

Primljen / Received: 3.4.2025.

Ispravljen / Corrected: 28.7.2025.

Prihvaćen / Accepted: 1.9.2025.

Dostupno online / Available online: 10.1.2026.

Procjena trajnosti visokoučinkovitog betona s dodatkom otpadnih čeličnih vlakana

Autori:

Dr.sc. **Rekia Zouini**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Bechar, Alžir

Odjel za građevinarstvo i hidrauliku

Laboratorij za eko-materijale: inovacije i primjene

rekia.zouini@univ-bechar.dz

Autor za korespondenciju



Umar Amjad, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Kataru, Katar

Centar za napredne materijale (CAM)

umaramjad@qu.edu.qaProf.dr.sc. **Mohammed Irshidat**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Kataru, Katar

Centar za napredne materijale (CAM)

mirshidat@qu.edu.qaProf.dr.sc. **Abdelkadir Makani**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Bechar, Alžir

Odjel za građevinarstvo i hidrauliku

Laboratorij za eko-materijale: inovacije i primjene

makkani.abdelkadir@univ-bechar.dz

Prethodno priopćenje

Rekia Zouini, Umar Amjad, Mohammed Irshidat, Abdelkadir Makani

Procjena trajnosti visokoučinkovitog betona s dodatkom otpadnih čeličnih vlakana

Trajnost i održivost ključni su ciljevi u suvremenim istraživanjima betona zbog sve veće potražnje za ekonomičnim i ekološki prihvatljivim građevinskim materijalima. Iako je ugradnja otpadnih čeličnih vlakana u beton pokazala potencijal u poboljšanju mehaničkih svojstava, njihov utjecaj na trajnost zahtijeva dodatna istraživanja. Ovo istraživanje procjenjuje svojstva trajnosti betona visokih uporabnih svojstava (engl. *high-performance concrete* - HPC) ojačanog otpadnim čeličnim vlaknima dobivenim iz građevinskog otpada i recikliranih guma. Ključni parametri trajnosti, uključujući vodoupojnost, prodor klorida i otpornost na karbonaciju, analizirani su pod agresivnim uvjetima okoliša. Napredne tehnike karakterizacije, poput Fourierove transformacijske infracrvene spektroskopije (FTIR) i termogravimetrijske analize (TGA), korištene su za procjenu gubitka mase i pružanje uvida u ponašanje materijala. Dobiveni rezultati doprinose dubljem razumijevanju kako otpadna čelična vlakna utječu na dugoročne performanse održivih betonskih materijala.

Ključne riječi:

beton visokih performansi, otpadna čelična vlakna, vodoupojnost, prodor klorida, trajnost

Research Paper

Rekia Zouini, Umar Amjad, Mohammed Irshidat, Abdelkadir Makani

Durability assessment of high-performance concrete reinforced with waste steel fibres

Durability and sustainability are critical objectives in modern concrete research due to the increasing demand for cost-effective and environmentally friendly construction materials. While incorporating waste steel fibers into concrete has shown promise in enhancing mechanical properties, their impact on durability requires further investigation. This study evaluates the durability performance of high-performance concrete (HPC) reinforced with waste steel fibers sourced from building waste and recycled tires. Key durability parameters, including sorptivity, chloride penetration, and carbonation resistance, were analyzed under aggressive environmental conditions. Advanced characterization techniques, such as Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric analysis (TGA), were employed to assess mass loss and provide insights into material behavior. The findings contribute to a deeper understanding of how waste steel fibers influence the long-term performance of sustainable concrete materials.

Key words:

high-performance concrete, waste steel fibers, sorptivity, chloride penetration, durability

1. Uvod

Građevinska industrija kontinuirano traži učinkovita i održiva rješenja za poboljšanje svojstava materijala. Beton je jedan od temeljnih elemenata građevinskih materijala zbog svojih mehaničkih svojstava poput tlačne čvrstoće, međutim, krhke je prirode i ima ograničenu vlačnu čvrstoću, kao i otpornost na okolišne utjecaje. Kako bi se prevladala ova ograničenja, istraživači ispituju upotrebu različitih vrsta vlakana za poboljšanje duktilnosti i trajnosti betona. Ugradnjom vlakana u beton povećava se mehanička otpornost. Beton visokih uporabnih svojstava (engl. *high-performance concrete* - HPC) dizajniran je za postizanje izuzetne trajnosti uz poboljšana mehanička svojstva. Primarna uloga vlakana u betonu jest povećanje kapaciteta apsorpcije energije i održavanje nosivosti nakon početnog pucanja. Vlakna djeluju kao mostovi preko pukotina, sprječavajući njihovo širenje i poboljšavajući ukupni strukturni integritet, kako je prikazano u [1, 2]. U betonu vrlo visokih uporabnih svojstava ojačanom vlaknima (UHPRFC), čelična vlakna kontroliraju širenje pukotina, smanjuju koncentraciju naprezanja i poboljšavaju apsorpciju energije prije loma [3]. Mnoge su studije ispitivale utjecaj vlakana na trajnost betona.

Procjena trajnosti uključuje razmatranje čimbenika poput propusnosti. Posljedično, kapilarno upijanje je značajan parametar koji utječe na trajnost armiranobetonskih konstrukcija. Značajno je da je primjena vodoodbojnih tretmana znatno smanjila kapilarno upijanje [4]. Permeacija, uzrokovana razlikama u tlaku, još je jedan put prodiranju klorida. Apсорpcija je standardna metoda transporta [5], u kemijskom smislu proces upijanja tvari, a u fizikalnom smislu prijenos energije valova na materiju prilikom prolaza valova kroz nju.

