



Sveučilište u Zagrebu  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Kristina Leko, Ivana Radić

**PRORAČUN UPORABNOG VIJEKA  
MIKROARMIRANOG BETONA IZLOŽENOG  
DJELOVANJU AGRESIVNOG OKOLIŠA**

Zagreb, 2017.

*Ovaj rad izrađen je u Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom doc. dr. sc. Ane Baričević, dipl.ing.građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.*

---

## **SADRŽAJ**

1	UVOD .....	1
2	OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA .....	3
3	METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA .....	4
4	PRISTUPI PROJEKTIRANJA TRAJNOSTI KONSTRUKCIJA .....	6
4.1	Probabilistički pristup.....	6
4.2	Deterministički pristup .....	9
4.3	Indikatori trajnosti .....	10
5	PRORAČUN UPORABNOG VIJEKA ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA	13
5.1	Korozija uzrokovana kloridima .....	13
5.2	Oštećenja betona uslijed djelovanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja .....	16
6	EKSPERIMENTALNI RAD.....	22
6.1	Materijali .....	22
6.2	Sastav mješavina .....	24
6.3	Izrada uzoraka i njegovanje.....	26
6.4	Metode ispitivanja .....	26
6.5	Analiza rezultata ispitivanja .....	27
6.6	Eksperimentalno određivanje parametara za modeliranje uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju smrzavanja i odmrzavanja .....	37
6.7	Proračun uporabnog vijeka.....	47
7	PRORAČUN UPORABNOG VIJEKA – PRIMJER .....	49
7.1	Sastav mješavina .....	49
7.2	Ulazni parametri za modeliranje uporabnog vijeka.....	50
7.3	Primjer proračuna – kolnička ploča mosta .....	54
8	ZAKLJUČAK .....	63
9	LITERATURA.....	64

---

## **SAŽETAK**

Kristina Leko, Ivana Radić: PRORAČUN UPORABNOG VIJEKA MIKROARMIRANOG BETONA IZLOŽENOG DJELOVANJU AGRESIVNOG OKOLIŠA

Budućnost građenja svakako se pronalazi u primjeni ekološki prihvatljivih materijala, što prvenstveno znači smanjenu potrošnju prirodnih resursa i ulaganje značajnih sredstava u edukaciju i podizanje svijesti o važnosti primjene otpada odnosno stvaranja kružnih ekonomija. U sklopu ovog rada provedena su opsežna istraživanja koja se naslanjaju na saznanja proizašla iz međunarodnog projekta Anagennisi – Innovative reuse of all tyre componentns in concrete, a koja su za cilj imala utvrđivanje ponašanja inovativnih mikroarmiranih betona s recikliranim polimernim vlaknima (RTPF) u agresivnom okolišu.

Poseban doprinos rada očituje se u modeliranju dugotrajnog ponašanja mikroarmiranih betona s RTPF vlaknima u morskom i kontinentalnom području primjenom programskih paketa LIFE-365 i ConcLIFE. Za potrebe proračuna provedene su opsežne eksperimentalne analize iz kojih su proizašli ulazni parametri za proračun. Usporedba inovativnih materijala provedena je sa literaturno dostupnim podacima o običnom betonu, tj sastavima koji uobičajeno pronalazimo na hrvatskom tržištu. Provedene analize su pokazale da se primjenom RTPF vlakana može ostvariti jednaki uporabni vijek za promatrane uvjete izloženosti. Posebni doprinos se očituje u području izloženom smrzavanju i odmrzavanju gdje beton armiran s RTPF vlaknima ostvaruje jednak i/ili produljeni uporabni vijek zbog visokog udjela gume (> 60% masenog udjela) u RTPF vlaknima zaostale iz procesa reciklaže, a koja preuzima ulogu kemijskog dodatka jer se zbog svojih fizikalnih karakteristika ponaša kao amortizer i absorbira naprezanja razvijena u strukturi uslijed povećanja volumena vode tijekom promjene agregatnog stanja. Treba naglasiti da provedene analize pokazuju da se na taj način potrošnja cementa može smanjiti i do 50 kg po m<sup>3</sup> betona, uz istovremeno smanjenje potrošnje kemijskih dodataka. Slijedi da se primjenom projektiranih mikroarmiranih betona s RTPF vlaknima može u potpunosti zadovoljiti 7. temeljni zahtjev za građevine jer se može zajamčiti mogućnost reciklaže građevinskih materijala nakon uklanjanja građevine, trajnost građevine i uporaba okolišu prihvatljivih sirovina i sekundarnih materijala u građevinama.

*Ključne riječi: otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, difuzija klorida, mikroarmirani beton, proračun uporabnog vijeka*

---

## **ABSTRACT**

Kristina Leko, Ivana Radic: SERVICE LIFE PREDICTION OF FIBRE REINFORCED CONCRETE IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Implementation of environmentally friendly materials, reduced consumption of non renewable resources and significant investments in education and raising of the awareness about the importance of reuse of waste must get in the focus of construction industry if sustainability is to be reached. Within this work, an extensive research was carried out to extend the knowledge gained in the international scientific project *Anagennisi - Innovative reuse of all their components in concrete*. Main aim was to determine the behavior of innovative fibre reinforced concrete with recycled polymer fibers (RTPF) when exposed to aggressive environments.

Specific contribution of this work is manifested in estimation of the long term behavior of fibre reinforced concrete with RTPF using software packages LIFE-365 and ConCLIFE. Performed analysis were further expanded by using mix designs available within the literature. Based on performed analyses, investigated RTPF fibres can assure an equal or prolonged service life of concrete for observed environmental conditions. Their contribution is particularly shown when concrete is exposed to freezing and thawing, where rubber residues within the RTPF fibers are taking over the usual role of chemical additives. Exposed to additional stresses in matrix, caused by volume increase due to transformation of water in ice, rubber acts as an amortizers and absorbs the present stress and in such manner reduces the spalling of concrete surface. It should be emphasized that carried analyzes showed that cement consumption can thus be reduced up to 50 kg per m<sup>3</sup> of concrete, while parallel reductions of the consumption of chemical additives. Therefore can be concluded that the use of fibre reinforced concrete with RTPF fibers can fully satisfy the 7<sup>th</sup> basic requirement for structures and in particular ensure the following: reuse or recyclability of the construction materials, durability of the construction materials and use of environmentally compatible secondary materials.

*Key words: freeze-thaw resistance, chloride diffusion, fibre reinforced concrete, estimation of service life*

---

## **1 UVOD**

Kriteriji održivosti za armirani beton su: smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, čuvanje prirodnih sirovina kao što je recikliranje građevinskog otpada te korištenje industrijskog otpada kao agregata te trajnije konstrukcije (>50 godina) [1]. Trajnost armiranobetonskih konstrukcija počela se razvijati u posljednjih 30tak godina kada se odbacilo vjerovanje kako je beton vječan materijal. Normom HRN EN 206 daju se vrijednosti maksimalnog vodocementnog omjera, minimalne količine cementa, minimalne količine zraka i najmanje debljine zaštitnog sloja, a čijim se poštivanjem smatra da će građevina ostvariti uporabni vijek od 50 godina. Treba ipak naglasiti da bi se iskoristivost prirodnih resursa u svrhu betonske industrije povećala bi se 5 puta ukoliko bi se projektiralo na uporabni vijek od 250 umjesto 50 godina, kako je određeno Eurokodom [2].

Hrvatski sabor je na temelju članka 89. Ustava Republike Hrvatske donio odluku o proglašenju Zakona o gradnji, 6. prosinca 2013. godine u kojem je prema članku 15. propisano [3]: „Građevine moraju biti projektirane, izgrađene i uklonjene tako da je uporaba prirodnih izvora održiva, a posebno moraju zajamčit sljedeće:

1. ponovnu uporabu ili mogućnost reciklaže građevine, njezinih materijala i dijelova nakon uklanjanja,
2. trajnost građevine,
3. uporabu okolišu prihvatljivih sirovina i sekundarnih materijala u građevinama.

