



izr. prof. dr. Andrej Ivanič, univ. dipl. inž. grad.

andrej.ivanic@um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



dr. Ahmad Rizwan Mumtaz, mag. inž. grad.

ahmadrizwan.mumtaz@student.um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



izr. prof. dr. Natalija Bede Odorčič, univ. dipl. inž. grad.

natalija.bede@uniri.hr
Univerza na Reki,
Radmile Matejčić 2, 51000 Rijeka,
Hrvaška



doc. dr. Núria Garro, univ. dipl. fiz.

nuria.garro@uv.es
Univerza v Valencii, Inštitut za znanost o materialih,
Poligon »La Coma« s/n, 46980 Paterna,
Španija



izr. prof. dr. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

samo.lubej@um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



izr. prof. dr. Antonio Comite, univ. dipl. kem.

antonio.comite@unige.it
Univerza v Genovi, Oddelek za kemijo in industrijsko kemijo,
Via Dodecaneso 31, 16146 Genova,
Italija



doc. dr. Marcello Pagliero, univ. dipl. kem.

marcello.pagliero@unige.it
Univerza v Genovi, Oddelek za kemijo in industrijsko kemijo,
Genova,
Italija



Nikolina Škrilec, univ. dipl. inž. grad.

nikolina.skrilec@imo-real.si
IMO-REAL, d. o. o.,
Ulica Štefana Kovača 10, 9000 Murska Sobota
Slovenija



doc. dr. Gregor Kravanja, mag. inž. kem. tehn.

gregor.kravanja@um.si
Univerza v Mariboru,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor,
Slovenija



Znanstveni članek

UDK/UDC: 691.32:620.1:539.51

ULTRAVISOKOZMOGLJIVI BETON Z BAZALTNIMI VLAKNI TER SAMOČISTILNIMI IN LUMINISCENČNIMI POVRŠINAMI ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE WITH BASALT FIBRES AND SELF-CLEANING, LUMINESCENT SURFACES

Povzetek

Raziskava obravnava razvoj ultravisokozmogljivega betona (UHPC), zasnovanega na optimizirani cementni matriki z nizkim vodovezivnim razmerjem, doseženim z metodo mokrega zgoščanja delcev. V mešanico je bil dodan 1 vol.% bazaltnih vlaken, ki so bistveno izboljšala duktilnost materiala, zmanjšala njegovo krhkost ter učinkovito premoščala nastale razpoke. Analiza SEM-EDS je potrdila homogeno razporeditev vlaken in njihovo dobro vez s hidratacijsko matrico. Razvita mešanica je dosegla tlačno trdnost 138,5 MPa in upogibno trdnost 12,5 MPa, kar kljub delni nadomestitvi cementa z metakaolinom potrjuje zelo visoko mehansko zmogljivost UHPC.

Za pridobitev dodatnih multifunkcionalnih lastnosti, kot sta izrazita vodoodbojnost in luminiscenčno emitiranje svetlobe, je bila uporabljena dvoslojna biomimetična površinska obdelava na osnovi nanodelcev SiO_2 in luminiscenčnega prahu. Preizkusi omogočajo pokazali stabilno superhidrofobnost s kontaktnimi koti do $154,9^\circ$, luminiscenčni sloj pa je omogočil oddajanje vidne zelene svetlobe pri približno 520 nm. Rezultati potrjujejo, da sinergija optimizirane UHPC-matrice, bazaltnih vlaken in funkcionalnih površinskih slojev pomembno razširja uporabnost betona, zlasti pri trajnostno zasnovanih elementih, kjer sta nadzor razpok in zaščita pred vodo ključnega pomena, hkrati pa je zagotovljena pasivna nočna vidljivost brez zunanega vira energije.

Ključne besede: ultravisokozmogljivi beton (UHPC); bazaltne vlakna; metakaolin; metoda mokrega zgoščanja delcev; superhidrofobnost; luminiscenca

Summary

The study addresses the development of ultra-high-performance concrete (UHPC) based on an optimized cementitious matrix with a low water-to-binder ratio, achieved using the wet particle packing method. A volume fraction of 1 vol. % basalt fibres was incorporated into the mixture, which significantly improved material ductility, reduced brittleness, and effectively bridged the generated cracks. SEM-EDS analysis confirmed the homogeneous distribution of fibers and their strong bonding with the hydration matrix. The developed mixture achieved a compressive strength of 138.5 MPa and a flexural strength of 12.5 MPa, which, despite the partial replacement of cement with metakaolin, confirms the very high mechanical performance of UHPC.

To obtain additional multifunctional properties, such as pronounced water repellency and luminescent light emission, a double-layer biomimetic surface treatment based on SiO_2 nanoparticles and luminescent powder was applied. Wettability tests demonstrated stable superhydrophobic behaviour with contact angles of up to 154.9° , while the luminescent layer enabled emission of visible green light at approximately 520 nm. The results confirm that the synergy of the optimized UHPC matrix, basalt fibres, and functional surface layers significantly expands the applicability of concrete, particularly in sustainably designed elements where crack control and water protection are crucial, while also providing passive nighttime visibility without an external energy source.

Key words: ultra-high-performance concrete; basalt fibres; metakaolin; wet particle packing method; superhydrophobic; luminescence

1 UVOD

Ultravisokozmogljivi beton (ang. Ultra-High-Performance Concrete – UHPC) je eden najnaprednejših sodobnih cementnih kompozitov, ki združuje izjemne mehanske lastnosti z visoko obstojnostjo in odpornostjo proti vplivom okolja. Zaradi svoje goste mikrostrukture, nizke poroznosti in optimizirane granulometrične zrnastostne sestave dosega tlačne trdnosti, ki pogosto presegajo 120 MPa. Nizko razmerje voda/vezivo (W/B < 0,25) in preiščena uporaba finih praškastih dodatkov zagotavlja izredno kompaktno matrico, medtem ko vključitev jeklenih vlaken bistveno poveča žilavost ter odpornost proti nastanku in širjenju razpok. Zaradi teh lastnosti UHPC postaja osrednji material v razvoju trajnostnih in tehnološko naprednih gradbenih rešitev ter predmet intenzivnih raziskav v zadnjem desetletju [Mumtaz, 2024].

Kombinacija navedenih lastnosti omogoča boljše razumevanje njegovega vedenja v konstrukcijah in hkrati omogoča širok spekter uporabe UHPC, ki se uveljavlja pri gradnji mostov, stolpov vetrnih turbin, morskih in pristaniških konstrukcij ter pri proizvodnji prefabriciranih betonskih elementov, vojaških objektov in predorov. Poleg konstrukcijskih aplikacij se UHPC čedalje pogosteje uporablja tudi v arhitekturnih sistemih, zlasti za fasadne panele, kjer zagotavlja hkrati visoko nosilnost in estetsko kakovost [Kravanja, 2024].

Kljub odličnim mehanskim lastnostim pa uporaba jeklenih vlaken prinaša tudi določene omejitve, predvsem njihovo občutljivost za kemijsko korozijo v prisotnosti kloridnih ionov, kar lahko negativno vpliva na mikrostrukturo in s tem zmanjša trajnost materiala [Dong, 2024].

Kot alternativa jeklenim vlaknom se v zadnjem času vse pogosteje uporabljajo bazaltne vlakna, saj so naravnega izvora, odporna proti koroziji ter prispevajo k večji trajnosti in izboljšanim mehanskim lastnostim UHPC [Chen, 2023]. V slovenskem raziskovalnem prostoru so bili na področju uporabe bazaltnih vlaken in kompozitnih ojačitev v betonu posebej dejavni Saje idr., ki so preučevali vpliv peskane površinske obdelave bazaltnih kompozitnih palic (BFRP) na sprijem z betonom. Pokazalo se je, da je količina nanesenega peska zelo neenakomerna, kar poudarja potrebo po poenotenju postopkov obdelave, medtem ko sama intenzivnost peskanja ni bistveno vplivala na povprečno sprijemno trdnost [Saje, 2024].

