

Volumenske deformacije morta mikroarmiranog ugljičnim vlaknima

Milinković, Kiara

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:088383>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Kiara Milinković

**Volumenske deformacije morta
mikroarmiranog otpadnim ugljičnim
vlaknima**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Kiara Milinković

**Volumenske deformacije morta
mikroarmiranog otpadnim ugljičnim
vlaknima**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ana Baričević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

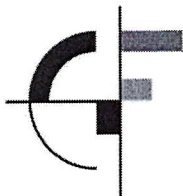
Kiara Milinković

**Volume deformations of waste carbon fibre
mortar**

MASTER THESIS

Supervisor: Assist. Prof. Ana Baričević

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

| | |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Kiara Milinković (Ime i prezime) | 0082061862 (IMBAG) |
|-------------------------------------|-----------------------|

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

| |
|---|
| Volumenske deformacije morta mikroarmiranog ugljičnim vlaknima (Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku) |
|---|

| |
|--|
| Volume deformations of carbon fibre reinforced mortar (Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku) |
|--|

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

| |
|---|
| Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima - ReWire (UIP-2020-02-5242) (Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta) |
|---|

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

| |
|--|
| (Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse) |
|--|

Datum:

| |
|------------------|
| 26. lipanj 2024. |
|------------------|

Mentor:

| |
|----------------------------------|
| izv. prof. dr. sc. Ana Baričević |
|----------------------------------|

Potpis mentora:

| |
|--|
| |
|--|

Komentor:

| |
|--|
| |
|--|



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja:

Kiara Milinković, 0082061862

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Volumenske deformacije morta mikroarmiranog ugljičnim vlaknima

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

26.6.2024.

Potpis:

Kiara Milinković



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja:

Kiara Milinković, 37138658049

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

Volumenske deformacije morta mikroarmiranog ugljičnim vlaknima

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv. prof. dr. sc. Ana Baričević

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

5.7.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

26.6.2024.

Potpis:

Kiara Milinkovic

ZAHVALA

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u sklopu projekta "Cementni kompoziti ojačani otpadnim vlaknima - ReWire" (UIP-2020-02-5242) financiranim od strane Hrvatske zaklade za znanost te provedeno na Sveučilištu u Zagrebu Građevinskom fakultetu.

SAŽETAK

Ovaj rad predstavlja istraživanje o razvoju cementnih materijala visokih uporabnih svojstava s dodatkom otpadnih ugljičnih vlakana iz lokalnih izvora, koja nastaju kao nusproizvod prilikom tkanja mrežica za različite kompozitne sustave. Da bi otpadna vlakna mogla ući u širu uporabu, kao dodatak građevinskom materijalu, potrebno je detaljno istraživanje i ispitivanje njihovih svojstava te njihovo ponašanje u cementnom kompozitu. U svrhu toga, u ovom radu su provedena ispitivanja volumenske stabilnosti, konkretno autogeno skupljanje i skupljanje uslijed sušenja, na uzorcima cementnog morta s dodatkom otpadnih ugljičnih vlakna duljina 6 i 12 mm koja su dozirana u volumenskim udjelima od 0.5 %, 1 % i 2 %. Radi usporedbe su također korištene referentna mješavina bez vlakana te mješavine s 1 % udjela tvorničkih vlakana duljine 6 i 12 mm. U radu je opisana problematika i nastanak autogenog skupljanja i skupljanja uslijed sušenja te su objašnjeni mehanizmi utjecaja vlakana na cementni mort u pogledu volumnih deformacija i utjecaja na izmjenu vlage s okolišem. U eksperimentalnom dijelu opisan je postupak pripreme uzoraka te sva provedena ispitivanja u svježem i očvrslom stanju. Rezultati ispitivanja upućuju na pozitivan utjecaj otpadnih ugljičnih vlakana, ali i postojanje granične količine vlakana čijim prekoračenjem dolazi do loše obradivosti u svježem stanju te nezadovoljavajućeg ponašanja uzoraka u pogledu skupljanja. Identifikacija takvih nedostataka je ključna za daljnje pronalaženja rješenja i za razvoj novih tehnoloških postupaka.

Ključne riječi: mort, ugljična vlakna, autogeno skupljanje, skupljanje uslijed sušenja

SUMMARY

This thesis is a research dealing with the development of high performance cementitious materials with the addition of waste carbon fibres from local sources, which is a by-product of the production of high-performance construction textiles used for various composite systems. In order for waste fibres to be used on a larger scale, as an additive to construction materials, their properties and behaviour in cement composites must be thoroughly researched and tested. For this purpose, tests on volume stability, in particular autogenous shrinkage and drying shrinkage, were carried out in this thesis on cement mortar samples with the addition of 6 and 12 mm long waste carbon fibres, which were dosed in volume fractions of 0.5 %, 1 % and 2 %. A reference mixture without fibres and mixtures with 1% of factory fibres of 6 and 12 mm length were also used for comparison. The thesis describes the problem and cause of autogenous shrinkage and drying shrinkage and explains the mechanisms of fibre influence on cement mortar in terms of volume deformations and influence on moisture exchange with the environment. The experimental part describes the procedure for preparing the samples and the tests carried out in the fresh and hardened state. The test results show that there is a positive influence of waste carbon fibres but also a critical amount of fibres that can be used because when exceeded, this leads to poor workability in the fresh state and unsatisfactory behaviour of the samples in terms of shrinkage. The identification of such behaviour is crucial in order to find solutions and for develop new technological processes in the future.

Key words: mortar, carbon fibres, autogenous shrinkage, drying shrinkage

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| ZAHVALA | i |
| SAŽETAK | ii |
| SUMMARY | iii |
| SADRŽAJ | iv |
| 1 UVOD | 1 |
| 2 Skupljanje cementnih kompozita | 3 |
| 2.1 Autogeno skupljanje | 3 |
| 2.1.1 Mehanizmi nastanka | 3 |
| 2.1.2 Utjecajni parametri kod autogenog skupljanja | 5 |
| 2.1.3 Metode ispitivanja autogenog skupljanja | 5 |
| 2.2 Skupljanje uslijed sušenja..... | 11 |
| 2.2.1 Mehanizmi nastanka | 11 |
| 2.2.2 Utjecajni parametri kod skupljanja uslijed sušenja..... | 12 |
| 3 UGLJIČNA VLAKNA I NJIHOV UTJECAJ NA VOLUMENSKJE DEFORMACIJE MORTA .. | 14 |
| 3.1 Osnovno o ugljičnim vlaknima | 14 |
| 3.2 Utjecaj ugljičnih vlakna na svojstva volumenskih deformacija morta..... | 18 |
| 3.3 Primjena morta s dodatkom ugljičnih vlakana | 22 |
| 3.3.1 Vrste popravaka uz primjenu sanacijskog morta..... | 23 |
| 4 EKSPERIMENTALNI RAD | 26 |
| 4.1 Materijali | 26 |
| 4.2 Sastav mješavina, postupak miješanja i priprema uzoraka | 27 |
| 4.3 Metode ispitivanja..... | 31 |
| 4.3.1 Svojstva u svježem stanju..... | 32 |
| 4.3.2 Početak i kraj vezivanja..... | 34 |
| 4.3.3 Određivanje dimenzijskih promjena | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | REZULTATI I DISKUSIJA | 37 |
| 5.1 | Svojstva u svježem stanju..... | 37 |
| 5.2 | Početak i kraj vezivanja..... | 42 |
| 5.3 | Određivanje dimenzijskih promjena..... | 43 |
| 5.3.1 | Autogeno skupljanje | 43 |
| 5.3.2 | Skupljanje uslijed sušenja..... | 51 |
| 6 | ZAKLJUČAK..... | 58 |
| | POPIS LITERATURE | 60 |
| | POPIS SLIKA | 63 |
| | POPIS TABLICA..... | 65 |

1 UVOD

Od 60-ih godina prošlog stoljeća počelo se dolaziti do spoznaje važnosti trajnosti betonskih konstrukcija te je razvijanje suvremenih metoda i pristupa s vremenom omogućilo razmatranje pitanja trajnosti još u fazi projektiranja konstrukcije [1]. Projektiranje trajnosti bi, po važnosti, trebalo biti ravnopravno s provjerom nosivosti i uporabljivosti. Nažalost, u praksi je vidljivo da mnoge konstrukcije, uslijed izloženosti mehaničkim opterećenjima te okolišnim utjecajima, znatna oštećenja bilježe već nakon 20-30 godina u uporabi [2], unatoč projektiranom uporabnom vijeku od 50 ili više godina. Prema istraživanju [3], količina novca potrošenog na sanacije već je premašila iznos potreban za izgradnju novih građevina. Razlog leži u tome što se smatralo da je beton „vječan“ materijal koji može izdržati sve uvjete okoliša te se nisu poduzimale pravovremene mjere održavanja, stoga su sada štete velike, i obujmom i vrijednosti, a veliki broj postojećih građevina zahtjeva sanacije. Kao što je već napomenuto, u posljednje vrijeme posvećuje se više pažnje tom aspektu u građevinskom sektoru te se provode brojna istraživanja koja razvijaju nove materijale i metode za sanaciju. Nadalje, građevinska industrija je odgovorna za značajnu količinu emitiranog CO₂ te ima za cilj smanjenje potrošnje energije te minimiziranje utjecaja na okoliš. Upravo zbog toga sve je veći zahtjev za korištenje prihvatljivih metoda i materijala, a jedna od njih je uporaba recikliranih i otpadnih materijala. Veliki potencijal leži u proizvodnim otpadnim ugljičnim vlaknima koja se mogu koristiti kao dodatak sanacijskom mortu budući da pozitivno utječu na svojstva bitna ovoj primjeni. Inače su ovakve vrste vlakana korištene zbog različitih svojstava koja poboljšavaju kod morta, a neke od njih su: ograničavanje nastanka pukotina, povećanje duktilnosti, poboljšanje otpornosti na abraziju i tako dalje [2]. Čista otpadna ugljična vlakna nastaju pri tkanju tehničkog tekstila, gdje se zbog ograničenja stroja odbacuje rubni dio tekstila u duljini do 20 cm, uslijed čega 20-25 % vlakana završi kao otpad [4]. U Republici Hrvatskoj, na godišnjoj razini, nastane čak i do 300 tona čistog otpadnog materijala koji se sastoji od vlakana različite debljine i duljine te je bez onečišćenja. Istraživanja su pokazala da su ove količine dovoljne za mikroarmiranje između 50 do 150 tisuća m³ cementnih kompozita [2] [4]. Upravo zbog toga, proizvodni otpad, t.j. čista

otpadna vlakna predstavljaju vrijedan izvor resursa u odnosu na proizvodnju novih materijala.

Budući da je, u Republici Hrvatskoj, glavni uzrok degradacije materijala prodiranje agresivnih tvari kroz pukotine, posebna pozornost je upravo na toj pojavi. Volumenske deformacije uslijed skupljanja betona jedan su od glavnih razloga za nastanak pukotina. Kod cementnih materijala zbog izmjene vlažnosti, bilo s okolinom ili unutar kompozita, dolazi do promjene volumena cementne matrice te nastanka vlačnih sila koje, ako se premaši čvrstoća, utječu na razvoj pukotina. Poznato je da vlakna kroz različite mehanizme pospješuju ponašanje materijala kod volumenskih deformacija. Postoje različite vrste skupljanja, a prema tipu to su: kemijsko, autogeno, plastično, skupljanje uslijed sušenja te uslijed karbonatizacije.

U ovom radu provedeno je ispitivanje autogenog skupljanja i skupljanja uslijed sušenja koji su ispitani na 6 različitih mješavina s varijacijom udjela i duljine proizvodnih otpadnih ugljičnih vlakana (oUV) koje su uspoređivane s referentnom mješavinom bez vlakana (REF) te 2 mješavine s tvornički proizvedenim ugljičnim vlaknima (tUV). Udjeli vlakana u mješavinama bili su 0.5 %, 1.0 % i 2.0 % na ukupni volumen te su za svaki volumen korištena vlakna duljine 6 i 12 mm. Ispitana su svojstva u svježem stanju (konzistencija, sadržaj pora, gustoća i temperatura) te se pratila promjena duljine uzorka uslijed autogenog te skupljanja uslijed sušenja. Korištena su otpadna ugljična vlakna kod kojih je glavni izazov njihova nekonzistentnost u kvaliteti, odnosno pojava oštećenja na površini tijekom procesa tkanja, ali i duljina. Upravo zbog toga, bilo je potrebno proučiti ponašanje kompozita armiranih ovim vlaknima kako bi se odredili mogući tehnološki izazovi te dala rješenja za njih.

Cilj rada je ispitati utjecaj ponovne upotrebe otpadnih ugljičnih vlakana na svojstva cementnih kompozita, čime bi se smanjila količina odloženog otpada, minimalizirao utjecaj na okoliš te ujedno i poboljšala svojstva kompozita u pogledu volumenskih deformacija što bi u budućnosti moglo potaknuti njegovu širu upotrebu u građevinskoj praksi.

2 SKUPLJANJE CEMENTNIH KOMPOZITA

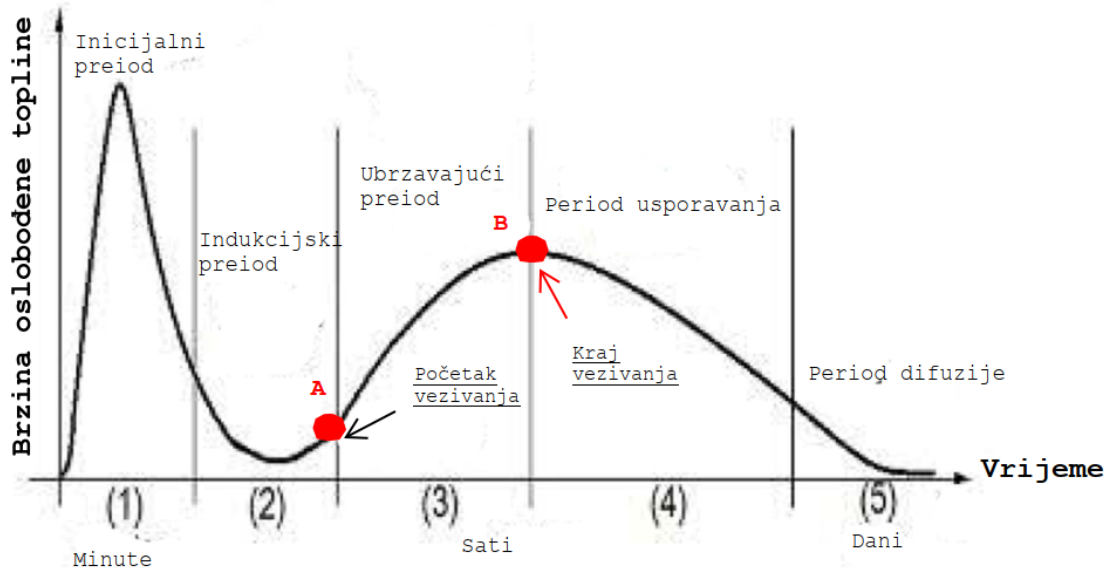
Slobodno skupljanje cementnih kompozita predstavlja vremensku deformaciju smanjenja volumena bez djelovanja vanjskih sila. Tijekom ranog procesa hidratacije te tijekom cijelog životnog vijeka materijala, dolazi do različitih uzroka promjene relativne vlažnosti u njegovoj strukturi, što posljedično uzrokuje promjene volumena. Najveća posljedica volumenskih deformacija je nastanak naprezanja koje rezultira razvojem pukotina i omogućuje slobodno prodiranje agresivnih tvari iz okoliša te utječu na trajnost, ali i oslabljenja strukture kompozita. Postoji više podjela skupljanja, a prema tipu skupljanje dijelimo na kemijsko skupljanje, autogeno skupljanje, plastično skupljanje, skupljanje uslijed sušenja te skupljanje zbog karbonatizacije. U ovom radu, naglasak je stavljen na autogeno skupljanje i skupljanje uslijed sušenja.

2.1 Autogeno skupljanje

2.1.1 Mehanizmi nastanka

Autogeno skupljanje nastaje uslijed pojave samoisušivanja u porama unutar mikrostrukture cementne matrice koja je još u fazi formiranja i očvršćivanja tijekom procesa hidratacije. Pore unutar mikrostrukture su rezultat kemijskog skupljanja, koje se javlja iz razloga što produkti nastali u procesu hidratacije imaju manji volumen od ukupnog volumena nehidratiziranih komponenti. Nakon formiranja, pore su ispunjene vodom, ali nastavkom procesa hidratacije dolazi do trošenja vode, odnosno isušivanja pora. Proces nastanka skupljanja usporedan je sa stupnjevima hidratacije cementa [5]. U ranoj fazi, nakon miješanja cementa i vode, formiraju se prvi produkti hidratacije uslijed čega dolazi do većeg oslobađanja topline te se taj period naziva inicijalni period. Nakon inicijalnog, slijedi vrijeme mirovanja, odnosno indukcijски period. Indukcijski period završava naglim porastom topline hidratacije u trenutku koji približno označava i početak vezivanja, što je prikazano kao točka A na slici 1, dok točka B označava kraj vezivanja u kojem je došlo do formiranja strukture i početka očvršćivanja [6]. U fazi kraja vezivanja nastaju fizičke veze i cementna matrica se

počinje ponašati kao čvrsto tijelo koje se odupire skupljanju uslijed čega dolazi do pojave naprezanja.



Slika 1 Faze procesa hidratacije (Izvor: [7])

U daljnjem napretku hidratacije, mikrostruktura cementne matrice sve je gušća i njene su pore finije te se postupno smanjuje količina slobodne vode koja se troši na hidrataciju. U određenom trenutku, jedina preostala voda koja se može iskoristiti za hidrataciju cementa je ona unutar kapilarnih pora te njenom potrošnjom dolazi do procesa samoisušivanja. Problematika samoisušivanja može se prikazati kroz Jednadžbu 1 u kojoj σ_{cap} predstavlja naprezanje unutar pore, γ je površinska napetost tekućine unutar pore, a r radijus pore, odnosno meniskusa [8]. Iz jednadžbe 1 je vidljivo da manje pore prouzrokuju veće naprezanje te da je forma mikrostrukture nastale tijekom kemijskog skupljanja izrazito utjecajan parametar za autogeno skupljanje.

$$\sigma_{cap} = \frac{2\gamma}{r}$$

Jednadžba 1 Kapilarno naprezanje tekućine u porama (Izvor: [8])

2.1.2 Utjecajni parametri kod autogenog skupljanja

U radu [8], prikazano je kako „grublja“ morfologija pora cementne paste vodi manjim vrijednostima autogenog skupljanja. Na morfologiju će utjecati vrsta korištenog cementa i njegova finoća te korištenje finijih punila, kao što je silicijska prašina koja ima 50 - 100 puta manje čestice od cementa. Naime, sitnije čestice doprinose popunjavanju unutrašnje strukture i smanjenju veličine pora te će velika specifična površina sitnijih čestica povećati potrebu za vodom i smanjiti relativnu vlažnost unutar cementne matrice [9].

Veliku sklonost autogenom skupljanju imaju betoni visokih uporabnih svojstva sa svojim vodo- vezivnim omjerom manjim od 0.4 [9]. Veći v/c (vodocementni) omjer, odnosno više vode, uzrokuje veće pore i više slobodne vode potrebne za hidrataciju čime se smanjuje mogućnost pojave već opisanih mehanizama i procesa samoisušivanja. U radu [9] se navodi kako smanjenje v/c omjera sa 0.35 na 0.30 ima značajan utjecaj na autogeno skupljanje, dok daljnja redukcija v/c omjera ima manji utjecaj na razmatrano svojstvo.

Pozitivan učinak na autogeno skupljanje daju i porozniji agregati koji u svojim porama imaju apsorbiranu vodu koja u procesu samoisušivanja omogućuje unutrašnju zalihu vode potrebnu za hidrataciju preostalog cementa, odnosno ostvaruje se unutarnje njegovanje [9]. Također, budući da se skupljanje događa upravo u cementnoj matrici, veći udio nedeformabilnog agregata dat će poboljšanje u tom pogledu.