Inovativni materijali su materijali čija svojstva još nisu obuhvaćena odgovarajućim normama, već samo utvrđena laboratorijskim ispitivanjima te eksperimentalno potvrđena na građevinama [4]. Sukladno direktivi 1999/31/EC [5] dana je hijerarhija postupanja s otpadom, prema kojoj je najpoželjnije: smanjiti masovnu proizvodnju novog otpada, preraditi nastali otpad, reciklirati ga i upotrijebiti kao sirovinu, reciklirati u energetske svrhe te sigurno i ekološki prihvatljivo odlagati neiskorišteni otpad. U posljednje vrijeme se sve više istražuje upotreba otpadne gume i njezinih sastavnih dijelova u tehnologiji proizvodnje betona [6]. Broj automobila i potrošnja guma prati eksponencijalni rast broja stanovnika na zemlji. Samo u Europskoj Uniji se godišnje proizvede 3,5 milijuna tona otpadnih guma [7]. Slaba osviještenost stanovništva i manjak propisa dovelo je toga da se odlaže samo 5% otpadnih guma na deponije [2]. Međutim, jasno je da se prije gradnje takvim materijalima zahtijeva ocjena dugotrajnog ponašanja u konstrukciji, a posebno kada su izloženi agresivnim uvjetima okoliša.

Dosadašnja istraživanja u fokusu su imala primjenu dva od tri produkta mehaničke reciklaže otpadnih guma. Naime tijekom mehaničke reciklaže otpadnih guma nastaju: guma, čelična i polimerna vlakna. Brojna istraživanja [8-23] provedena su u cilju dokazivanja uporabivosti gumenog reciklata i čeličnih vlakana, a koja su potvrdila ekološku i ekonomsku isplativost njihove primjenivosti u građevinskom sektoru. Istovremeno, visokovrijedan polimerni materijal koji pronalazimo u gumama,

do danas ostaje potpuno neiskorišten odnosno koristi se isključivo u energetske svrhe kao gorivo u cementnoj industriji dok veći dio se isključivo odlaže na odlagalištima. Zbog visoke zapaljivosti i male zapreminske gustoće ovaj materijal predstavlja veliki izazov za skladištenje (slika 1), a procjenjuje se da samo na području Europske unije godišnje nastane oko 250 000 t ovog otpada [7].



**Slika 1 Odlaganje recikliranih polimernih vlakana u reciklažnom postrojenju za otpadne gume**

U nastojanju da se zadovolji 7. temeljni zahtjev za građevine, a istovremeno smanji potrošnja neobnovljivih resursa sve je više istraživanja usmjereno ka primjeni otpadnih materijala. Zbog nedovoljnog znanja o svojstvima i utjecaju na građevne materijale, u ovom slučaju beton, ovi materijali su često nepravedno marginalizirani. Tome svakako doprinose trenutni propisi koji ne omogućavaju jednostavnu primjenu lokalno dostupnih materijala, već vrlo često nameću primjenu velikih koeficijenata sigurnosti koji kod gradnje niskorizičnih konstrukcija nisu opravdani.

## 2 OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Opći ciljevi istraživanja provedenih u sklopu ovog rada su prvenstveno podizanje svijesti o važnosti i lokanoj dostupnosti visoko vrijednih materijala proizašlih kao otpad iz drugih industrija, a čija primjena u građevinarstvu može doprinijeti projektiranju i građenju trajnih građevina sa smanjenim troškovima održavanja. Uzimajući u obzir trenutno važeće propise, posebno 7. temeljni zahtjev za građevine postaje jasno da građevini sektor mora i može postati fleksibilniji i omogućiti primjenu visokovrijednih materijala kojima bi se na taj način ukinuo status otpada.

O opasnostima odlaganja otpadnih guma, ali produkata njihove reciklaže ne treba posebno pisati. Dugotrajni požari i emisije opasnih plinova tijekom istih, trebaju biti glavna premisa u rješavanju ovog problema. Uzme li se obzir da su svojstva produkata reciklaže otpadnih guma bolja od svojstava vlakana koja proizvodimo isključivo za potrebe građevinske industrije, jasno je koliko je važan doprinos ovog istraživanja za pomak građevinske industrije u smjeru održivog razvoja.

Specifični ciljevi rada su:

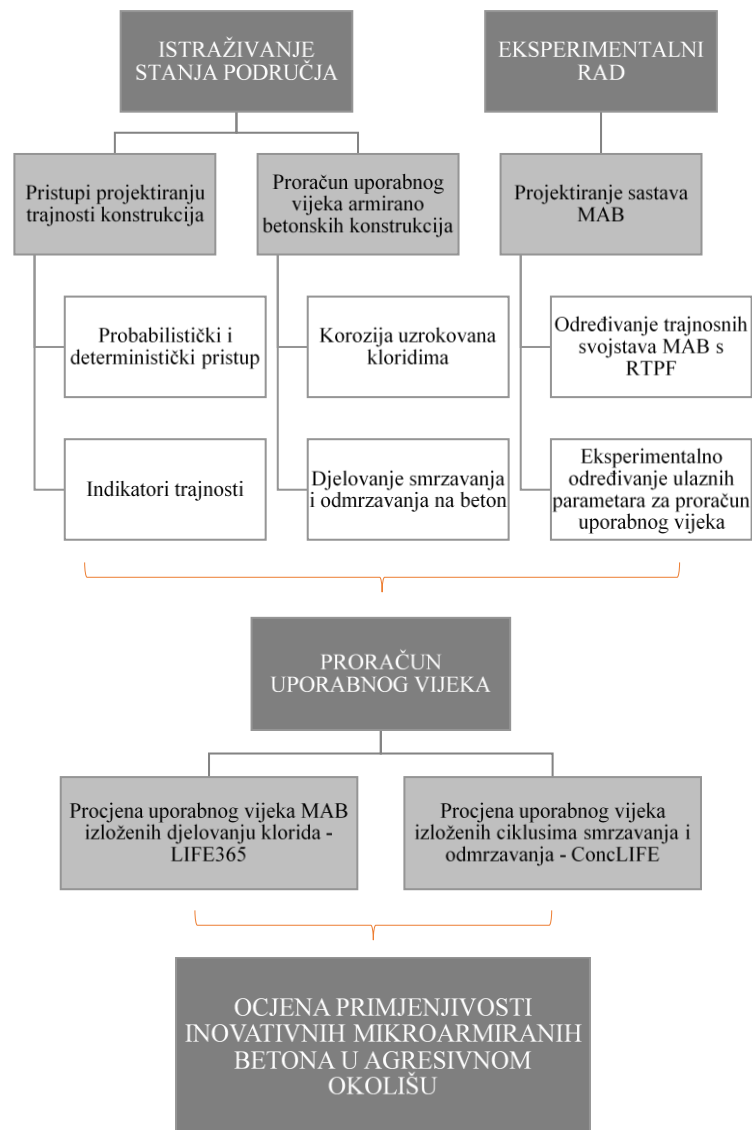
- a) Dokazati da reciklirana polimerna vlakna iz automoblističkih guma (*engl. Recycled tyre polymer fibres - RTPF*) nemaju negativan utjecaj na mehanička svojstva betona, a istovremeno utječu na poboljšano ponašanje betona tijekom izloženosti agresivnim okolišima, npr. morski okoliš ili niske temperature, i na taj način mogu produžiti uporabni vijek građevina.
- b) Dokazati da se reciklirana polimerna vlakna iz automoblističkih guma (*engl. Recycled tyre polymer fibres - RTPF*), posebno miješana, zbog velikog udjela gume mogu koristiti kao zamjena kemijskih dodataka za poboljšanu otpornost na smrzavanje i odmrzavanje betona u okolišima s izraženom degradacijom uslijed djelovanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja



### 3 METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

U ovom istraživanju provest će se eksperimentalna laboratorijska mjerenja potrebna za određivanje ulaznih parametara za proračun uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju agresivnih okoliša, s posebnim naglaskom na djelovanje klorida i ciklusa smrzavanja/ odmrzavanja.

Metodologija i plan istraživanja prikazani su shematski na slici 2. U sklopu istraživanja stanja područja poseban naglasak je stavljen na utvrđivanje postojećih pristupa u projektiranju trajnosti i proračuna uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija. Područje primjene polimernih vlakana u betonu nije posebno obrađivano već je potkrijepljeno literaturom, s obzirom da se istraživanje u sklopu ovog rada naslanja na opsežna istraživanja provedena u sklopu međunarodnom istraživačkog projekta „Anagennisi – Innovative reuse of all tyre components in concrete“ [7].



