

Utjecaj zamjene cementa metakaolinom i vapnenačkim filerom na svojstva UHPC-a

Antonija Ocelić¹, doc. dr. sc. **Ana Baričević²**

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, antonija.ocelic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ana.baricevic@grad.unizg.hr

Sažetak

Zahtjev održivosti u građevinskoj industriji može ispuniti beton ultra visokih uporabnih svojstava (engl. UHPC). U radu je dan opći pregled UHPC-a uz provedena ispitivanja utjecaja silicijske prašine, metakaolina, vapnenačkog filera te nanogline na reološka i mehanička svojstva UHPC-a. Rezultati su pokazali sporiji prirast te manje vrijednosti ranih čvrstoća u odnosu na referentnu mješavinu. Istaknut je utjecaj nano gline na obradivost te potreba pronalaska optimalnog postupka miješanja i udjela nanogline.

Ključne riječi: UHPC, održivi materijali, nanoglina, metakaolin, vapnenački filer, silicijska prašina

Influence of cement replacement by metakaolin and limestone filler on the properties of UHPC

Abstract

The demand for sustainability in construction can be met by ultra-high performance concrete. The paper gives a general overview of UHPC and investigates the influence of silica fume, metakaolin, limestone filler and nanoclay on the rheological and mechanical properties of UHPC. The results showed a slower increase and lower early strengths compared to the reference mix. The influence of nanoclay on the workability of the mix and the need to find the optimum mixing procedure and content of nanoclay are highlighted.

Key words: UHPC, sustainable materials, nano-clay, metakaolin, limestone filler, silica fume

1 Uvod

Zadnjih godina se u području građevinskih materijala, uz postizanje odgovarajućih mehaničkih svojstava, sve veća važnost pridaje i zadovoljenju uvjeta ekološke i ekonomske učinkovitosti. Na taj način se, kako pri izgradnji novih, tako i pri obnovi postojećih građevina, nastoji zadovoljiti kriterij održivosti. Kao potencijalni materijal kojim bi se zadovoljili potrebni zahtjevi održivosti građevinskih materijala ističe se beton ultra visokih uporabnih svojstava (engl. ultra high performance concrete, UHPC). Izvanredna svojstva UHPC-a omogućuju njegovu raznovrsnu primjenu, kako u konstrukcijskim, tako i u nekonstrukcijskim namjenama. Konstrukcijsku primjenu našao je u izgradnji mostova i dijelova građevina zahvaljujući svojim svojstvima koja omogućuju proizvodnju manjih, lakših i tanjih presjeka, što ga čini učinkovitijim u odnosu na ostale cementne kompozite. Nekonstrukcijsku primjenu UHPC je našao kao sanacijski materijal, tj. za popravak završnih slojeva postojećih betonskih konstrukcija te na taj način poboljšavajući mehanička svojstva i svojstva trajnosti uz manje potrebnog održavanja [1]. Usprkos brojnim prednostima, UHPC, kao i svaki materijal, ima i nedostatke, a glavne čine: relativno visoka cijena, nedostatak odgovarajućih standarda, krhki slom, zahtjevan proces miješanja, visoko autogeno skupljanje te nedovoljno dugoročnih istraživanja o ponašanju UHPC-a u određenim uvjetima [2, 3]. Iako se UHPC, dugoročno gledano smatra ekološkim materijalom, istraživanjima se želi postići još veća ekološka učinkovitost te smanjiti njegova cijena [4]. Na taj način, pojedina istraživanja [4–11] daju prijedlog primjene zamjenskih cementnih materijala u sastavu UHPC-a, načina poboljšanja njegovih svojstava te načina smanjenja negativnog učinka na okoliš i postizanja održivog razvoja.

Cilj ovog rada je utvrditi utjecaj zamjenskih cementnih (metakaolina i vapnenačkog filera) i nano materijala (nanogline) na svojstva UHPC-a. Nano materijal je dodan s ciljem poboljšanja reoloških i mehaničkih svojstava UHPC-a. Kako je navedeno u [11], nanoglina potiče hidratacijske reakcije te poboljšava mikrostrukturu UHPC matrice, popunjavajući prostor između čestica cementa. Svi ti utjecaji dovode do poboljšanih reoloških svojstava mješavine, a time dovodeći i do poboljšanih mehaničkih svojstava. Cilj je postići ekološki i ekonomski učinkovitiji UHPC, što znači smanjenje udjela cementa uz zadržavanje odgovarajućih mehaničkih svojstava. Ova ispitivanja služe kao preliminarna, tj. za odabir matrice za daljnja, detaljnija ispitivanja te razvoj UHPC-a.