Najvažniji faktor koji utječe na beton jest ulazak agresivnih elemenata koji dovode do raspada cementnih veza; posljedično, difuzivnost klorida ključan je parametar koji utječe na trajnost ovih konstrukcija [6]. Formulacije se obično ugrađuju u beton kako bi se zaštitila armatura od prodiranja korozivnih tvari poput klorida ili sulfata u morskom okruženju. Tipično, poboljšanje kvalitete zaštitnog sloja – na primjer, smanjenjem vodovezivnog omjera ili dodavanjem dopunskih cementnih materijala – ne samo da poboljšava mehanička svojstva, već i povećava ukupnu trajnost betona [7]. Poroznost betona i prisutnost pukotina uzrokovanih naprezanjem značajno pridonose prijenosu agresivnih tvari unutar materijala. Tipično na svojstva transporta klorida u betonu, uključujući propusnost i difuziju, utječu različiti čimbenici kao što su kvaliteta betona, uvjeti izloženosti okolišu te prisutnost naprezanja ili pukotina [8].

Koeficijent difuzije klorida raste sa širenjem specifičnih površina pukotina kako se oštećenje pojačava [9]. Utvrđeno je da čimbenici poput vijugavosti, dubine i širine pukotina značajno utječu na prodiranje kloridnih iona, pri čemu je širina pukotina posebno utjecajna [7]. Uočeno je da čelična vlakna ugrađena u napuknuti beton vrlo visokih uporabnih svojstava (engl. *ultra high-performance concrete* - UHPC) podliježu koroziji pri dugotrajnom uranjanju u otopinu NaCl, pri čemu se stupanj korozije povećava proporcionalno

trajanju uranjanja [10]. Za procjenu difuzivnosti klorida u betonu može se primijeniti izlaganje otopinama soli putem testova uranjanja ili natapanjem [6]. Standardni postupak ispitivanja uključuje namakanje osam sati, zatim sušenje u peći na 65 °C u trajanju od osam sati, što rezultira ukupnim vremenom ciklusa od 32 sata. Medij za smrzavanje-odmrzavanje i namakanje bila je 5 %-tna otopina natrijevog sulfata, pri čemu je dubina otopine održavana na 5 mm od smrznute površine do tekuće površine uzorka [11]. Ako se površina poroznog materijala stavi u kontakt s vlažnom tekućinom, tekućina će se apsorbirati kapilarnim djelovanjem.

Provedene su brojne studije kako bi se procijenila apsorpcija klorida u betonu. Ubrzani laboratorijski testovi, uključujući električni otpor, koeficijent migracije, brzinu protoka naboja i koeficijent difuzije iz testova uranjanja, pokazuju da betoni ultravisokih performansi ojačani vlaknima imaju manju otpornost na prodiranje klorida od referentnih betona bez vlakana [12]. Štoviše, Augustino i sur. primijetili su da povećanje sadržaja vlakana, osobito recikliranim čeličnim vlaknima, ima tendenciju povećati koeficijent vodoupojnosti, vjerojatno zbog povećanog stvaranja mikropora i smanjene kompaktnosti matrice [13]. Hwang i sur. smatraju da je kemijska degradacija moguća u slučaju betona koji sadrži čelična vlakna. To je zato što čelična vlakna u betonu mogu značajno povećati broj zračnih pora i/ili poroznost [14].

Trajanje uranjanja značajno utječe na apsorpciju agresivnih tvari, čime se utječe na degradaciju betona. Produljeno izlaganje korozivnim okruženjima, u kombinaciji s većim udjelom vlakana, ubrzava smanjenje čvrstoće UHPRFC-a. Ovaj gubitak čvrstoće rezultat je otapanja vlakana, pucanja i oštećenja betonske matrice, posebno u teškim uvjetima [3].

Što se tiče trajnosti, istraživanja su pokazala da uključivanje optimalne količine čeličnih vlakana poboljšava otpornost betona na karbonatizaciju, međutim, to negativno utječe na otpornost na propusnost kompozita ojačanog nano-SiO₂ [15]. S mikrostrukturne strane, prema Zhang i sur. SEM analizi, čelična vlakna poboljšavaju ITZ između agregata i mortova, zbijenost i mikrostrukturu betona [16].

Iako su postojeća istraživanja dokumentirala poboljšanja trajnosti, poput smanjene propusnosti i bolje otpornosti na karbonatizaciju dodavanjem vlakana, malo ih je kombiniralo pokazatelje trajnosti s detaljnom mikrostrukturnom i kemijskom karakterizacijom (SEM, FTIR, TGA/DTA) u istraživanju otpadnih čeličnih vlakana. Nadalje, razmatra se i utjecaj vrste vlakana (otpadna vlakna iz guma i otpadna građevinska vlakna) na unutarnju strukturu, posebno na zakrivljenost hidratacijskih faza ili otpornost na karbonatizaciju.

Ovo istraživanje ima za cilj procijeniti utjecaj recikliranih čeličnih vlakana (iz građevinskog otpada i rabljenih guma) na trajnost betona visokih uporabnih svojstava (HPC) u agresivnim uvjetima okoliša. Trajnost je procijenjena kroz vodoupojnost, ispitivanje karbonatizacije te je evaluirana termogravimetrijskom analizom (TGA), diferencijalnom toplinskom analizom (DTA) i infracrvenom spektroskopijom s Fourierovom transformacijom (FTIR). Ovo istraživanje pruža uvid u potencijal ugradnje recikliranih vlakana kao održive alternative u naprednim primjenama betona.