Slika 2 Metodologija i plan istraživanja

Eksperimentalni rad podijeljen je u dva dijela: određivanje trajnosnih svojstava mikroarmiranih betona (MAB) s recikliranim polimernim vlaknima (RTPF), a ovisno o stupnju čistoće RTPF vlakana i eksperimentalno određivanje ulaznih parametara potrebnih za proračun uporabnog vijeka MAB primjenom programskih paketa LIFE-365 i ConCLIFE. Posljednje poglavlje obuhvaća proračun uporabnog vijeka na primjeru kolničke ploče u morskom i kontinentalnom području, te zaključke provedeni istraživanja.

## **4 PRISTUPI PROJEKTIRANJA TRAJNOSTI KONSTRUKCIJA**

Trajnost konstrukcije se definira kao sposobnost konstrukcije da uslijed očekivanog opterećenja iz okoliša tijekom predviđenog uporabnog vijeka zadrži zahtjevanu razinu sigurnosti, uporabljivosti te odgovarajući izgled bez povećanih troškova za održavanje i sanaciju [2]. Za postizanje traženog uporabnog vijeka konstrukcije ključno je u fazi projektiranja uzeti u obzir čimbenike koji su međuovisni poput namjene konstrukcije, uvjeta izloženosti, zahtijevanih svojstava konstrukcije, svojstva građevnih materijala, geometrijske složenosti konstruktivnih elemenata, kvalitete gradnje i projektiranih mjera zaštite, te redovitog održavanja konstrukcija tijekom projektiranog uporabnog vijeka [24].

Metodologija projektiranja uporabnog vijeka prema ISO/FDIS 16204 [25] prikazana je na slici 3. Početni korak je određivanje trajnosnih kriterija, bilo kroz uporabni vijek konstrukcije što je karakteristično za projektiranje prema normama tj. deterministički pristup ili granične vrijednosti indikatora trajnosti, tj. osnovne parametre za probabilistički pristup projektiranju. Dijagram tjeka metodologije projektiranja trajnosti konstrukcija obuhvaća radnje održavanja i popravka građevinskih konstrukcija, a sve u cilju ostvarenja projektiranog uporabnog vijeka.

Tijekom projektiranja konstrukcija koje su građene u prošlim desetljećima nedovoljno se pažnje posvećivalo trajnosti. Danas, takve građevine zahtijevaju značajna sredstva za održavanje i sanaciju kako bi ostvarile projektirani uporabni vijek pri čemu ta sredstva često premašuju troškove same gradnje. Budućnost građevinarstva ide u smjeru održive gradnje koja uključuje ekološke, sociološke, tehnološke i ekonomske aspekte. Prednost dobivaju materijali koji osiguravaju produljeni uporabni vijek i otvaraju mogućnost razvoja cirkularne industrije. Projektiranje, izgradnja i održavanje trajnijih konstrukcija je najvažniji parametar održivog razvoja. Tijekom faze planiranja potrebno je uzeti u obzir cijeli životni vijek građevine te odabrati oblik konstruktivnih elementa i materijale koji osiguravaju tražena svojstva uz prihvatljive troškove [2]. Postoji više načina pristupanja projektiranju trajnosti koje grubo možemo podijeliti na deterministični i probabilistički pristup. Na slici 4 prikazane su različite razine projektiranja trajnosti [26].

### **4.1 Probabilistički pristup**

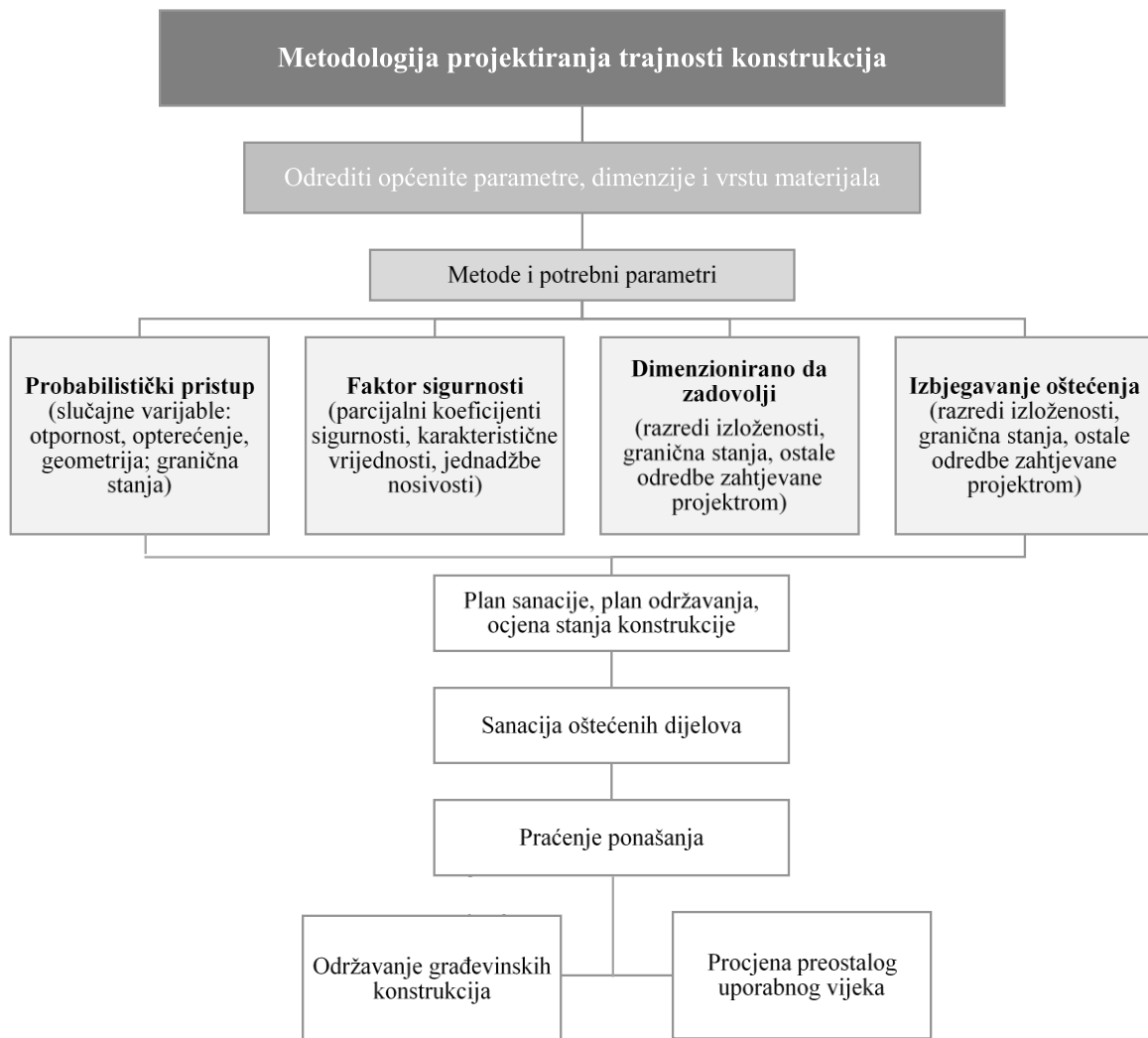
U probabilističkom pristupu sigurnosti osnovni parametri su slučajne varijable. Probabilističke metode su zasnovane na poznavanju svojstava materijala i mehanizama degradacije, gdje svojstva materijala i/ili indikatore trajnosti čine parametri mjereni u laboratoriju/ terenu, predstavljaju ulazne parametre proračuna i tretiraju se kao slučajne varijable sa pripadajućim distribucijama [27]. Tijekom proračuna u obzir se uzima i geometrija poprečnog presjeka elemenata, tj. debljina i kvaliteta zaštitnog sloja betona koji je bitan čimbenik trajnosti betonskih elemenata. Proračun se zasniva na činjenicama

---

da svaka konstrukcija ima vjerojatnost otkazivanja. Granično stanje nosivosti je stanje netom prije rušenja konstrukcije, a prikazujemo ga kao:

$$R - S = R(X_1, X_2, \dots, X_n) - S(X_{n+1}, X_{n+2}, \dots, X_m) = 0 \quad (1)$$

gdje je  $R$  funkcija otpornosti konstrukcije,  $S$  funkcija opterećenja na konstrukciju,  $X_i$  slučajne varijable funkcije opterećenja i nosivosti na konstrukciju.