Kljub svoji izjemni trdnosti in obstojnosti UHPC še vedno ne izpolnjuje vseh funkcionalnih in trajnostnih zahtev sodobnega gradbeništva, poleg tega pa je njegova proizvodnja z vidika stroškov manj ugodna od klasičnih betonskih mešanic [Dong, 2024]. Cenovna razlika je predvsem posledica visoke vsebnosti cementa, značilne za proizvodnjo UHPC, ki močno vpliva na skupne stroške materiala. Zaradi zelo nizkega vodovezivnega razmerja, visoke vsebnosti veziva, velikega deleža finih delcev ter majhne največje velikosti agregata je pri UHPC izraziteje prisotno zgodnje avtogeno krčenje, kar je pomemben pojav, ki ga je treba upoštevati pri načrtovanju materiala in konstrukcij.

V zadnjem desetletju se zato intenzivno iščejo pristopi za zmanjšanje okoljskega odtisa UHPC, pri čemer se del cementa nadomešča z alternativnimi cementnimi materiali, kot so pepel, mleta granulirana plavžna žindra in metakaolin [Amran, 2022]. Med njimi se metakaolin izkazuje kot izjemno reakti-

ven pucolanski material, ki pomembno prispeva k izboljšanju mehanskih lastnosti, gostoti mikrostrukture ter povečani obstojnosti betona [Tasiopoulou, 2023].

Takšni trajnostno usmerjeni pristopi niso omejeni zgolj na laboratorijske raziskave, temveč se UHPC vse pogosteje uveljavlja tudi v inženirski praksi. Z vlakni ojačani ultravisokozmogljivi beton (UHPFRC) se v Sloveniji že uspešno uporablja pri sanacijah obstoječih konstrukcij, zlasti mostov. Pomemben primer predstavlja sanacija mostu Log Čezsoški pri Bovcu, kjer je bila zgornja površina mostne plošče zaščiten z neprekinjenim slojem UHPFRC debeline 2,5 do 3 cm. Uporabljena je bila takrat patentirana tehnologija CEMTECMultiscale®, ki temelji na večnivojski ojačitvi z mikro- in makrovlakni ter zagotavlja visoko nosilnost, izjemno nizko prepustnost in učinkovito odpornost proti nastanku ter širjenju razpok. Tehnologija je bila predhodno preverjena v raziskovalnih projektih in številnih praktičnih aplikacijah v Švici in drugih evropskih državah.

Posebnost sanacije mostu Log Čezsoški, pri kateri je sodeloval Zavod za gradbeništvo Slovenije, je bila uporaba okolju prilagojene mešanice ECO-UHPFRC z zmanjšano vsebnostjo cementa in večjim deležem mineralnih dodatkov lokalnega izvora. Kljub zahtevnim vremenskim razmeram je bila sanacija izvedena v dveh dneh, most pa ponovno odprt za promet že po enem mesecu, kar pomeni pomembno časovno prednost v primerjavi s klasičnimi sanacijskimi postopki. Analize življenjskega cikla so pokazale tudi manjši okoljski vpliv takšne rešitve [Habert, 2013].

Poleg izjemnih mehanskih lastnosti ima UHPC velik potencial za integracijo naprednih oziroma pametnih funkcionalnosti, ki omogočajo razvoj tako imenovanega multifunkcionalnega betona. Med najpomembnejše spadajo superhidrofobnost (odboj vode in povečana odpornost proti zmrzovanju), samo-senzibilnost (zaznavanje deformacij in razpok), samoceljenje (aktivacija nehidriranih delcev), samočistilnost (fotokatalitični razkroj nečistoč), električna prevodnost (uporaba kovinskih vlaken za senzorske in ogrevalne aplikacije), toplotna regulacija (vgradnja fazno spremenljivih materialov) ter luminiscenca, ki omogoča oddajanje svetlobe in prispeva k učinkovitosti. Takšne lastnosti omogočajo razvoj naprednih, učinkovitih in trajnostnih betonskih kompozitov, ki presegajo vlogo pasivnega gradbenega materiala ter postajajo aktiven element inteligentnih konstrukcij [Han, 2017].

Superhidrofobnost betona predstavlja eno najučinkovitejših strategij za zmanjšanje prodiranja vode ter povečanje odpornosti proti zmrzovanju in tajanju ter koroziji [Kravanja, 2022a]. Temelji na povečanju kontaktnega kota vode ($WCA > 150^\circ$), kar zmanjša kapilarno absorpcijo in omogoča, da kapljice zlahka zdrsnejo s površine. Hidrofobne snovi se lahko vnašajo bodisi na površino bodisi v notranjost betona, kjer tvorijo zaščitno plast, ki bistveno podaljšuje življenjsko dobo in zmanjšuje potrebo po vzdrževanju konstrukcij [Wu, 2022].

Drugi pomemben vidik nove generacije multifunkcionalnih betonov je luminiscenca, tj. sposobnost oddajanja svetlobe brez zunanjih virov energije. To je inovativen koncept v gradbeništvu, ki v zadnjem času postaja vse bolj aktualen. Uporaba luminiscenčnih agregatov ali pigmentov omogoča razvoj samoosvetljujočih površin, ki prispevajo k večji prometni varnosti, zmanjšani porabi energije in manjšemu svetlobnemu

onesnaževanju, hkrati pa odpravljajo težave z neenakomerno osvetlitvijo in bleščanjem, značilnim za klasično ulično razsvetljavo [Wang, 2021].

Predstavljena raziskava obravnava razvoj in karakterizacijo z bazaltom ojačanega ultravisokozmogljivega betona (UHPC), ki združuje superhidrofobnost in luminiscenco ter s tem uresničuje koncept multifunkcionalnega betona nove generacije. Takšen material ne le izboljšuje mehanske in trajnostne lastnosti, temveč predstavlja pomemben korak v smeri pametne in trajnostne gradnje prihodnosti.

UHPC z integriranimi multifunkcionalnimi lastnostmi v slovenskem znanstvenem in strokovnem prostoru doslej še ni bil sistematično obravnavan, zato je ta prispevek pomemben korak k razvoju pametnih in trajnostnih gradbenih materialov v Sloveniji.

V prvem delu članka je predstavljen razvoj optimizirane sestave UHPC z uporabo metakaolina kot dodatnega cementnega materiala ter bazaltnih vlaken kot ojačitvene komponente, s ciljem izboljšanja mehanskih lastnosti in trajnosti betona. Poseben poudarek je namenjen optimizaciji razmerja voda/vezivo z metodo mokrega zgoščanja delcev ter ovrednotenju vpliva metakaolina in bazaltnih vlaken na tlačno in upogibno trdnost ter reološko obnašanje mešanice.

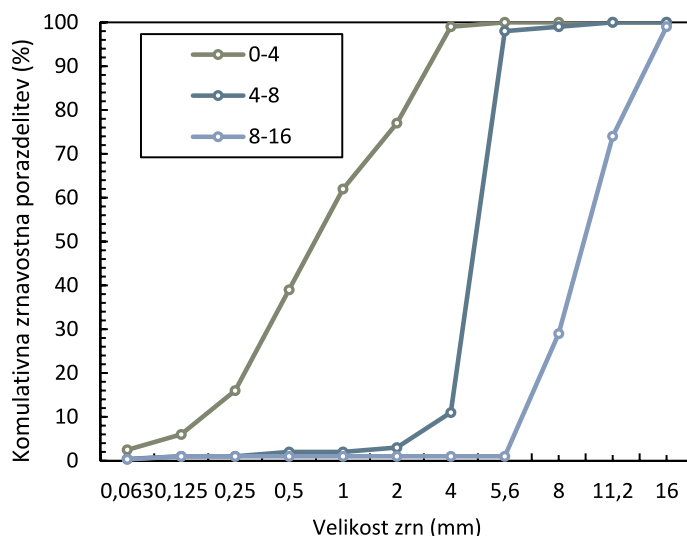
Drugi del članka je usmerjen v razvoj multifunkcionalnega UHPC z integracijo superhidrofobnih in luminiscenčnih lastnosti. Cilj je bil oblikovati trajno samočistilno površino z nizkim kotom zdrsa vode ter dolgotrajnim svetlobnim oddajanjem, pri čemer so bile analizirane močljivost, morfologija in hrpa-vost površine ter svetlobna emisija v temi brez zunanjih virov energije.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