2 Općenito o betonu ultra visokih uporabnih svojstava

UHPC je beton visokih uporabnih svojstava tlačne čvrstoće veće od 100 MPa, vlačne veće od 15 MPa te time povećanih mehaničkih svojstava i superiorne trajnosti u odnosu na običan beton (≤ 60 MPa) [12]. Iako je u nazivu ovog cementnog materijala

sadržana riječ beton, riječ je zapravo o mortu, a naziv beton dan je zbog prisustva čeličnih vlakana u uobičajenom sastavu [1]. Zbog prisutnosti vlakana, UHPC je moguće definirati i kao hibridni spoj tri tehnologije, tj. betona ojačanog vlaknima (engl. fibre reinforced concrete, FRC), betona visokih uporabnih svojstava (engl. high performance concrete, HPC) te samozbijajućeg betona (engl. self-compacting concrete, SCC) [5]. Stoga, riječ je o kombinaciji matrice visokih uporabnih svojstava te vlakana [6]. Osnovni principi za dobivanje betona ultra visokih uporabnih svojstava su smanjenje poroznosti, poboljšanje mikrostrukture i homogenosti te povećanje žilavosti [13]. Smanjenje poroznosti je razlog visokih svojstava trajnosti UHPC-a [3], a postiže se zgusnutim sastavom te smanjenjem vodocementnog omjera upotrebom superplastifikatora [13, 14]. Poboljšanje mikrostrukture postiže se tretmanima toplinom koji ubrzavaju pucolanske reakcije [1] te odgovarajućim granulometrijskim sastavom čestica, hidratacijskim i pucolanskim reakcijama i poboljšanjem zone sučeljka agregata i matrice [13]. Postizanje homogene strukture mješavine UHPC-a odnosi se na smanjenje veličine agregata, što će dovesti do smanjenja veličine pukotina, ali i učiniti zonu sučeljka sličnijom cementnoj matrici [13–15]. Dodatak vlakana u sastav predstavlja zadovoljenje četvrtog kriterija, tj. postizanje odlične žilavosti i otpornosti na udar te duktilnijeg ponašanja kompozita [13, 15]. Do danas je razvijeno nekoliko vrsta UHPC-a koje čine: ojačani kompaktni kompoziti (engl. compact reinforced composites, CRC), višerazinski cementni kompoziti (engl. multi-scale cement composites, MSCC), beton s reaktivnim prahom (engl. reactive powder concrete, RPC) te komercijalne vrste [1].

2.1 Sastav i faktori utjecaja

Glavni sastav UHPC-a čine: visokokvalitetan cement s dodatcima, koje većinom čini silicijska prašina, agregati te velike količine superplastifikatora s dodatkom vlakana [14]. Količina cementa pri tome može doseći $800 - 1000 \text{ kg/m}^3$, što negativno utječe na okoliš, jer procijenjena emisija CO_2 pri proizvodnji cementa iznosi 7 % globalne emisije CO_2 [7]. Kako bi se smanjio udio cementa, u sastavu UHPC-a koriste se i zamjenski cementni materijali, među kojima bitan sastojak predstavlja silicijska prašina [7, 13]. Međutim, njena visoka cijena i ograničena dostupnost sprječavaju njenu širu primjenu, posebno u zemljama u razvoju [16]. Stoga, kako bi se postigla održivost UHPC-a, ističe se potreba za primjenom industrijskih otpadnih materijala, tj. povoljnijih alternativnih materijala kao zamjena za cement [6, 7]. Na taj način, zamjenske cementne materijale koji se koriste u sastavu UHPC-a, osim silicijske prašine, čine i: leteći pepeo, granulirana zgura visokih peći, rižine ljuskice, metakaolin, vapnenački filer, prah čelične zgure, stakleni prah itd. [1, 11, 13, 14]. Uz cement i zamjenske materijale, vezivo čine i punila mikro i nano veličine, a neka od njih su kvarcni i vapnenački filer te nano-kalcijev karbonat i nanogлина [11]. Agregate većinom čine sitni agregati (prosječnog promjera od 1 mm do 4 mm) [17]

različitog porijekla, kao što su kvarcni pijesak, koji se zbog visoke cijene zamjenjuje riječnim pijeskom, pijeskom vapnenca, drobljenim bazaltom, recikliranim staklenim čahurama te ostatcima željezne rude [11, 13, 14]. Kako se UHPC odlikuje malim vodo-cementnim omjerom (0,15-0,25) [11], potrebna je upotreba superplastifikatora, među kojima su se polikarboksilati (PCs) pokazali najboljima te je zbog utjecaja na obradivost bitan redoslijed njihovog dodavanja [13].