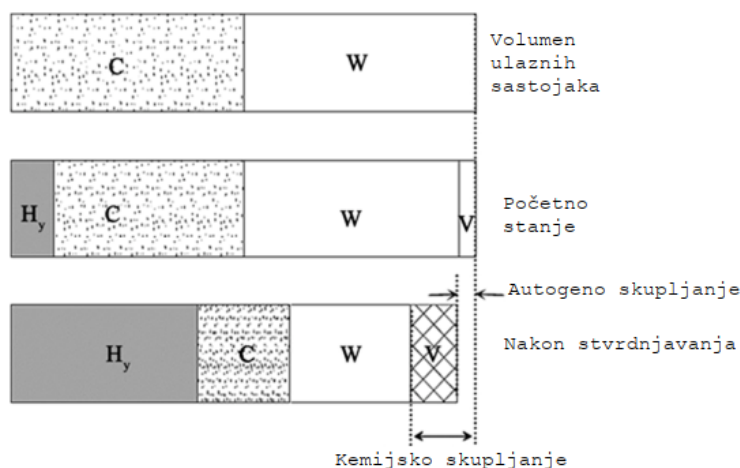
Dakle, autogeno skupljanje biti će najizraženije za betone koji zahtijevaju posebna svojstva kao što su izrazito visoke čvrstoće te betoni izvođeni u ekstremnim klimatskim uvjetima, dok će kod konvencionalnih betona autogeno skupljanje najčešće biti zanemarivo malo.

2.1.3 Metode ispitivanja autogenog skupljanja

Iako je autogeno skupljanje definirano u teoriji, dostupne su različite metode za njegovo ispitivanje, a time i različiti uvjeti pri kojima se ispitivanje provodi. Razlika koja čini najveći utjecaj je početak mjerenja jer, kako je prethodno navedeno, autogeno skupljanje se javlja s određenim vremenskim odmakom od početka miješanja. Kod nekih metoda, definirano je

da autogeno skupljanje započinje od trenutka početka vezivanja određenog ubodnom iglom Vicatovog uređaja. Međutim, određivanje početka vremena vezivanja za različite razine cementnih kompozita nije ujednačeno. Također, skupljanje mjereno nakon početka vezivanja uzeti će u obzir, osim skupljanja nastalog od samoisušivanja, i ono skupljanje nastalo zbog smanjenja volumena reakcijskih produkata, to jest kemijsko skupljanje čiji je odnos s autogenim skupljanjem prikazan na slici 2 što otežava razdvajanje te dvije vrste skupljanja [10]. U ranoj fazi dok je beton još u tekućem stanju, autogeno skupljanje je proporcionalno stupnju hidratacije i ekvivalentno je kemijskom skupljanju [6]. Dakle, u prvih nekoliko sati, autogeno skupljanje neodvojivo je od kemijskog skupljanja, ali kada dođe do kraja vezivanja autogeno skupljanje obuhvaća sve manje kemijskog skupljanja [6].

Mnogi istraživači, kako je navedeno u radu [10], započinju mjerenje autogenog skupljanja dan nakon ugrađivanja morta u kalup iako autogeno skupljanje počinje nakon formiranja čvrste, ali porozne matrice. Neovisno o početku mjerenja, autogeno skupljanje definirano je kao mikroskopska volumna promjena uz konstantnu temperaturu bez izmjene vlažnosti s vanjskim okolišem te su razvijeni različiti pristupi i metode mjerenja. Metode se dijele na direktne i indirektne te svaka od njih ima svoje prednosti i mane [10].



Slika 2 Odnos između autogenog i kemijskog skupljanja: C- nehidratizirani cement; W- nehidratizirana voda; H_y – sastojak hidratacije; V- pore nastale hidratacijom (Izvor: [5])

Direktne metode ispitivanja autogenog skupljanja se dijele na volumenske i linearne metode, a modifikacijama ispitivanja mogu se provesti i beskontaktno. Volumenskim metodama mjere se volumne promjene uzoraka uz konstantnu temperaturu te se dijele na membransku metodu i metodu određivanja pomoću kapilarne cijevi [10]. Membranska metoda ili metoda uzgona temeljena je na promjeni uzgona uzorka u tekućini. Svježa se mješavina stavi u gumenu membranu i zabrtvi, a autogeno skupljanje se odredi na temelju promjene mase uzorka. Reapsorpcija vode koja se uzdigla na površinu uzorka, odnosno izdvojena voda, te promjene u temperaturi uslijed hidratacije dovode do nerelevantnih rezultata. Još jedan od nedostataka ove metode je to što su gumene membrane preslabe da bi se mogle koristiti za uzorke betona, odnosno mješavina s krupnim agregatom, te je ispitivanje moguće provesti samo na cementnim pastama i mortovima [10].

Kod linearnih mjerenja, mjere se promjene u duljini cementne paste, morta ili betonskog uzorka ugrađenih u kalupe različitog oblika. Ove metode klasificiraju se na kontaktne i beskontaktno metode ovisno o vrsti senzora koji se koristi te na vertikalne i horizontalne ovisno o položaju uzorka. Horizontalna metoda se koristi češće iz razloga što kod vertikalne postoji utjecaj gravitacije tijekom mjerenja [10]. Nadalje, postoje različite dimenzije kalupa ovisno o razini cementnog kompozita.

Za kontaktnu metodu mjerni nastavci su ili ugrađeni u uzorak ili su u direktnom kontaktu s uzorkom te su povezani na uređaje kao što su mjerne ure ili linearni podesivi diferencijalni transformator, koji bilježe podatke o pomacima. Uzorak ugrađen u kalup mora biti zabrtvljen sa svih strana kako ne bi izmjenjivao vlažnost s okolišem te radi redukcije trenja uzorka s kalupom postavlja se teflonska pločica [10]. Na slici 3 dan je shematski prikaz opreme za mjerenje autogenog skupljanja na betonskom uzorku dimenzija 100 x 100 x 400 mm, dok se za mjerenje skupljanja cementne paste ili morta najčešće koriste uzorci dimenzija 40 x 40 x 160 mm.

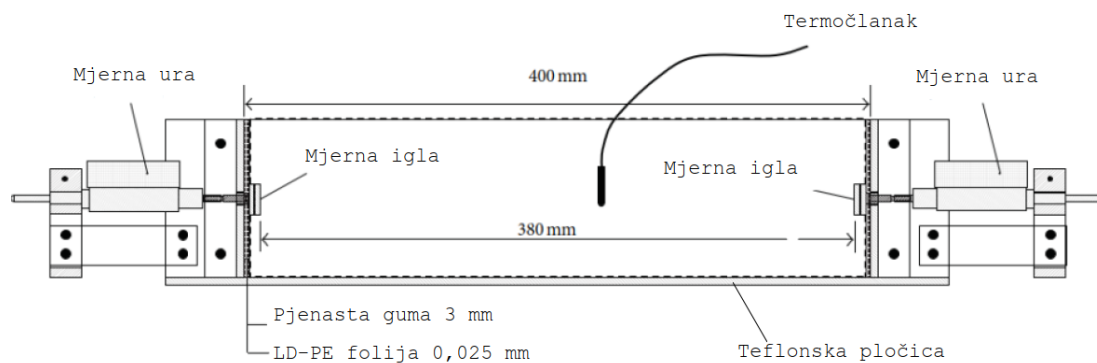
Za otklanjanje utjecaja temperaturnih deformacija koriste se toplinski koeficijent i mjerenje temperature uzorka za korekciju skupljanja, dok je moguće i korištenje metoda za regulaciju temperature uzorka, kao što su parna kupelj ili uranjanje u kupke s uljem. Vrijeme početka mjerenja autogenog skupljanja se odredi na zasebnom uzorku dok se vrijeme početka/ kraja vezivanja po potrebi može dodatno mjeriti i drugim metodama.

Autogena deformacija skupljanja/ bubrenja izračunava se prema sljedećoj formuli [12]:

$$\varepsilon = \frac{\Sigma \Delta l}{L} * 1000 \left[\frac{mm}{m} \right]$$

Jednadžba 2

$$\Delta L = \frac{(X_{i,a} - X_{0,a}) + (X_{i,b} - X_{0,b})}{L}$$



Slika 3 Shematski prikaz opreme za linearno mjerenje autogenog skupljanja (Izvor: [12])

gdje je:

ΔL promjena duljine

L- razmak između repera

$X_{0,a}$ i $X_{0,b}$ – vrijednosti početnog mjerenja na mikrouoricama

$X_{i,a}$ i $X_{i,b}$ – vrijednosti mjerenja na mikrouoricama u vremenu

Druga metoda ispitivanja je pomoću valovite polietilenske cijevi (slika 4), kod koje se zbog oblika cijevi volumenske deformacije reflektiraju kao linearne promjene [10]. Kalup valjkastog oblika ima omjer duljine i promjera 400:30 mm što dovodi do toga da aksijalne deformacije imaju puno veće vrijednosti od onih u radijanom smjeru te time volumenska deformacija i linearni pomak postaju ista vrijednost. Plastični kalup sprječava izmjenu

vlažnosti s vanjskim okolišem dok valovitost cijevi omogućuje minimalizirano trenje uzorka s kalupom. Prema ASTM standardu [13], početak mjerenja određuje se krajem vezivanja zasebnog uzorka napravljenog iz iste mješavine. Iako krutost cijevi i vrijeme početka mjerenja imaju utjecaj na dobivene rezultate, ova metoda smatra se najboljom za provođenje autogenog skupljanja budući da najmanje ovisi o okolišnim uvjetima prilikom mjerenja. Veličina kalupa također ovisi o razini cementnog kompozita koji se ispituje.

Budući da korištenje kontaktnih senzora može oštetiti uzorak te ih je teško ispravno pozicionirati za mjerenje, senzori na laserskom principu mjerenja pomaka pokazali su se kao bolja alternativa jer dobiveni rezultati imaju izrazito veliku točnost [10].



Slika 4 Oprema za linearno mjerenje autogenog skupljanja na cementnoj pasti i mortu pomoću valovite cijevi (Izvor: [13])

Razvijene su i indirektno metode, kod kojih se za određivanje autogenog skupljanja koriste mjerenja više svojstava iz kojih se na temelju osnovnih fizičkih procesa i uspostavljanja međusobnog odnosa daju jednadžbe za predviđanje. Kada je unutarnja relativna vlažnost uzorka iznad 80 %, problematično naprezanje unutar nanometarskih pora se ne događa jer se voda tada crpi iz većih, kapilarnih pora [10]. Kao što je već rečeno u ovom radu, relativna vlažnost i struktura pora utječu na autogeno skupljanje te postoje jednadžbe koje ga indirektno mogu predvidjeti na temelju tih parametara. U radu [10] navodi se jednadžba 2 kao prikaz izrazito linearne veze između relativne vlažnosti h_s i autogenog skupljanja ε_s :

$$\varepsilon_s(h_s) = mh_s + n$$

Jednadžba 3 Linearni odnos relativne vlažnosti i autogenog skupljanja [10]

gdje su m i n konstante definirane iz odnosa autogenog skupljanja i relativne vlažnosti ovisno o v/c omjer, volumen i sadržaj mineralnih dodataka.

Prema Kelvinovoj jednadžbi, jednadžba 3, odnos između relativne vlažnosti i veličine radijusa pore dan je prema:

$$\ln(RH) = \frac{-2\gamma V_m}{rRT}$$

Jednadžba 4 Ovisnost relativne vlažnosti i promjera meniskusa [10]

gdje je RH relativna vlažnost, γ je površinska napetost otopine u porama (N/m), V_m molarni volumen, r je radijus meniskusa (m), R je plinska konstanta (8.314 J/(molK)) i T je temperatura (K).

MacKenzie i Bentz [10] su predložili jednadžbu za procjenu skupljanja nastalog usred kapilarnog naprezanja koja glasi:

$$\varepsilon = \frac{S\sigma_{cap}}{3} \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right)$$

Jednadžba 5 Vrijednost autogenog skupljanja u ovisnosti o kapilarnom naprezanju [10]

gdje je ε linearni pomak pri autogenom skupljanju, S je razina saturacije pora, K je modul elastičnosti poroznog materijala (Pa) i K_s je modul elastičnosti tekućine u porama (Pa).

Rezultati dobiveni indirektnim metodama daju prilično precizne i primjenjive rezultate koji su dosljedni s onima dobivenim direktnim mjerenjima [10]. Naime, kemijsko skupljanje se ne može definirati indirektni metodama jer one uzimaju u obzir parametre povezane isključivo sa skupljanjem nastalim samoisušivanjem [10].

2.2 Skupljanje uslijed sušenja

Za konvencionalne betone s vodo-cementnim omjerom ≥ 0.4 dominantna vrsta skupljanja bit će skupljanje uslijed sušenja [14]. Uzrok njegovog nastanka sličan je kao i za autogeno skupljanje to jest riječ je o smanjenju relativne vlažnosti očvrsnulog morta/betona. No, postoji razlika u tome što je kod autogenog skupljanja riječ o izmjeni relativne vlažnosti unutar same strukture te nema izmijene s okolinom dok je kod skupljanja uslijed sušenja promjena uzrokovana difuzijom to jest tendencijom da se relativna vlažnost strukture izjednači s vlažnosti okoline [15].

2.2.1 Mehanizmi nastanka

Mehanizmi uzroka ove volumenske nestabilnosti objašnjeni su kroz procese kao što su: promjena površinske napetosti (Gibbs- Bangham efekt), kapilarnost, razdvajajući tlak i međuslojno kretanje vode [14].

Površinska energija (Gibbs- Banghamov efekt)

Gibbs-Banghamov mehanizam imat će najveći doprinos kod skupljanja, no za njegov nastanak uvjet je da je relativna vlažnost manja od 40 %. U procesu sušenja mikrostrukture dolazi do promjene površinske energije uslijed desorpcije adsorbirane vode sa površine čestica C-S-H gela. Ovaj fenomen rezultira povećanjem međumolekulskih privlačnih sila i površinske energije što vodi do kontrakcije mikrostrukture to jest volumenske deformacije [14]. Budući da se ovaj proces događa isključivo pri relativnoj vlažnosti manjoj od 40 %, a betonski elementi su rijetko izloženi takvom okolišu, vrijedi da će neki drugi mehanizmi, kao što je kapilarnost, biti primarni.

Kapilarnost

Na granici između 40-50 % relativne vlažnosti dolazi do promjene u mehanizmu, kada kapilarnost postaje dominantni razlog volumenske deformacije. Gubitak vlage u materijalu zbog smanjenja okolnog tlaka pare, dovodi do promjene zakrivljenosti radijusa meniskusa

to jest slobodna površina postaje konkavnija u porama uslijed čega dolazi do formiranja negativnog tlaka unutar fluida u pori što vodi do kompresije materijala to jest njegove volumne promjene [6] [14]. Trebalo bi naglasiti da je ovo isti onaj mehanizam koji se događa kod autogenog skupljanja te da također i ovdje vrijedi to da važnu ulogu u kapilarnom naprezanju ima struktura pora i razina relativne vlažnosti materijala. Kapilarno naprezanje događa se u rasponu relativne vlažnosti od 40 do 95 % [14].

Razdvajajući tlak

Pri relativnoj vlažnosti manjoj od 50 % granični film vode na česticama C-S-H gela, koji je za njih vezan površinskim silama adsorpcije, se desorpcijom smanjuje što vodi do smanjenja razdvajajućeg tlaka između njih te uzrokuje njihovo međusobno privlačenje. Taj fenomen inducira nastanak vlačnih naprezanja u nanoporama te naprezanje čvrste tvari to jest dolazi do deformacije skupljanja [14].

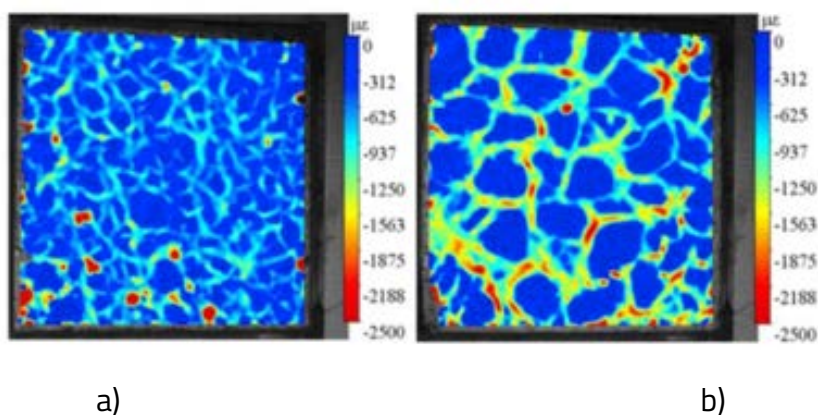
Međuslojno kretanje vode

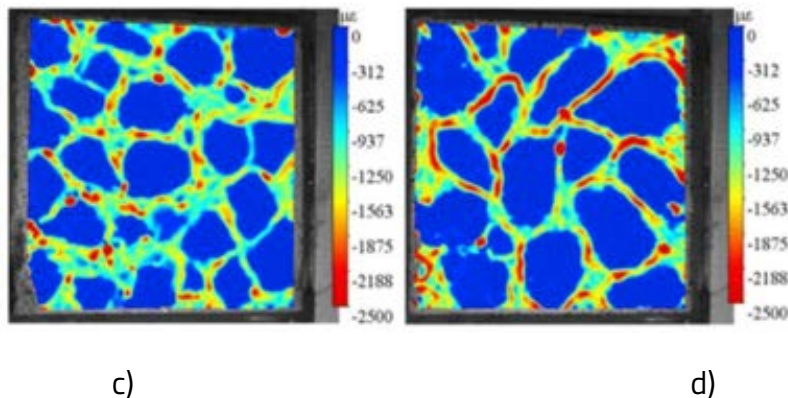
Polarizirane molekule vode su izrazito jako vezane za površine čestica produkata hidratacije te do njihovog isušivanja može doći tek pri relativnoj vlažnosti ≤ 25 % to jest izrazitim sušenjem [6] [14]. Tada međuslojna voda počne migrirati, a to aktivira kontrakciju čestica te time sužavanje njihovog međuprostora. U rasponu relativne vlažnosti ≤ 12 % i mali gubici vode izazivaju značajne nepovratne volumen promjene budući da je riječ o vodi koja je čvrsto vezana za molekule [14].

2.2.2 Utjecajni parametri kod skupljanja uslijed sušenja

Skupljanje uslijed sušenja je promjena vlažnosti vezana uz okoliš, dok je kod autogenog ta izmjena isključivo unutar mikrostrukture samog materijala. Isto tako, svojstva pogodna za smanjenje skupljanja uslijed sušenja su ona koja su nepoželjna kad je riječ o skupljanju od samoisušivanja. Mali vodo-cementni omjer i mala propusnost betona pogoduju smanjenju

skupljanja uslijed sušenja. Ako je v/c omjer dovoljno nizak da se kod hidratacije potroši većina vode te relativna vlažnost betona bude ispod 80 %, manja je vjerojatnost da će doći do razmjene vlage između betona i okoliša [5]. Rezultati istraživanja [5], prikazuju da se skupljanje uslijed sušenja smanji čak za 54 % ako se v/c omjer reducira sa 0.41 na 0.33. Korištenje mineralnih dodataka koji imaju pucolanska svojstva imati će nekoliko prednosti kada je riječ o kontrakciji volumena. U fazi kada još nije došlo do pucolanske reakcije, čestice mineralnog dodatka imati će ulogu mikro- agregata koji pruža otpor skupljanju cementne matrice te također popunjavaju sitne šupljine čime otežava gubitke vode u toj ranijoj fazi. Kada dođe do pucolanske reakcije mineralnog dodatka i portlandita, nastati će produkti C-S-H gela koji dodatno popunjava šupljine i očvršćuju strukturu čime je ona sposobnija oduprijeti se skupljanju. Kod dodataka kao što su leteći pepeo i silicijska prašina, finoća mliva i njihov sferični oblik (manja kontaktna površina) smanjuju apsorpcijske sile koje nastaju kod gubitaka vode [14]. U radu [5] navedeno je da skupljanje uslijed sušenja betona smanjeno za približno 25 % kada je bilo dodano 8 % mikrosilike na masu cementa. Kvaliteta pakiranja i zbijenosti agregata doprinosi opiranju mikrostrukture da se skuplja te ima direktan utjecaj na poroznost koja je jedan od ključnih parametara kada je riječ o skupljanju. Grublja raspodjela agregata u strukturi i prisutnost većih zrna negativno će utjecati na skupljanje uslijed sušenja što je vidljivo na slici 5 gdje crvena boja predstavlja područja intenzivnijeg skupljanja [14].