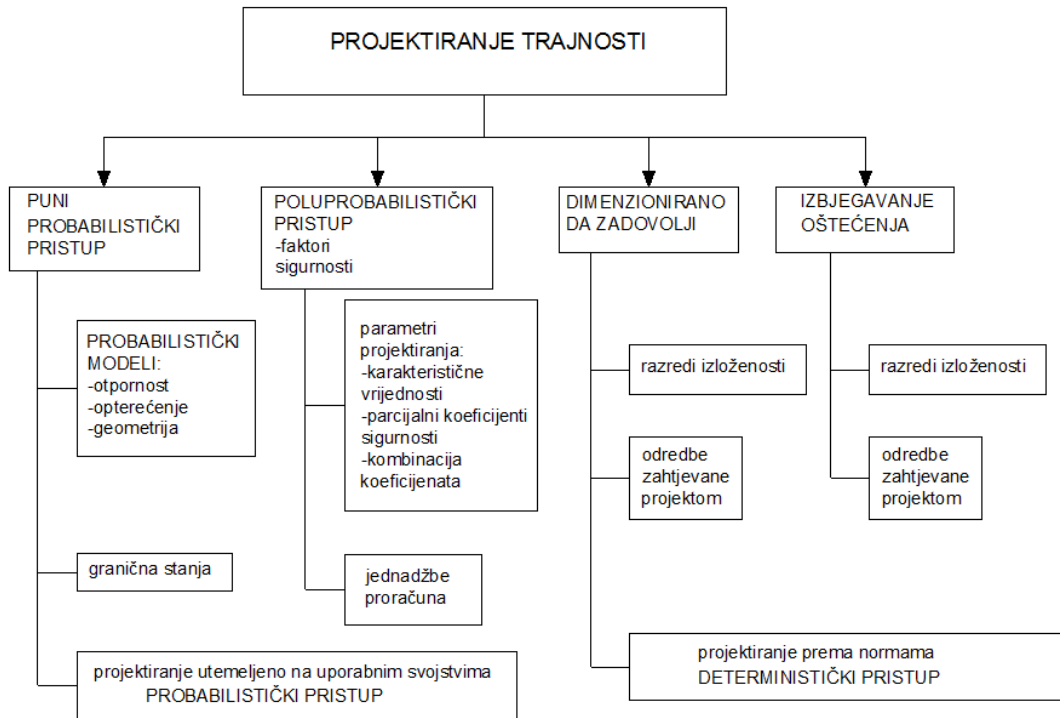


Slika 3. Metodologija projektiranja trajnosti konstrukcija [25]

Proračun daje vrijednost otkazivanja elementa konstrukcije ili cijele konstrukcije nazvan indeks pouzdanosti  $\beta$ . Vjerojatnost otkazivanja  $\beta$  se uspoređuje sa ciljanom vrijednošću  $\beta_{\text{željeno}}$  koja predstavlja dopuštenu graničnu vrijednost:

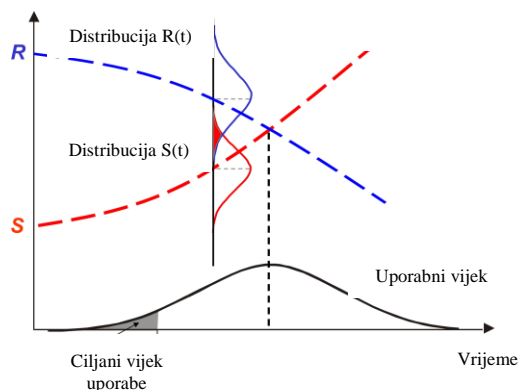
$$\beta < \beta_{\text{željeno}}; \quad \beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (2)$$

gdje je  $\Phi$  funkcija standardne distribucije, a  $P_f$  vjerojatnost otkazivanja konstrukcije unutar uporabnog vijeka.



Slika 4. Načini projektiranja trajnosti [26]

Funkcije  $R(t)$  i  $S(t)$  su stohastičke veličine ovisne o vremenu te moraju biti opisane u svakom vremenskom trenutku. Funkcija  $R(t)$  je otpornost konstrukcije u vremenu koja se smanjuje uslijed procesa degradacije, dok je  $S(t)$  funkcija opterećenja u vremenu koja ostaje jednaka ili raste. Mjesto preklapanja krivulja opterećenja i otpornosti utvrđuje vjerojatnosti otkazivanja  $P_f$  [27], što je prikazano slikom 5.



Slika 5. Vjerojatnost zakazivanja i ciljani uporabni vijek [28]

Polu-probabilistički pristup čini svojevrsno pojednostavljene potpune probabilističke metode. Ulazni parametri proračuna su konačne vrijednosti, a nesigurnosti se uzimaju u obzir sa parcijalnim koeficijentima. Parcijalni koeficijenti su određeni eksperimentalno ili čine tradicijski preuzete vrijednosti te uzimaju u obzir: nepovoljna odstupanja od reprezentativnih vrijednosti, odstupanja od reprezentativnih vrijednosti materijala te dimenzionalne promjene i svojstva materijala [25]. Proračunsku vrijednost opterećenja  $F_d$  izražavamo kao:

$$F_d = \gamma_f \times F_{rep} \quad (3)$$

gdje je  $F_{rep}$  reprezentativna vrijednost opterećenja, a  $\gamma_f$  parcijalni faktor sigurnosti. Proračunsku vrijednost otpornosti materijala izražavamo kao:

$$R_d = R_k / \gamma_M \quad (4)$$

gdje je  $R_k$  karakteristična vrijednost otpornosti materijala,  $\gamma_m$  parcijalni faktor koji uzima u obzir svojstvama materijala,  $\gamma_{Rd}$  parcijalni koeficijent koji uzima u obzir dimenzijske nesigurnosti, a  $\gamma_M = \gamma_m \times \gamma_{Rd}$  parcijalni koeficijent sigurnosti koji uzima u obzir dimenzionalne promjene i svojstva materijala.

## **4.2 Deterministički pristup**

Deterministički pristup ili projektiranje prema normama je uobičajeni pristup projektiranja trajnosti, baziran prvenstveno na zahtjevima za sastav betona. Granične vrijednosti su određene normama u obliku razreda izloženosti koji opisuje uvjete okoliša. Određuju se vrijednosti: maksimalnog vodocementnog omjera, minimalna vrijednost tlačne čvrstoće, minimalna količina cementa i minimalna debljina zaštitnog sloja.

Dimenzionirano da zadovolji čini konvencionalan pristup u projektiranju trajnosti. Projektiranje se provodi prema smjernicama danim u Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije [29], odnosno normama na koje se isti poziva. Projektiranje se osim u posebni slučajevima provodi za uporabni vijek od 50 godina, a granične vrijednosti otkazivanja konstrukcije nisu definirane. Svi ulazni parametri su jednoznačno određeni normiranim vrijednostima. Djelovanje okoliša na konstrukciju se svrstava u sedam razreda izloženosti. Obuhvaćena je korozija uzrokovana karbonatizacijom, kloridima koji jesu iz mora, kloridima koji nisu iz mora, kemijska korozija, beton izložen habanju te korozija uzrokovana smrzavanjem i odmrzavanjem. Pojedini razred izloženosti određuje: maksimalni vodocementni omjer, najmanji razred tlačne čvrstoće, najmanju količinu cementa i najmanju količinu zraka. Ovaj pristup se bazira isključivo na osnovnom sastavu betona,

---

zanemaruje važnost kvalitetne ugradnje i njege betonskih elemenata. Proračun ne uzima u obzir

Razred izloženosti	Uporabni vijek < 50 godina	Uporabni vijek > 50 godina	Norma/preporuka
--------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------

karakteristike posebnih betona, različite dodatke betonu, reciklirani agregat tj. općenito uporabu inovativnih materijala. Nisu propisani načini ispitivanja trajnosnih svojstava, a nedostaci se uočavaju tek po završetku gradnje. Često jedini parametar kojim se ocjenjuje kvaliteta ugrađenog betona jest tlačna čvrstoća, a čiji rezultati ne daju stvarnu sliku o svojstvima ugrađenog betona zbog načina njegovanja betona na gradilištu i u laboratoriju [2].