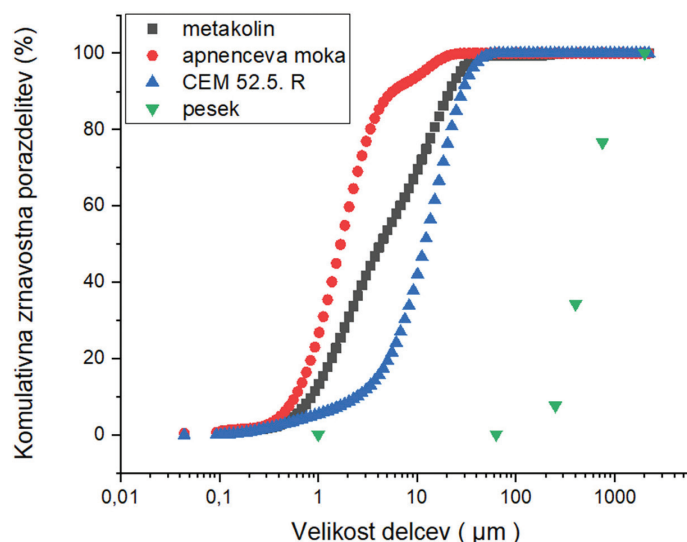
2.1 Materiali in metode

Kot glavno vezivo je bil uporabljen portlandski cement CEM I 52.5 R (Alpacem cementi, d. o. o., Deskle, Slovenija) s specifično gostoto 3,1. Metakaolin (MK; Melamin, d. o. o., Kočevje, Slovenija) s specifično gostoto 2,1 je bil uporabljen kot dodatni cementni material. Fina agregatna frakcija sta bili kremenčev pesek z modulom zrnivosti 2,81 in apnenčeva moka (LP, ang. limestone filler) s specifično gostoto 2,6, oba je dobavilo podjetje Murexin, d. o. o., Buzin, Slovenija (slika 1). Za referenčni beton smo uporabili fine in grobe frakcije naravnega mineralnega agregata rečnega izvora iz reke Drave, ki ga pridobivajo v separaciji Podlesnik v Mariboru (slika 2).

Za ojačitev so bila uporabljena 12 mm dolga bazalna vlakna s specifično gostoto 2,6. Hidrofobni aditiv je bil polimetilhidrogensiloksan (PMHS, $\rho = 1,1$), luminiscenčne lastnosti pa so bile dosežene z dodatkom stroncijevega aluminata ($\rho = 3,73$; Samson Kamnik, d. o. o., Kamnik, Slovenija). Za izdelavo superhidrofobne površine smo uporabili nanos nanodelcev silicijevega dioksida (SiO_2 ; 10–20 nm; 99,5 % čistost; Sigma Aldrich, ZDA) in poliestrsko mrežico z odprtiniami velikosti 200 μm (Konus Konex, d. o. o., Slovenske Konjice, Slovenija). Uporabljena sta bila vodovodna voda ter zelo učinkovit hiperplastifikator na osnovi polikarboksilatnih etrov Sika® ViscoCrete®-5075 RS (Sika, d. o. o., Slovenija), ki omogoča dobro obdelovalnost



Slika 1. Zrnavostna sestava materialov za referenčni beton z uporabo naravnega mineralnega agregata



Slika 2. Zrnavostna sestava materialov za UHPC-beton

Komponenta	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
CEM 52.5 R	64,80	22,20	5,40	3,30	3,20	0,50	0,50	0,10	0,20
MK	0,20	54,00	42,00	0,90	0,50	0,20	0,10	0,10	1,20
LP	83,20	6,40	1,50	1,00	0,20	0,10	0,10	0,10	0,00

Preglednica 1. Kemijska sestava komponent UHPC in njihova vsebnost oksidov (v mas. %)

mešanice pri nizkem razmerju voda/vezivo. Preglednica 1 prikazuje kemijsko sestavo komponent UHPC, izraženo kot masni delež glavnih oksidov, določenih z rentgensko fluorescenčno spektroskopijo (XRF).

2.2 Priprava betonskih mešanic

Za primerjalno analizo mehanskih lastnosti sta bila pripravljena tako fino zrnati UHPC kot referenčni običajni beton. UHPC je bil zasnovan skladno s priporočili standarda [ASTM C1856/C1856M-17], ki določa postopke za izdelavo, ravnanje in preskušanje vzorcev ultravisokozmogljivega betona. Za UHPC so bili izdelani manjše kocke dimenzij 70 × 70 × 70 mm in prizmatični vzorci dimenzij 40 × 40 × 160 mm. Dodatno so bile za določitev tlačne trdnosti izdelane kocke dimenzij 150 × 150 × 150 mm, in sicer za materiala UHPC in referenčni beton. Sestava referenčnega betona in UHPC je prikazana v Tabeli 2. UHPC-mešanice so bile pripravljene z optimiziranim vodno-vezivnim razmerjem za doseg želene zgoščenosti delcev.

	w/b	CEM 52.5	MK	Voda	≤ 2 mm	0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm	Apn. moka	SP (%)	Vlakna (%)
REF	0,50	360,0	/	180	/	859	171	682	/	/	/
UHPC-0.20	0,20	746,0	74,6	188,7	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.22	0,22	746,0	74,6	197,8	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.24	0,24	746,0	74,6	205,2	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.27	0,27	746,0	74,6	221,6	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.28	0,28	746,0	74,6	229,8	954,0	/	/	/	199,0	31,2	0
UHPC-0.22-1 % BF	0,22	746,0	74,6	197,8	954,0	/	/	/	199,0	31,2	26

Preglednica 2. Sestava referenčnega betona in mešanic ultravisokozmogljivega betona (UHPC) z dodatkom metakaolina (v kg/m³)

2.3 Izdelava biomimetične luminiscenčne površine UHPC

Za izdelavo luminiscenčne in superhidrofobne (biomimetične) površine UHPC je bila razvita nova metoda. Pred ulivanjem betona so bile notranje stene kalupov obložene s poliestrsko mrežico kvadratne oblike (200 μm), kar je omogočilo oblikovanje mikroteksturirane površine. Po 24 urah smo vzorce razkalupili in odstranili mrežice. Sledila je nega vzorcev v vodi do starosti 28 dni skladno s standardoma [SIST EN 12390-1:2021] in [SIST EN 12390-2:2019]. Na površino je bil nato nanosen prosojni premaz z dodatkom submikronskega luminiscenčnega prahu, ki omogoča trajno luminescenco. Za doseg superhidrofobnosti je bila površina dodatno obdelana z razpršilno suspenzijo nanodelcev SiO₂, modificiranih s PMHS. Suspenzija je bila pripravljena iz 0,6 g nanodelcev SiO₂, dispergiranih v 100 mL etanola z 20-minutno ultrazvočno obdelavo, nato pa dodatno homogenizirana 10 minut pri 10.000 vrt/min. Zatem je bilo postopno dodanih 25 mL PMHS ob magnetnem mešanju v trajanju 30 minut. Pripravljena suspenzija je bila nanesena na površino betona z brizganjem pri hitrosti približno 5 cm/s in razdalji šobe vsaj 10 cm, s čimer je nastala mikro- in nanostrukturirana superhidrofobna plast.

Nastala površina z dvojno mikro- in nanohrapavostjo vzpostavlja Cassie-Baxterjevo stanje omočenja, pri katerem je voda v stiku le z vrhovi površinske strukture, medtem ko zrak ostaja ujet v vdolbinah, kar vodi do izrazite superhidrofobnosti [Spori, 2010].