Tablica 1. Kemijska analiza Portl cementa (%)

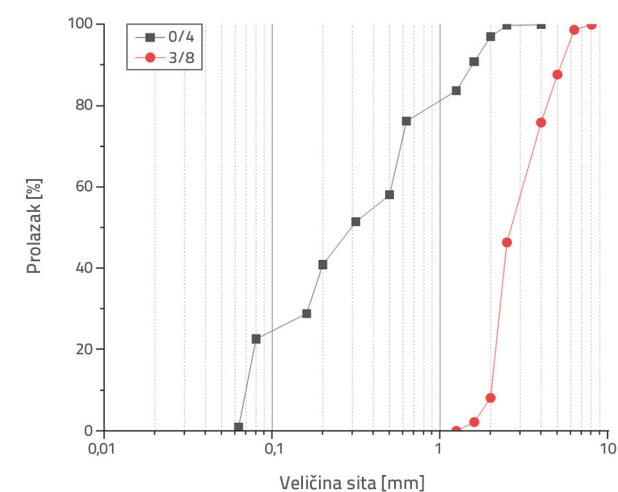
Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	LOI
6,40	1,80 – 3,00	20,05	61,23	1,20- 3,00	3,45	0,01 – 0,05	0,50 – 3,00

Tablica 2. Svojstva vlakana

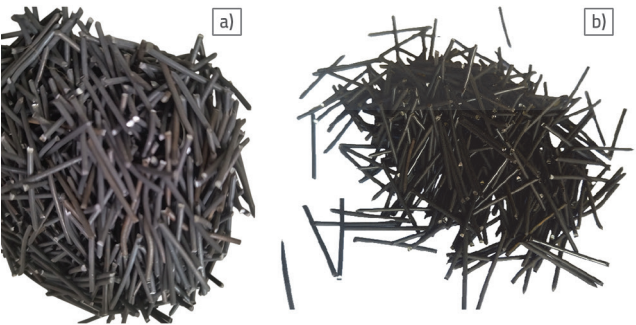
Vrsta vlakana	L [mm]	D [mm]	Volumen [%]	Modul elastičnosti [GPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]
Čelična vlakna iz otpadnih guma	30	1,36	2	220	850,33
Čelična vlakna iz građevinskog otpada	30	1,34	2	215	675,73

2. Materijali i metode

Portland cement tip II korišten je kao primarno vezivo. Kemijska analiza ovog cementa prikazana je u tablici 1. Lokalno dobiveni pijesak 0/4 mm i šljunak 3/8 mm korišteni su kao sitni i krupni agregati, u skladu s europskom normom EN 12620. Granulometrijski sastav agregata prikazana je na slici 1.



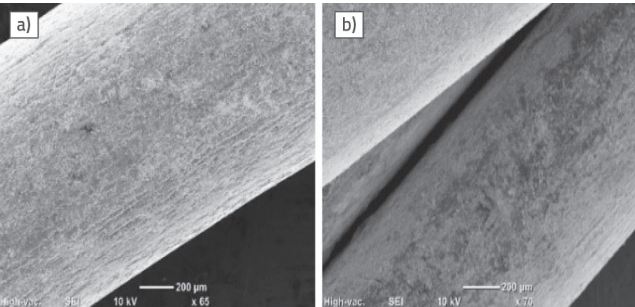
Slika 1. Granulometrijski sastav krupnog i sitnog agregata



Slika 2. Otpadna čelična vlakna: a) Čelična vlakna iz otpadnih guma; b) Čelična vlakna iz građevinskog otpada

Primarni fokus istraživanja u građevinarstvu jest rješavanje problema nedostatnosti materijala. Širenje industrija u svrhu

poboljšanja korištenja lokalno dobivenih građevinskih materijala uspješna je strategija [17], za koju su korištena vlakna, reciklirana vlakna duljine 30 mm i promjera 1 mm, dobivena iz recikliranih automobilskih guma i ostataka građevinskog čelika. Fizička svojstva obiju vrsta vlakana sažeta su u tablici 2. Slika 2. prikazuje fizički izgled vlakana, a slika 3. prikazuje SEM snimke koje prikazuju njihovu površinsku morfologiju i teksturu. Prije uporabe vlakna su ručno očišćena i izrezana na približno 30 mm. Treba napomenuti da ekstrakcija čeličnih vlakana iz otpadnih automobilskih guma uključuje spaljivanje guma kako bi se uklonila guma i izdvojile ugrađene čelične žice. Izdvojena se vlakna zatim čiste od preostalih onečišćenja prije ugradnje u betonske mješavine. Doziranje vlakana iznosilo je 2 % volumena betona. Dodan je superplastifikator u količini od 1 % na masu veziva kako bi se osigurala odgovarajuća obradivost betona.



Slika 3. Analiza vlakana pomoću SEM-a: a) Čelična vlakna iz otpadnih guma; b) Čelična vlakna iz građevinskog otpada

Suhi materijali miješani su dvije minute; dodana je voda i superplastifikator te je ponovno miješano još 2 minute srednjom brzinom. Tijekom miješanja vlakna su dodavana postupno i miješana 3 minute kako bi se osigurala ravnomjerna distribucija. Pripremljene su tri mješavine s vlaknima iz otpadnih guma i građevinskog otpada te referentna mješavina bez vlakana za usporedbu. Sastojci su temeljito izmiješani i ugrađeni u kalupe dimenzija 4 × 4 × 16 cm. Nakon 24 sata kalupi su uklonjeni, a uzorci su uronjeni u vodu na period njege od 90 dana pri 20 °C u Istraživačkom laboratoriju EMIA/LFGM, Bechar, Alžir. Sastav betona prikazan je u tablici 3.