Slika 5 Prikaz veličine skupljanja ovisno o veličini zrna i kvaliteti pakiranja agregata: a) 5-10 mm, b) 10-16 mm, c) 16-20 mm i d) 20-25 mm (Izvor: [14])

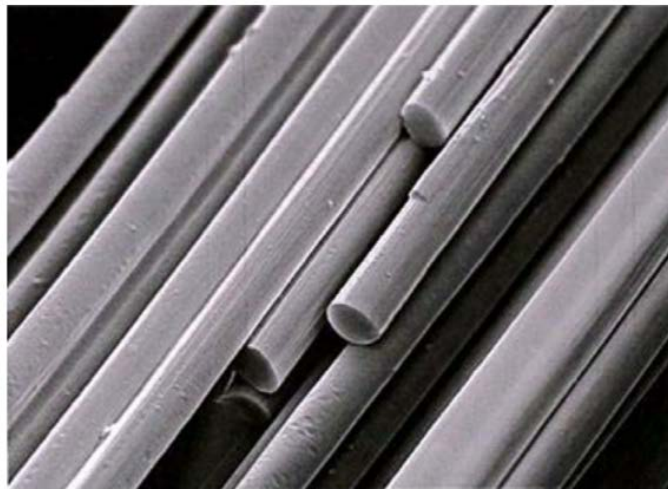
3 UGLJIČNA VLAKNA I NJIHOV UTJECAJ NA VOLUMENSKJE DEFORMACIJE MORTA

3.1 Osnovno o ugljičnim vlaknima

Ovisno o podrijetlu, vlakna se dijele na prirodna i umjetna vlakna. Prirodna vlakna dobivaju se preradom sirovina iz prirode (biljna i životinjska ili minerali) dok umjetna vlakna nastaju industrijskom proizvodnjom te se dijele na vlakna s organskom ili anorganskom komponentom [16]. Svojstva vlakna ovise o vrsti sirovine te procesu prerade te sirovine. Tako će veću vlačnu čvrstoću imati kemijska vlakna od sintetskih polimera, srednje su čvrstoće svila i prirodna celulozna vlakna, a najmanje su čvrstoće vuna i kemijska vlakna od prirodnih polimera [16]. Ugljična vlakna su organska vlakna s udjelom ugljika od 90 % ili više koja se sastoje od nekoliko tisuća finih filamentnih vlakna promjera između 5 i 10 μm (slika 6). Kao što samo ime kaže, ugljična vlakna uglavnom sadrže ugljik, drugi kemijski element je dušik kojeg ima u rasponu od 3 % do 7 % dok je ostalih <1 % kisik koji se pretežno nalazi na površini vlakna kao posljedica oksidativnog tretmana površine vlakana koja omogućuje

bolju adheziju premaza koji ih drži u snopovima i čime je poboljšan učinak vlakana u kompozitima [17]. Danas su u komercijalnoj proizvodnji najzastupljenija ugljična vlakna proizvedena oksidacijom i karbonizacijom poliakrilonitrila (PAN), a nešto rjeđa su ona proizvedena od celuloznih viskoznih vlakana te mezofazne smole [17].

Ugljična vlakna proizvode se u kontinuiranom procesu termičkom pretvorbom prekursora kao što je PAN, koji sadrži ugljik. Proces termičke pretvorbe može se podijeliti u tri koraka. Prvi korak je oksidativna stabilizacija PAN-a koja se odvija na zraku temperature do 300 °C, drugi korak je karbonizacija vlakana na temperaturi do 1500 °C u kojem je uklonjen veći dio ne-ugljičnih elemenata nakon čega slijedi grafitizacija koja se odvija na temperaturi do 3000 °C [17]. Završni proizvod tih procesa su vrlo paperjasta vlakna koja ne bi imala prikladne karakteristike i ponašanje unutar matrice kompozita da se ne provede proces oksidacije površine te premazivanje. Konačan proizvod su snopovi vlakana namotani oko vretena te mljeveni ili sjeckani komadići vlakna (slika 7).



Slika 6: Snop filamentnih vlakana uvećan za 50x (Izvor: [17])

Proces pređenja vlakana i njihovo zatezanje vrlo su bitni za njihova kasnija svojstva iz dva razloga. Proces pređenja definira radijus pojedinog filameta u snopu vlakana dok istežanje

vlakana fiksira atome i strukturnu orijentaciju molekula što igra važnu ulogu u mehaničkim svojstvima [17].

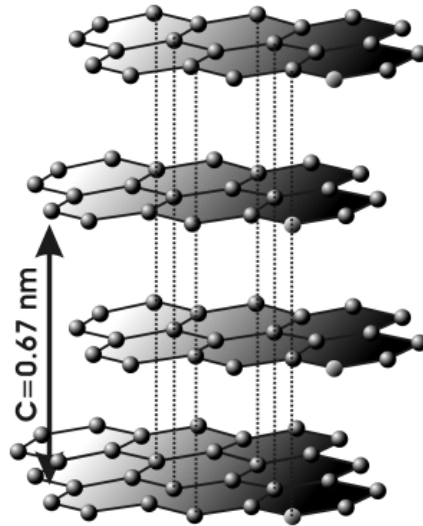


a)

b)

Slika 7: Oblici ugljičnih vlakana: a) Namotavanje dugih niti oko vretena, b) Mljeveni i sjeckani oblik vlakna (Izvor: [17])

Prednosti ugljičnih vlakana u odnosu na ostale vrste su njihova visoka vlačna čvrstoća, velika krutost, mala gustoća i dobra kemijska otpornost. Također posjeduju jedinstvenu kombinaciju svojstava kao što su dobra dinamička izdržljivost te dobra toplinska, elektromagnetske i električna svojstva koje čine ovaj materijal idealnom opcijom za uporabu u raznim industrijama [17]. Ono što daje spomenuta svojstva leži u molekularnoj strukturi čija je alotropska modifikacija u obliku grafita. Grafit je modifikacija ugljika koja ima planarnu strukturu kod koje su atomi raspoređeni heksagonalno (slika 8) te međusobno imaju veliku energiju veze što rezultira visokom čvrstoćom i modulima uzduž osi vlakana dok je veza između slojeva omogućena preko slabih Van der Waals-ovih sila zbog čega su mehanička svojstva okomito na vlakna puno lošija [18].



Slika 8: Planarna struktura grafita (Izvor: [19])

Uobičajena vlačna čvrstoća današnjih visokorazvijenih ugljičnih vlakana kreće se od 3000 do 6000 MPa dok je raspon modula elastičnosti od 250 do 500 GPa [17]. Ova dva mehanička svojstva razlog su uporabe ugljičnih vlakana u svemirskoj i avioindustriji. Još jedno bitno svojstvo koje igra veliku ulogu kod primjene ovog materijala je mala gustoća koja se kreće između 1.7 g/cm^3 i 2 g/cm^3 [17]. Kombinacija visokih mehaničkih svojstva te male gustoće upravo je ono što ugljična vlakna čini idealnim za zamjenu metala u mnogim sektorima. U usporedbi s ostalim organskim vlaknima, ugljična vlakna također su vrlo stabilna u pogledu puzanja što ih čini kompatibilnim s materijalima s kojima tvore kompozit. Toplinska svojstva ugljičnih vlakana čine ih pogodnim za primjenu u ekstremnim temperaturnim uvjetima. Nizak koeficijent toplinskog istezanja, koji je $-10 \times 10^{-6}/\text{K}$ u uzdužnom smjeru te $10 \times 10^{-6}/\text{K}$ radijalno, također ga čini prikladnijim u usporedbi s metalom [17]. Kemijska stabilnost i inertnost čine ugljična vlakna otporna na kiseline, alkalije i organska otapala, a razlog tome leži u grafitnoj strukturi molekula [17].

Najčešća uporaba ugljičnih vlakana je u obliku kompozita ojačanih vlaknima te je iz tog razloga bitna njihova prionjivost s matricom koja se ostvaruje preko adhezije ili kemijskom vezom. Već spomenuta grafitna struktura nema sposobnost reagiranja s matricom (epoksidna smola, cementni mort) i stvaranja čvršćih veza, stoga bi rezultat bio slaba

prionjivost između slojeva te bi se vlakna vrlo lako mogla izvući iz matrice. Iz tih razloga potrebna je obrada površine koja poboljšava prionjivost. Postoje različite metode obrade površine, a neke od njih su: oksidacija plinom, elektrokemijskom oksidacijom u elektrolitu, plazma tretmanom ili pirolitičkim površinskim premazima i elektropolimerizacijom [17]. Ovi procesi mijenjaju strukturu površine koja postane kemijski reaktivnija s premazom i/ili matricom što daje čvršću vezu u samom kompozitu. Nakon obrade površine, vlakna se tretiraju premazima koji su ključni za njihovo jednostavnije ovladavanja i poboljšanje ponašanja u matrici s kojom čine kompozit [17]. Različite vrste premaza pridonosiće različitoj disperziji i distribuciji vlakana ovisno o matrici u kojoj se koriste. Poliuretan, koji je često korišten premaz, ima hidrofobna svojstva te je netopiv u vodi što otežava raspršivanje vlakana u matrici, to jest može uzrokovati nakupljanje vlakana u čvorove. S druge strane još jedna vrlo često korištena vrsta premaza, glicerol, koji je topiv u vodi što će pridonijeti tome da se vlakna bolje distribuiraju [20].

3.2 Utjecaj ugljičnih vlakna na svojstva volumenskih deformacija morta

U građevinskoj praksi postoje različite metode za smanjenje mogućnosti nastanka pukotina u cementnim materijalima uslijed pojave skupljanja. Jedan od načina je modifikacija sastava mješavine gdje se vodeći računa o vrstama dodataka, granulometrijskom sastavu i vrsti agregata te v/c omjeru može utjecati na buduće ponašanje materijala u pogledu volumenskih deformacija. Drugi način je dodatak ugljičnih vlakana u mješavinu. Prisutnost vlakna u mješavini utjecati će na morfologiju strukture materijala i zadržavanje njegove vlage što su važni parametri kod volumenskih deformacija skupljanja. Vlakna će uz to imati i ulogu premošćivanja pukotina te smanjenje širine pukotina, sprječavanje propagacije njihovog širenja te će smanjiti učestalost i broj pukotina u strukturi materijala.

Na učinkovitost vlakana u matrici utjecaj će imati kombinacija njihovih parametara kao što su: modul elastičnosti vlakana, omjer duljine i promjera vlakna te udio vlakana. U radu [21] prikazan je model koji opisuje ponašanje cementnog kompozita ojačanog vlaknima, a taj se model temelji na pretpostavci da dolazi do posmične sile između matrice i vlakna uslijed

kontrakcije kompozita. Iz toga je dobivena jednadžba 5 koja daje izraz za deformaciju od slobodnog skupljanja te daje dobar uvid u to koji parametri i kako utječu na volumenske promjene kompozita. Parametar ε_m predstavlja volumensku deformaciju matrice ne uključujući vlakna, η je omjer modula elastičnosti vlakna i matrice (E_f - module elastičnost vlakana, E_m – modul matrice), k predstavlja koeficijent orijentacije vlakana, parametar γ opisuje utjecaj omjera duljine (l_f) i promjera vlakna (r_f), V_f predstavlja udio vlakana u matrici, V_m volumen matrice, a R je radijus reprezentativnog cilindra u cementnoj matrici [21].

$$\varepsilon_t = \varepsilon_m \left[1 - \eta \frac{kV_f}{1 - kV_f(1 + \frac{1}{\gamma_1})} \left(1 - \frac{1}{\beta\gamma} \tanh\beta\gamma \right) \right]$$

Jednadžba 6 Općeniti
izraz za slobodno
skupljanje cementnog
kompozita s vlaknima
[21]

gdje je:

$$\eta = \frac{E_f}{E_m}; \quad \gamma = \frac{kl_f}{2r_f}; \quad \gamma_1 = \frac{kl_f}{2R}$$

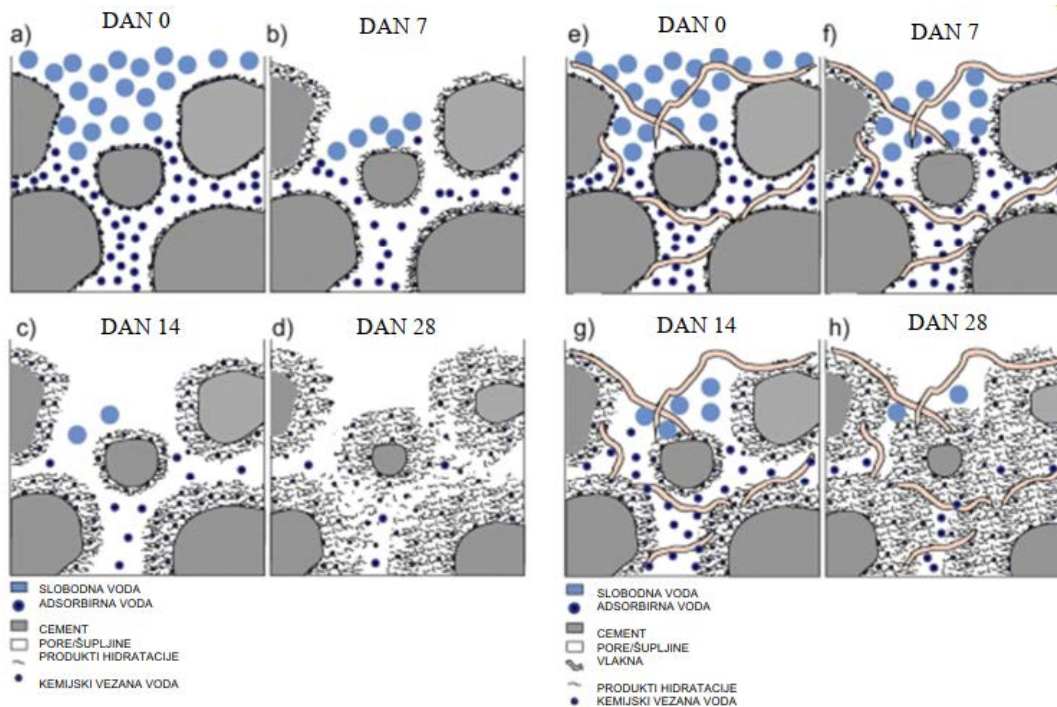
$$\beta = \left(\frac{1}{(1+V_m)\eta \log \gamma_2} \right)^{1/2}; \quad \gamma_2 = \left(\frac{1}{kV_f(1+1/\gamma_1)} \right)^{1/2}$$

Jedan od najvažnijih doprinosa će imati modul elastičnosti vlakna što je vidljivo iz jednadžbe 5 gdje porastom parametra η , to jest povećanjem modula elastičnosti vlakna ili smanjenjem modula elastičnosti cementne matrice, smanjuje se vrijednost deformacije kompozita. Prema literaturi [21], eksperimentalna ispitivanja pokazala su dobru korelaciju i podudaranja s jednadžbom 5. U radu [22] navode kako, da bi vlakna imala pozitivan učinak na sprječavanje pukotina, modul elastičnosti vlakna treba biti veći od modula elastičnosti matrice materijala. Budući da je krutost cementnog materijala u svježem stanju vrlo mala, tada će vlakna manjih modula elastičnosti imati doprinos, dok su u fazi nakon očvršćivanja strukture vlakna većih modula prikladnija. Prema radu [22], vlakna neće imati pozitivan

učinak ako im je modul puno veći od modula matrice iz razloga što vlakna s većim modulom zahtijevaju bolju prionjivost s matricom da bi djelovala i spriječila pukotine, a cementni kompozit u svježem stanju ne može to zadovoljiti. Dakle vlakna bi u pojedinim fazama trebala imati sličnija svojstva matrici da bi u toj fazi imala učinkovito djelovanje u pogledu premošćivanja pukotina i preuzimanja naprezanja uslijed deformacija.

Udio vlakana i njihova geometrija također su važni parametri na koje treba obratiti pozornost prilikom planiranja sastava. Postoji kritična vrijednost L/D omjera (u daljnjem tekstu L/D gdje je L duljina vlakna, a D promjer) za koju vrijedi da daljnje povećanje iznad te vrijednosti nema doprinosa u smanjenju skupljanja, u radu [21] navode kako L/D omjer veći od 50 za čelična vlakna nema gotovo nikakav učinak. U skladu s time je i tvrdnja iz rada [23] kojom navode da kratka vlakna s L/D omjerom manjim od 50 imaju dobru disperziju dok s druge strane vlakna s L/D omjerom >100 imaju tendenciju zapetljavanja to jest formiranja tako zvanih „ježeva“. Većina istraživanja koja su se bavila utjecajem promjera vlakna složna su oko toga da smanjenje promjera ima pozitivan utjecaj na kontrolu formiranja pukotina [22]. Što se tiče duljine vlakna, u literaturi ima puno ne slaganja oko toga pospješuju li dulja vlakna ponašanje kompozita ili ona imaju zanemariv učinak [22]. U radu [22] također je zaključeno da mješavine koje sadrže veća zrna agregata trebaju duža vlakna kao bi premostila pukotine u strukturi te to također vrijedi i za vlakna koja imaju lošiju prionjivost s matricom.

U različitim literaturama [21], [22] i [23] jednosložno pišu kako povećanje udjela vlakana u kompozitu vodi do smanjenja količine pukotina. No međutim, ako je udio vlakna previsok, u strukturi materijala će doći do formiranja zračnih džepova i pora što ima negativan utjecaj na mnoga ostala svojstva. Kod velike količine vlakna, pogotovo onih veće duljine, doći će do njihovog gomilanja i grudanja što formira kompozit s vlaknima vrlo loše disperzije. Dobra disperzija je ključna za to da bi vlakna vršila svoju ulogu koju imaju u matrici. Međutim, loša disperzija ne samo da poništava djelovanje vlakna već i pogoršava ostala bitna svojstva tog kompozita te otežava obradivost u svježem stanju. U radu [23] navode kako je ispitivanjima utvrđeno da udio ugljičnih vlakana od 0.1 % pokazuje najbolje rezultate u smanjenju pukotina. Nadalje, preporučuje se korištenje dodataka kao što je silicijska prašina kako bi se poboljšala obradivost te omogućila bolja disperzija vlakana [23].



Slika 9 Shematski prikaz mehanizma djelovanja vlakana (Izvor: [14])

Još jedan od razloga zašto će vlakna pogoršati obradivost je njihova velika specifična površina na koju će već pri miješanju navući puno vode, smanjiti konzistenciju mješavine te time pogoršati obradivost koja je bitna za kasnija svojstva u očvrslom stanju. Istraživanja spomenuta u radu [23] pokazala su kako hidrofилna vlakna imaju bolju disperziju od vlakna koja imaju hidrofobna svojstva. S time se slažu i zaključci iz rada [20] što pokazuje važnost svojstva hidrofobnosti ili hidrofилnosti na ponašanje vlakana, a na to svojstvo najčešće će utjecati korištena vrsta premaza. Naime premazi, kao što je glicerин, koji su topivi u vodi pridonijeti će dobroj disperziji dok oni hidrofobni i netopivi u vodi otežavaju raspršenost to jest vlakna će se zadržati u snopovima [20]. Vlakna osim mehanizma premošćivanja pukotina imaju sposobnost apsorpcije i zadržavanja vode te kasnije desorpcije vode u mikrostrukturu što pogoduje smanjenju deformacija od skupljanja. Na slici 9 shematski je prikazano kao vlakna mogu imati i funkciju čvrste strukture koja koristi za taloženje produkata hidratacije te se time progušćuje struktura što reducira skupljanja uslijed sušenja [14].

3.3 Primjena morta s dodatkom ugljičnih vlakana

Popravak dotrajalih armiranobetonskih konstrukcija ili elemenata nužan je radi postizanja njihovog predviđenog vijeka trajanja te radi osiguranja njihove sigurne uporabe. Kvalitetna sanacija će ojačati element u pogledu nosivosti ili poboljšati njegovu otpornost na agresivan okoliš te time omogućiti funkcionalnost i uporabivost konstrukcije. Postoje različite metode popravaka za različite vrste oštećenja, a one vrste oštećenja koje mogu zahtijevati uporabu sanacijskog morta su: lokalni popravci betona (*eng. patching*), povećanje zaštitnog sloja betona, pojačanje kompozitnim sustavima, površinska zaštita te sanacija pukotina [1].

Mortovi i betoni za popravak prema HRN EN 1504-3 dijele se, u odnosu na primjenu, na one za konstrukcijsku sanaciju i nekonstrukcijsku sanaciju [1]. Konstrukcijski popravak je onaj koji se odnosi na obnovu konstrukcijske cjelovitosti te mehaničke otpornosti i stabilnosti dok je nekonstrukcijski popravak onaj koji obnavlja geometriju ili estetiku te osigurava trajnost. O kojoj god vrsti popravka je riječ, mort korišten za sanaciju treba zadovoljiti niz zahtjeva u svrhu osiguranja željenog učinka.