Metode karakterizacije

2.3.1 Metoda mokrega zgoščanja delcev

Lastnosti ultravisokozmogljivega betona (UHPC) so v veliki meri odvisne od pakiranja delcev v vezivnem sistemu, saj to določa gostoto matrice, poroznost in posledično mehanske ter trajnostne lastnosti [Shi, 2015]. Zmanjšanje vodno-vezivnega razmerja (v/v) vodi do večje trdnosti, vendar zahteva skrbno optimizacijo razporeditve delcev različnih velikosti, da se doseže največja zapolnitev trdne faze pri minimalni vsebnosti vode.

Zgoščenost delcev v mešanici je definirana kot razmerje med prostornino trdne faze in celotno prostornino zmesi [Chu, 2022]:

$$\varphi = \varphi_{max} = \frac{V_c}{V} \quad (1)$$

kjer je φ_{max} – največja volumenska koncentracija trdnih delcev (brezdimenzijska), V_c – prostornina trdne faze v kalupu (cm³ ali m³), V – celotna prostornina zmesi v kalupu (cm³ ali m³). Prostornina trdne faze V_c se izračuna glede na maso in gostoto posameznih komponent po enačbi (2):

$$V_c = \frac{M_\alpha}{\rho_\alpha} + \frac{M_\beta}{\rho_\beta} + \frac{M_\gamma}{\rho_\gamma} \quad (2)$$

kjer so M_α , M_β , M_γ – mase posameznih trdnih komponent (cement, metakaolin, apnenčeva moka) (kg), ρ_α , ρ_β , ρ_γ – njihove specifične gostote (kg/m³).

2.3.2 Preizkus z razlezom betona

Obdelovalnost UHPC je bila v fazi optimizacije zgoščenosti delcev v mešanici ocenjena s preskusom razlivnosti malte po standardu [SIST EN 1015-3:2019]. Ta preskus je primeren za fino zrnate cementne sisteme, kot je UHPC.

Za primerjavo UHPC z referenčnim betonom je bil dodatno izveden preskus z razlezom svežega betona skladno s standardom [SIST EN 12350-8:2019], s katerim je bila ovrednotena razlivnost obeh mešanic.

2.3.3 Določitev tlačne in upogibne trdnosti

Tlačna trdnost UHPC je bila določena na kockah dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm, medtem ko je bila tlačna trdnost referenčnega betona določena na kockah dimenzij $150 \times 150 \times 150$ mm skladno s standardoma [SIST EN 12390-1:2021] in [SIST EN 12390-2:2019]. Preizkusi so bili izvedeni na hidravlični stiskalnici Toni Technik z nazivno nosilnostjo 3000 kN.

Upogibna trdnost UHPC je bila določena s tritočkovnim upogibnim preizkusom na prizmatičnih vzorcih dimenzij $40 \times 40 \times 160$ mm v skladu s standardom [SIST EN 196-1:2016, Metode pres.], pri čemer je bila hitrost obremenjevanja 50 ± 10 N/s. Obremenitev in pomik pa sta bila spremljana z 2D-optično korelacijo slike (DIC) ter LVDT-senzorji. Za vsako mešanico so bili preizkušeni trije vzorci. Preizkusi so bili izvedeni na univerzalnem preizkuševalnem stroju Zwick Roell Z600 z nosilnostjo 600 kN. Upogibna trdnost referenčnega betona je bila določena na večjih prizmatičnih vzorcih skladno s standardom [SIST EN 12390-5:2019].

2.3.4 Opazovanje mikrostrukture

Mikrostruktura cementnih kompozitov je bila analizirana z mikroskopom (FE-SEM, Supra 40 VP, Carl Zeiss, Nemčija), opremljenim z energijsko disperzijsko rentgensko spektroskopijo (EDS). Vzorci so bili najprej odlomljeni, izbrani deli pa mehansko polirani za analizo notranje mikrostrukture. Pred mikroskopsko analizo so bili vzorci prevlečeni s tanko plastjo ogljika.

2.3.5 Preizkusi omočenja

Kontaktne kot (CA) in kot zdrsa (RA) obdelanih vzorcev sta bila izmerjena pri temperaturi 293 K z uporabo goniometra po metodi sedeče kapljice. Kapljice ultračiste vode (upornost $18,2 \mu\Omega$) $10 \mu\text{L}$ so bile nanese na površino betona z mikropipeto. Slike kapljic so bile zajete z digitalno kamero Basler acA 300-200um z objektivom Basler Premium Lens, preračun kontaktnega kota pa je bil izveden z algoritmom OpenDrop [Huang, 2021]. Podrobnejši opis postopka je naveden v literaturi [Kravanja, 2021].

2.3.6 Spektroskopske analize in preizkus luminiscence

Spektralne značilnosti in intenziteta svetlobne emisije vzorcev, prevlečenih z luminiscenčnim prahom, so bile analizirane z napravo Acton SP-300i (Princeton Instruments, ZDA) z dolgoprepustnim filtrom.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Optimalna zgoščenost delcev v mešanici UHPC

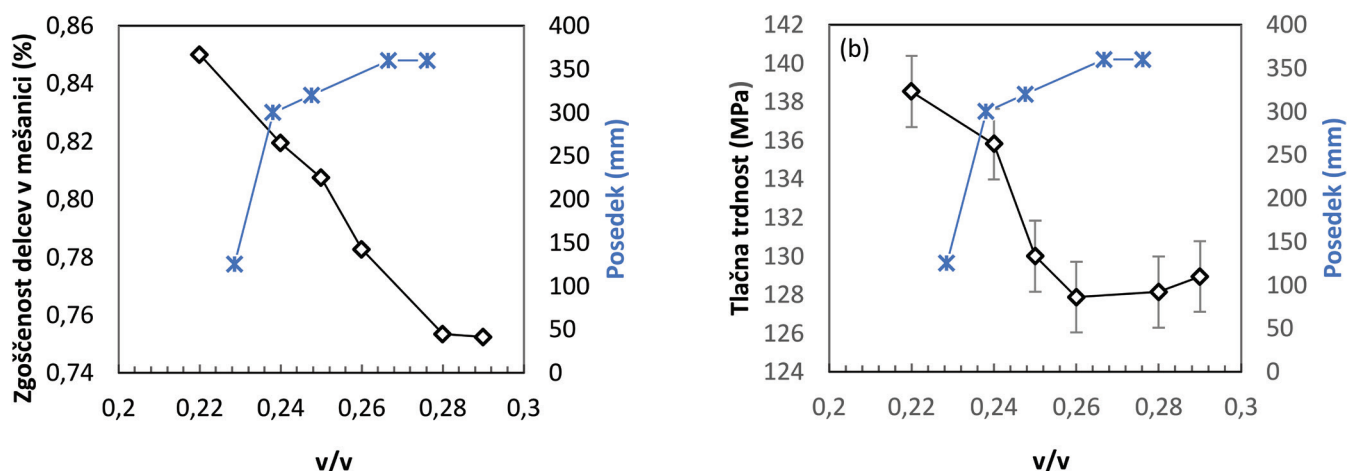
Pri zasnovi mešanice z metakaolinom (MK) je bila skladno z metodo mokrega zgoščanja delcev izvedena serija preizkusov za optimizacijo vodno-vezivnega razmerja (w/b). Rezultati so pokazali, da je bila največja zgoščenost delcev dosežena pri optimalnem razmerju w/b = 0,24, kar je ustrezalo razlivnosti malte približno 265 mm.

Pri tem razmerju je UHPC na kockah dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm dosegel tlačno trdnost 136,3 MPa, medtem ko je bila pri mešanici z dodatkom MK izmerjena 138,5 MPa. Optimalno razmerje w/b = 0,24 je bilo zato izbrano za nadaljnje raziskave (slika 3).

3.2 Reološke in mehanske lastnosti

UHPC v primerjavi z referenčno mešanico izkazuje gostejšo mikrostrukturo, kar je posledica nizkega vodovezivnega razmerja, visoke vsebnosti veziva in optimirane granulometrije finih delcev. Vloga metakaolina pri tem ni polnilna, temveč predvsem reaktivna.