Svojstva UHPC-a ovise o mnogim utjecajnim faktorima, među kojima su: vezivni materijal, agregati, gustoća mješavine, vlakna, veličina uzorka, vodo-cementni omjer, način njege, stupanj opterećenja [3, 14, 15]. Prema tome, u istraživanjima [16, 18–20] su ispitani neki od utjecaja te sve više istraživanja ide u smjeru primjene zamjenskih cementnih materijala zbog smanjenja negativnog učinka na okoliš. Način njege također ima značajan utjecaj na UHPC, ponajviše njegovu čvrstoću te je u [19] njega toplinom rezultirala ubrzanjem procesa hidratacije, povećanom gustoćom te time ultra visokom čvrstoćom, dok je u [16] njega autoklaviranjem pokazala najbolji utjecaj na rezultate čvrstoće. Iako je njega autoklaviranjem najbolja metoda po pitanju utjecaja na čvrstoću, standardna njega pri sobnoj temperaturi je ekonomski i ekološki učinkovitija [14]. Međutim, UHPC zadovoljavajućih svojstava se može proizvesti i pri normalnoj temperaturi njege [1], što je potvrđeno i u [21] gdje je istaknuta mogućnost proizvodnje UHPC-a, osim u tvornici, i na gradilištu. Za dobivanje UHPC-a odgovarajućih svojstava, potrebno je projektirati sastav odabirom materijala u optimalnim udjelima. Potrebno je postići zgusnuti sastav cementne matrice s dobrom obradivošću i čvrstoćom [1]. Također, projektiranje sastava treba biti ekonomski isplativo i održivo. Glavni parametri koje pri tome treba razmotriti su: optimiziranje granulometrijskog sastava, eliminacija krupnog agregata te odgovarajuća integracija vlakana [5].

3 Eksperimentalni dio

3.1 Materijali

Za izradu mješavina upotrijebljeni su sljedeći cementni i zamjenski cementni materijali: cement CEM I 52,5 N, silicijska prašina Microsilica 920, metakaolin Metaver M, vapnenački filer Omyacarb te nano glina Cimsil A55 G. Agregat su činile 3 frakcije dolomita, tj. 0,1/0,6 mm, 0,6/1,25 mm, 1,25/2,00 mm (Samoborka) te kvarcni pijesak 0,1/1,0 mm. Za osiguranje potrebne obradivosti mješavine, upotrijebljen je polikarboksilatni superplastifikator Glenium ACE 430.

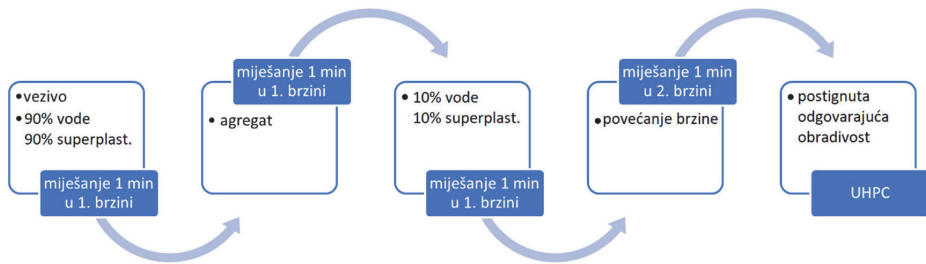
3.2 Sastav mješavina, priprema uzoraka i metode ispitivanja

Zamiješano je 7 mješavina UHPC-a, a sastav je dan u tablici 1. Sastav referentne mješavine preuzet je iz rada [22]. Za postizanje odgovarajuće obradivosti mješavina primijenjen je postupak dan na slici 1. Kao što je prikazano, ukupni postupak miješanja trajao je 4 minute, a podijeljen je u 4 dijela trajanja 1 minute. Navedeno vrijedi za prve tri mješavine, dok je za iduće četiri postupak malo modificiran na način da je ukupno trajanje produljeno za 30 do 60 sekundi, što je bilo potrebno za osiguranje odgovarajuće obradivosti nakon dodatka nanogline u navedenim mješavinama. Prva i druga brzina miješanja odnose se na brzine prema normi [23]. Oznake mješavina dane su prema zamjenskom pucolanskom materijalu i dodatku nano materijala. Na taj način, oznaka SF0,5NC znači da se radi o mješavini sa silicijskom prašinom te dodatkom nanogline u iznosu od 0,5 %, dok oznaka MK znači da se radi o mješavini s dodatkom metakaolina.