Dimenzijska stabilnost morta, koja može biti narušena uslijed promjene vlage, jedno je od najbitnijih svojstava. Mort nanesen na podlogu će, zbog već opisanih mehanizama, imati tendenciju da se skuplja dok će ga čvrsta podloga sprječavati u tome. To će uzrokovati vlačna naprezanja te dodatno posmično naprezanje koje se javlja u ravnini veze što bi moglo negativno utjecati i na prionjivost [1]. Prionjivost je također važno svojstvo koje ovisi o svojstvu materijala te zbijanju tijekom ugradnje. Kvaliteta zbijenosti i ugradnje uvelike će ovisiti o reološkim svojstvima morta. Zahtijevana svojstva u svježem stanju često ovise o definiranoj debljini sanacijskog sloja. Ako je debljina veća od 5 cm, može se predvidjeti korištenje oplata za što će biti prikladnija tekuća konzistencija koja je pogodna za pumpu ili samozbijajući beton [1]. Kod manje debljine ili nemogućnosti ugradnje oplata, mort se nanosi gletanjem ili prskanjem. U tom slučaju materijal ne treba biti tekući, već je poželjno da jednom kad je ugrađen ostane u tom obliku dok ne veže, čak i na vertikalnim ploham ili u podgledu (tikotropno djelovanje) [1]. Zbog zahtjeva trajnosti, definirani v/c omjer često bude nizak (≤ 0.4) što rezultira većim deformacijama od autogenog skupljanja (poglavlje 2.1.2) te visokim tlačnim čvrstoćama iako nema nužne potrebe za time iz konstruktivnih

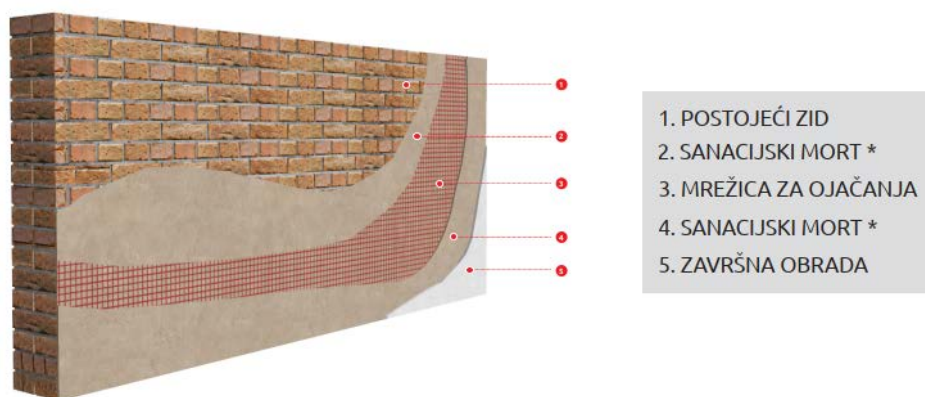
razloga. Mali moduli elastičnosti bit će povoljniji što se tiče skupljanja jer će naprezanja nastala spriječenim deformacijama biti manja što je modul manji [1]. Međutim ako je predviđeno da sanacija bude konstruktivna i da materijal za popravaka nosi u ravnini veze onda je potrebno osigurati da mort ima što sličniju tlačnu čvrstoću i modul podlozi na koju se nanosi[1].

Dodavanjem ugljičnih vlakna može se utjecati na svojstva i učinkovitost sanacijskog morta. Vlakna će mehanizmom premošćivanja pukotina smanjiti njihovu širinu i nastalu količinu tijekom deformacija od skupljanja, ali će i uvelike utjecati na reološka svojstva morta u svježem stanju. Ovisno o načinu primjene i ugradnje, smanjena obradivost može biti i pogodna ako je riječ o gletanju i prskanju jer povoljno utječe na tiksotropnost, to jest postojanost svježije mješavine nakon ugradnje na nehorizontalnim površinama.

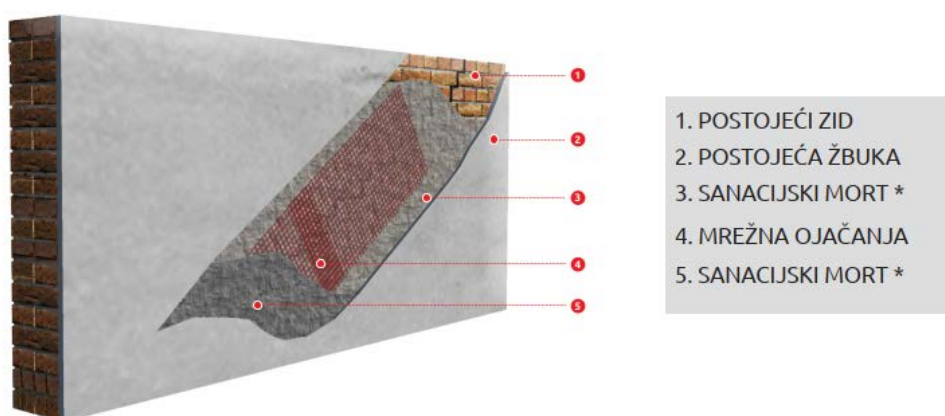
3.3.1 Vrste popravaka uz primjenu sanacijskog morta

Sanacija lokalnih pukotina i ojačanje zidnih konstrukcija FRCM sustavom

FRCM (*eng. Fibre Reinforced Cement Material*) sustav čine visokoduktilni mortovi niskog modula elastičnosti i odgovarajuća mrežica za ojačanje (staklena ili ugljična mrežica) koji osiguravaju posmično i vlačno ojačanje elementa kao i povećanje duktilnosti cijele konstrukcije uz minimalno povećanje mase i smanjenje postojećih dimenzija prostora u usporedbi s ostalim tehnikama ojačanja (slika 10 i slika 11) [24]. Prednosti ovog sustava također su i jednostavna i brza ugradnja te omjer cijene i kvalitete. Uloga mrežice u sustavu je da preuzme vlačna naprezanja, dok je mort zadužen za povezivanje s konstrukcijom i zaštitu mrežice od vanjskih utjecaja. Upravo iz tog razloga su najčešće korišteni mortovi s dodatkom ugljičnih vlakana koja smanjuju raspucavanje površine FRCM sustava.



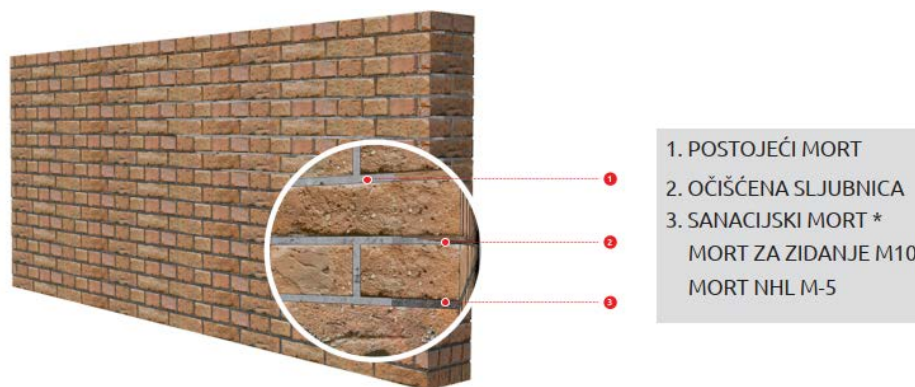
Slika 10: Ojačanje zidanih konstrukcija FRCM sustavom (Izvor: [24])



Slika 11: Sanacija lokalnih pukotina FRCM sustavom (Izvor: [24])

Ojačanje zida zamjenom morta u sljubnicama

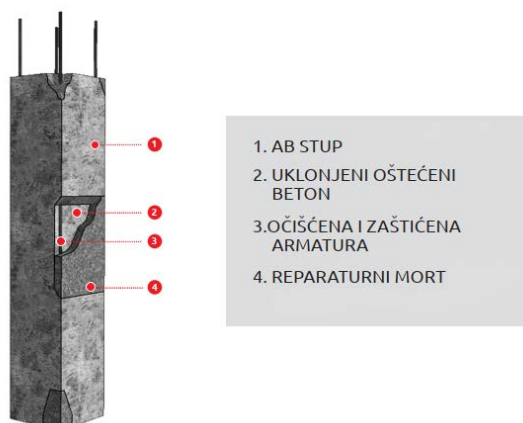
Zamjenom trusnog morta u sljubnicama zidanih konstrukcija, povećava se tlačna i posmična čvrstoća zida te smanjuju deformacije i vraća nosivi kapacitet (slika 12). Zamjenski mort sastavom i svojstvima mora po mehaničkim svojstvima biti kompatibilan sa postojećim zidom te dimenzijski stabilan te se iz tog razloga preporučuje korištenje morta s dodatkom vlakana koja će spriječiti moguću pojavu skupljanja [24].



Slika 12: Zamjena morta u sljubnicama (Izvor: [24])

Sanacija lokalnih oštećenja AB konstrukcija (eng. patching)

Postupak sanacije lokalnog oštećenja, „*patching*“ tehnika je popravka betonskih konstrukcija kojom se oštećeni i kontaminirani beton zamjenjuje sanacijskim mortom. Svrha ove tehnike je obnova estetskih i geometrijskih svojstva konstrukcije s ciljem poboljšanja trajnosti i sigurnosti. Postupak provođenja reprofilacije („*patching*“) obično se odvija u području zaštitnog sloja armature, a sastoji se od faza uklanjanja betona, pripreme površine, pripreme armature te ugradnje sanacijskog sloja (mort ili beton) (slika 13). Da bi popravak bio uspješan, sanacijski materijal to jest mort, treba osigurati zahtijevanu trajnost i kompatibilnost s podlogom. Mort s dodatkom ugljičnih vlakana imati će poboljšanu dimenzijsku stabilnost te je time smanjena mogućnost pojave pukotina koje su glavni uzrok prodora agresivnih tvari i narušavanja trajnosti.

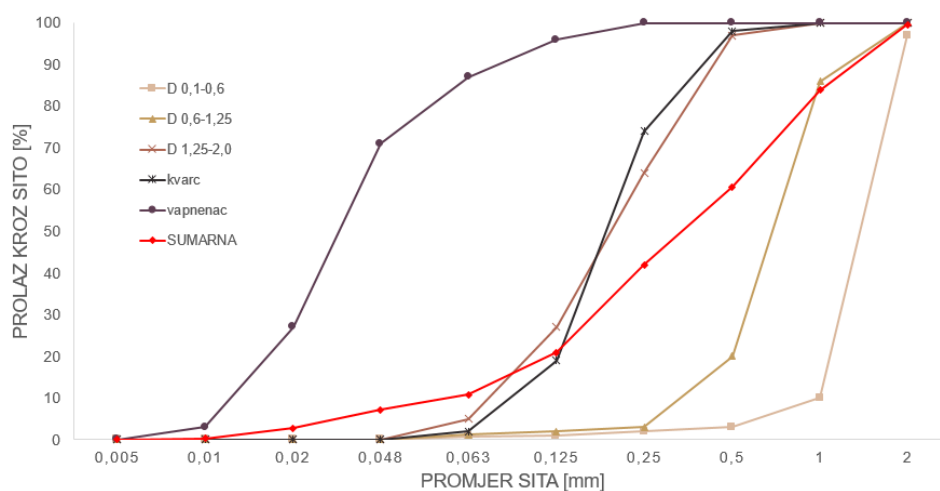


Slika 13 Popravak lokalnog oštećenja (Izvor: [24])

4 EKSPERIMENTALNI RAD

4.1 Materijali

Za izradu mješavina korištene su sljedeće komponente: cement CEM I 52.5 N, voda, superplastifikator (MasterGlenium ACE 430), vlakna i agregat. Agregat čine 3 frakcije dolomita, a to su: 0.1/0.6 mm, 0.6/1.25 mm i 1.25/2.0 mm te kvarcni pijesak frakcije 0.1-0.6 mm i vapnenački filer. Određeni su granulometrijski sastav agregata i sumarna krivulja te su prikazani na slici 14. Vlakna korištena u mješavinama su otpadna ugljična vlakna i tvornički proizvedena vlakna duljina 6 mm i 12 mm.



Slika 14: Krivulje prosijavanja agregata

Otpadna vlakna dobivena su iz proizvodnje mrežica i tekstila za građevinarstvo, odnosno kao ostatak na stroju te se svrstavaju u čisti otpad iz tvornice. Prije upotrebe, bila je potrebna obrada vlakana koja se sastojala od češljanja, kako bi se dobili uredni snopovi ujednačenih dužina vlakana. Slika 15 prikazuje izgled vlakna prije obrade, dok je na slici desno dan prikaz tvornički dobivenih vlakana. Otpadna vlakna je bilo potrebno rezati te su rezana na dvije

duljine, 6 mm i 12 mm, korištenjem hidraulične preše i noževa postavljenih na željenom razmaku. U tablici 1 su dana svojstva korištenih vlakna definirana u tehničkom listu.

Tablica 1: Svojstva vlakana

| Svojstvo | Mjerna jedinica | Otpadna vlakna | | Tvornička vlakna | |
|-------------------------|----------------------|----------------|------|------------------|----------|
| Gustoća | (g/cm ³) | 1,77 | | 1,8 | |
| Duljina vlakna | (mm) | 6 | 12 | 6 | 12 |
| Promjer vlakna | (μm) | 7 | | 7 | |
| L/D omjer | / | 850 | 1700 | 850 | 1700 |
| Vlačna čvrstoća | (GPa) | 4,0 | | 4,0 | |
| Vlačni modul | (GPa) | 250 | | 240 | |
| Produljenje pri prekidu | (%) | 1,6 | | 1,7 | |
| Vrsta premaza | / | Poliuretan | | Poliuretan | Glicerin |
| Maseni udio premaza | (%) | 1,0 | | 2,7 | 4,0 |

4.2 Sastav mješavina, postupak miješanja i priprema uzoraka

Zamiješano je 9 mješavina morta od kojih 6 u svom sastavu ima otpadna ugljična vlakna, 2 mješavine su s dodatkom tvorničkih vlakana te je jedna referentna mješavina bez vlakana. Sastav svih mješavina je dan u tablici 2. Korišten je postupak miješanja prikazan na slici 16, a ukupno trajanje miješanja je bilo 6 minuta. Oznake mješavina dane su prema tome sadrže li vlakna i koji je njihov izvor, koja je dužina vlakna te prema njihovom udjelu u ukupnom

volumenu mješavine; tako na primjer *UV* označava ugljična vlakna, *o* znači da se radi o otpadnim vlaknima dok je *t* oznaka za tvornički proizvedena vlakna.

Dakle oznake mješavina imaju sljedeće značenje:

- I. REF- referentna mješavina bez ugljičnih vlakana
- II. oUV 0,5%- 6 mort s 0,5 % udjela otpadnih ugljičnih vlakna duljine 6 mm
- III. oUV 0,5%- 12 mort s 0,5 % udjela otpadnih ugljičnih vlakna duljine 12 mm
- IV. oUV 1%- 6 mort s 1,0 % udjela otpadnih ugljičnih vlakna duljine 6 mm
- V. oUV 1%- 12 mort s 1,0 % udjela otpadnih ugljičnih vlakna duljine 12 mm
- VI. oUV 2% -6 mort s 2,0 % udjela otpadnih ugljičnih vlakna duljine 6 mm
- VII. oUV 2% -12 mort s 2,0 % udjela otpadnih ugljičnih vlakna duljine 12 mm
- VIII. tUV 1%- 6 mort s 1,0 % udjela tvornički proizvedenih ugljičnih vlakna duljine 6 mm
- IX. tUV 1%- 12 mort s 1,0 % udjela tvornički proizvedenih ugljičnih vlakna duljine 12 mm



a)



b)

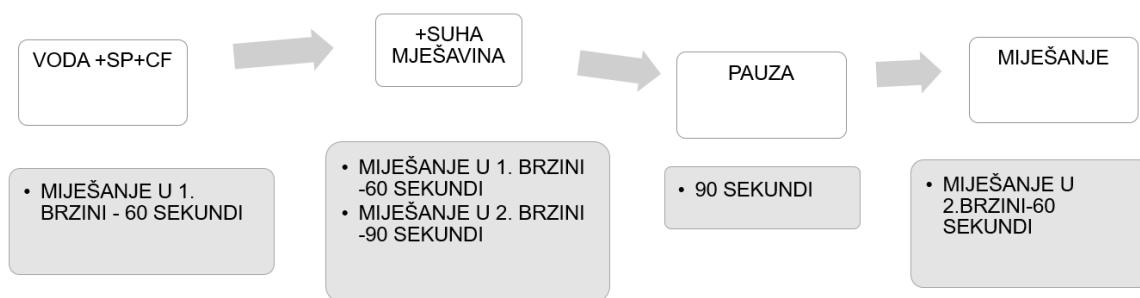
Slika 15: Obrada ugljičnih vlakna: a) zapetljani snopovi otpadnih vlakana, b) tvornička vlakna

Za sve mješavine je vodo- vezivni odnos bio konstantan 0.40, dok je udio superplastifikatora bio 0.45 % mase cementa. Tijekom procesu miješanja mortova s dodatkom ugljičnih vlakna

zamijećeno je da je obradivost mješavine smanjena te je bilo potrebno modificirati postupak, dodan je superplastifikator i produljeno je trajanje miješanja (slika 17). U tablici 3 dani su podaci o količinama dodanog superplastifikatora te trajanju produljenja miješanja za svaku mješavinu.

Tablica 2: Sastav mješavina

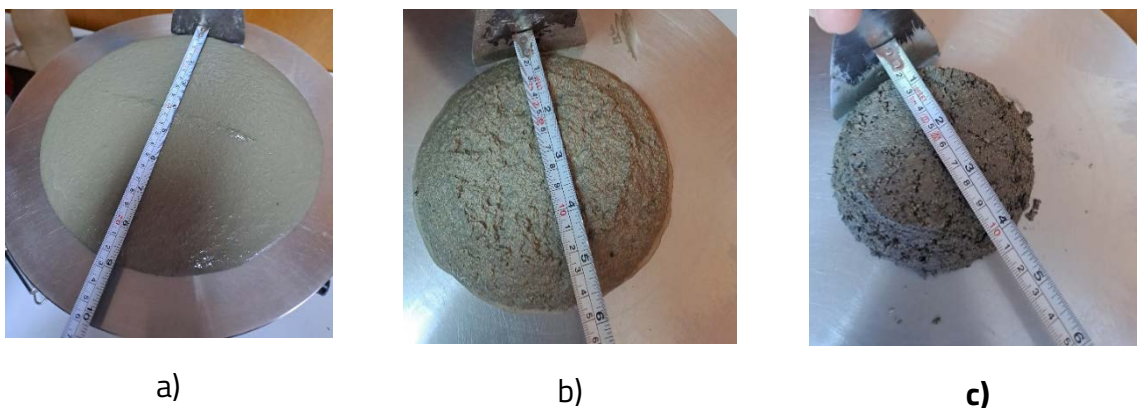
| Komponente (kg/m ³) | Mješavina | | | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| | REF | oUV 0,5%- 6 | oUV 0,5%- 12 | oUV 1% - 6 | oUV 1%- 12 | oUV 2% - 6 | oUV 2% - 12 | tUV 1%- 6 | tUV 1%- 12 |
| Cement (CEM I 52,5 N) | 770 | 770 | | 770 | | 770 | | 770 | |
| Voda | 305 | 305 | | 305 | | 305 | | 305 | |
| Superplastifikator | 3,47 | 3,47 | | 3,47 | | 3,47 | | 3,47 | |
| Vlakna | 0 | 8,9 | | 17,7 | | 35,4 | | 17,7 | |
| Kvarcni pijesak (0,1-0,6 mm) | 231 | 228 | | 225 | | 220 | | 225 | |
| Dolomit (0,1/0,6 mm) | 310 | 307 | | 303 | | 296 | | 303 | |
| Dolomit (0,6/1,25 mm) | 397 | 392 | | 388 | | 379 | | 388 | |
| Dolomit (1,25/2,0 mm) | 161 | 159 | | 158 | | 154 | | 158 | |
| Vapnenački filer | 118 | 116 | | 115 | | 112 | | 115 | |



Slika 16: Postupak miješanja

Tablica 3: Udio dodanog superplastifikatora

| <i>Mješavina</i> | Dodan superplastifikator (g) | Ukupna količina superplastifikatora | Trajanje produljenog miješanja (s) |
|--------------------|-------------------------------------|--|---|
| <i>REF</i> | / | / | / |
| <i>oUV 0,5%-6</i> | 3 | 6,47 | 30 |
| <i>oUV 0,5%-12</i> | | | |
| <i>oUV 1%-6</i> | 9,1 | 12,57 | 90 |
| <i>oUV 1%-12</i> | | | |
| <i>oUV 2%- 6</i> | 15,4 | 28,87 | 90 |
| <i>oUV 2%- 12</i> | | | |
| <i>tUV 1%- 6</i> | 10,1 | 13,57 | 90 |
| <i>tUV 1%- 12</i> | 12,73 | 16,2 | 90 |



Slika 17: Gusta konzistencija mješavine s vlaknima; a) referentna mješavina, b) 1 % vlakana mm, c) 2 % vlakana

4.3 Metode ispitivanja

Nakon miješanja odmah su provedena ispitivanja u svježem stanju te je mort ugrađen u pripremljene kalupe. Ispitivanja u svježem stanju sastojala su se od određivanja konzistencije, gustoće te mjerenja temperature i sadržaja pora. Na uzorcima u očvrslulom stanju provodila su se mjerenja volumenske deformacije, odnosno skupljanje uslijed sušenja te autogeno skupljanje uz koje se pratila promjena relativne vlažnosti te početak i kraj vezivanja.