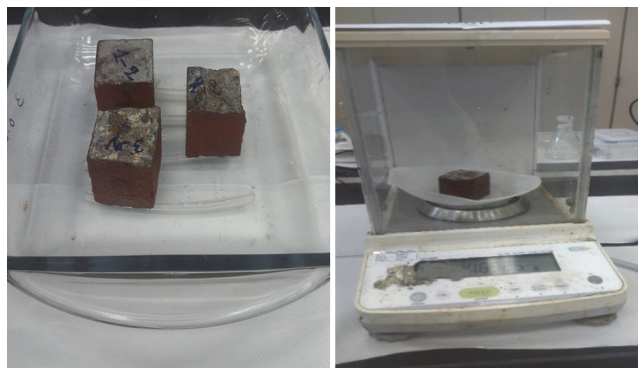
Tablica 3. Sastav betona

Sastav	(D1)	(D2)	(D3)
Cement [kg/m ³]	400	400	400
Pijesak [kg/m ³]	665	665	665
Šljunak [kg/m ³]	1111	1075	1075
Voda [kg/m ³]	148	148	148
Superplastifikator [%]	1,75	1,75	1,75
Volumen vlakana [%]	-	2	2
Omjer V/C	0.37		

*D1: Beton bez vlakana
D2: Beton s vlaknima iz otpadnih guma
D3: Beton s vlaknima iz građevinskog otpada

2.1. Test vodoupojnosti

Ispitivanje vodoupojnosti provedeno na betonskom uzorku pruža vrijedne uvide u strukturu pora betona. Niske vrijednosti vodoupojnosti ukazuju na visokokvalitetni beton s poboljšanom otpornošću na upijanje vode [18]. Ovaj test ključan je za procjenu trajnosti i propusnosti betona, jer prekomjerno upijanje vode može dovesti do oštećenja uslijed smrzavanja i odmrzavanja, korozije armature i sveukupnog propadanja betona. Test vodoupojnosti, provedeno prema ASTM C 1585 [14], mjeri brzinu kojom porozni materijali poput betona upijaju vodu.



Slika 4. Test vodoupojnosti

Slika 4. prikazuje postavljanje testa vodoupojnosti. Inicijalno su betonske kocke promjera 40 x 40 mm sušene jedan dan u peći na temperaturi od 105 °C. Četiri površine betonskih kocki zapečaćene su voskom [4]. Zabilježena je početna masa, zatim su tri uzorka uronjena u vodu, a tri u 5 %-tnu otopinu NaCl na dubinu od 5 do 10 mm. Uzorci su vađeni iz vode u određenim intervalima, a upijena voda mjerena je u navedenom intervalu (5 min do 3 dana). Ova analiza pruža vrijedne informacije o karakteristikama upijanja vode betona i pomaže u procjeni njegove ukupne kvalitete. Broj i reference u tekstu isti su kao u izrazu (1).

$$S = \Delta W / (A \cdot \sqrt{t}) \quad (1)$$

gdje je:

S – koeficijent vodoupojnosti [g/(cm²·√min)]

ΔW – prirast mase [g]

A – površina poprečnog presjeka izložene površine [cm²]

T – vrijeme izlaganja [min].

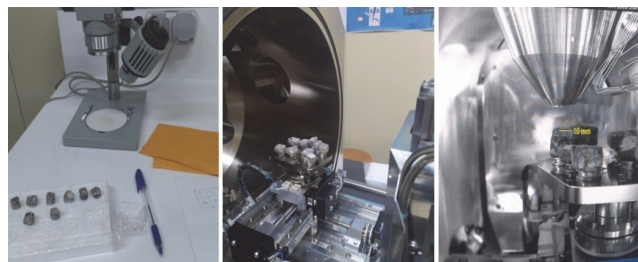
2.2. Test karbonizacije

Postupak uključuje vađenje uzoraka iz otopina, nakon čega slijedi faza temeljitog sušenja. Nakon toga svaki se uzorak precizno reže na dva dijela. Sljedeći koraci obuhvaćaju provođenje ispitivanja karbonatizacije na jednom dijelu nakon jednog dana i ponavljanje testa na drugom dijelu nakon 20 dana. Tijekom svake faze ispitivanje karbonatizacije, unutarnja površina betona izložena je otopini fenoltaleina, koja se nanosi prskanjem. Ovaj detaljni postupak ima za cilj procijeniti i pratiti karakteristike karbonatizacije betonskih uzoraka u različitim vremenskim intervalima, pružajući vrijedan uvid u njihova kemijska svojstva i potencijalne promjene.

2.3. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM)

Za SEM pripremljeno je šest uzoraka. Tri mješavine betona, referentni beton, beton s otpadnim građevinskim čeličnim vlaknima i beton s recikliranim vlaknima iz guma, bile su izložene vodi i otopini natrijevog klorida (NaCl).

Uzorci za SEM izrezani su na male kocke dimenzija otprilike 1 × 1 × 1 cm. Dodatna izolirana čelična vlakna uključena su za analizu specifičnu za vlakna. Promatranja su se usredotočila na mikrostrukturna obilježja kao što su veza matrice i vlakana, poroznost i znakovi degradacije. SEM analiza uzoraka betona i vlakana provedena je u Centru za napredne materijale (CAM) na Sveučilištu u Kataru, Doha, Katar, s pomoću svestranog stolnog skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM). Operativna postava SEM sustava prikazana je na slici 5.