Metoda koja se bazira na izbjegavanju oštećenja obuhvaća konstruktivne mjere zaštite, pravilan odabir materijala, fizičko odvajanje od okoline primjenom materijala sa boljim trajnosnim svojstvima i druge tehnološke mjere zaštite. Koriste se membrane, obložne oplata te premazi koji imaju bolja trajnosna svojstva od elemenata koje štite. Karakteristične zaštite čelika su pocinčavanje i emajliranje te one spadaju u zaštitu metala prevlakama i elektrokemijska zaštita koja tretira glavni uzrok korozije tako da metal drži u stanju pasivnosti. U ovu skupinu ubrajamo i inhibitore korozije koji umanjuju mogućnost nastanka korozije čelične armature. To su tvari organskog ili anorganskog podrijetla koje se dodaju u sastav betona kao i ostali kemijski dodaci te odgađaju inicijaciju korozije. Ni jedna od ovih metoda ne sprječava trajno nastanak korozije te je potreban monitoring [2].

### 4.3 Indikatori trajnosti

Projektiranje na osnovu svojstava materijala podrazumijeva da su prije odabira proračunskih modela za ocjenu trajnosti konstrukcije poznata svojstva materijala, tzv *indikatori trajnosti*. Indikatori trajnosti su: difuzija klorida, vodopropusnost, koeficijent kapilarnog upijanja, plinopropusnost, poroznost i debljina zaštitnog sloja. Projektom se definiraju vrijednosti parametara trajnosti karakteristične za okoliš u kojem će konstrukcija biti izložena tijekom svog uporabnog vijeka, a čije su granične vrijednosti definirane u tablici 1, a postupak primjene na slici 6.

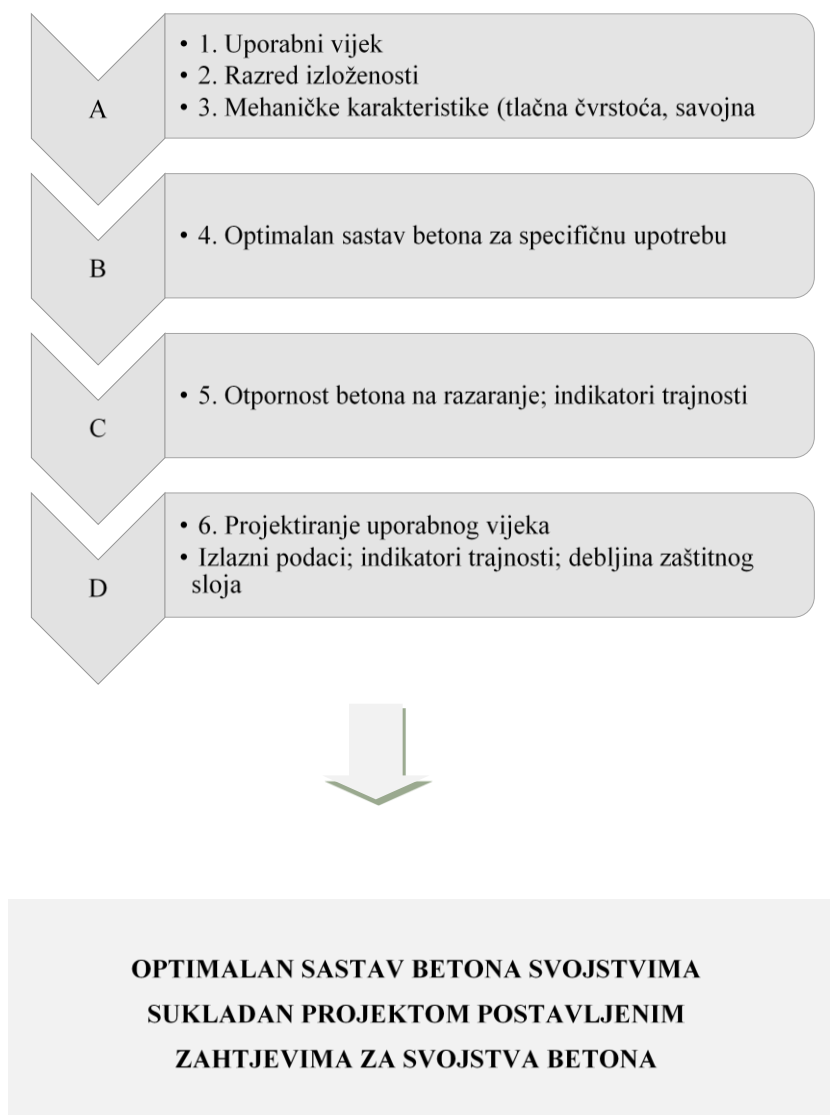
Cilj projektiranja trajnosti je odabir materijala koji će tijekom cijelog uporabnog vijeka zadržati svojstva bolja ili jednaka zadanim kriterijima za pojedini razred okoliša. Prije odabira materijala za gradnju provode se preliminarna ispitivanja u laboratoriju, a u cilju odabira sastava koji zadovoljava kriterije postavljene za pojedini razred okoliša. Posebno je to važno kod ocjene inovativnih materijala poput mikroarmiranih betona s polimernim vlaknima iz otpadnih guma koji su predmet ovog rada. Uvođenje novih komponenti zahtjeva značajne ocjene trajnosti takovih materijala, prije njihove primjene u građevinskom sektoru.

**Tablica 1 Kriteriji za projektiranje trajnosti [31]**

---

<b>X0, XC1</b>	$K_g = 2 \pm 0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	$K_g = 1 \pm 0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	Preporuka prema TC 116-PCD: Ispitivanje plinopropusnosti betona – Preduvjet za ispitivanje plinopropusnosti i kapilarnog upijanja vode – Mjerenje plinopropusnosti betona prema RILEM – CEMBUREAU metodi
<b>XC2</b>	$K_g = 2 \pm 0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	$K_g = 1 \pm 0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	
<b>XC3</b>	$K_g = 1 \pm 0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	$K_g = 0.1 \pm 0.05 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	
<b>XC4</b>	$K_g = 1 \pm 0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	$K_g = 0.1 \pm 0.05 \times 10^{-16} \text{ m}^2$	
<b>XS1</b>	$D_f = 10 \pm 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	$D_f = 8 \pm 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	NT BUILD 492
<b>XS2</b>	$D_f = 5 \pm 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	$D_f = 3 \pm 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	
<b>XS3</b>	$D_f = 2 \pm 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	$D_f < 2 \pm 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	
<b>XF1</b>	Pad dinamičkog modula elastičnosti $< 15 \pm 2 \%$ nakon 28 ciklusa	Pad dinamičkog modula elastičnosti $< 10 \pm 1 \%$ nakon 28 ciklusa	CEN/TR 15177
<b>XF2</b>	Gubitak mase $< 0.5 \pm 0.1 \text{ kg/m}^3$ nakon 28 ciklusa	Gubitak mase $< 0.2 \pm 0.05 \text{ kg/m}^3$ nakon 28 ciklusa	CEN/TS 12390-9
<b>XF3</b>	Pad dinamičkog modula elastičnosti $< 25 \pm 5 \%$ nakon 56 ciklusa	Pad dinamičkog modula elastičnosti $< 15 \pm 2 \%$ nakon 56 ciklusa	CEN/TR 15177
<b>XF4</b>	Gubitak mase $< 0.5 \pm 0.1 \text{ kg/m}^3$ nakon 56 ciklusa	Gubitak mase $< 0.2 \pm 0.05 \text{ kg/m}^3$ nakon 56 ciklusa	CEN/TS 12390-9
<b>XM1</b>	Gubitak mase $< 25 \pm 5 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Gubitak mase $< 21 \pm 3 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$	EN 206:2014
<b>XM2</b>	Gubitak mase $< 21 \pm 3 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Gubitak mase $< 18 \pm 2 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$	
<b>XM3</b>	Gubitak mase $< 18 \pm 2 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Gubitak mase $< 15 \pm 1 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$	





Slika 6. Principi probabilističkog pristupa projektiranju trajnosti [30]

## **5 PRORAČUN UPORABNOG VIJEKA ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA**

Sa propisanim vodocementnim omjerom, razredom tlačne čvrstoće, aeriranjem, minimalnom količinom cementa i trajanjem njegovanja ne može se prognozirati uporabni vijek konstrukcije. Mnogi primjeri iz prakse, kao što su oštećenja materijala uslijed korozije armature, pokazali su da veliku važnost treba dati projektiranju trajnosti [28].