U tablici 4 navedene su korištene norme za svako ispitivanje, dimenzije ispitanih uzoraka te njihov broj po mješavini. Pripremljena su tri uzorka za mjerenje autogenog skupljanja, tri uzorka za mjerenje skupljanja uslijed sušenja te jedan uzorak za mjerenje temperature. Svi kalupi su bili u obliku prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Nakon ugradnje u kalupe, uzorci su se čuvali u laboratorijskim uvjetima na $20 \pm 2^\circ \text{C}$ i relativnoj vlažnosti od najmanje 55 %.

Tablica 4: Metode ispitivanja svojstva morta

| Svojstvo | Norma | Dimenzije uzoraka [mm] | Broj uzoraka po mješavini |
|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Gustoća | HRN EN 12350-6:2019 | / | / |
| Sadržaj pora | HRN EN 12350-5:2009 | / | / |
| Konzistencija | HRN EN 1015-3:2000/A1:2005 | / | / |
| Početak i kraj vezivanja | HRN EN 480-2 | / | 1 |
| Skupljanje uslijed sušenja | HRN EN 12390- 1 | 40 x 40 x 160 | 3 |
| Autogeno skupljanje | / | 40 x 40 x 160 | 3 |

4.3.1 Svojstva u svježem stanju

Gustoća morta ispituje se na način da se uzorak u svježem stanju ugradi u kalup poznatog volumena, odredi mu se masa te se iz omjera poznate mase i volumena odredi gustoća (slika 18a). Za određivanje sadržaja pora koristi se uređaj koji radi na principu Boyle- Marriottovog zakona (slika 18b). U uređaj koji je zabrtvljen sa svih strana se pomoću poznatog pritiska zraka utiskuje voda. Smanjenje volumena zraka u uzorku se očitava putem smanjenja razine vode iznad uzorka te se kalibrira u postotak zraka u uzorku.



a) Određivanje gustoće



b) Određivanje udjela pora porometrom



c) Određivanje konzistencije na stoliću za potresanje

Slika 18: Ispitivanja u svježem stanju: a), b), c)

Obradivost svježeg uzorka ispituje se na način da se mort ugrađuje u kalup konusnog oblika u dva sloja pri čemu se svaki sloj zbija s 10 udaraca. Nakon zbijanja, konus se pažljivo podiže te se uzorak potresa uz pomoć stolića za potresanje koji se 15 puta diže i spušta. Nakon toga izmjere se dva međusobno okomita promjera rasprostiranoga uzorka (slika 18 c).

Temperatura svježe mješavine mjerila se digitalnim termometrom svaki put neposredno nakon završetka miješanja.

4.3.2 Početak i kraj vezivanja

Vrijeme vezivanja određivano je automatskim Vicatovim aparatom na uzorcima potopljenim u vodi kojima se prati penetracija igle. Od trenutka završetka miješanja do trenutak u kojem je igla penetrirala na dubini od 4 mm iznad dna uzorka smatra se vremenom početka vezivanja, a trenutak kada igla više ne penetrira dublje od 2,5 mm u uzorak definira vrijeme kraja vezivanja (slika 19) [25]. U poglavlju 2.1.1 definiran je razlog važnosti ovog ispitivanja i kako proces vezivanja ima utjecaj na početak autogeno skupljanje.



Slika 19: Mjerenje vremena vezivanja automatskim Vicatovim aparatom

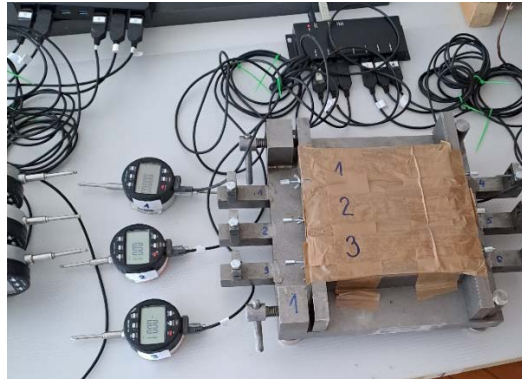
4.3.3 Određivanje dimenzijskih promjena

Autogeno skupljanje ispituje se na uzorcima u obliku prizme dimenzija 40 x 40 x 160 mm. Priprema kalupa se sastoji od toga da se s unutarnje strane oblože plastičnom folijom, a mjesta spajanja rubova folije se zabrtve silikonom te se na dno stavi teflonska pločica koja reducira trenje uzorka (slika 20).



Slika 20: Priprema kalupa za mjerenje autogenog skupljanja

Na suprotnim krajevima kalupa na sredini se nalaze rupice kroz koje se provuku i zabrtve mjerne igle koje se učvrste navojima. Nakon ugrađivanja mješavine u kalupe navoji se otpuste da se igle mogu slobodno pomicati skupa s uzorkom te se na njihov drugi kraj poveže mjerna ura. Svaki uzorak je sa obje strane povezan na digitalnu mjernu uru koje su povezane na računalo i svakih 5 minuta bilježi pomake. Tijekom mjerenja svi uzorci su bili zatvoreni te čuvani u laboratorijskim uvjetima od $20 \pm 2^\circ \text{C}$ i relativnoj vlažnosti od najmanje 50 %. Na slici 21 prikazani su pripremljeni uzorci s opremom za mjerenje te je vidljivo kako je osim oblaganja plastičnom folijom uzorke bilo potrebno s gornje strane zaštititi ljepljivom trakom kako bi se osiguralo sprječavanje isušivanja i evaporacije vlage iz ispitnih uzoraka i time postiglo da se dobiveni rezultati odnose na deformacije uzrokovane isključivo autogenim skupljanjem. Budući da na autogeno skupljanje utječe temperaturna promjena uslijed hidratacije, u jedan je zaseban uzorak bio ugrađen termočlanak kojim se pratila temperatura.

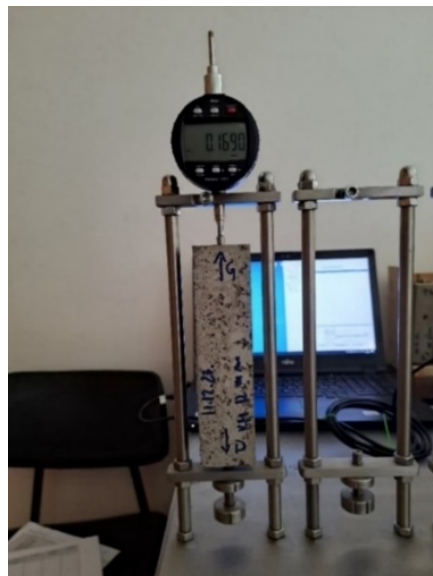


Slika 21: Uređaj za mjerenje autogenog skupljanja

Korištena je metoda mjerenja linearnih deformacija, a vrijednost autogenog skupljanja/ bubrenja izračunate se preko jednadžbe definirane u poglavlju 2.1.3 *Metode ispitivanja autogenog skupljanja*

Deformacije skupljanja uslijed sušenja mjerile su se pomoću uređaja za mjerenje skupljanja uslijed sušenja koji se sastoji od okvira predviđenog za uzorke dimenzija 40 x 40 x 160 mm te od mjerne ure za automatsko mjerenje rezolucije 0,0005 prema Graff- Kaufmann metodi.

Uzorci su imali ugrađene repere na koje se postavljala mjerna ura kojom je mjerena promjena u odnosu na početnu vrijednost (slika 22). Mjerenje promjene duljine i mase uzoraka provodilo se u razdoblju od 28 dana.



Slika 22: Mjerenje skupljanja uslijed sušenja

5 REZULTATI I DISKUSIJA

5.1 Svojstva u svježem stanju

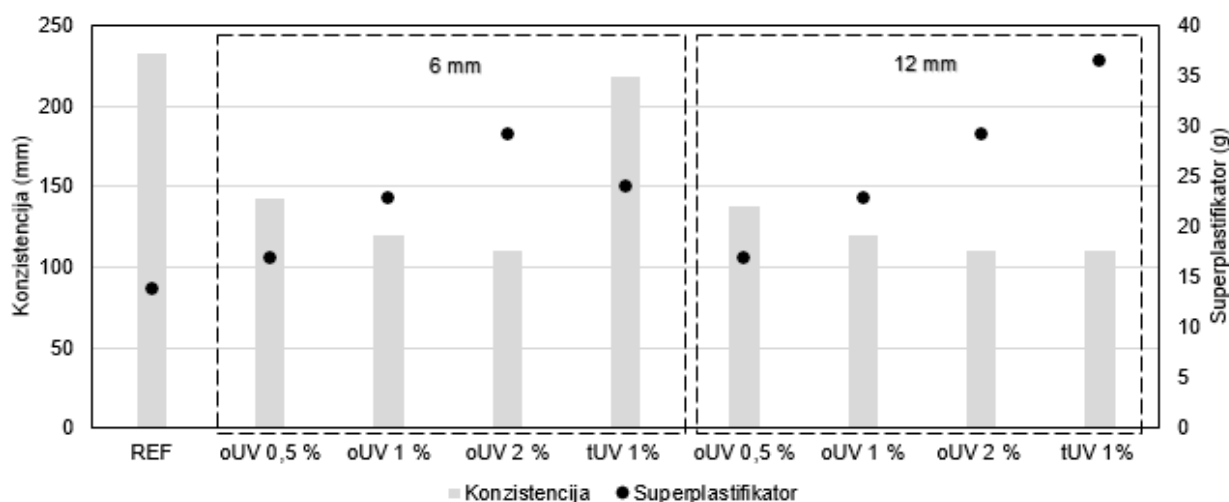
Svi rezultati ispitivanja svojstava u svježem stanju dani su u tablici 5. Iz prikazanog je vidljivo da prisutnost vlakana u mortu utječe na njegovu obradivost i količinu zraka.

Tablica 5: Svojstva u svježem stanju

| Svojstvo | Gustoća (g/cm ³) | Konzistencija r_{sred} (mm) | Sadržaj zraka (%) |
|-------------|---------------------------------|---|----------------------|
| REF | 2,277 | 233 | 3,3 |
| oUV 0,5%-6 | 2,24 | 143 | 5,4 |
| oUV 0,5%-12 | 2,286 | 138 | 4 |
| oUV 1%-6 | 2,22 | 120 | 5,5 |
| oUV 1%-12 | 2,217 | 120 | 5,5 |
| oUV 2%-6 | 2,151 | 110 | 6,4 |
| oUV 2%-12 | 2,166 | 110 | 5,5 |
| tUV 1%- 6 | 2,234 | 218 | 4,6 |
| tUV 1%- 12 | 2,252 | 110 | 5,8 |

Povećanjem udjela ugljičnih vlakana dolazi do smanjenja obradivosti mješavina, odnosno smanjenja vrijednosti konzistencije. Konzistencija mješavina koje sadrže vlakna smanjena

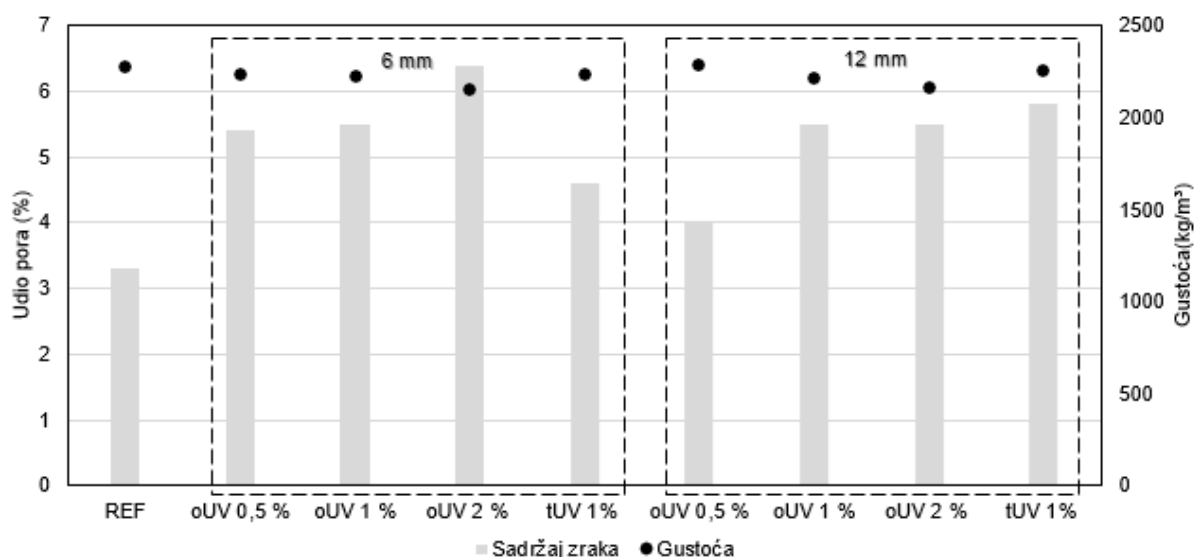
je za prosječnih 43 % u odnosu na referentnu mješavinu, što je vidljivo i na slici 23. Pri tome veličina vlakana i povećanje udjela superplastifikatora nemaju značajniji utjecaj, već je najveći utjecaj količina vlakana. Dobivene vrijednosti su u skladu s literaturom [2], [27]. Do smanjenja konzistencije dolazi zbog velikog L/D omjera vlakna i vrijednosti njihovog udjela u mješavini što je detaljnije opisano u poglavlju 3.2.



Slika 23: Odnos konzistencije mješavina i količine superplastifikatora

Odstupanje od trenda pokazuje mješavina tUV 1% - 6 koja, unatoč tome što sadrži vlakna, pokazuje svojstva sličnija referentnoj mješavini. Također treba napomenuti da je odstupanje neočekivano budući da tUV 1%-6 ima istu vrstu premaza kao i otpadna vlakna, dok tUV 1%-12 unatoč drugačijoj vrsti premaza prati trend ponašanja oUV mješavina. Naime, vrsta premaza vlakna može uvelike utjecati na njihovo ponašanje u svježoj mješavini te time uvjetovati svojstva u svježem i očvrslulom stanju. Sve oUV mješavine sadrže vlakna s poliuretanskim premazom, koji je hidrofoban i ne topiv u vodi, dok tUV 1%-12 sadrži vlakna s glicerinskim premazom. Hidrofobni premazi koji nisu topivi u vodi otežavaju disperziju vlakana dok će topivi premaz pospješiti raspršenost. No međutim, u radu [28] su ispitivanja provedena na ugljičnim vlaknima pokazala da vrsta premaza koja se navodi u tehničkom listu proizvođača ne odgovara dobivenim rezultatima. Točnije, ispitani uzorci su se dali

rezultate koji ukazuju na mogućnost postojanja premaza na bazi silana na ugljičnim vlaknima usprkos navodima proizvođača da su vlakna tretirana poliuretanskim premazima. U tablici 5 također se može vidjeti da mješavine s vlaknima imaju povećani udio pora te posljedično i manju gustoću. Ta ovisnost je jasnije prikazana na slici 24.



Slika 24: Utjecaj udjela pora na gustoću mješavine

U mješavinama s dodatkom vlakana zamijećen je porast sadržaja pora u prosjeku od 40 % u odnosu na referentnu mješavinu, shodno tome je došlo do opadanja gustoće u prosjeku od 2.5 %. Povećanjem količine vlakana u mješavini dolazi do povećanja udjela pora, međutim duljina vlakana nema značajniji utjecaj.

Trebalo bi napomenuti da udio pora uvelike ovisi i o načinu i duljini trajanja miješanja. Budući da je dodavanje vlakana pogoršalo obradivost i da je bilo potrebno dodati superplastifikator u mješavine, time je bilo potrebno produžiti miješanja za 30 do 90 sekundi te su na taj način zahvaćene određene količine zraka u same mješavine.

Kao što je primijećeno u jednom od prijašnjih istraživanja [27], kada udio vlakana u mješavini dosegne određenu vrijednost dolazi do nemogućnosti disperzije vlakana te nastaju njihovi grumeni i snopovi koji također uzrokuju zračne džepove. Ta se pojava može primijetiti i u

ovom radu te je na slici 25 prikazana usporedba uzorak oUV 2%- 6 i REF, u očvrslom stanju, gdje se vidi kako je struktura uzorka s vlaknima vrlo nepravilna i porozna što je posljedica upravo zračnih džepova koja su formirana od strane vlakana.



a) Izgled uzorka REF



b) Izgled uzorka oUV 2% - 6

Slika 25: Usporedba izgleda uzorka REF i oUV 2% - 6

Na slici 24 se također može primijetiti da uzorak tUV 1% - 6, unatoč udjelu vlakana od 1%, opet ima svojstva vrlo slična referentnoj mješavini to jest udio pora nije toliko povećan kao što je kod ostalih mješavina. To da se uzorak tUV 1% - 6 ponaša slično kao referentna

mješavina vidljivo je i iz njegovog presjeka (slika 26 b) dok uzorak oUV 1% - 6 (slika 26 a) ima bolju raspršenost te postoji veći utjecaj vlakna što je onda vidljivo i na svojstvima u svježem stanju.



a) oUV 1% - 6

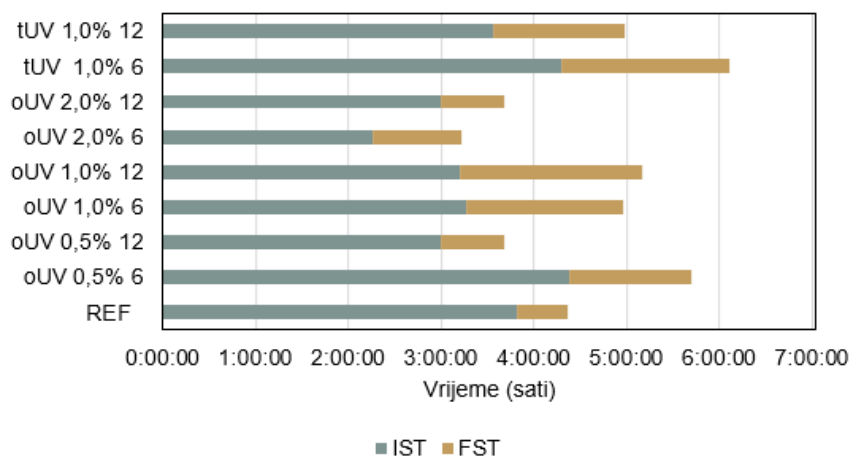


b) tUV 1% - 6

Slika 26: Razlike u raspršenosti vlakna u mješavini

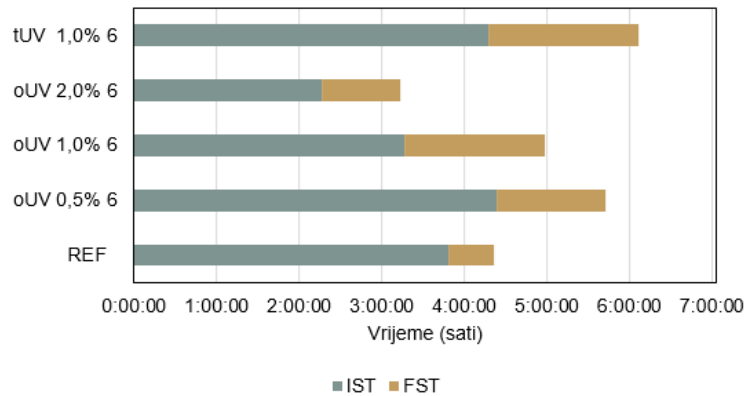
5.2 Početak i kraj vezivanja

Na slici 27 prikazani su rezultati vremena vezivanja svih mješavina, koji su određeni automatskim Vicatovim aparatom, gdje IST (*eng. initial setting time*) predstavlja početak vezivanja a FST (*eng. final setting time*) kraj vezivanja.