Svojstva svježeg morta ispitana su odmah nakon miješanja. Nakon ulijevanja morta u kalupe, uzorci su pokriveni folijom i čuvani u laboratorijskim uvjetima 24 sata do vađenja iz kalupa, kako bi se spriječilo isparavanje vode. Nakon raskalupljanja, uzorci su držani u komori na 20 ± 2 °C i RH ≥ 95 %, do ispitivanja.

Tablica 1. Sastav mješavina

Komponente [kg/m ³]	Mješavina						
	REF	SF	MK	SF0,5NC	SF2NC	MK0,5NC	MK2NC
Cement	875	613	613	613	613	613	613
Silicijska prašina	44	44	-	43	41	-	-
Metakaolin	-	-	44	-	-	43	41
Vapnenački filer	-	263	263	259	247	259	247
Nano glina	-	-	-	4,6	18	4,6	18
v/v	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Voda	202	202	202	202	202	202	202
Superplastifikator	46	46	46	46	46	46	46
Kvarcni pijesak	219	219	219	219	219	219	219
Dolomit (0,1/0,6)	354	354	354	354	354	354	354
Dolomit (0,6/1,25)	382	382	382	382	382	382	382
Dolomit (1,25/2,00)	318	318	318	318	318	318	318



Slika 1. Postupak miješanja UHPC-a

Provedena su ispitivanja svojstava u svježem te očvrnulom stanju. Sve pojedinosti ispitivanja su dane u tablici 2.

Tablica 2. Provedena ispitivanja

Vrsta ispitivanja	Norma	Dimenzije uzorka [mm]	Broj uzoraka po mješavini
Konzistencija	HRN EN 1015-3:2000	/	1
Udio pora	HRN EN 1015-7:2000	/	1
Gustoća	HRN EN 1015-6:2000	/	1
Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje (1. dan)	HRN EN 1015-11:2019	40x40x160	3
Tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje (7. dan)	HRN EN 1015-11:2019	40x40x160	3

4 Rezultati i diskusija

4.1 Svojstva u svježem stanju

U tablici 3 dani su rezultati svježih svojstava mješavina. Za prve tri mješavine konzistencija se nije mogla izmjeriti prema navedenoj metodi jer su mješavine imale svojstvo samozbijajućeg betona i svojim tečenjem su prešle granice kružne ploče na kojoj se ispitivanje provodi. S druge strane, dobivene gustoće su podjednake za sve mješavine, varirajući od 2,34 do 2,38 g/cm³. Mješavine s metakaolinom i silicijskom prašinom imaju udio pora podjednak onom referentne mješavine, što odgovara rezultatima drugih istraživanja, gdje je navedeno da njihov dodatak ne utječe na ukupni udio pora [24]. Međutim, za mješavine s dodatkom nanogline, uočene su gotovo dvostruko veće vrijednosti udjela pora u odnosu na referentnu mješavinu. Iako se u [25] navodi da dodatak nanogline povećava gustoću i smanjuje poroznost mješavine, u ovom slučaju bi razlog suprotnog učinka na poroznost mogao biti u procesu miješanja, tj. u [26, 27] se navodi važnost dobrog raspršivanja čestica na-

nogline, jer u protivnom dolazi do njihovog nakupljanja, što negativno utječe na svojstva mješavine. Dodatno, mješavine s dodatkom nanogline miješane su 30 do 60 sekundi duže u odnosu na referentnu mješavinu, a što je zasigurno doprinijelo većem udjelu zahvaćenog zraka. Unatoč navedenim razlikama, sve vrijednosti udjela pora se nalaze u rasponu od 0,3 % do 5,4 %, uobičajenom za UHPC [5].