Slika 5. Analiza uzoraka pomoću SEM-a

2.4. Termogravimetrijska analiza (TGA) i analiza Fourierove transformacijske infracrvene spektroskopije (FTIR)

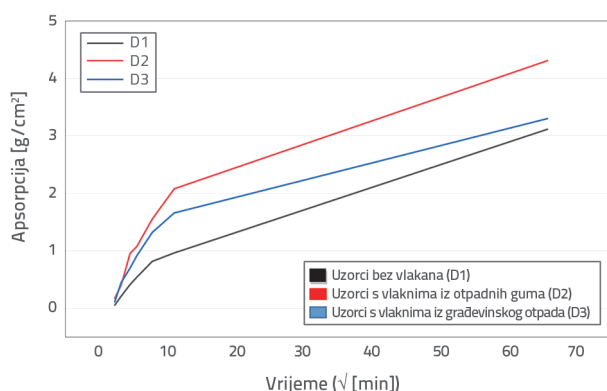
TGA i FTIR provedeni su u Centru za napredne materijale (CAM), Sveučilište u Kataru, Doha, Katar, pomoću kombiniranog TGA–FTIR analizatora, PerkinElmer. Za TGA 20 mg praškastih

uzoraka zagrijano je od 25 °C do 650 °C u atmosferi dušika brzinom zagrijavanja od 20 °C/min. Priprema uzorka i uređaja trajala je jedan sat, a analiza svakog uzorka 32 minute. Nasuprot tome, FTIR spektri prikupljeni su u rasponu valnog broja od 450 do 4000 cm^{-1} .

3. Rezultati i rasprava

3.1. Vodoupojnost

Slika 6. prikazuje koeficijent vodoupojnosti za uzorke uronjene u vodu. Rezultati pokazuju da se upijanje vode s vremenom progresivno smanjivalo za sve uzorke. Među njima beton s čeličnim vlaknima iz guma (D2) pokazao je najveće upijanje budući da je u istom razdoblju upio najznačajniju količinu vode, slijedi beton ojačan građevinskim vlaknima (D3), a na kraju referentni beton (D1), koji je imao najniže upijanje. Ovaj trend, kako je prikazano na slici, naglašava utjecaj vrste vlakana na karakteristike upijanja betonskih uzoraka tijekom uranjanja u vodu.

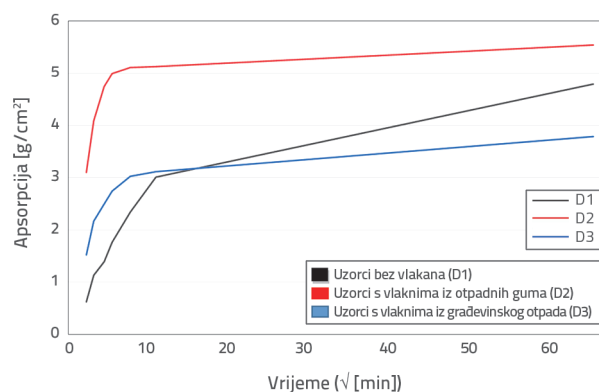


Slika 6. Koeficijent vodoupojnosti uzoraka uronjenih u vodu

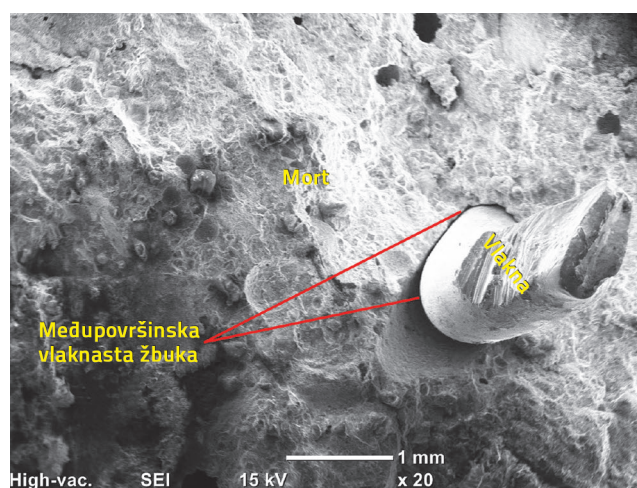
Što se tiče uronjenih uzoraka u natrijev klorid (NaCl) prikazanih na slici 7., vidljivo je da postoji značajan skok upijanja kod 5. minute, koji se s vremenom postupno smanjuje. Ovo ponašanje može se pripisati ubrzavajućem učinku natrijevog klorida na proces apsorpcije, što dovodi do povećane propusnosti u betonu. Primjetno je da uzorci betona koji sadrže vlakna iz guma (D2) pokazuju najveću apsorpciju u usporedbi s uzorcima s otpadnim građevinskim vlaknima (D3), što je jasno prikazano na mikrostrukтури betona s vlaknima iz otpadnih guma na slici 8., koja prikazuje pore iza vlakana u betonu, a te pore pomažu difuziji otopine u beton.

Suprotno tome, vlakna iz građevinskog otpada (D3), kao što je prikazano na slici 9., pokazala su dobru prionljivost između vlakana i cementne paste. Nadalje, povećana poroznost čeličnih vlakana mogla bi smanjiti čvrstoću veze između čeličnih vlakana i betona. Posljedično, čelična vlakna mogu pokazivati odvojeno ponašanje od tijela betona kada su izložena vanjskim opterećenjima [14]. Zanimljivo je da su nakon 3 dana stope upijanja dosegle najnižu točku, što je

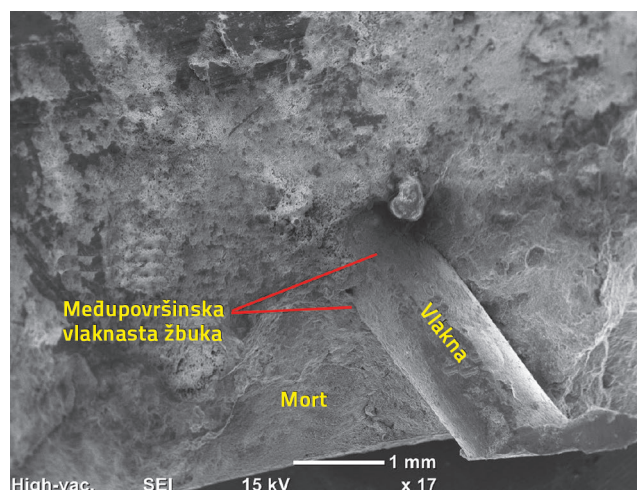
uočeno i u betonu uronjenom u vodu i u otopini natrijevog klorida. Ovaj fenomen vjerojatno je rezultat zasićenja betonskih pora otopinom, što utječe na dinamiku apsorpcije tijekom navedenog vremena.