Republika Hrvatska u svojoj površini obuhvaća pet klimatskih zona i raznolikost klimatskih ekstrema [32]. Karakteristični mehanizam degradacije za priobalno područje je prodor klorida koji uzrokuje kloridnu koroziju dok je za područje oštre klime karakterističan mehanizam smrzavanja i odmrzavanja. Tehnički propis za građevinske konstrukcije [29] predviđa projektiranje i građenje građevinskih konstrukcija na način da se predvide svi utjecaji koji proizlaze iz načina i redosljeda građenja, predvidivih djelovanja i utjecaja na građevinu, a utječu na uporabni vijek građevine. Ako posebnim propisom nije drukčije propisano, uporabni vijek građevina smatra se 50 godina u slučaju da su poštovane sve uzance dane navedenim tehničkim propisom. Međutim konstrukcije izložene agresivnom okolišu već nakon nekoliko godina izloženosti pokazuju znakove dotrajalosti. Najbolji primjeri agresivnog djelovanja okoliša su konstrukcije poput Krčkog mosta, Masleničkog mosta, mosta Krka ili primjerice objekta lansirne rampe Torpedo u Rijeci. Izložene visokom salinitetu mora, udarima vjetra koji ubrzavaju prodor klorida, relativno visokoj vlažnosti i temperaturi tijekom godine te cikličkim temperaturnim promjenama, tijekom projektiranja ovih i sličnih građevina posebnu važnost treba posvetiti projektiranju trajnosti, ali i kvaliteti izvođenja.

Jasno je da se troškovi održavanja i popravka mogu smanjiti isključivo uz propisano odnosno projektom određeno izvođenje i održavanje građevinske konstrukcije. Dobar primjer neadekvatnog održavanja je upravo objekt lansirne rampe Torpedo sagrađen 1929. godine, a bez adekvatnog održavanja u posljednjih 50 godina. Predstavnik industrijske arhitekture i velikog povijesnog značenja trenutno ne ispunjava temeljne zahtjeve mehaničke otpornosti i stabilnosti te zahtijeva hitnu sanaciju. Prema procjeni troškova uklanjanja postojeće i izvedbe nove armirano betonske konstrukcije, proračunato od strane Građevinskog fakulteta u Rijeci, brutto troškovi iznose približno 2,5 milijuna kuna te rastu kako vrijeme odmiče [33]. Pozitivni primjer projektiranja na osnovu svojstava je svakako luka Gaženica u Zadru. Projektom su propisane tražene vrijednosti koeficijenta difuzije te vodonepropusnosti kao osnovnih indikatora u morskom okolišu [34], a koje su potom i mjerene tijekom cijelog perioda gradnje čime je kontrola kvalitete građenja dosegla novu razinu.

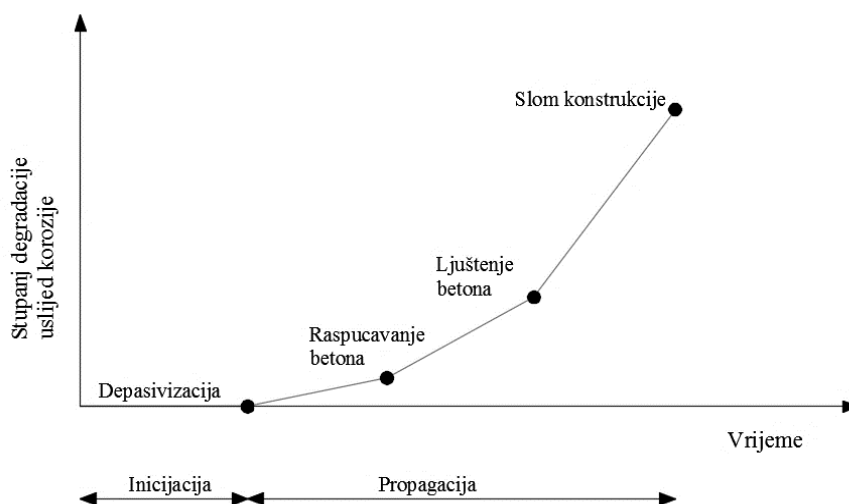
### **5.1 Korozija uzrokovana kloridima**

Kloridi su jedan od osnovnih uzroka korozije i degradacije armiranobetonske konstrukcije. Porijeklo klorida u betonu može biti agregat, morska voda, otpadna voda i/ili dodaci. Maksimalan sadržaj klorida u betonu propisan je važećim normama. Početni udio klorida dospije u mješavinu

---

prilikom miješanja, a prodor novih klorida dolazi iz okoliša, kao npr. djelovanje mora, soli za odmrzavanje prilikom posipanja po cestama, mostovima, razne kemikalije (rezervoari) [35]. Ukupan sadržaj klorida u betonu čine vezani i slobodni ioni klora. Vezani ioni klora mogu biti kemijski ili fizički vezani [36]. U procesu korozije sudjeluju jedino slobodni ioni otopljeni u pornoj vodi. Kad kloridni ioni razore zaštitni pasivni sloj, omogućen je prodor klorida na armaturu. Niske koncentracije klorida ne uzrokuju štetu u betonu međutim, oštećenja u betonu uslijed korozije početi će se razvijati kada se dosegne kritična koncentracija klorida. Tada dolazi do depasivizacije čelika. Kritična koncentracija klorida ponajviše ovisi o sastavu porne otopine i to znači da ona nije konstantna.

Kloridni ioni prodiru u konstrukcijski materijal difuzijom, migracijom i konvekcijom. U stvarnosti je to kombinacija više načina transporta, ali je jedan dominantan i to je obično difuzija. Životni vijek armiranobetonske konstrukcije modelira se kroz dvije faze: period inicijacije i propagacije oštećenja primjenom tzv. Tuttijevog dijagrama, slika 7. Zbroj vremena inicijacije i propagacije oštećenja, tj korozije armature, daje ukupno vrijeme do potrebne sanacije ili kraja uporabnog vijeka konstrukcije [37].



Slika 7. Životni vijek armiranobetonske konstrukcije [37]

Tijekom vremena inicijacije konstrukcija odolijeva utjecajima iz okoline. Trenutak propagacije je uzrokovan početkom degradacije konstrukcije, a ovisi o uvjetima okoliša i otpornosti elementa. Jasno da napredovanje oštećenja utječe na smanjenu otpornost elemenata tijekom vremena i bržu degradaciju konstrukcije. Na slici 7. su prikazana granična stanja degradacije armiranobetonskih konstrukcija, a koja uključuju stanje depasivizacije armature, tj. period inicijacije korozije, razvoj pukotina, odlamanje zaštitnog sloja i slom konstrukcije uslijed gubitka nosivosti [37].

Fickov prvi zakon opisuje stacionaran tok, znači jednosmjernan i konstantan transport neke tvari, dok Fickov drugi zakon opisuje difuziju za nestacionaran tok difuzije kod koje koncentracija

ovisi o položaju i vremenu. Prodor klorida kroz beton modelira se Fickovim drugim zakonom, pri čemu se uzima da difuzija dominantan mehanizam prodora klorida te se zanemaruje utjecaj ostalih mehanizama, što je opisano izrazom [38]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \text{ odnosno, } C = C_0 \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{app} \cdot t}} \right) \quad (5)$$

gdje je  $D_{app}$  prividni (*eng. apparent*) koeficijent difuzije klorida u materijalu ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $C$  koncentracija klorida u otopini, a  $C_0$  koncentracija klorida na dubini  $x=0$ .

### 5.1.1 Teorijski model proračuna uporabnog vijeka uslijed korozije uzrokovane kloridima – LIFE 365

Life – 365 je programski paket za procjenu uporabnog vijeka i troškova održavanja armiranobetonskih konstrukcija [38]. Programski paket omogućava projektiranje armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida, pri tome uzimajući u obzir uvjete izloženosti konstrukcije i sastav mješavine. Programski paket omogućava proračun uporabnog vijeka u dva koraka: proračun razdoblja inicijacije ( $t_i$ ) i razdoblja propagacije ( $t_p$ ). Rezultat proračuna je vrijeme do prve sanacije ( $t_i+t_p$ ), plan održavanja i predviđanje troškova cjeloživotnog uporabnog vijeka konstrukcije.

Proračun je baziran na Fickovom drugom zakonu, uz pretpostavku da je difuzija dominantan mehanizam transporta klorida. Istovremeno model uzima u obzir slijedeće pretpostavke: homogenost materijala, konstantu koncentraciju klorida na površini elemenata i jednoliku vrijednost koeficijenta difuzije po cijeloj dubini presjeka elementa. U slučaju korištenja mineralnih dodataka, osnovna pretpostavka je da leteći pepeo i zguza nemaju utjecaja na početnu vrijednost koeficijenta difuzije, ni na vrijednost kritične koncentracije klorida na površini armature. Dok se smanjenje propusnosti i vrijednosti koeficijenta difuzije ( $D_{SF}$ ) dodatkom silicijske prašine uzima u obzir u ovisnosti o udjelu silicijske prašine (SF) u betonu, a prema [38].