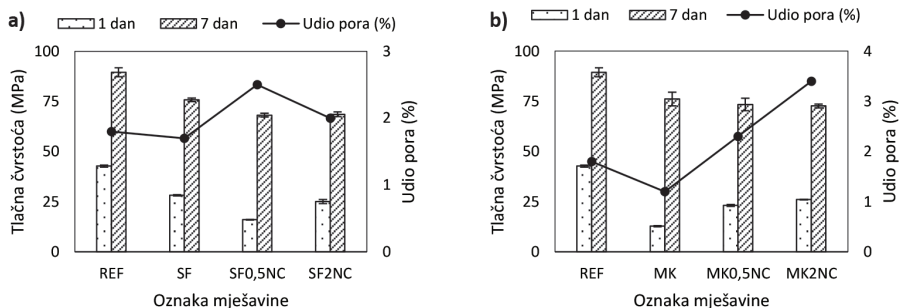
Tablica 3. Svojstva mješavina u svježem stanju

Mješavina	Konzistencija [mm]	Udio pora [%]	Gustoća [g/cm ³]	Temperatura [°C]
REF	/	1,8	2,38	26,7
SF	/	1,7	2,34	26
MK	/	1,2	2,37	27,3
SF0,5NC	275	2,5	2,35	27,2
SF2NC	230	2,0	2,34	26,8
MK0,5NC	250	2,3	2,36	27,2
MK2NC	224	3,4	2,35	27,4

4.2 Mehanička svojstva

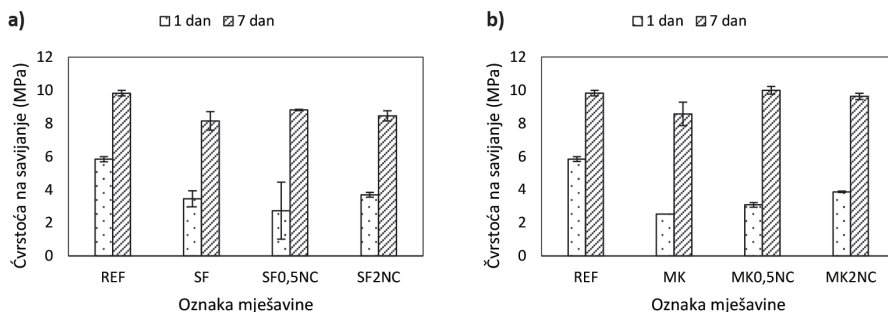
Na slici 2 prikazane su vrijednosti tlačnih čvrstoća mješavina 1. i 7. dana. Sve mješavine bilježe pad tlačne čvrstoće i za 1. i za 7. dan starosti u odnosu na referentnu mješavinu. Smanjenje tlačnih čvrstoća svih mješavina može se pripisati dodatku vapnenačkog filera, gdje je u [28] za udio vapnenačkog filera od 25 % zabilježen pad tlačnih čvrstoća otprilike za 20 % za starosti 3 - 7 dana. Prirast tlačne čvrstoće zabilježen je za kasnije starosti, tj. 91. dan [28]. Za mješavine bez dodatka nanogline, pad tlačne čvrstoće se, zbog smanjenja udjela cementa u odnosu na referentnu mješavinu, može pripisati i samim zamjenskim cementnim materijalima, tj. silicijskoj prašini i metakaolinu. Naime, u [29] se navodi da dodatak silicijske prašine pokazuje poboljšanja tek nakon 7 dana starosti, odnosno s protekom vremena, dok je u [30] za metakaolin navedeno da smanjuje tlačnu čvrstoću 1. dana, a sveukupan povoljan učinak na tlačnu te čvrstoću na savijanje pokazuje tek nakon 14 dana starosti. Pad čvrstoće u ranijim starostima se za silicijsku prašinu pripisuje po prirodi sporijoj pucolanskoj reakciji [29], dok se u slučaju metakaolina utjecaj na tlačnu čvrstoću povezuje s tri učinka: punila, pucolanske reakcije i povećanja hidratacije cementa [31]. Pri tome se utjecaji punila i poticanja hidratacije cementa ostvaruju odmah, odnosno u prva 24 sata, dok pucolanska reakcije povećava tlačnu čvrstoću u razdoblju 7 do 14 dana od očvrstnuća [31]. Također, utjecaj imaju i udjeli navedenih materijala, gdje se za silicijsku prašinu u [24] kao optimalan udio za tlačnu čvrstoću navodi udio od 8 %, dok je za metakaolin taj udio 10 %-20 % [32], odnosno 5 %-20 % u [30].