Slika 7. Koeficijent vodoupojnosti uzoraka uronjenih u otopinu NaCl



Slika 8. SEM analiza betonskog uzorka prikazuje vlakna iz otpadnih automobilskih guma (D2) i priranje betona



Slika 9. SEM analiza betonskog uzorka prikazuje vlakna iz građevinskog otpada (D3) i prionjivost s betonom

3.2. Karbonizacija

Test karbonizacije nakon 1 dana

Na temelju vizualnog pregleda slika karbonizacijskih testova snimljenih jedan dan nakon eksperimenta (slika 10.) i pojave ljubičaste boje nakon dodavanja otopine fenolftaleina, ni u uzorcima uronjenim u vodu niti u onima uronjenim u otopinu natrijevog klorida nije detektirana karbonizacija. Prisutnost ljubičaste boje ukazuje na odsutnost karbonata u uzorcima betona pod obama uvjetima, što sugerira da se stvaranje karbonata nije dogodilo unutar navedenog razdoblja ni u uzorcima uronjenima u vodu ni u uzorcima uronjenima u natrijev klorid.



Slika 10. Test karbonizacije nakon 1 dana ekstrakcije iz NaCl

Karbonizacija nakon 20 dana od ispitivanja sorpcije

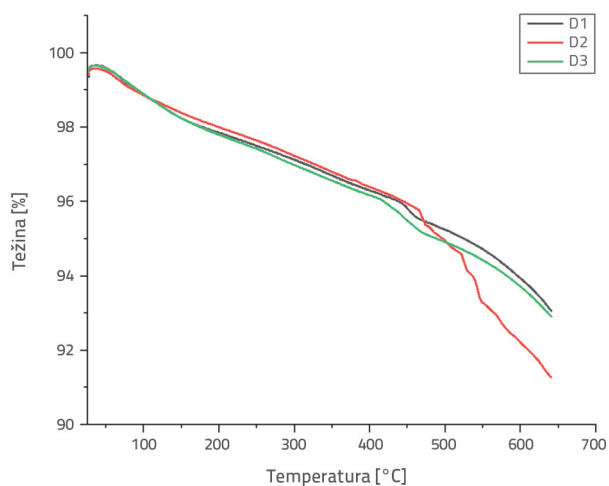
Nakon 20 dana provedeno je ispitivanje karbonizacije na preostalim dijelovima uzoraka betona, kao što je prikazano na slici 11. Primjetno je da uzorci uronjeni u vodu nisu pokazali znakove karbonizacije, što je rezultat koji se odražava i na uzorke uronjene u otopinu natrijevog klorida (NaCl), koji su bili potpuno karbonizirani. Ovaj rezultat potvrđuje da izloženost kloridima ubrzava karbonizaciju, vjerojatno zbog promjena u strukturi pora i promjene pH uzrokovanih kloridima. Čelična vlakna također mogu pridonijeti podložnosti na karbonizaciju, utječući na zadržavanje vlage unutar materijala i difuziju iona.



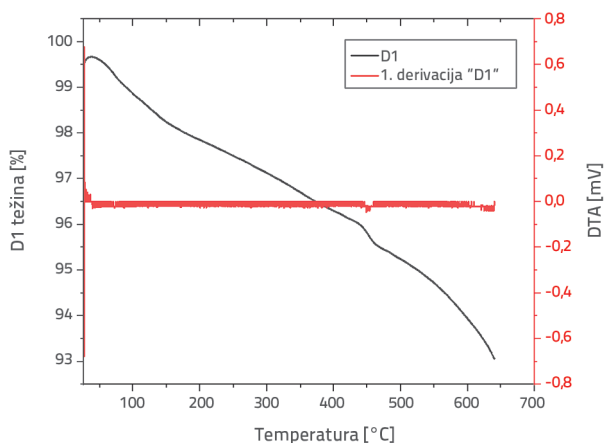
Slika 11. Test karbonizacije nakon 20 dana ekstrakcije iz NaCl

3.3. Termogravimetrijska i diferencijalna termička analiza (TGA–DTA)

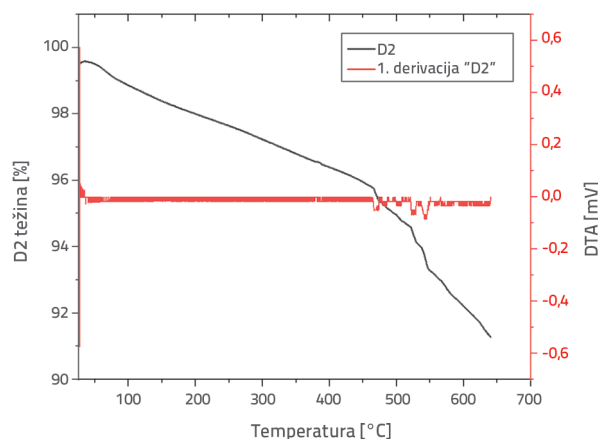
Slika 12. prikazuje TGA analizu betona, uključujući uzorke sa i bez vlakana, D1, D2 i D3, nakon izlaganja NaCl-u. Graf otkriva dosljedan gubitak mase u uzorcima betona u temperaturnom rasponu od 26 do 450 stupnjeva Celzija. Ovaj obrazac jasnije je prikazan na slikama 13., 14. i 15., koje prikazuju DTA analizu uzoraka. Promatrani gubitak mase između 25 i 170 °C pripisan je kombinaciji isparavanja vode i razgradnje etringita; početne promjene zabilježene su za etringit dehidriran na temperaturama do 90 °C. C-S-H gel pokazuje blago smanjenje iznad 100 °C [20]. Iznad 450 °C dolazi do primjetnog porasta gubitka mase, što je posebno vidljivo kod uzorka D2 koji nadmašuju D1 i D3. Ovo zapažanje snažno upućuje na razgradnju portlandita u ovim uzorcima, što je obilježje koje je naglašeno u DTA analizi na slici 14., posebno za uzorke D2.