V primerjavi s sorodnimi raziskavami UHPC z metakaolinom se v tej študiji dosežene tlačne trdnosti uvrščajo v pričakovani razpon, saj literatura poroča o vrednostih približno med 120 in 160 MPa pri delni nadomestitvi cementa z metakaolinom, pri čemer se kot optimalen delež nadomestitve najpogosteje navaja 10–15 % [Mohamed, 2024].

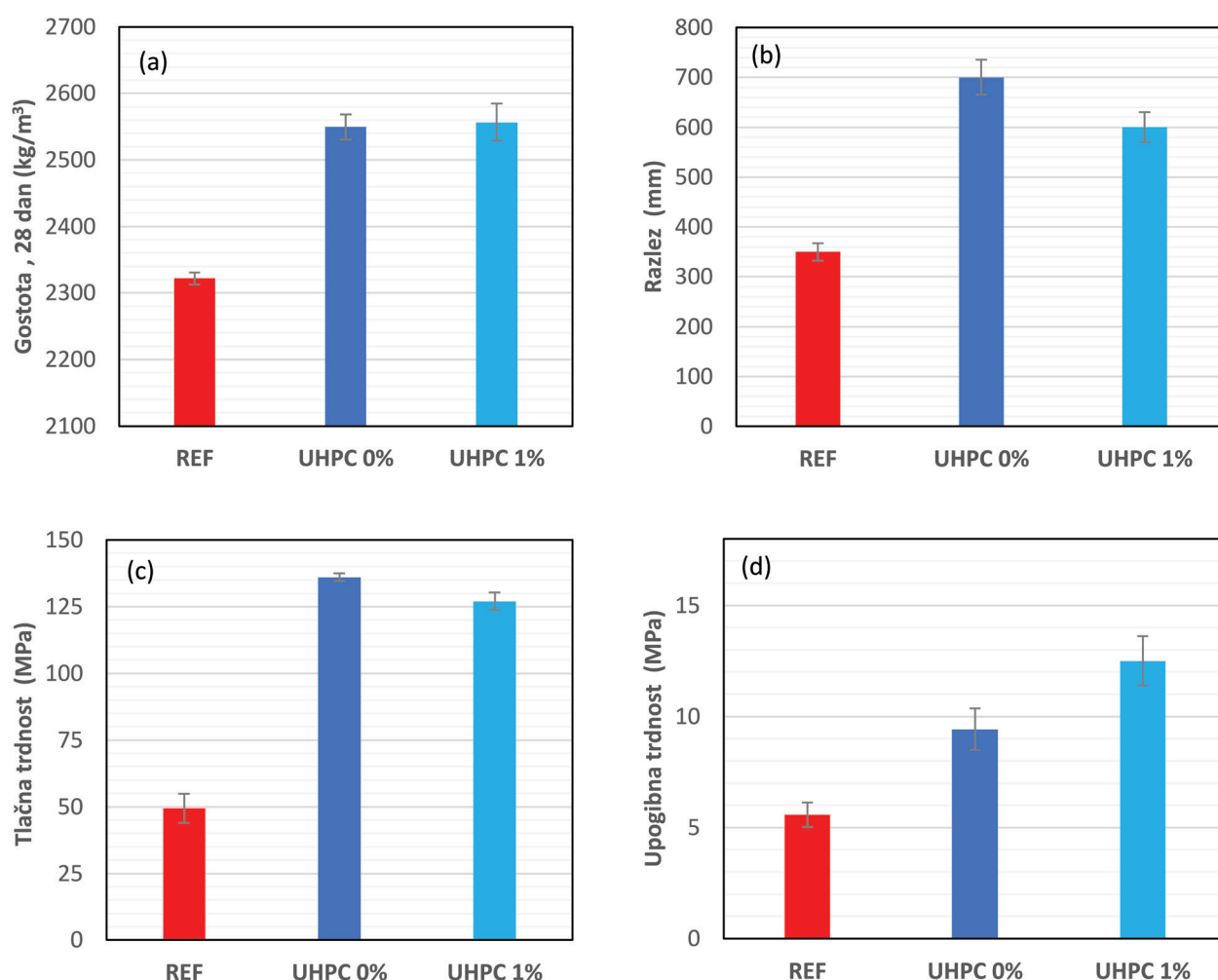


Slika 3. Vpliv vodo-vezivnega razmerja (v/v) na (a) zgoščenost delcev v mešanici in (b) tlačno trdnost ter posedek ultravisokozmogljivega betona (UHPC)

Dodatek bazaltnih vlaken na gostoto kompozita vpliva minimalno (slika 4 a). Referenčni beton, pripravljen brez dodatka superplastifikatorja, je dosegel razlez približno 350 mm, kar ustreza plastični konsistenci, primerni za vgradnjo z vibriranjem. Ker pričakovano ni dosegel razlivnosti, značilne za samozgoščevalni beton, je bil uporabljen zgolj kot referenčna primerjalna mešanica. Ultravisokozmogljivi beton (UHPC) brez vlaken je zaradi visoke vsebnosti superplastifikatorja dosegel razlez okoli 700 mm, kar ustreza značilnemu območju samozgoščevalnih betonov SF2 ter potrjuje njegovo samorazlivno obnašanje. Pri mešanici UHPC z 1 % bazaltnih vlaken se je razlez zmanjšal na približno 600 mm (slika 4b). Zmanjšanje razlivnosti je posledica povečanega notranjega trenja in mehanskega prepletanja vlaken v matrici, vendar beton kljub temu ohranja lastnosti samorazlivnega in dobro kohezivnega materiala brez znakov ločevanja.

neposredno primerljiva zaradi različnih dimenzij preizkušancev ($70 \times 70 \times 70$ mm in $150 \times 150 \times 150$ mm) ter velikostnega učinka. Pri mešanici z bazaltnimi vlakni je bilo vodovezivno razmerje dodatno znižano z 0,24 na 0,22, kar je prispevalo k zelo visoki osnovni trdnosti matrice. Dodatek 1 vol. % bazaltnih vlaken je nekoliko zmanjšal tlačno trdnost (na približno 127 MPa), hkrati pa izrazito povečal upogibno trdnost z 9,4 MPa na 12,5 MPa, kar potrjuje učinkovitost vlaken pri prenosu nateznih napetosti in omejevanju razpok.

Primerjava z nedavnimi raziskavami kaže, da bazaltne vlakna predvsem prispevajo k izboljšanju nateznega obnašanja in duktilnosti UHPC, medtem ko je njihov vpliv na tlačno trdnost izrazitejši šele pri višjih volumskih deležih vlaken [Chen, 2024].



Slika 4. Reološke in mehanske lastnosti betonskih mešanic: (a) gostota, (b) razlez, (c) tlačna trdnost (opomba: UHPC: kocke $70 \times 70 \times 70$ mm; referenčni beton: kocke $150 \times 150 \times 150$ mm.) in (d) upogibna trdnost

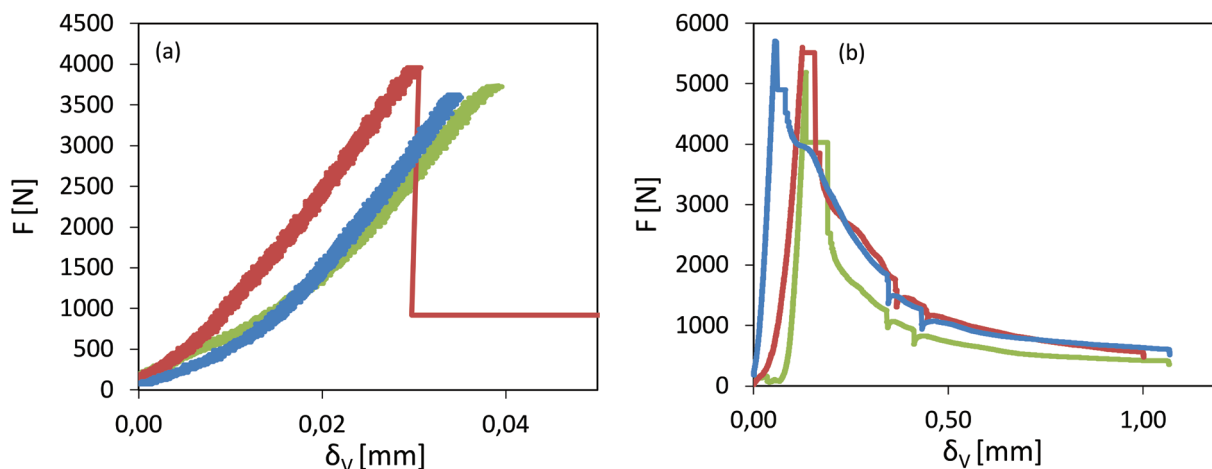
Pri mehanskih lastnostih (sliki 4c in 4d) UHPC brez vlaken dosega bistveno višjo tlačno trdnost (136 MPa) v primerjavi z referenčnim betonom (49 MPa), kar je predvsem posledica izrazito nižjega vodovezivnega razmerja in visoke vsebnosti veziva. Treba pa je poudariti, da primerjava tlačnih trdnosti ni