Koeficijent difuzije je parametar koji predstavlja brzinu prodiranja klorida u beton. Vrijednost navedenog parametra se može dobiti eksperimentalnim putem ili se određuje teorijski koeficijent difuzije. Odnos između koeficijenta difuzije i vodocementnog faktora je dobiven iskustvenim putem i dan je sljedećom formulom [40]:

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40 \times \frac{v}{c})} \quad (6)$$

gdje je  $D_{28}$  koeficijent difuzije klorida za 28 dana star beton ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) i  $v/c$  vodocementni omjer.

---

Promjena koeficijenta difuzije tijekom vremena opisana je kroz parametar  $m$ . Naime, i leteći pepeo i zgura utječu na veličinu smanjenja difuzije, a što se uzima u ovisnosti o udjelu letećeg pepela ili zgure [1]. Istovremeno se pretpostavlja da silicijska prašina nema utjecaja na konstantu  $m$ . Za opisivanje ovisnosti koeficijenta difuzije o temperaturi, Life – 365 koristi izraz [38]:

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^n \cdot \exp\left[\frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (7)$$

gdje su  $D(t)$  koeficijent difuzije u trenutku  $t$  i pri temperaturi  $T$ (K),  $D_{ref}$  koeficijent difuzije u trenutku  $t_{ref}$  i pri referentnoj temperaturi  $T_{ref}$  (K),  $U$  energija aktivacije procesa difuzije (350000 J/mol),  $R$  plinska konstanta (J/ mol K),  $T$  apsolutna temperatura (K).

## **5.2 Oštećenja betona uslijed djelovanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja**

Beton je kao građevni materijal zbog niza svojih prednosti poznat kao jedan od najčešće upotrebljivanih materijala. Mišljenje o betonu kao vječnom materijalu počelo se mijenjati stjecanjem znanja o utjecaju korozije i drugih mehanizama na uporabni vijek građevina. Izloženost betona ciklusima smrzavanja i odmrzavanja svakako čini jedan od mehanizama degradacije s negativnim učincima na beton [40].

Oštećenja betona uslijed smrzavanja nastaju zbog pojave da led zauzima 9% veći volumen od vode. Smrzavanje vode u sustavu pora betona dolazi do naprezanja, a kada naprezanja postanu veća od vlačne čvrstoće betona dolazi do razaranja strukture betona [2]. Do oštećenja uslijed smrzavanja neće doći ukoliko volumen pora nije najmanje 85 – 90% zasićen vodom. U tom slučaju ima dovoljno mjesta za širenje leda. Obično postoji uvijek jedna strana betona koja nije smrznuta i koja služi kao izlaz vodi, što znači da u većini slučajeva voda bi trebala biti istisnuta iz betona. Da bi se voda, koja se počela širiti zbog procesa smrzavanja koji je započeo negdje u strukturi betona, mogla nesmetano širiti, potrebno je osigurati mnogo malih, međusobno dovoljno blizu praznih mjehurića. To se može postići upotrebom kemijskih dodataka za poboljšanu otpornost betona na smrzavanja, tzv aeranta. Ako međusobna udaljenost mjehurića ne prekorači kritičnu udaljenost, tada pri smrzavanju neće biti stvoren pritisak koji može razoriti očvrsnuli cementni kompozit [41].

### *5.2.1 Modeliranje trajnosti konstrukcija izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja*

Model vijeka trajanja odnosi se na unutarnje djelovanje smrzavanja vlage, koje može biti uzrokom značajnog smanjenja čvrstoće betona, pa time krutosti i nosivosti konstrukcije. Postoje dvije vrste djelovanja smrzavanja na beton: unutarnje djelovanje, nastalo smrzavanjem vode unutar betona i površinsko ljuštenje, nastalo djelovanje otopine soli za odmrzavanje u kontaktu s površinom. Dostupni modeli za proračun trajnosti konstrukcija izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja baziraju se na mehanizmu oštećenja putem unutarnjeg djelovanja. Niže su opisani svi potrebni parametri za

---

provedbu proračuna, a koji zahtijevaju kompleksno i sveobuhvatno eksperimentalno određivanje ulaznih parametara za svaki projektirani sastav betona kojem se želi odrediti uporabni vijek.

#### *5.2.1.1 Kritični sadržaj vlage $S_{CR}$*

Kritični stupanj zasićenja  $S_{CR}$  određuje se laboratorijski za svaku mješavinu betona za koju se procjenjuje uporabni vijek. Određivanje se radi na nizu uzoraka različitog stupnja zasićenja (0,7 – 1) koji su podvrgnuti višestrukim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, nakon čega se ocjenjuje stupanj unutarnjeg oštećenja određivanjem vrijednosti relativnog dinamičkog modula elastičnosti [26].

Sadržaj vode  $S$  izražava se kao omjer volumena vode koja se može smrznuti u porama betona, odnosno volumen vode koju potpuno suh uzorak može primiti pri vakumskom zasićenju  $P_W$  i ukupnog volumena pora  $P_U$ , odnosno zbroja volumena pora ispunjenih vodom  $P_W$  i volumen pora ispunjenih zrakom  $a$ , prikazano izrazom:

$$S = \frac{P_W}{P_U} = \frac{P_W}{P_W + a} \quad (8)$$

Nastala oštećenja nastala unutar betona određuju se uzimajući u obzir promjenu dinamičkog modula elastičnosti prema normi HRN CEN / TR 15177 [42]. Relativni dinamički modul elastičnosti određen prolaskom ultrazvučnog vala, nakon  $n$  ciklusa smrzavanja i odmrzavanja računa se kao:

$$RDM_{UPTT,n} = \left( \frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 100\% \quad (9)$$

gdje je  $t_{s,0}$  početno vrijeme prolaska ultrazvučnog vala kroz uzorak ( $\mu s$ ) i  $t_{s,n}$  vrijeme prolaska ultrazvučnog vala nakon  $n$  ciklusa smrzavanja i odmrzavanja ( $\mu s$ ).

#### *5.2.1.2 Stvarni sadržaj vode $S_{ACT}$*

U stvarnosti, neki dijelovi konstrukcije bit će vlažniji od drugih zbog različitih okolišnih uvjeta. Ako stvarni sadržaj vode u određenom dijelu konstrukcije premaši kritičnu vrijednost neposredno prije smrzavanja, u tom dijelu konstrukcije doći će do oštećenja. Laboratorijsko ispitivanje kapilarnog upijanja vode u beton može se upotrijebiti kao dobra zamjena za stvarne uvjete vlage u kojima se beton nalazi. Bitno je upotrijebiti što tanji uzorak kako bi se među ostalim postigla dobro vidljiva prijelomna točka. Prijelomna točka odgovara stanju gdje su sve kapilarne pore ispunjene vodom, a izolirane zračne pore ispunjene zrakom.

Adsorpcija kapilarnim upijanjem provodi se postavljanjem pripremljenih uzoraka valjkastog oblika u vodu, pri čemu se mjeri povećanje mase uzorka tijekom vremena. Rezultat ispitivanja prikazuje se grafički kao odnos količine upijene vode i drugog korijena iz vremena, pri čemu se za

---

formiranje krivulje mogu razlikovati dva dijela. Prvi dio odgovara koeficijentu kratkotrajne adsorpcije i to je dio do prijelomne točke, a u drugom dijelu, od prijelomne točke, osim kapilarnog transporta zbraja se i difuzija vodene pare u velikim porama, a to odgovara koeficijentu dugotrajne adsorpcije [43].

Kratkotrajno upijanje se određuje se iz dijela linije do prijelomne točke, a računa se preko izraza:

$$K_u = \frac{W}{A \cdot \rho \cdot \sqrt{t}} \quad (10)$$

gdje je  $W$  količina adsorbirane vode (kg) i površina presjeka uzorka u kontaktu s vodom ( $m^2$ ),  $\rho$  gustoća vode ( $1 \text{ kg/dm}^3$ ),  $t$  ukupno vrijeme adsorpcije (s) i  $K_u$  koeficijent adsorpcije ( $\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ ).