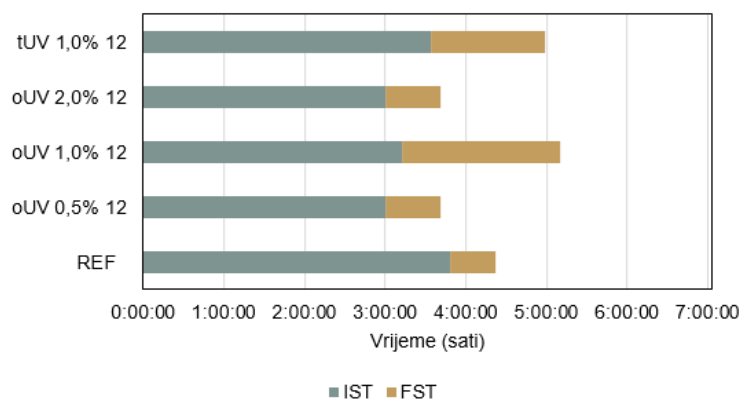


Slika 27: Vrijeme vezivanja

Na slici 28 su rezultati odvojeni na one dobivene na vlaknima 6 mm i na one s vlaknima od 12 mm te je vidljiva njihova usporedba s referentnom mješavinom. Može se uočiti da ponašanje uzoraka ne prati jedinstveni trend te da kod ovih mješavina duljina i udio vlakana nisu zaslužni za odgodu početka vezivanja ili brže postignut početak vezivanja, s obzirom na referentnu mješavinu. Odgoda početka vezivanja je prisutna kod oUV 0,5% 6 i tUV 1% 6 mješavina. S druge strane mješavine oUV 0,5% 12, oUV 1% 6, oUV 1% 12, oUV 2% 6, oUV 2% 12 i tUV 1% 12 brže su postigle vrijeme početka vezivanja ali unatoč tome oUV 1% 6, oUV 1% 12 i tUV 1% 12 su kraj vezivanja postigle nakon referentne mješavine to jest duže im je trebalo da vežu. Moglo bi se zaključiti da je kod ovih mješavina više utjecaja na početak i kraj vezivanja imalo miješanje prilikom kojeg su bile dodavane određene količine superplastifikatora te time produžena trajanja samih miješanja.



a)



b)

Slika 28 Vrijeme vezivanja: a) vlakna duljine 6 mm, b) vlakana duljine 12 mm

5.3 Određivanje dimenzijskih promjena

5.3.1 Autogeno skupljanje

U nastavku rada prikazani su rezultati dobiveni mjerenjem autogenih deformacija, na uzorcima prizme 40 x 40 x 160 mm. Mjerenje za svaku mješavinu vršilo se na tri uzorka, za koja su određene srednje vrijednosti u vremena od 7 dana prikazane na slici 28 i slici 27.

Na slici 28 dan je prikaz krivulja autogenih deformacija za pojedinu mješavinu te pripadne krivulje promjene relativne vlažnosti. U razdoblju od prvih 24 sata uočena je pojava bubrenja kod svih mješavina osim kod oUV 2% -12.

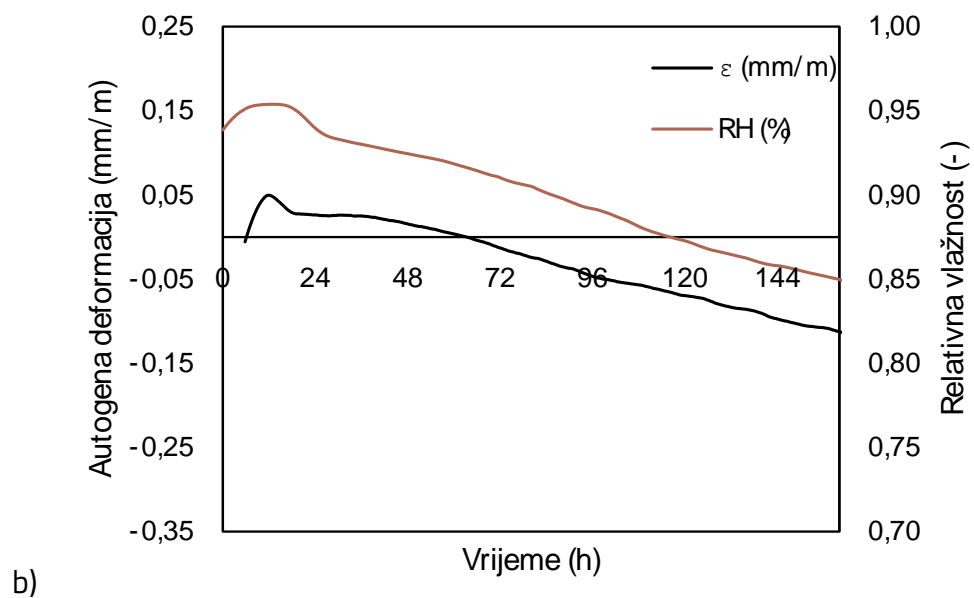
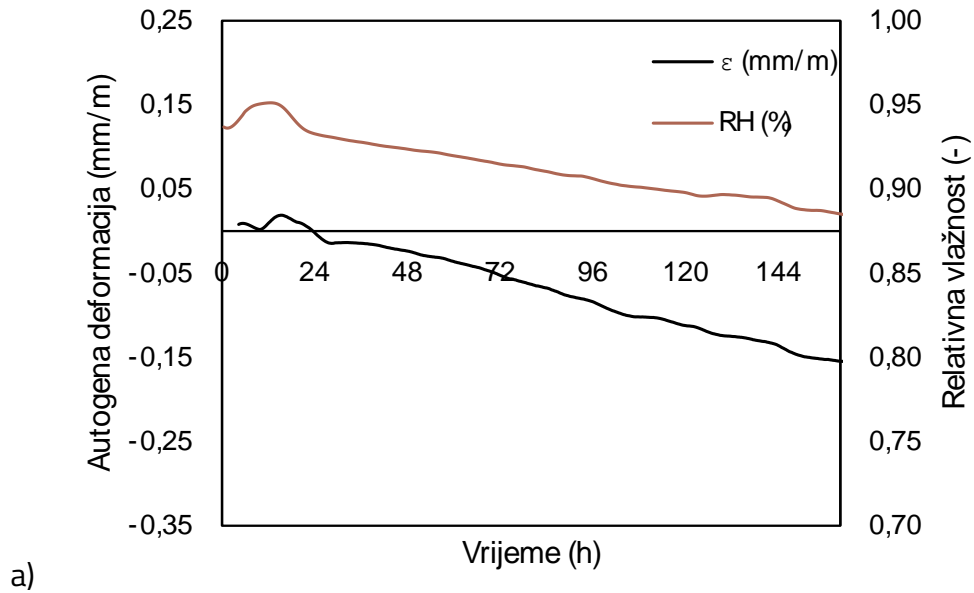
Do bubrenja dolazi nakon što se ponovno apsorbira izdvojena voda te zatim komponente u mikrostrukturi, koje još nisu hidratizirale, reagiraju s vodom i nastaju novi produkti hidratacije. Uočljivo je da se kod svake mješavine točka pada relativne vlažnosti poklapa s trenutkom kada deformacije uzoraka iz bubrenja prelazi u autogeno skupljanje. To se slaže s činjenicom da dolazi do pojačanog samoisušivanja uzorka zbog potrebe za vodom uslijed procesa hidratacije koji počinje trošenjem vode unutar finih pora uzoraka te samim time smanjuje njegovu vlažnost i uzrokuje deformacije skupljanja.

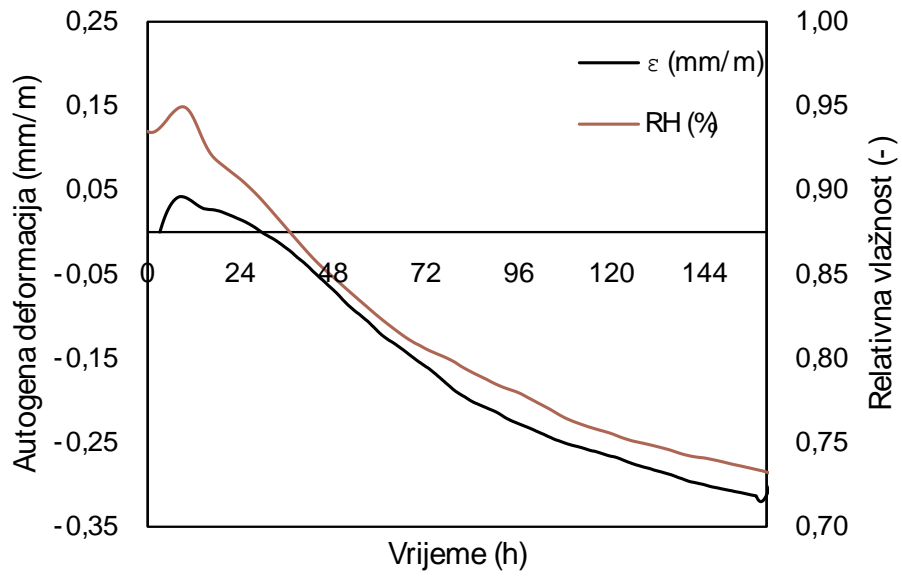
Najveće odstupanje, s obzirom na ostale mješavine, pokazuje mješavina s tvorničkim vlaknima od 12 mm koja unatoč početnom bubrenju na kraju ima iznos skupljanja od -0.296 mm/m što je ujedno i najveća vrijednost skupljanja u odnosu na sve mješavine. Graf relativne vlažnosti za uzorak tUV 1%-12 (slika 28 c) ima najbrži pad krivulje te time i najveću razliku relativne vlažnosti na početku i na kraju to jest relativna je vlažnost pala sa 95 % na oko 75 % što je pad od približno 20 %, dok je za ostale mješavine pad vlažnosti iznosio tek oko 5 – 10 %. Sukladno tome ponaša se i graf autogenog skupljanja kod kojeg je isto vidljivo naglo dostizanje velikih vrijednosti deformacije.

S druge strane, mješavina oUV 2%-6 u prvih 24 sata doseže visoke vrijednosti deformacije od bubrenja te nakon što dođe do trenutka početka padanja relativne vlažnosti uzorka, pad je vrlo blag te se u konačnici dosegne pad relativne vlažnosti od svega 3 %. Blagi nagib krivulje relativne vlažnosti prati i nagib krivulje deformacija od skupljanja koje tako ne dosegnu velike vrijednosti te vrijednosti bubrenja za ovaj uzorak ostaju dominantne. Kod mješavine oUV 2%-12 deformacije od samoisušivanja od početka mjerenja nadmašuju vrijednosti bubrenja što se vidi iz grafa (slika 28 i) gdje krivulja ostaje u domeni skupljanja cijelo vrijeme te to na kraju rezultira vrijednostima skupljanja većim od referentne mješavine.

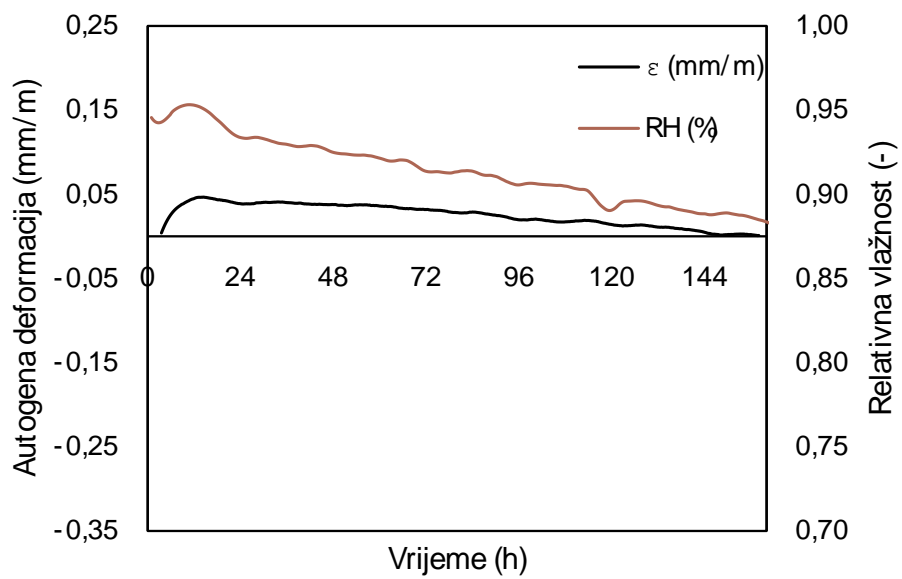
U slučaju mješavina oUV 0,5%-6, oUV 0,5%-12, oUV 1%-6 i tUV 1%-6 faze bubrenja izražene te uzorci naknadno razvijaju dosta niže vrijednosti autogenog skupljanja nakon 7 dana. Iz

toga proizlazi da ako dolazi do većih ekspanzija u ranoj dobi, konačne će vrijednosti skupljanja biti niže.

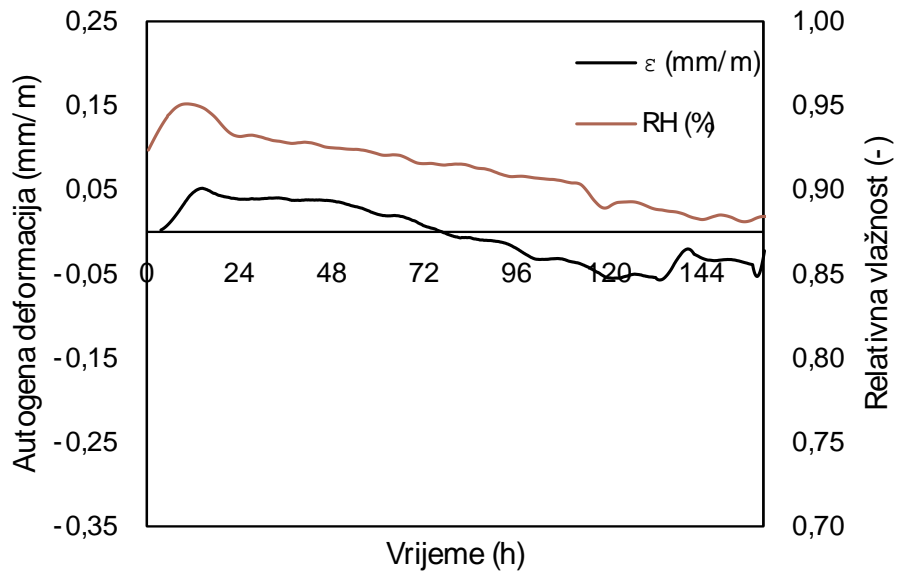




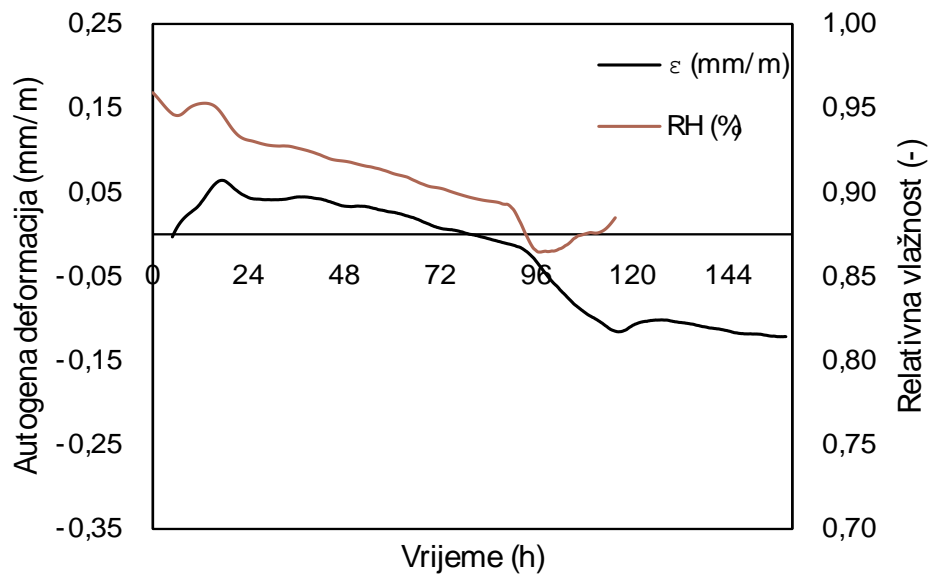
c)



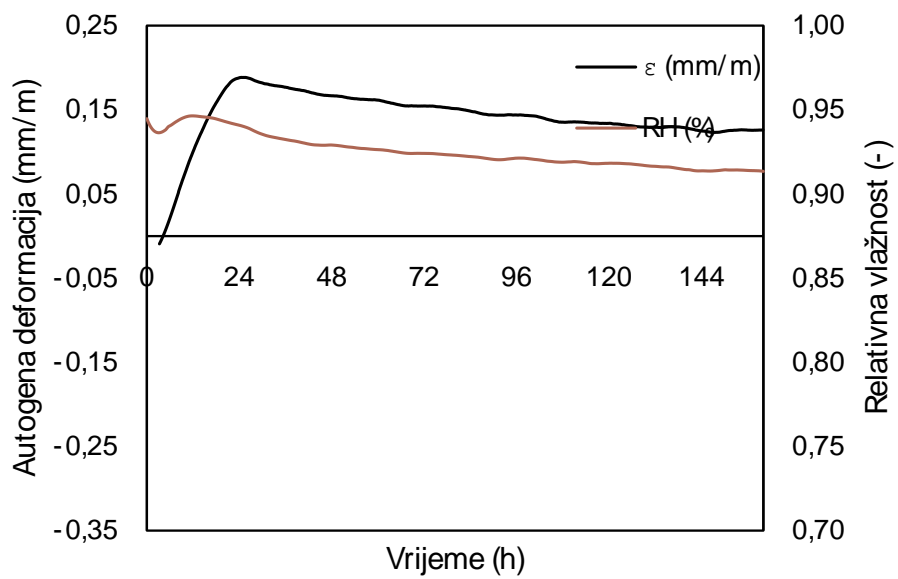
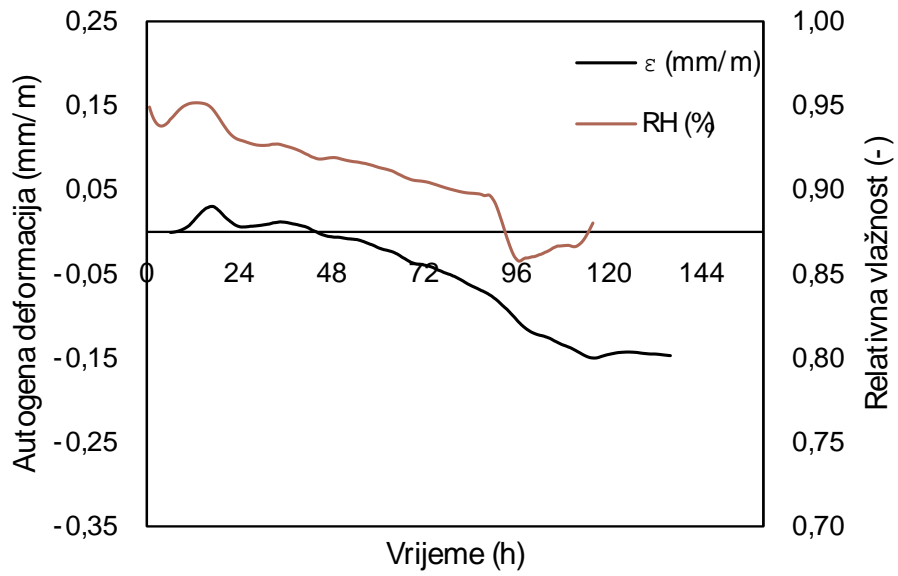
d)

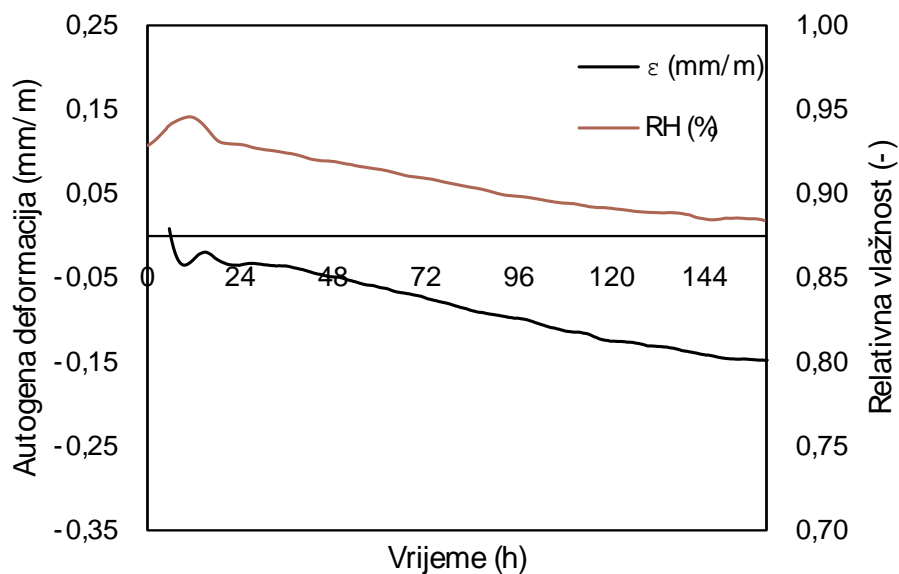


e)



f)