3.2.1 Vpliv bazaltnih vlaken na lom pri tritočkovnem upogibu

Za oceno upogibnega obnašanja betonskih kompozitov, ojačanih z vlakni, je ključna analiza diagrama sila-pomik, ki

prikazuje vpliv vlaken po doseženi največji obremenitvi (slika 5), zlasti na žilavost in širjenje razpok. Rezultati kažejo, da UHPC brez vlaken po doseženi največji obremenitvi izgubi nosilnost zelo hitro, kar je značilno za krhek lom.

Biomimetična površina UHPC (Slika 6b) pa kaže izrazito hierarhično hrapavost, ki jo tvorijo kvadratno oblikovane mikroizbokline velikosti približno 200 μm , nastale z odtisom mrežice, ter dodatna nanohrapavost zaradi nanodelcev SiO_2 . Kombinacija



Slika 5. Diagram sila–pomik pri upogibu: (a) UHPC brez vlaken, (b) UHPC z 1 vol. % bazaltnih vlaken

Pri mešanici UHPC z 1 vol. % bazaltnih vlaken pa je opazen počasnejši upad nosilnosti in daljši odziv po največji obremenitvi. Vlakna prevzemajo natezne napetosti, upočasnjujejo širjenje razpok ter povečajo energijo loma in duktilnost materiala. Dodatek bazaltnih vlaken tako izboljša mehanski odziv UHPC, kar prispeva k večji varnosti.

3.3 Mikrostruktura betona

V začetni fazi je bil opravljen pregled površinske morfologije in hrapavosti vzorcev, čemur je sledila nadaljnja analiza njihove notranje mikrostrukture.

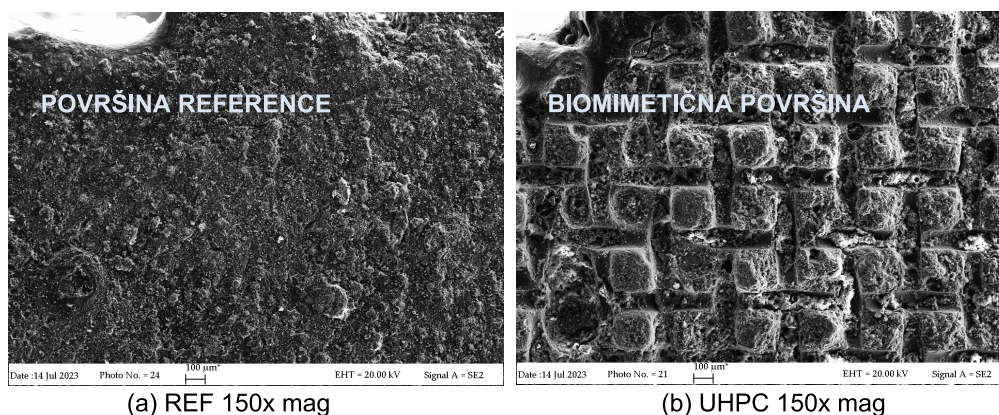
3.3.1 Analiza SEM-EDS površine betona

Na sliki 4 sta prikazani SEM-mikromorfologiji referenčnega betona (REF) in biomimetične površine UHPC. Površina REF (Slika 6a) je razmeroma gladka, brez izrazite mikrostrukture, zato omogoča neovirano omočenje in je izrazito hidrofilna.

mikro- in nanostruktur omogoča ujetje zraka med površino in vodnimi kapljicami, kar bistveno zmanjša dejansko kontaktno površino. Takšna konfiguracija je skladna s Cassie-Baxterjevim modelom, značilnim za superhidrofobne in samočistilne površine, kar potrjuje uspešno izvedbo biomimetične obdelave [Erbil, 2009].

SEM-EDS-analiza potrjuje izrazite razlike v kemični sestavi površine referenčnega betona (REF) in obdelanega UHPC. Površina REF kaže pričakovano prevlado elementov Ca, O in Si, ki izvirajo iz hidratacijskih produktov cementne paste (C–S–H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Aft in AFm). Višji delež kalcija in razmeroma nizek delež silicija nakazuje tipično višje razmerje Ca/Si, značilno za klasične cementne matrice.

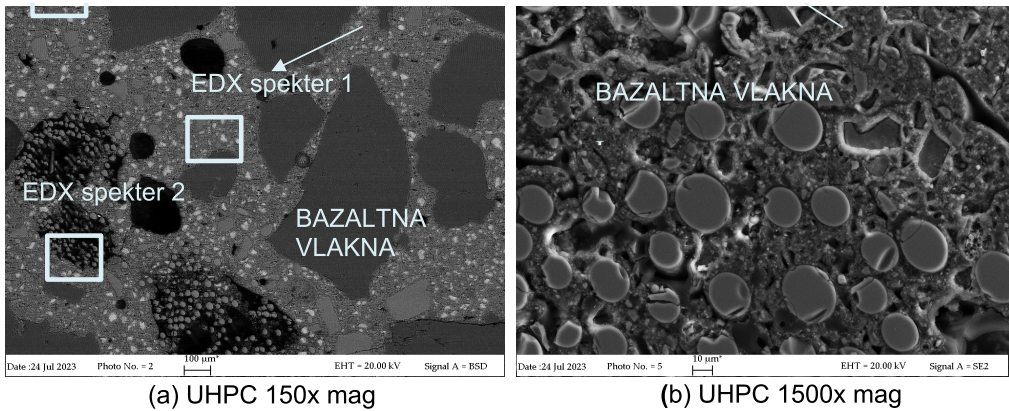
Pri UHPC-vzorcih je zaznan višji delež Si in nižji delež Ca v površinski coni, kar se odraža v znižanem razmerju Ca/Si. Ta sprememba je delno posledica sestave vezivne matrice z dodatkom metakaolina, delno pa vpliva nanosa nanodelcev SiO_2 ,



Slika 6. SEM-mikromorfologija (a) referenčnega betona in (b) biomimetične UHPC-površine z izrazito mikrogeometrijo pri 150 $\times$ povečavi

	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Sr
REF	55,95	0,23	0,28	0,91	7,93	0,07	0,10	2,76	31,23	0,05	0,23	0,26
UHPC	52,83	0,22	0,09	2,78	35,69	0,23	0,13	0,58	3,35	0,00	0,02	4,09

Preglednica 3. SEM-EDS-analiza površinske kemične sestave betonov. Prikazane so masne vsebnosti elementov v površinskem sloju (% mas.)



Slika 7. SEM-EDS-analiza preseka UHPC z bazaltnimi vlakni. (a) Mikrostruktura preseka z vidno porazdelitvijo bazaltnih vlaken in analiznimi območji EDS. (b) Povečava z jasno razločnimi okroglimi prerezi vlaken ter dobro povezavo med vlakni in cementno matrico

Spekter	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1	29,84	0,88	0,39	2,11	14,01	0,51	1,01	24,72	0,05	0,08
2	45,27	2,38	3,55	8,22	25,66	0,23	1,00	6,01	1,06	7,69

Preglednica 4. SEM-EDS-elementalna sestava cementne matrice (Spekter 1) in bazalnega vlakna

ki obogatijo površinski sloj s silicijem. Površinska obdelava tako pomembno vpliva predvsem na kemijsko sestavo in mikrostrukturo zgornje plasti materiala, medtem ko osnovna matrica UHPC določa večino mehanskih lastnosti. Prisotnost sledovnih elementov, kot sta Al in Sr, je povezana predvsem z vezivnimi dodatki ter ne s površinskim premazom.