Mješavine s dodatkom nanogline i silicijskom prašinom, tj. SF0,5NC i SF2NC su pokazale značajna smanjenja tlačne čvrstoće 1. dana (-62,45 %, -41,36 %) u odnosu na mješavinu REF. S druge strane, dodatak nanogline metakaolinu, tj. MK0,5NC i MK2NC, je doprinio porastu tlačne čvrstoće 1. dana (+80,77 %, +103,67 %) u odnosu na mješavinu MK. Može se zaključiti da je kombinacija nanogline i metakaolina povoljnija nego ona nanogline i silicijske prašine, a razlog se možda može pronaći u sličnijem sastavu veličine čestica metakaolina i nanogline. Međutim, [33] navodi da za povoljno djelovanje na svojstva UHPC-a, nije važno jesu li nano i pucolanski materijal iste baze. U ovom ispitivanju to bi značilo da kombinacija silicijske prašine i nanogline ne bi trebala imati značajnijeg utjecaja na svojstva UHPC-a samo zbog svog međusobno različitog kemijskog sastava. Osim toga, navodi se da u slučaju silicijske prašine, dodatak nano materijala nema značajnijeg utjecaja zbog njene velike pucolanske reaktivnosti [33]. Također, iako neka istraživanja navode povoljan utjecaj nanogline na tlačnu čvrstoću UHPC-a, riječ je malim povećanjima, tj. dodatkom 1 % i 3 % nanogline zabilježeno je povećanje 1,3 % i 2,8 % za 7. dan starosti [34]. Očekivani doprinos nanogline za ovo svojstvo je u granicama standardne devijacije rezultata ispitivanja stoga ne čudi što ovim istraživanjem nije zabilježen pozitivan doprinos. Posebno uzimajući u obzir značajan porast udjela pora (1,9 i 2,8 puta) kod mješavina MK0,5NC i MK2NC u odnosu na MK, a što je imalo dominantan utjecaj na vrijednosti tlačne čvrstoće. U istraživanju je upotrijebljena sepiolitna vrsta nanogline, koja povećava viskoznost te svojom igličastom strukturom i većom apsorpcijom vode smanjuje učinkovitost superplastifikatora [35]. Navedene karakteristike utječu na obradivost, što je bio slučaj i u ovom istraživanju, gdje su mješavine s nanoglinom trebale dulje miješanje. Za razumijevanje djelovanja silicijske prašine, metakaolina i nanogline potrebno je detaljnije proučiti njihov granulometrijski i kemijski sastav, a koji bi mogli biti dodatni uzroci ostvarenih rezultata. Važno je uočiti kako su za dva različita udjela nanogline dobivene podjednake tlačne čvrstoće 7. dana starosti, nevezano radi li se o kombinaciji sa silicijskom prašinom ili metakaolinom.



Slika 2. Tlačna čvrstoća mješavina: a) sa silicijskom prašinom, b) s metakaolinom

Slika 3 prikazuje vrijednosti čvrstoće na savijanje mješavina 1. i 7. dana. Kao i kod tlačne čvrstoće, mješavine većinom bilježe pad čvrstoće u odnosu na referentnu, koji je posebno izražen za 1. dan. Smanjenje čvrstoće na savijanje u prvih 7 dana odgovara rezultatima dobivenim u [34]. Najveće smanjenje čvrstoće na savijanje 1. dana bilježe MK i SF0,5NC, dok se za 7. dan to odnosi na SF i SF2NC. Prema dobivenim rezultatima za 7. dan starosti, mješavina s metakaolinom je ostvarila veću čvrstoću na savijanje ($8,57 \text{ N/mm}^2$) nego ona sa silicijskom prašinom ($8,15 \text{ N/mm}^2$), dok je u slučaju 1. dana starosti situacija obrnuta, tj. dobivena je čvrstoća od $3,45 \text{ N/mm}^2$ za silicijsku prašinu te $2,53 \text{ N/mm}^2$ za metakaolin. Dodatak nanogline je u slučaju mješavine MK0,5NC čak doveo do povećanja čvrstoće na savijanje u odnosu na referentnu za 1,73 %. Međutim, sve ostvarene razlike između pojedinih mješavina u granicama su vrijednosti standardne devijacije i ne mogu se smatrati značajnima posebno uzimajući u obzir udio pora.