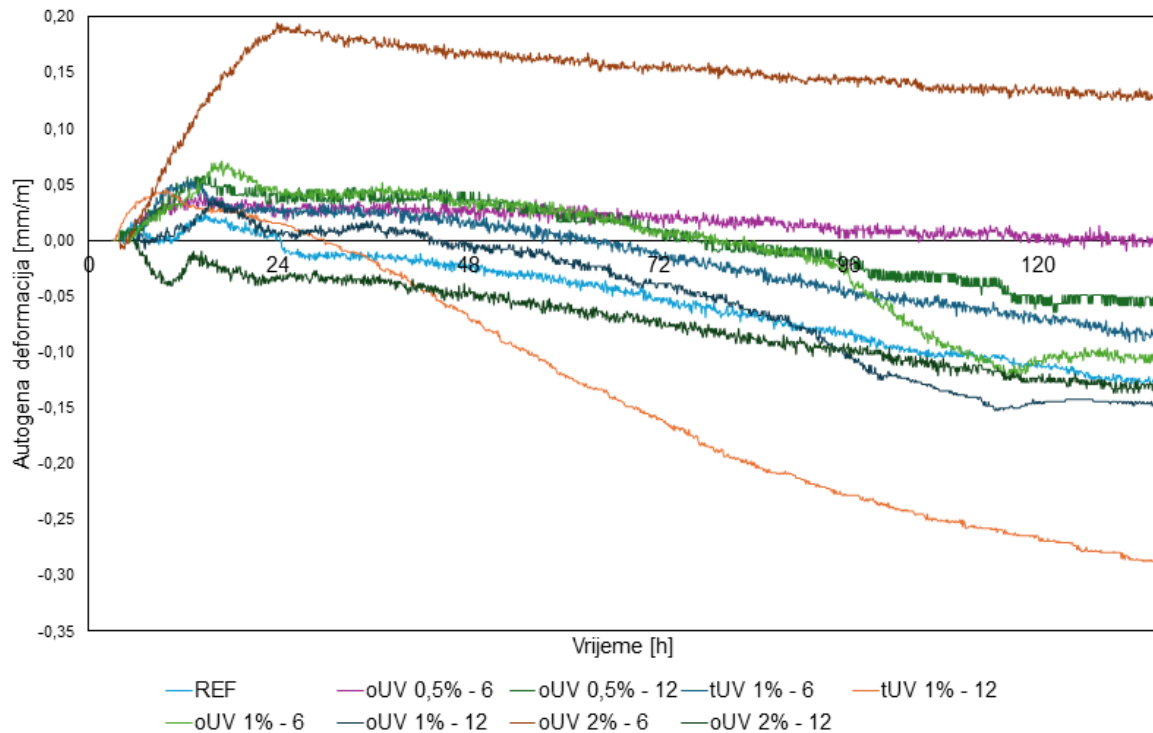


i)

Slika 29: Autogeno skupljanje: a) Referentna mješavina, b) i c) Mješavine s tvorničkim vlaknima (1 % - 6, 1 % - 12), d), e), f), g), h), i) Mješavine s otpadnim vlaknima (0,5 % - 6, 0,5 % - 12, 1%-6, 1%-12, 2%-6, 2%-12)

Promatrajući dobivene rezultate, na slici 30, može se vidjeti da najveće vrijednosti skupljanja imaju mješavine oUV 2%-12 i tUV 1%-12 čije su vrijednosti veće u odnosu na referentnu mješavinu. Njihove apsolutne vrijednosti autogenog skupljanja nakon 7 dana iznosile su: 0,296 mm/m (tUV 1%-12) > 0,171 mm/m (oUV 2%-12) > 0,163 mm/m (REF).

Niže vrijednosti skupljanja su dobivene kod mješavina tUV 1%-6 i oUV 1%-6 čije apsolutne vrijednosti iznose: 0,131 mm/m (tUV 1%-6) i 0,121 mm/m (oUV 1%-6). Najbolji rezultati dobiveni su na mješavinama s 0,5 % udjela vlakana s vrijednostima skupljanja od 0,014 mm/m (oUV 0,5%-6) i 0,055 mm/m (oUV 0,5%-12) gdje od te dvije mješavine s vlaknima duljine 6 mm daje najmanje vrijednosti skupljanja, odnosno deformacije su joj za cca 92 % manje u odnosu na referentnu mješavinu.



Slika 30: Krivulje autogenih deformacija

Iz dobivenih rezultata vidi se da mješavine s udjelom vlakana od 0.5 % imaju najmanje vrijednosti skupljanja u odnosu na referentnu mješavinu iz čega se može zaključiti da bi količina vlakana od 0.5 % na volumen mješavine bila najoptimalnija s obzirom na ostale količine u ovom istraživanju.

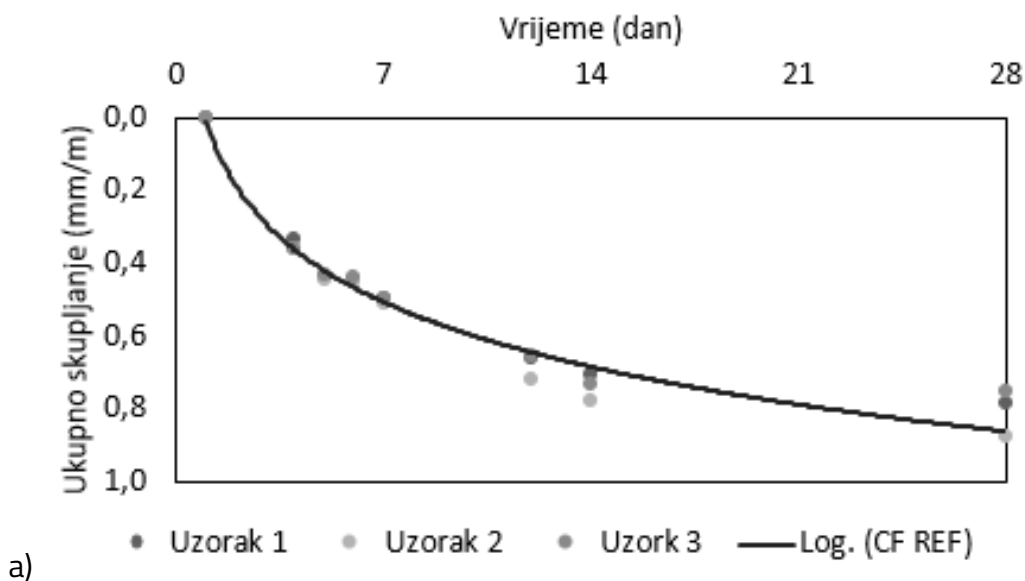
Mješavine s udjelom od 1 % koje sadrže vlakna duljine 6 mm pokazuju bolje ponašanje u pogledu skupljanja od mješavina s vlaknima duljine 12 mm što bi se moglo obrazložiti time da veće duljine vlakana pri njihovim većim udjelima dovode do zapetljavanja i loše disperzije u matrici što rezultira time da vlakna nemaju nikakvu ulogu ili čak da pogoršavaju neka svojstva. To se jasno vidi kod mješavine oUV 2%-12 koja ima veće vrijednosti skupljanja od referentne, iako u radu [29] ispitivanja pokazuju da povećanje duljine vlakna s 3 mm na 6 i 12 mm daje smanje vrijednosti autogenog skupljanja.

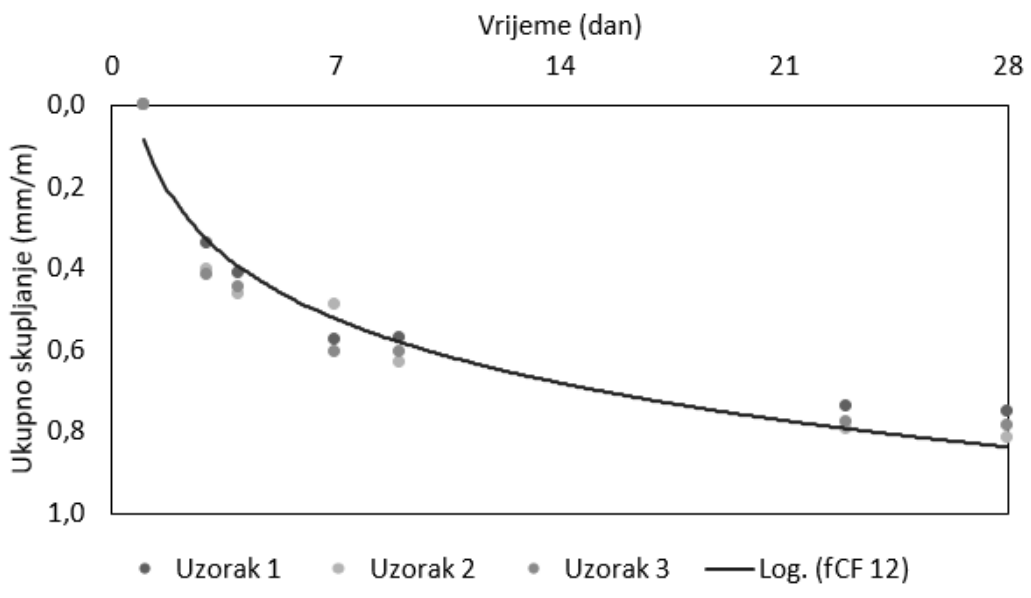
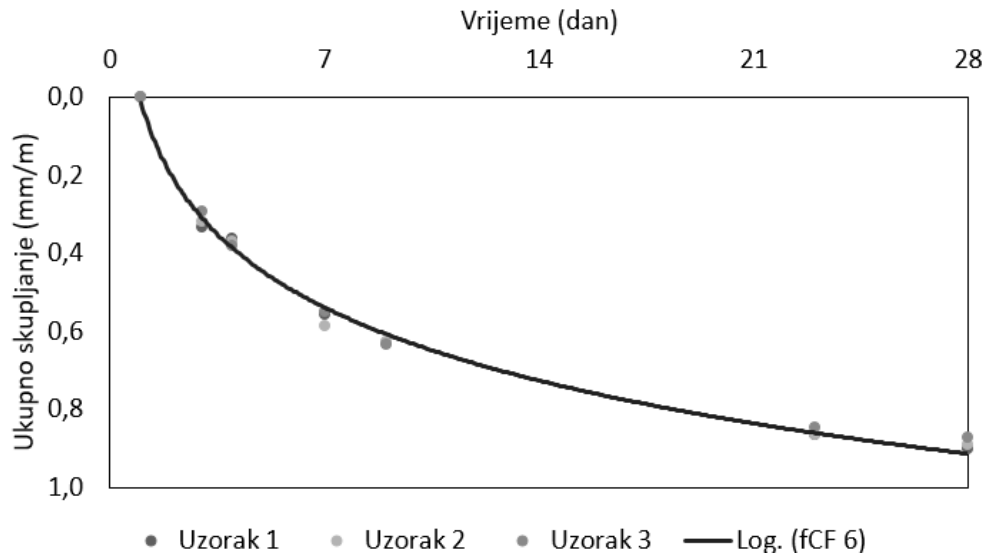
Iz dobivenih rezultata vidljivo je da veće količine i duljine vlakana pogoršavaju neka svojstva i u obradi rezultata svježih svojstva u poglavlju 4.3.1, gdje su mješavine s većim udjelima vlakna imale lošu obradivost i konzistenciju.

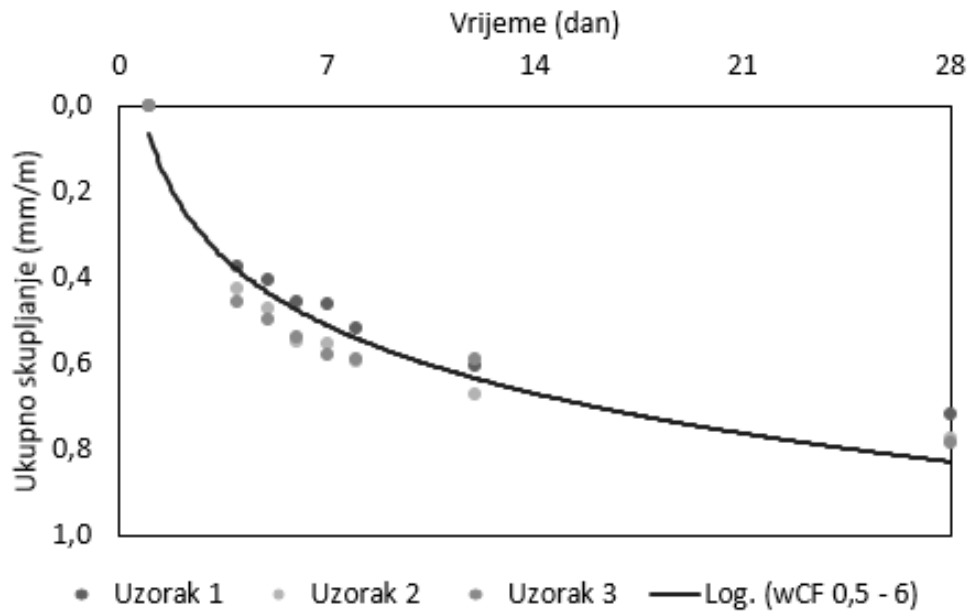
5.3.2 Skupljanje uslijed sušenja

Na slici 31 nalaze se grafovi za svaku mješavinu te je na svakom grafu skupljanje prikazano u vremenskom razdoblju od 28 dana, a svaka krivulja predstavlja srednju vrijednost skupljanja za tri ispitana uzorka po mješavini.

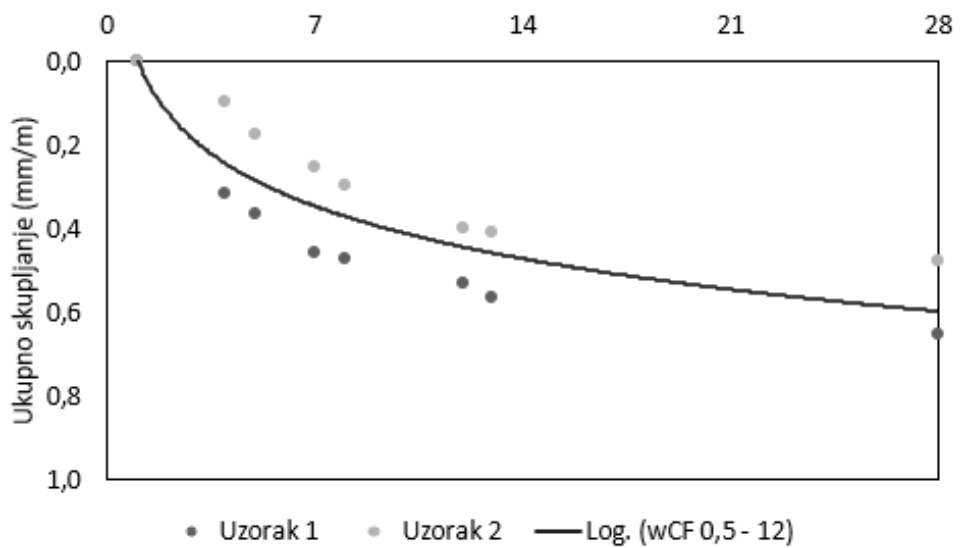
U pogledu skupljanja uslijed sušenja, nakon 28 dana, ispitane mješavine uočeno je da mješavine tUV 1%-6, oUV 1%-6 i oUV 1%-12 imaju najveće vrijednost skupljanja koja iznose 0,900 mm/m, veće i od referentne mješavine čija je vrijednost 0,805 mm/m dok je za oUV 2%-6, koja također ne pokazuje poboljšanje, vrijednost skupljanja 0,842 mm/m. Nešto manje vrijednosti od referentne mješavine imaju mješavine tUV 1%-12 (0,786 mm/m) > oUV 0,5%-6 (0,758 mm/m) > oUV 2%-12 (0,722 mm/m). Najveće odstupanje od referentne mješavine ima mješavina oUV 0,5%-12 čija vrijednost skupljanja iznosi 0,566 mm/m što je približno 30 % manje u odnosu mješavinu bez vlakana.



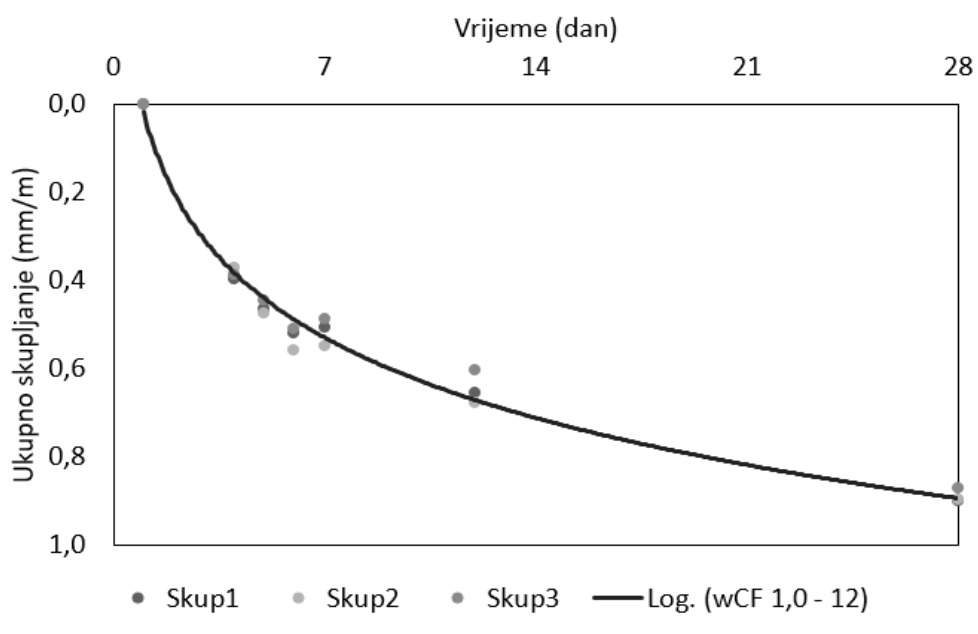
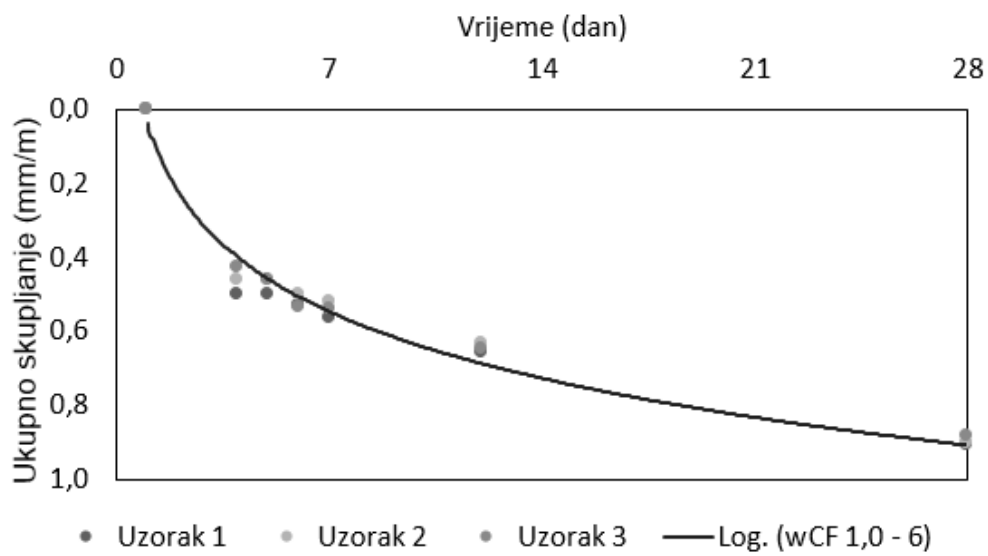