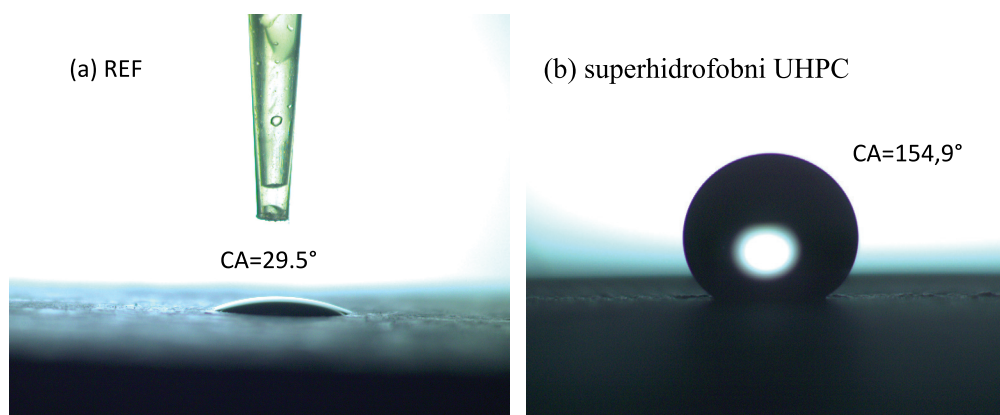
Slika 7 prikazuje SEM-EDS-analizo prereza UHPC z bazaltnimi vlakni, pri čemer je pri 150x povečavi razvidna porazdelitev vlaken v cementni matrici ter izbrani območji za elementno analizo, pri večji povečavi pa so jasno vidni okrogli prerezi vlaken z dobro adhezijo na matrico brez opaznih razpok ali ločitev. EDS-analiza potrjuje razliko v kemijski sestavi med cementno matrico in bazaltnimi vlakni, kar kaže na dobro mikrostrukturno povezavo in učinkovito vgradnjo vlaken v UHPC.

3.4 Kontaktni kot na referenčnem in superhidrofobnem betonu

Slika 8 prikazuje primerjavo omočenja v eni merilni točki med referenčno betonsko površino in biomimetično ob-

delanim UHPC. Kontaktni koti so bili na vsaki površini izmerjeni vsaj trikrat na medsebojni razdalji najmanj 10 mm za zagotovitev ponovljivosti meritev. Na referenčni površini (slika 8 a) se kapljica takoj razlije in tvori nizek kontaktni kot ($CA = 29,5^{\circ} \pm 8^{\circ}$), kar potrjuje izrazito hidrofilnost. Po nekaj minutah voda zaradi odprte poroznosti popolnoma prodre v pore betona, kontaktni kot pri vseh meritvah pade na 0° , kar kaže na neovirano vpijanje in popolno omočenje materiala.

Superhidrofobni UHPC (slika 8 b) izkazuje povsem nasprotno obnašanje: kapljice ohranijo skoraj popolnoma sferično obliko, kontaktni kot znaša $CA = 154,9^{\circ} \pm 3,5^{\circ}$, voda pa ne prodre v površino. Mikro- in nanostrukturiranje povzroči ujetje zraka pod kapljico in s tem močno zmanjšanje dejanske kontaktne površine. Takšna površina izkazuje stabilno superhidrofobnost, skladno s Cassie-Baxterjevim modelom, kar omogoča hitro zdrsnost kapljic in izrazit samočistilni učinek, kar je posebej uporabno pri fasadnih elementih, mostnih ograjah, betonskih cestnih pregradah, tunelskih oblogah ter vseh izpostavljenih betonskih površinah, kjer je zaželeno zmanjšanje vpijanja vode, umazanje in posledične korozije.



Slika 8. Primerjava kontaktnega kota (CA) vodne kapljice na površini (a) REF in (b) biomimetičnega superhidrofobnega UHPC

3.5 Luminiscenčni odziv superhidrofobnega UHPC

Nasliki 9 (a) je prikazan padec intenzitete luminiscence superhidrofobnega in luminiscenčnega UHPC v časovnem obdobju 0–240 min po predosvetlitvi vzorcev z naravno UV-svetlobo sonca v trajanju približno 30 minut. Razvidno je, da je začetna intenziteta najvišja, nato pa se v prvih 30 minutah najhitreje zmanjša in se kasneje stabilizira. Spekter doseže vrh pri približno 520 nm, kar ustreza značilni zeleno fluorescenčni emisiji.

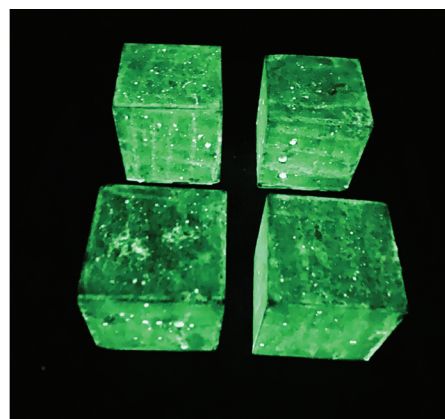
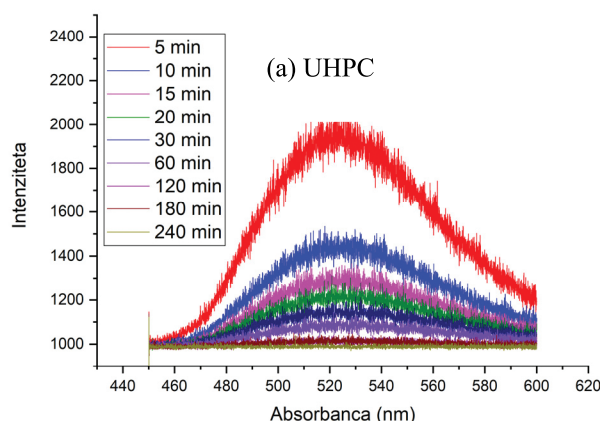
Slika 9 (b) prikazuje vidno emisijo zelene svetlobe na standardnih betonskih kockah iz UHPC (150 × 150 × 150 mm) v popolni temi, kar potrjuje učinkovito delovanje luminiscenčne prevleke in dolgotrajen pojemajoč sij.

Pri obravnavi trajnosti multifunkcionalne površine je treba omeniti tudi njene omejitve. Prejšnje raziskave so pokazale, da mehanska obraba oziroma abrazija ne vpliva bistveno na superhidrofobnost betonske površine, saj kontaktni koti ostajajo zelo visoki tudi po intenzivni mehanski obremenitvi [Kravanja, 2022b]. Nasprotno pa lahko dolgotrajna izpostavljenost UV-sevanju vpliva na stabilnost hidrofobnega premaza, kar predstavlja pomembno področje nadaljnjih raziskav.

Prav tako je treba upoštevati, da luminiscenčni prah v obravnavanem sistemu ni kovalentno vezan v betonsko matrico, temveč tvori površinski sloj, zato je lahko njegova svetlobna učinkovitost sčasoma zmanjšana zaradi mehanske obrabe ali okoljskih vplivov. Nadaljnji razvoj bo zato usmerjen v izboljšanje trajnosti luminiscenčnih prevlek za dolgoročno uporabo v realnih razmerah.