Slika 3. Čvrstoća na savijanje mješavina: a) sa silicijskom prašinom, b) s metakaolinom

5 Zaključak

Pregledom literature dan je prikaz osnovnih svojstava i utjecajnih faktora betona ultra visokih uporabnih svojstava, tj. UHPC-a. Ističe se kao materijal za zadovoljenje kriterija održivosti u području građevinske industrije te je moguće ostvariti veću ekološku i ekonomsku učinkovitost u odnosu na uobičajene cementne kompozite. U eksperimentalnom dijelu to se nastojalo potvrditi, tj. zamjenom cementa ekonomski (vapnenački filer) i ekološki (silicijska prašina/metakaolin) povoljnijim materijalima postići svojstva UHPC-a. Najbolje rezultate po pitanju tlačne čvrstoće pokazale su mješavine s metakaolinom i vapnenačkim filerom te njihova kombinacija s nanoglinom. Isto se može zaključiti i za čvrstoće na savijanje. Dodatak nanogline u mješavine utjecao je na obradivost iziskujući dulje vrijeme miješanja, što je dovelo do pojave većeg udjela pora u odnosu na mješavine bez nano gline. Dulje vrijeme miješanja i povećanje udjela pora odrazili su se i na smanjenje čvrstoća. U cilju jasnijeg razumijevanja doprinosa pojedinih zamjenskih materijala (silicijske prašine,

metakaolina i vapnenačkog filera) te nanogline potrebno je dodatno razmotriti njihov granulometrijski i kemijski sastav. Također, kako većina upotrijebljenih materijala pokazuje poboljšanje djelovanja s protekom vremena, za bolje razumijevanje i pojedine doprinose, potrebno je provesti ispitivanja za veće starosti UHPC-a. Za bolju inkorporaciju nanogline, potrebno je pronaći optimalan proces miješanja, kao i optimalan udio nanogline. Provedeno ispitivanje je služilo kao preliminarno za odabir materijala matrice za daljnja ispitivanja. Zaključno, daljnja istraživanja će ići u smjeru kombinacije metakaolina, vapnenačkog filera i nanogline uz određivanje optimalnih udjela i navedena potrebna poboljšanja.

Zahvala

Provedeno istraživanje je dio projekta “Razvoj novih tehnologija i usluga u izvođenju specijalnih građevinskih radova” (K.K.01.2.1.02.0297), financiranog od Europskog fonda za regionalni razvoj.

Literatura

- [1] Azmee, N.M., and Shafiq, N., “Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 9, 2018, doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00197.
- [2] Vaitkevičius, V., Šerelis, E., Vaičiukynienė, D., Raudonis, V., and Rudžionis, Ž., “Advanced mechanical properties and frost damage resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 126, pp. 26–31, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.012.
- [3] Abbas, S., Nehdi, M. L. and Saleem, M. A., “Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 10, no. 3, pp. 271–295, 2016, doi: 10.1007/s40069-016-0157-4.
- [4] Ferdosian, I. and Camões, A., “Sustainable construction through eco-efficient ultra-high performance concrete,” *Struct. Archit. - Proc. 3rd Int. Conf. Struct. Archit. ICSA 2016*, no. July, pp. 789–797, 2016, doi: 10.1201/b20891-109.
- [5] Imam, A., Sharma, K.K., Kumar, V., and Singh, N., “A review study on sustainable development of ultra high-performance concr,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 9–35, 2022, doi: 10.3934/MATERSCI.2022002.
- [6] Yu, R., Song, Q., Wang, X., Zhang, Z., Shui, Z., and Brouwers, H. J. H., “Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application,” *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 220–233, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.017.

