- [40] AFNOR NF EN 196-6: Methods of testing cement – Determination of fineness, 2018.
- [41] ASTM D448-12: Standard classification for sizes of aggregate for road and bridge construction. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2022, <https://doi.org/10.1520/D0448-12R22>.
- [42] ASTM C33/C33M-24a: Standard specification for concrete aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024, https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-24A.
- [43] Rodrigues, G.G. de O., Salomoni, N., Rohden, A.B., Carrara, G.: Physical and mechanical characterization of calcined clays for use as supplementary cementitious material, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8 (2023) 1, <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00308-z>.
- [44] Tironi, A., Trezza, M.A., Scian, A.N., Irassar, E.F.: Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays, *Cement and Concrete Composites*, 37 (2013) 1, pp. 319–327, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002>.
- [45] Tironi, A., Trezza, M.A., Scian, A.N., Irassar, E.F.: Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117 (2014) 2, pp. 547–556, <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3816-1>.
- [46] Haddad, O.: Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge, PhD dissertation, University of Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, France, 2007.
- [47] Maier, M., Beuntner, N., Thienel, K.-C.: An approach for the evaluation of local raw material potential for calcined clay as SCM, based on geological and mineralogical data: Examples from German clay deposits, In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, Singapore, 2020.
- [48] Alujas Díaz, A., Almenares Reyes, R.S., Arcial Carratalá, F., Pérez García, L.A., Leyva Rodríguez, C.A., Martirena Hernández, J.F.: The experience of Cuba TRC on the survey of kaolinitic clay deposits as source of SCMs—Main outcomes and learned lessons. In: *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, Springer, 2020, pp. 1–8.
- [49] NF EN 12390-3: Essai pour béton durci – Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes. AFNOR, 2019.
- [50] NF EN 12390-5: Essai pour béton durci – Partie 5: Résistance à la flexion sur éprouvette. AFNOR, 2019.
- [51] ASTM C1754/C1754M-25: Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2025, https://doi.org/10.1520/C1754_C1754M-25.
- [52] Zheng, D., Liang, X., Cui, H., Tang, W., Liu, W., Zhou, D.: Study of performances and microstructures of mortar with calcined low-grade clay, *Construction and Building Materials*, 327 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126963>.
- [53] Hadj Sadok, R., Belas, N., Tahlaiti, M., Mazouzi, R.: Reusing calcined sediments from Chorfa II dam as partial replacement of cement for sustainable mortar production, *Journal of Building Engineering*, 40 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102273>.
- [54] Wu, C. et al.: Preparation of solid-waste-based pervious concrete for pavement: A two-stage utilization approach of coal gangue, *Construction and Building Materials*, 319 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125962>.
- [55] Cyr, M., Lawrence, P., Ringot, E.: Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 2, pp. 264–277, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.001>.
- [56] Neville, A.M.: *Properties of Concrete*. 4th edition, Pitman Publishing, London, 2011.
- [57] Bhutta, M.A.R., Hasanah, N., Farhayu, N., Hussin, M.W., Tahir, M.B.M., Mirza, J.: Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). *Construction and Building Materials*, 47 (2013), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.022>.
- [58] Bittencourt, S.V., Magalhães, M. da S., Tavares, M.E. da N.: Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate, *Case Studies in Construction Materials*, 14 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00473>.
- [59] Yavuz, D., Akbulut, Z.F., Guler, S.: An experimental investigation of hydraulic and early and later-age mechanical properties of eco-friendly porous concrete containing waste glass powder and fly ash, *Construction and Building Materials*, 418 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135312>.