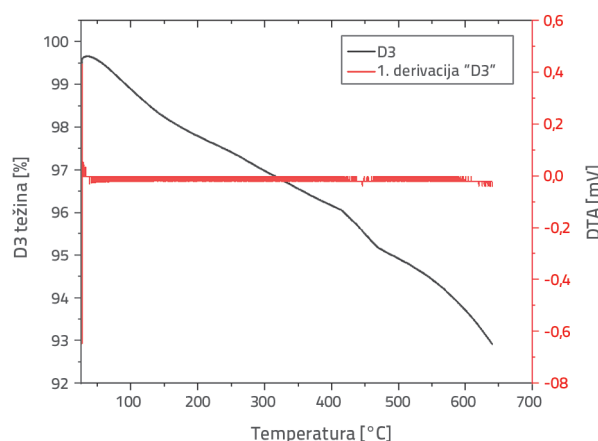
Slika 12. TGA analiza uzoraka D1, D2 i D3 nakon uranjanja u NaCl



Slika 13. DTA analiza D1 nakon uranjanja u NaCl



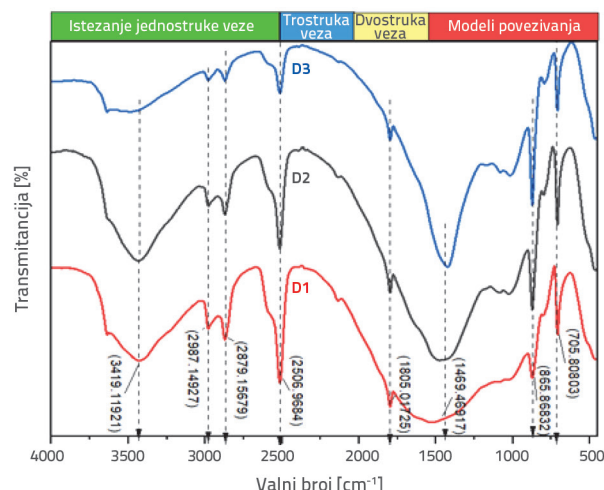
Slika 14. DTA analiza D2 nakon uranjanja u NaCl



Slika 15. DTA analiza D3 nakon uranjanja u NaCl

3.4. Analiza Fourierove transformacijske infracrvene spektroskopije (FTIR)

Slika 16. prikazuje FTIR analizu betona, uspoređujući uzorke sa i bez recikliranih otpadnih vlakana uronjenih u NaCl. Nakon analize, u području valnih brojeva od 2800 do 3400 cm^{-1} uočavaju se izrazite razlike u vrhovima, što ukazuje na prisutnost hidroksilnih skupina u vodi ili mineralnim hidratima. Konkretno, vrh u uzorcima D3 manji je, ali izraženiji nego u uzorcima D2 i D1, što sugerira varijacije u sastavu. Sličan trend primjećuje se u valnom području od 1800 do 2500 cm^{-1} . Međutim, obrat se događa u valnom području od 700 do 1600 cm^{-1} , gdje su valovi D3 dublji od D2 i D1. Ovo specifično valno područje ukazuje na prisutnost silikatnih minerala u betonu, što se može identificirati po karakterističnim apsorpcijskim vrpčama, posebno u rasponu od 900 – 1000 cm^{-1} , koje su povezane s ovim silikatnim fazama, potvrđujući prisutnost silicijevih minerala u cementnoj matrici betona prema [21].



Slika 16. FTIR rezultati D1, D2 i D3 nakon uranjanja u NaCl

4. Zaključak

Ova studija istraživala je utjecaj doziranja čeličnih vlakana iz otpadnih automobilskih guma i čeličnih vlakana iz građevinskog otpada na trajnost betona. Rezultati pokazuju da dodavanje vlakana betonu utječe na njegovu apsorpciju zbog pora koje omogućuju difuziju agresivnih otopina. Beton s čeličnim vlaknima iz otpadnih guma ima veću opsorpciju od betona s čeličnim vlaknima iz građevinskog otpada, što naglašava utjecaj vrste vlakana na svojstva betona.

Mikrostrukturna analiza s pomoću SEM-a otkrila je da beton s vlaknima iz građevinskog otpada pokazuje jaču vezu vlakno – matrica, učinkovito ograničavajući prodor kemijske otopine. Nasuprot tome, beton koji sadrži vlakna iz otpadnih guma pokazao je slabije vezanje na sučelju, što je povećalo poroznost i omogućilo širenje otopine natrijevog klorida kroz cijelu matricu. Ovo kemijsko prodiranje u konačnici je dovelo do degradacije materijala uslijed razgradnje cementnih spojeva zbog kemijskih reakcija između produkata hidratacije cementa i agresivnih elemenata u otopini. FTIR i TGA pružili su dokaze o promjenama u produktima hidratacije cementa i toplinskoj stabilnosti. Analiza termogravimetrijskom metodom (TGA) otkrila je gubitak mase pri višim temperaturama, vjerojatno zbog razgradnje sastava cementne paste. FTIR analiza potvrdila je prisutnost silikatnih minerala u betonu, pružajući dodatne informacije o njegovom sastavu.

Betonski uzorci izloženi otopini natrijevog klorida bili su potpuno karbonizirani, što ukazuje na to da otopina ubrzava karbonizaciju.