4 SKLEP

Raziskava potrjuje, da je mogoče ultravisokozmogljivi beton (UHPC) nadgraditi z lastnostmi, ki so za sodobno gradbeništvo strateškega pomena: povečano duktilnostjo, izboljšano površinsko odpornostjo na obrus ter funkcionalnostmi, ki zmanjšujejo potrebe po vzdrževanju in znižujejo energijsko porabo skozi celoten življenjski cikel konstrukcije. Vključitev bazaltnih vlaken se je izkazala kot posebno učinkovita, saj prispeva k stabilnejšemu mehanizmu porušitve pri upogibu ter omogoča boljši nadzor nad nastajanjem in širjenjem razpok. Poleg tega bazalna vlakna predstavljajo nekorozivno alternativo jeklenim vlaknom, kar je pomembna prednost pri tankostenskih, arhitekturno izpostavljenih in prefabriciranih betonskih elementih.



Slika 9. (a) Absorbanca luminiscence UHPC v času. (b) Vidna emisija zelene svetlobe UHPC v temi

Biomimetično strukturirana površina je zagotovila superhidrofobnost ($CA > 150^\circ$), kar vodi v zmanjšano omočenje, manjšo kapilarno vpojnost ter nižje tveganje za poškodbe zaradi zmrzovanja, soli in površinske kontaminacije. Za gradbeno prakso to pomeni večjo trajnost in nižje stroške vzdrževanja, zlasti pri fasadnih ploščah, robnih elementih, betonskih pregradah in konstrukcijah, izpostavljenih agresivnim okoljskim vplivom.

Dodana luminiscenčna prevleka na biomimetični površini je omogočila dolgotrajno emisijo zelene svetlobe, kar predstavlja pomembno dodatno funkcionalnost. Takšni betonski sistemi zagotavljajo osnovno nočno vidnost brez zunanjih virov energije, s čimer povečujejo varnost ter hkrati znižujejo obratovalne in vzdrževalne stroške javnih in zasebnih infrastrukturnih objektov.

Skupno ugotovitve potrjujejo, da je multifunkcionalni UHPC pomemben korak k razvoju trajnostne, visoko odporne in tehnološko napredne gradbene prakse, saj združuje mehansko učinkovitost z dodatnimi funkcionalnostmi, ki presegajo klasične lastnosti betonskih materialov.

5 ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARIS) za delno financiranje raziskave v okviru raziskovalnega programa P2-0046 ter programu Erasmus+. Del mehanskih preizkusov je bil izveden z opremo, nabavljeno v okviru projekta »Research Infrastructure for Campus-based Laboratories« Univerze na Reki (št. RC.2.2.06-0001), sofinanciranega s strani Evropskega sklada za regionalni razvoj (ESRR)

Prispevek temelji na članku: Novel Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Enhanced by Superhydrophobic and Self-Luminescent Features, Sustainability, MDPI. Objavljen je pod licenco CC BY 4.0 in prirejen za slovensko strokovno javnost [Mumtaz, 2024].

7 LITERTURA

Amran, M., Huang, S.-S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., Ozbakkaloglu, T., Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects, *Construction and Building Materials*, 352, 129029, 2022.

ASTM C1856/C1856M-17, Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete, (n.d.). West Conshohocken, PA,

Chen, Z., Wang, X., Ding, L., Jiang, K., Huang, H., Liu, J., Wu, Z., Synergistic effects of hybrid macro basalt fibers and micro fibers on the mechanical properties of UHPC, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(4), 264, <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00807-3>, 2023.

Chen, Z., Wang, X., Ding, L., Jiang, K., Su, C., Ben, Q., Wu, Z., Effects of macro basalt fibers on the tensile behavior of ultra-high performance concrete, *Journal of Building Engineering*, 89, 109277, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109277>, 2024.

Chu, S. H., Lam, W. L., Li, L., Poon, C. S., Packing density of ternary cementitious particles based on wet packing method, *Powder Technology*, 405, 117493, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117493>, 2022.

Dong, L., Yang, Y., Liu, Z., Yang, T., Xue, C., Shao, R., Wu, C., Effect of chloride ion migration behaviour on the microstructure and mechanical properties of ultra-high performance concrete: A review, *Journal of Building Engineering*, 82, 108233, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108233>, 2024.

Erbil, H. Y., Cansoy, C. E., Range of applicability of the Wenzel and Cassie-Baxter equations for superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 25(24), 14135-14145, 2009.

Habert, G., Denarié, E., Šajna, A., Rossi, P., Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes, *Cement and Concrete Composites*, 38, 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.008>, 2013.

Han, B., Zhang, L., Ou, J., Smart and multifunctional concrete toward sustainable infrastructures (Vol. 399). Springer, 2017.

Huang, E., Skoufis, A., Denning, T., Qi, J., Dagastine, R. R., Tabor, R. F., Berry, J. D., OpenDrop: Open-source software for pendant drop tensiometry & contact angle measurements, *Journal of Open Source Software*, 6(58), 2604, 2021.

Kravanja, G., Godec, R. F., Rozman, M., Rudolf, R., Ivanič, A., (a), Biomimetic superhydrophobic concrete with enhanced anticorrosive, freeze thaw, and deicing resistance, *Advanced Engineering Materials*, 24(7), 2101445, 2022.

Kravanja, G., Godec, R. F., Rozman, M., Rudolf, R., Ivanič, A., (b), Biomimetic Superhydrophobic Concrete with Enhanced Anticorrosive, Freeze Thaw, and Deicing Resistance, *Advanced Engineering Materials*, 24(7), <https://doi.org/10.1002/adem.202101445>, 2022.

Kravanja, G., Ivanič, A., Lubej, S., Degradation of plasticized poly (1-chloroethylene) waterproofing membranes used as a building material, *Acta Chim. Slov*, 68, 494-504, 2021.

Kravanja, G., Mumtaz, A. R., Kravanja, S., A comprehensive review of the advances, manufacturing, properties, innovations, environmental impact and applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), *Buildings*, 14(2), 382, 2024.

Mohamed, A. M., Tayeh, B. A., Metakaolin in ultra-high-performance concrete: A critical review of its effectiveness as a green and sustainable admixture, *Case Studies in*

Construction Materials, 21, e03967, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03967>, 2024.

Mumtaz, A. R., Bede Odorčić, N., Garro, N., Lubej, S., Ivanič, A., Comite, A., ... Kravanja, G., Novel Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) enhanced by superhydrophobic and self-luminescent features, Sustainability, 16(3), 1068, 2024.

Saje, D., Turk, G., Lopatič, J., Influence of sand coating intensity on bond properties between basalt fibre-reinforced polymer bars and concrete, Case Studies in Construction Materials, 21, e04072, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04072>, 2024.

Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z., A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design, Construction and Building Materials, 101, 741-751, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>, 2015.

SIST EN 196-1:2016, Metode preskušanja cementa – 1. del: Določanje trdnosti, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 1015-3:2019, Metode preskušanja zidarske malte – 3. del: Določevanje konsistence sveže malte (s stresalno mizo), (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12350-8:2019, Preskušanje svežega betona – 8. del: Samozgoščevalni beton – Preskus razleza s posedom, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12390-1:2021, Preskušanje strjenega betona – 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12390-2:2019, Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti, (n.d.). Ljubljana.,

SIST EN 12390-5:2019, Preskušanje strjenega betona – 5. del: Upogibna trdnost preskušancev, (n.d.). Ljubljana.,

Spori, D. M., Drobek, T., Zürcher, S., Spencer, N. D., Cassie-State Wetting Investigated by Means of a Hole-to-Pillar Density Gradient, Langmuir, 26(12), 9465–9473, <https://doi.org/10.1021/la904714c>, 2010.

Tasiopoulou, T., Katsourinis, D., Giannopoulos, D., Founti, M., Production-process simulation and life-cycle assessment of metakaolin as supplementary cementitious material, Eng, 4(1), 761-779, 2023.

Wang, W., Sha, A., Lu, Z., Jia, M., Jiang, W., Liu, Z., Yuan, D., Self-luminescent cement-based composite materials: properties and mechanisms, Construction and Building Materials, 269, 121267, 2021.

Wu, Y., Dong, L., Shu, X., Yang, Y., She, W., Ran, Q., A review on recent advances in the fabrication and evaluation of superhydrophobic concrete, Composites Part B: Engineering, 237, 109867, 2022.