- [7] Hamad, M. A. et al., "Production of ultra-high-performance concrete with low energy consumption and carbon footprint using supplementary cementitious materials instead of silica fume: A review," *Energies*, vol. 14, no. 24, pp. 1–26, 2021, doi: 10.3390/en14248291.
- [8] Reda, M. M., Shrive, N. G., and Gillott, J. E., "Microstructural investigation of innovative UHPC," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 323–329, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00225-7.
- [9] Shi, Y., Long, G., Ma, C., Xie, Y., and He, J., "Design and preparation of ultra-high performance concrete with low environmental impact," *J. Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 633–643, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.318.
- [10] Marvila, M. T., De Azevedo, A. R. G., De Matos, P. R., Monteiro, S. N., and Vieira, C. M. F., "Materials for production of high and ultra-high performance concrete: Review and perspective of possible novel materials," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 15, 2021, doi: 10.3390/ma14154304.
- [11] Du, J. et al., "New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)," *Compos. Part B Eng.*, vol. 224, no. August, p. 109220, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109220.
- [12] Pernicova, R., Dobias, D., and Mandlík, T., "Mechanical properties of UHPC with different kinds of glass fibres," *Proc. Int. Conf. FIBRE Concr.*, vol. 2015-Janua, pp. 353–359, 2015.
- [13] Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., and Fang, Z., "A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 741–751, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.
- [14] Mishra, O., and Singh, S. P., "An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 8, no. 2, pp. 97–143, 2019, doi: 10.1080/21650373.2018.1564398.
- [15] Shweta Mishra, "Reviewing Some Properties of Ultra High Performance Concrete," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V9, no. 06, pp. 108–121, 2020, doi: 10.17577/ijertv9is060156.
- [16] Ahmed, S., Al-Dawood, Z., Abed, F., Mannan, M. A., and Al-Samarai, M., "Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete - A review," *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. September, p. 103238, 2021, doi: 10.1016/j.jobte.2021.103238.
- [17] Micelli, F., Renni, A., Kandalajt, A. G., and Moro, S. Fiber-reinforced concrete and ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete materials. INC, 2020.
- [18] Alkaysi, M., and El-Tawil, S., "Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, no. 10, pp. 4185–4200, 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0780-6.

- [19] Yoo, D. Y., and Banthia, N., "Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 73, pp. 267–280, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001.
- [20] Duc Vinh Quang, N., Aleksandrova, O., and Samchenko, S., "Combined effect of mineral admixtures and fine aggregate on the mechanical properties of ultrahigh performance concrete," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 869, no. 3, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/869/3/032034.
- [21] Yang, S. L., Millard, S. G., Soutsos, M. N., Barnett, S. J., and Le, T. T., "Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2291–2298, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.11.012.
- [22] Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H. J. H., "Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 29–39, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.11.002.
- [23] "HRN_EN_196-1_2016 (Metode ispitivanja cementa -- 1. dio: Određivanje čvrstoće)" .
- [24] Hassan, A. A. A., Lachemi, M., and Hossain, K. M. A., "Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 6, pp. 801–807, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013.
- [25] Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., and Low, I. M., "Effect of nanoclay on durability and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites," *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 5, no. 1, pp. 62–70, 2017, doi: 10.1016/j.jascer.2017.01.003.
- [26] Niu, X. J., Bin Li, Q., Hu, Y., Tan, Y. S., and Liu, C. F., "Properties of cement-based materials incorporating nano-clay and calcined nano-clay: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 284, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122820.
- [27] Hamed, N., El-Feky, M. S., Kohail, M., and Nasr, E. S. A. R., "Effect of nano-clay deagglomeration on mechanical properties of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 205, pp. 245–256, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.018.
- [28] Kang, S. H., Jeong, Y., Tan, K. H., and Moon, J., "High-volume use of limestone in ultra-high performance fiber-reinforced concrete for reducing cement content and autogenous shrinkage," *Constr. Build. Mater.*, vol. 213, pp. 292–305, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.091.
- [29] Barbhuiya, S., and Qureshi, M., "Effects of Silica Fume on the Strength and Durability Properties of Concrete," *Cesdoc*, no. December 2016, pp. 117–120, 2016.
- [30] Mo, Z., Wang, R., and Gao, X., "Hydration and mechanical properties of UHPC matrix containing limestone and different levels of metakaolin," *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 119454, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119454.

- [31] Anurag, Kumar, R., Goyal, S., and Srivastava, A., "A comprehensive study on the influence of supplementary cementitious materials on physico-mechanical, microstructural and durability properties of low carbon cement composites," *Powder Technol.*, vol. 394, pp. 645–668, 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.08.081.
- [32] Homayoonmehr, R., Ramezaniapour, A. A., and Mirdarsoltany, M., "Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review," *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. April, p. 103011, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103011.
- [33] Alharbi, Y. R., Abadel, A. A., Mayhoub, O. A., and Kohail, M., "Effect of using available metakaoline and nano materials on the behavior of reactive powder concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 269, no. xxxx, p. 121344, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121344.
- [34] Mohamed, A. M., "Influence of nano materials on flexural behavior and compressive strength of concrete," *HBRC J.*, vol. 12, no. 2, pp. 212–225, 2016, doi: 10.1016/j.hbrj.2014.11.006.
- [35] Varela, H., Barluenga, G., and Palomar, I., "Influence of nanoclays on flowability and rheology of SCC pastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 243, p. 118285, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118285.