Zahvala

Želimo zahvaliti svim organizacijama koje podržavaju ovo istraživanje, istraživačkom laboratoriju EMIA Sveučilišta Bechar na akademskoj podršci te Centru za napredne materijale CAM Sveučilišta Katar na domaćinstvu tijekom moje prakse i pružanju vrijednih resursa. Također, hvala svim supervizorima na njihovom vodstvu i podršci.

LITERATURA

- [1] Soleimanzadeh, S., Othuman Mydin, M.A.: Influence of high temperatures on flexural strength of foamed concrete containing fly ash polypropylene fiber, *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 26 (2013) 2, pp. 117–126, <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2013.26.02b.02>
- [2] Kadhim, S.S., Al-Salim, N.H., Kadhim, M.M., Haleem, H.A.: Structural Behavior of Concrete Members Strengthened Using Fiber Reinforced Polymer: A Review, *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 38 (2025) 1, pp. 156–169, <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.01a.15>
- [3] Song, Z., Li, S., Yu, Q.: Chloride-induced mechanical degradation of ultra-high performance fiber-reinforced concrete: Insights from corrosion evolution paths, *Construction Building Materials*, 395 (2023) February, Paper 132329, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132329>
- [4] Wittmann, F.H., Zhang, P., Zhao, T.: Influence of Combined Environmental Loads on Durability of Reinforced Concrete Structures, *Restoration of Buildings Monuments*, 12 (2014) 4, pp. 349–362, <https://doi.org/10.1515/rbm-2006-6069>
- [5] Hooton, D.: Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review FHWA Contract DTFH61-97-R-00022, Prediction of Chloride Penetration in Concrete, Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review by University of, August (2016).
- [6] Bagheri, A.R., Zanganeh, H.: Comparison of Rapid Tests for Evaluation of Chloride Resistance of Concretes with Supplementary Cementitious Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (2012) 9, pp. 1175–1182, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000485](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000485)
- [7] Li, W., Liu, W., Wang, S.: The Effect of Crack Width on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete, *Advances in Materials Science Engineering*, 2017 (2017), <https://doi.org/10.1155/2017/3968578>
- [8] Lu, C., Gao, Y., Cui, Z., Liu, R.: Experimental Analysis of Chloride Penetration into Concrete Subjected to Drying–Wetting Cycles, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (2015) 12, pp. 1–10, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001304](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001304)
- [9] Lee, B.J., Hyun, J.H., Kim, Y.Y., Shin, K.J.: Chloride permeability of damaged high-performance fiber-reinforced cement composite by repeated compressive loads, *Materials*, 7 (2014) 8, pp. 5802–5815, <https://doi.org/10.3390/ma7085802>
- [10] Niu, L., Zhang, S.: Performance of Cracked Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Exposed to Dry-Wet Cycles of Chlorides, *Advances in Materials Science Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2021/4625972>
- [11] Zeng, H., Zhang, J., Li, Y., Su, X., Gu, C.Z., Zhang, K.: Mechanical Properties Microstructure of Basalt Fiber Reinforced Concrete Under the Single-Side Salt-Freezing–Drying–Wetting Cycles, *International Journal of Concrete Structures Materials*, 16 (2022) 1, <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00535-7>
- [12] Pollner, T., Grimm, B., Illguth, M., Kapteina, G., Dauberschmidt, C.: Chloride Penetration Resistance of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete–How To Test the Performance Using the Rapid Chloride Migration Test, *fib Symposium*, October (2022), pp. 461–473.
- [13] Augustino, D.S., Onchiri, R.O., Kabubo, C., Kanali, C.: Mechanical Durability Performance of High-Strength Concrete with Waste Tyre Steel Fibres, *Advances in Civil Engineering*, 2022 (2022), <https://doi.org/10.1155/2022/4691972>
- [14] Hwang, J.P., Jung, M.S., Kim, M., Ann, K.Y.: Corrosion risk of steel fibre in concrete, *Construction Building Materials*, 101 (2015), pp. 239–245, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.072>
- [15] Zhang, P., Li, Q., Chen, Y., Shi, Y., Ling, Y.F.: Durability of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Materials*, 12 (2019).
- [16] Li, Y., Zhang, Q., Wang, R., Xiong, X., Li, Y., Wang, J.: Experimental Investigation on the Dynamic Mechanical Properties Microstructure Deterioration of Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Freeze–Thaw Cycles, *Buildings*, 12 (2022) 12, <https://doi.org/10.3390/buildings12122170>
- [17] Arunraj, E., Vincent Sam Jebadurai, S., Daniel, C., Joel Shelton, J., Hemalatha, G.: Experimental study on compressive strength of brick using natural fibres, *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 32 (2019) 6, pp. 799–804, <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.06c.01>
- [18] Sekar, A., Kandasamy, G.: Study on durability properties of coconut shell concrete with coconut fiber, *Buildings*, 9 (2019) 5, <https://doi.org/10.3390/buildings9050107>
- [19] Afroz, S., Rahman, F., Iffat, S., Manzur, T.: Sorptivity strength characteristics of commonly used concrete mixes of Bangladesh, *Proceedings of the International Conference on Recent Innovation, Civil Engineering for Sustainable Development (IICSD-2015)*, December (2015), pp. 39–44.
- [20] Schneider, U., Alonso, M.C., Pimienta, P., Jansson, R.: Physical properties behaviour of high-performance concrete at high temperatures, *Structures in Fire - Proceedings of the 6th International Conference, SiF'10*, pp. 800–808.
- [21] Horgnies, M., Chen, J.J., Bouillon, C.: Overview about the use of fourier transform infrared spectroscopy to study cementitious materials, *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 77 (2025), pp. 251–262, <https://doi.org/10.2495/MC130221>