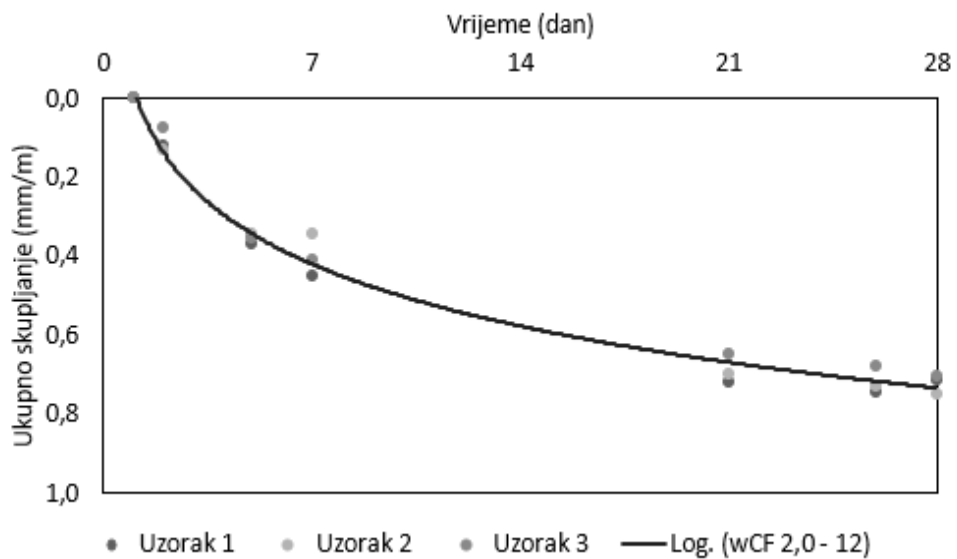
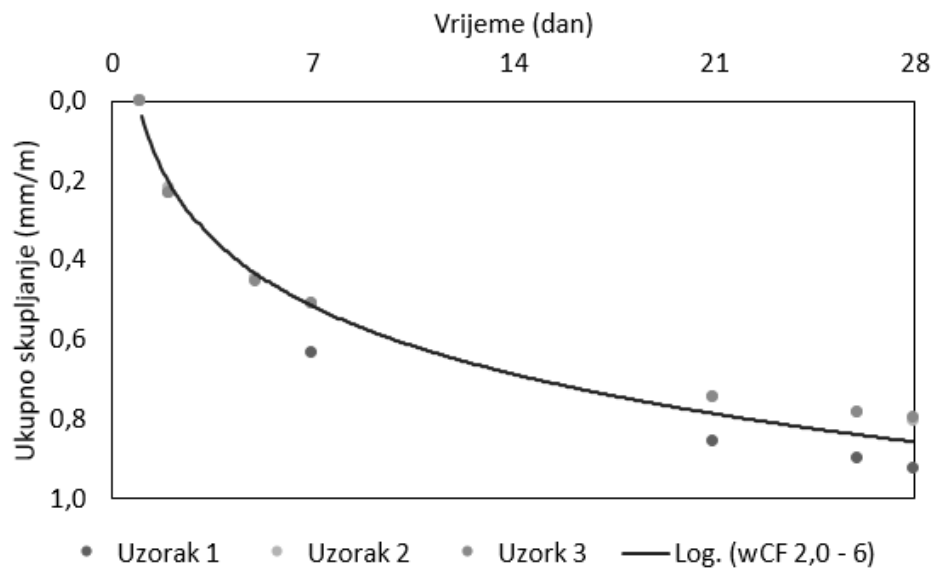


d)



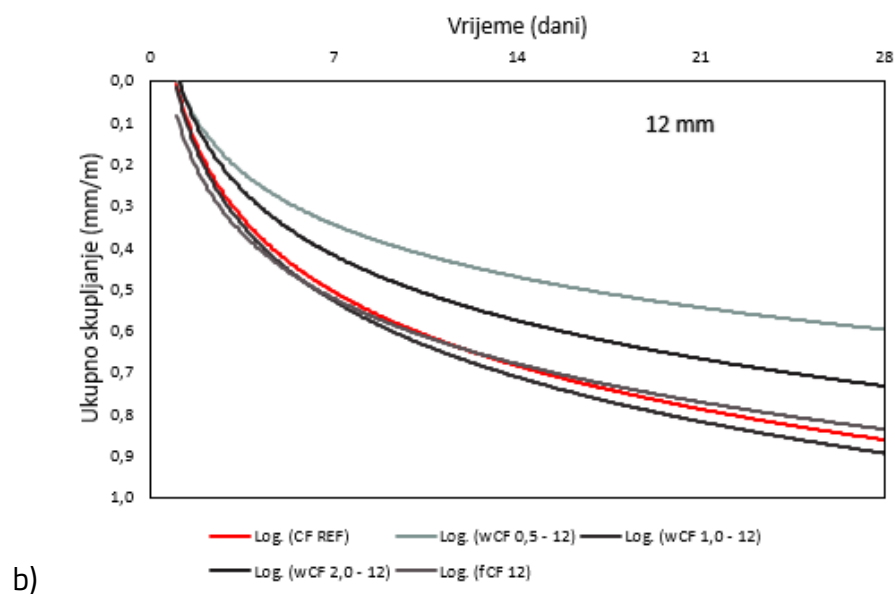
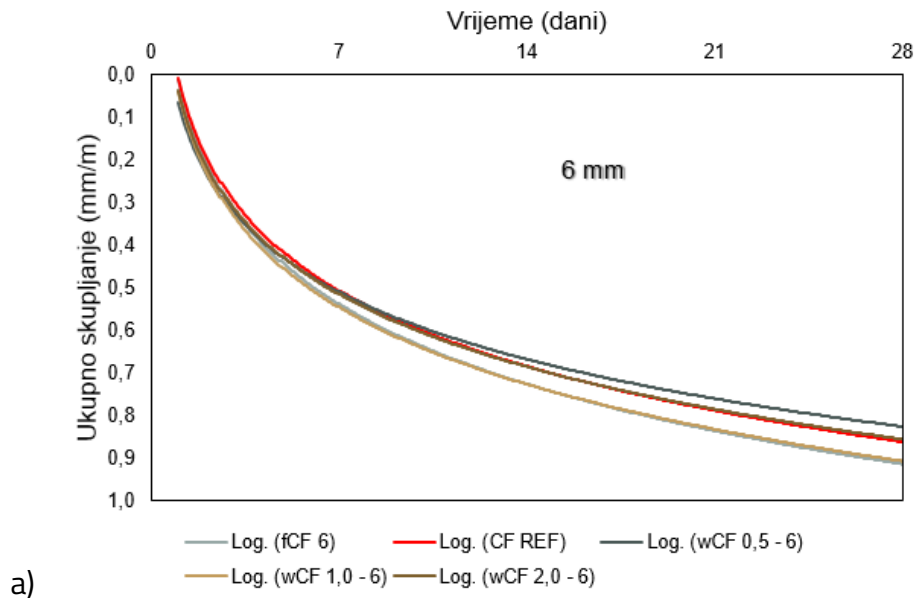
e)





Slika 31: Deformacije uslijed skupljanja uslijed sušenja: a) Referentna mješavina, b) i c) Mješavine s tvorničkim vlaknima (1 % - 6, 1 % - 12), d), e), f), g), h), i) Mješavine s otpadnim vlaknima (0,5 % - 6, 0,5 % - 12, 1%-6, 1%-12, 2%-6, 2%-12)

Za jasniju usporedbu na slici 32 dan je prikaz grafova mješavina s dodatkom vlakana 6 mm (slika 32 a) i 12 mm (slika 32 b) te njihov odnos sa referentnom mješavinom.



Slika 32: Usporedba deformacija skupljanja uslijed sušenja za mješavine s vlaknima od 6 i 12 mm

Mješavine s 0,5 % udjela vlakna pokazuju poboljšanje u odnosu na referentnu, što se tiče deformacija od skupljanja uslijed sušenja, gdje mješavina s vlaknima dužine 12 mm daje najmanje vrijednosti u odnosu na sve druge uzorke. To je očekivano s obzirom da su mješavine s 0,5 % vlakana i kod autogenog skupljanja davale najbolje rezultate. Tvornička vlakna dužine 6 mm daju rezultate lošije u odnosu na referentnu što bi se moglo objasniti lošom raspodjelom vlakana u poprečnom presjeku uzorka. Ne postojanje većih poboljšanja u odnosu na referentnu, ili čak pogoršanja kod uzoraka sa 2% udjela, također se može obrazložiti kroz pogoršanje obradivosti u svježem stanju koje je otežalo ugradnju uzoraka u kalupe i njihovu zbijenost te time prouzročilo poroznu i nekompaktnu strukturu uzorka. U poglavlju 2.2.2 je objašnjeno kako takva struktura ubrzava gubitak vlažnosti uzorka te time i skupljanje uslijed sušenja. Dakle, svako daljnje povećanje udjela vlakana, neovisno o njihovoj duljini, narušava obradivost mješavina, a ne smanjuje deformacije od skupljanja već u nekim slučajevima i povećava.

6 ZAKLJUČAK

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi mogu li proizvodna otpadna ugljična vlakna ponuditi alternativu za mikroarmiranje cementnog kompozita koji bi poslužio kao sanacijski materijal sa manjom vjerojatnošću pojave pukotina uslijed skupljanja. Ovo bi omogućilo unapređenje trajnosti takvih kompozita, budući da ti procesi uzrokuju nastajanje pukotina koje su kasnije put za prodor agresivnih tvari i degradaciju samog materijala. Upotrebom otpadnih ugljičnih vlakana bi se također pridonijelo i rješanju ekološkog problema odlaganja i gospodarenja otpadom.

Provedena je diskusija i prikaz rezultata dobivenih na ispitivanjima u svježem stanju te na rezultatima određenim mjerenjima deformacije uzoraka.

U svježem stanju su sve mješavine s dodatkom vlakana pokazale značajno pogoršanje obradivosti i konzistencije što se pokazalo kroz njihovu otežanu ugradnju u kalupe. Takvo ponašanje je očekivano budući da vlakna imaju veliku specifičnu površinu na koju se, u procesu miješanja, navuče određena količina vode te se time gubi zahtijevanu obradivost mješavine. Odstupanje je imala mješavina s tvorničkim vlaknima udjela 1% i duljine 6 mm, čija je konzistencija bila gotovo jednaka kao referentna mješavina bez vlakana. To bi se moglo pripisati vrsti premaza kojom je obrađena površina vlakana. No, može se zaključiti da bi bila korisna detaljnija istraživanje utjecaj obrade površine vlakna na njihovu distribuciju u cementnoj matrici.

Sama distribucija vlakana je bitna jer bolja raspršenost vlakna i njihova pravilna raspodjela u presjeku uzorka uvelike utječu na ostala svojstva materijala, između ostalog i na volumenske deformacije. Upravo bi to moglo objasniti zašto sve mješavine s udjelom vlakana 1% i 2% imaju lošije rezultate kod ispitivanja skupljanja. Naime velika količina i duljina vlakana dovode do njihovog grudanja i loše disperzije u cementnom kompozitu što je uočljivo još u svježem stanju mješavina.

Poželjna poboljšanja u pogledu skupljanja pokazali su uzorci s 0,5% udjela vlakna koji su ostvarili oko 90% manje autogeno skupljanje u odnosu na referentnu mješavinu. Također,

kod skupljanja uslijed sušenja je uzorak s 0,5 % udjela otpadnih vlakana duljine 12 mm ostvario najmanje vrijednosti skupljanja za oko 30% od mješavine bez vlakana.

Moglo bi se reći da je udio od 0,5% na volumen mješavine, u ovom istraživanju granična vrijednost te da svako povećanje u odnosu na nju daje lošije ponašanje u pogledu obradivosti, a nema poboljšanja kod skupljanja nego čak pogoršanja kod nekih uzoraka. Budući da je ovo istraživanje pokazalo da veće količine vlakna ne znače nužno poboljšanje svojstava korisno bi bilo provesti daljnja istraživanja koja će ispitati veći broj uzoraka s više različitih količina otpadnih vlakna kako bi se došlo do onog optimalnog udjela.

POPIS LITERATURE

- [1] J. Radić i i. Suradnici, *Betonske konstrukcije- Sanacije*, Zagreb: Hrvatska sveučilišna naklada Građevinski fakultete sveučilišta u Zagrebu, 2008.
- [2] A. Baričević, K. Didulica , M. Frančić Smrkić and M. Jelčić Rukavina, "Cementitious Composites Reinforced with Waste Fibers from the Production of High- Quality Construction Textiles," *Materials*, Februar 2022.
- [3] F. Vecchio i F. Bucci, »Analysis of Repaired Reinforced Concrete Structures,« May 2015.
- [4] T. Haramina, T. Jelavić, T. Šolić, M. Katalinić i A. Pilipović, »Analiza mogućnosti recikliranja diskontinuiranih E-staklenih vakana,« *Kategorizirani radovi*, Studeni 2011.
- [5] M. Š.-. Isović, G. Markovski i M. Čećez, »Deformacije skupljanja betona,« *Građevinar*, pp. 727-734, 7 Rujan 2012.
- [6] D. Bjegović i N. Štirmer, *Teorija i tehnologija betona*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.
- [7] M. D. Garcia, *Synthesis by supercritical fluids methods of advanced additions for cementitious materials*, Universite de Bordeaux, 2017.
- [8] D. Bentz i O. Jensen, »Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking,« *ELSEVIER*, pp. 677-687, 2004.
- [9] L. Wu, N. Farzadnia, C. Shi, Z. Zhang i H. Wang, »Autogenous shrinkage of high performance concrete,« *ELSEVIER*, May 2017.
- [10] Z. Hu, C. Shi, Z. Cao, Z. Ou, D. Wang, Z. Wu i L. He, »A review on testing methods for autogenous shrinkage measurement of cement-based materials,« *Journal od Sustainable Cement-Based MATERIALS*, Jun 2013..

- [11] A. INTERNATIONAL, »Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste,« ASTM INTERNATIONAL , 2017. [Mrežno]. Available: <https://www.astm.org/c1608-17.html>.
- [12] M. Serdar, A. Baričević, M. Jelčić Rukavina, M. Pezer, D. Bjegović i N. Štirmer, »Shrinkage Behaviour of Fibre Reinforced Concrete with Recycled Tyre Polymer Fibres,« *International Journal of Polymer Science*, October 2015.
- [13] A. International, *Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*.
- [14] N. P. Tran, C. Gunasekara, D. W. Law, S. Houshyar, S. Setunge i A. Cwirzen, »A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement- based materials,« *ELSEVIER*, 2021.
- [15] E.-i. Tazawa, *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima: Taylor & Francis, 1998.
- [16] R. Čunko, D. Raffaelli i I. Šmit, »Vlakna,« u *Hrvatska Tehnička Enciklopedija*, pp. 500- 527.
- [17] B. Mahltig i Y. Kyosev, *Inorganic and Composite Fibers- Production, Properties and Applicatins*, Woodhead Publishing, 2018.
- [18] P. Delhaes, *Graphite and Precursors*, Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001.
- [19] K. N. Win, »Structure and electrochemical behavior of nitrogen doped diamond-like carbon thin film with or without platinum and ruthenium doping,« *Nanyang technological university*, 2011.
- [20] K. Didulica, A. Čenanović , B. Mrduljaš i A. Baričević, »The use of waste carbon fibres for the production of conductive cementitious materials,« *Internatonal scientific conference*, 2023.
- [21] J. Zhang i V. Li, »Influences of Fibers on Drying Shrinkage of Fiber-Reinforced Cementitious Composite,« *Journal of engineering mechanics*, January 2001.

- [22] I. Bertelsen, L. Ottosen i G. Fischer, »Influence of fibre characteristic on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review,« *Construction and Building Materials*, 19 August 2019.
- [23] Y. Xu i D. Chung, »Silane-treated carbon fiber for reinforcing cement,« *PERGAMON*, 18 January 2001.
- [24] »Samoborka - sanacije i ojačanja u protupotresnoj obnovi,« Samoborka , [Mrežno]. Available: <https://www.samoborka.hr/>. [Pokušaj pristupa 20. lipanj 2024].
- [25] *HRN EN 480-2 Dodaci betonu, mortu i mortu za injektiranje- Ispitne metode- 2. dio: Određivanje vremena vezivanja*, 2006.
- [26] D. Bjegović i N. Štirmer , Terocija i tehnologija betona- Mjerne metode, Sveučilište u Zagrebu.
- [27] B. Han, Z. Liqing, Z. Cheny , W. Yunyang, Y. Xun i O. Jinping, »Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement- based materials,« *Construction and Building Materials*, 5. 2016.
- [28] B. Mrduljaš , A. Baričević, I. Pucić, I. Carević i K. Didulica, »Alkali resistance of selected waste fibres to model cement environment,« *Case Studies in Construction Materials*, 2023.
- [29] G. Kim, H. Yoon i H. Lee, »Autogenous shrinkage and electrical characteristics of cement pastes and mortars with carbon nanotube and carbon fibre,« *ELSEVIER*, May 2018.
- [30] W. Zhou, L. Duan, S. Tang, E. Chen i A. Hanif, »Modeling the evolved microstructure of cement pastes governed by diffusion through barrier shells of C-S-H,« *COMPOSITES*, 3 December 2018.

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1 Faze procesa hidratacije (Izvor: [7]) | 4 |
| Slika 2 Odnos između autogenog i kemijskog skupljanja: C- nehidratizirani cement; W- nehidratizirana voda; Hy – sastojak hidratacije; V- pore nastale hidratacijom (Izvor: [5]).... | 6 |
| Slika 3 Shematski prikaz opreme za linearno mjerenje autogenog skupljanja (Izvor: [12]) .. | 8 |
| Slika 4 Oprema za linearno mjerenje autogenog skupljanja na cementnoj pasti i mortu pomoću valovite cijevi (Izvor: [13]) | 9 |
| Slika 5 Prikaz veličine skupljanja ovisno o veličini zrna i kvaliteti pakiranja agregata: a) 5-10 mm, b) 10-16 mm, c) 16-20 mm i d) 20-25 mm (Izvor: [14])..... | 14 |
| Slika 6: Snop filamentnih vlakana uvećan za 50x (Izvor: [17]) | 15 |
| Slika 7: Oblici ugljičnih vlakana: a) Namotavanje dugih niti oko vretena, b) Mljeveni i sjeckani oblik vlakna (Izvor: [17])..... | 16 |
| Slika 8: Planarna struktura grafita (Izvor: [19]) | 17 |
| Slika 9 Shematski prikaz mehanizma djelovanja vlakana (Izvor: [14]) | 21 |
| Slika 10: Ojačanje zidanih konstrukcija FRCM sustavom (Izvor: [24])..... | 24 |
| Slika 11: Sanacija lokalnih pukotina FRCM sustavom (Izvor: [24]) | 24 |
| Slika 12: Zamjena morta u sljubnicama (Izvor: [24])..... | 25 |
| Slika 13 Popravak lokalnog oštećenja (Izvor: [24])..... | 25 |
| Slika 14: Krivulje prosijavanja agregata | 26 |
| Slika 15: Obrada ugljičnih vlakna: a) zapetljani snopovi otpadnih vlakana, b) tvornička vlakna | 28 |
| Slika 16: Postupak miješanja | 30 |
| Slika 17: Gusta konzistencija mješavine s vlaknima; a) referentna mješavina, b) 1 % vlakana mm, c) 2 % vlakana | 31 |
| Slika 18: Ispitivanja u svježem stanju: a), b), c) | 33 |
| Slika 19: Mjerenje vremena vezivanja automatskim Vicatovim aparatom..... | 34 |
| Slika 20: Priprema kalupa za mjerenje autogenog skupljanja..... | 35 |
| Slika 21: Uređaj za mjerenje autogenog skupljanja..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Slika 22: Mjerenje skupljanja uslijed sušenja..... | 36 |
| Slika 23: Odnos konzistencije mješavina i količine superplastifikatora..... | 38 |
| Slika 24: Utjecaj udjela pora na gustoću mješavine | 39 |
| Slika 25: Usporedba izgleda uzorka REF i oUV 2% - 6 | 40 |
| Slika 26: Razlike u raspršenosti vlakna u mješavini..... | 41 |
| Slika 27: Vrijeme vezivanja..... | 42 |
| Slika 28 Vrijeme vezivanja: a) vlakna duljine 6 mm, b) vlakana duljine 12 mm | 43 |
| Slika 29: Autogeno skupljanje: a) Referentna mješavina, b) i c) Mješavine s tvorničkim vlaknima (1 % - 6, 1 % - 12), d), e), f), g), h), i) Mješavine s otpadnim vlaknima (0,5 % - 6, 0,5 % - 12, 1%-6, 1%-12, 2%-6, 2%-12)..... | 49 |
| Slika 30: Krivulje autogenih deformacija..... | 50 |
| Slika 31: Deformacije uslijed skupljanja uslijed sušenja: a) Referentna mješavina, b) i c) Mješavine s tvorničkim vlaknima (1 % - 6, 1 % - 12), d), e), f), g), h), i) Mješavine s otpadnim vlaknima (0,5 % - 6, 0,5 % - 12, 1%-6, 1%-12, 2%-6, 2%-12)..... | 55 |
| Slika 32: Usporedba deformacija skupljanja uslijed sušenja za mješavine s vlaknima od 6 i 12 mm | 56 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1: Svojstva vlakana | 27 |
| Tablica 2: Sastav mješavina..... | 29 |
| Tablica 3: Udio dodanog superplastifikatora..... | 30 |
| Tablica 4: Metode ispitivanja svojstva morta..... | 32 |
| Tablica 5: Svojstva u svježem stanju | 37 |