Dugotrajno upijanje se opaža se nakon prijelomne točke te odgovara adsorpciji vode u zračne pore. Stvarni sadržaj vode  $S_{ACT}$  može se računati preko izraza danog u [43]:

$$S_{ACT} = S_b + et^d \quad (11)$$

gdje je  $S_b$  stupanj zasićenosti dosegnut na prijelomnoj točki i  $e$  i  $d$  koeficijenti betona. Vrijednost stupnja zasićenja u početnoj točki ispitivanja kapilarnog upijanja može se prikazati jednadžbom:

$$S_0 = \frac{P_{w,0}}{P_u} = \frac{P_{w,0}}{P_w + a} \quad (12)$$

gdje je  $P_{w,0}$  volumen vode u početnoj točki ispitivanja koja se može smrznuti u porama betona ( $m^3$ ),  $P_w$  volumen vode koja se može smrznuti u porama betona ( $m^3$ ),  $P_u$  ukupan volumen pora ( $m^3$ ) i  $a$  volumen pora ispunjenih zrakom ( $m^3$ ). Volumen vode u početnoj točki ispitivanja koja se može smrznuti u porama betona može se prikazati kao:

$$P_{w,0} = \frac{m_0 - m_d}{\rho_v} \quad (13)$$

gdje je  $m_0$  masa uzorka na početku ispitivanja (g) i  $m_d$  masa suhog uzorka (g). Volumen vode koja se može smrznuti u porama betona, može se prikazati preko izraza:

$$P_w = \frac{m_z - m_d}{\rho_v} \quad (14)$$

gdje je  $m_z$  masa zasićenog uzorka (g) i  $m_d$  masa suhog uzorka (g). Volumen pora može se prikazati izrazom:

$$a = V_{uz} \cdot a_0 \quad (15)$$

---

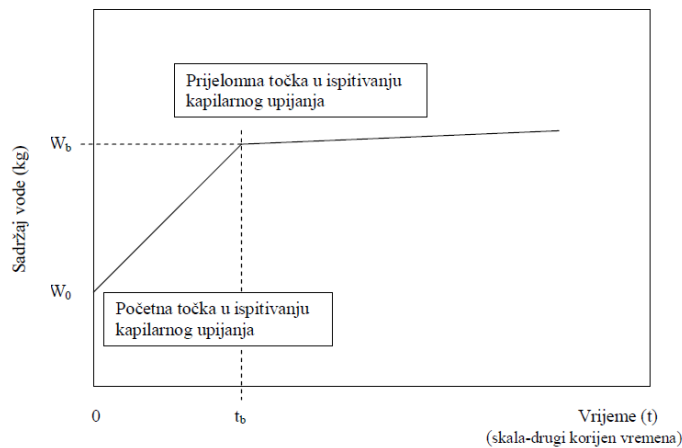
gdje je  $V_{uz}$  volumen uzorka ( $\text{dm}^3$ ) i  $a_0$  sadržaj zraka u betonu (%). Vrijednost stupnja zasićenja u prijelomnoj točki ispitivanja kapilarnog upijanja  $S_b$  može se prikazati preko jednadžbe:

$$S_b = \frac{P_{w,b}}{P_p} \quad (16)$$

gdje je  $P_{w,b}$  volumen vode u prijelomnoj točki ispitivanja kapilarnog upijanja i  $P_p$  ukupan volumen pora ( $\text{m}^3$ ). Volumen vode u prijelomnoj točki ispitivanja kapilarnog upijanja računamo preko izraza:

$$P_{w,b} = \frac{m_b - m_d}{\rho_v} \quad (17)$$

gdje je  $m_b$  masa uzorka u prijelomnoj točki (g). Prijelomna točka odgovara kapilarnom zasićenju, a polagano upijanje nakon prijelomne točke iznad kapilarnom području, slika 8.



Slika 8 Eksperimentalno ispitivanje kapilarnog upijanja [41]

Stupanj saturacije  $S_{ACT}$  teorijski se može izračunati prema izrazu [43]:

$$S_{ACT} = 1 - \frac{\alpha_a}{P_c} \quad (18)$$

gdje je  $\alpha_a$  rezidualni volumen zraka (%) i  $P_c$  ukupna poroznost betona (%). Stvarni sadržaj vlage u konstrukcije ovisi o vremenu izlaganja, ali i uvjetima okoliša. Sadržaj vode u određenom volumenu materijala, definira da li će doći do oštećenja uslijed smrzavanja i odmrzavanja. Ako je dosegnuta kritična vrijednost neposredno prije smrzavanja, u tom volumenu materijala će doći do oštećenja. Za predviđanje uporabnog vijeka opisanog volumena materijala, važno je znati predvidjeti promjene vlažnosti. Za to koristimo laboratorijska ispitivanja kapilarnog upijanja vode koja mogu biti pokazatelj stvarne sorpcije vode u konstrukcijama [26].



Ekvivalentno kapilarno apsorpcijsko vrijeme je vrijeme koje opisuje uvjete vlažnosti tijekom kojih će doći do oštećenja konstrukcije. Korištenjem rezultata ispitivanja kapilarnog upijanja moguće je ekstrapolirati očekivane uvjete vlažnosti u različitim vrstama konstrukcija. U probabilističkom proračunu, trenutak početka razvoja unutarnjih oštećenja definiran je graničnim stanjem u kojem je vrijednost kritičnog stupnja zasićenja  $S_{CR}$  manja od stvarnog sadržaja vlage u materijalu  $S_{ACT}$ . Odnos se promatra tijekom vremena, gdje  $S_{ACT}(t)$  u određenom trenutku  $t$ , tijekom uporabnog vijeka konstrukcije  $t_{SL}$  treba uvijek biti manje vrijednosti od  $S_{CR}$ , a sve u cilju osiguranja željene trajnosti konstrukcije. Navedeno se opisuje na slijedeći način:

$$g(S_{CR}, S_{ACT}(t < t_{SL})) = S_{CR} - S_{ACT}(t < t_{SL}) \quad (19)$$

gdje je  $S_{CR}$  kritični stupanj saturacije,  $S_{ACT}$  stvarni stupanj saturacije u vremenu  $t$  i  $t_{SL}$  uporabni vijek konstrukcije (godine).

### 5.2.1.3 Teorijski model proračuna uporabnog vijeka uslijed oštećenja uzrokovanog smrzavanjem i odmrzavanjem – CONCLIFE

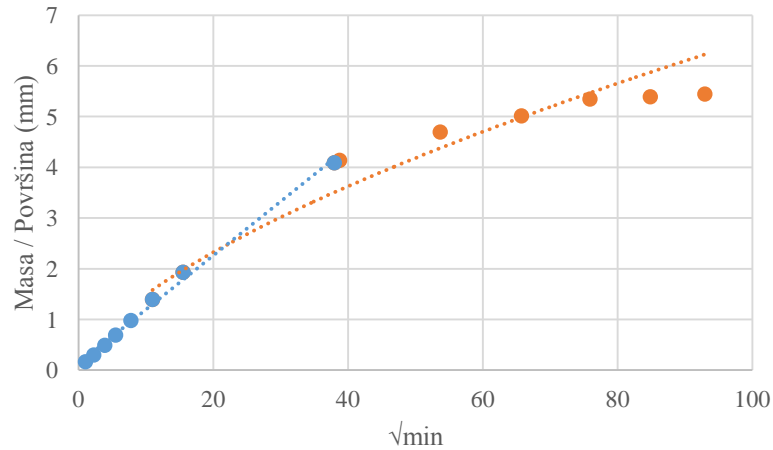
Conclife je deterministički programski paket koji služi za proračun uporabnog vijeka konstrukcije izloženog djelovanju sulfata i/ili ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Program je osmišljen 2001. s namjerom za projektiranje kolnika i kolničkih ploča mostova. Prednost programa je mogućnost kontroliranja okolišnih uvjeta kao što su temperatura, vlaga, padaline i sl., uz pretpostavku da je osnovni mehanizam prijenosa vlage u betonu kapilarno upijanje [44]. Ulazni parametri potrebni za proračun uporabnog vijeka konstrukcije izloženog ciklusima smrzavanja i odmrzavanja pomoću programskog paketa Conclife uključuju slijedeće: kritični sadržaj vlage  $S_{CR}$  (0 - 1), poroznost betona  $P_C$  (%), udio pora  $a$  (%) te koeficijent sorpcije  $S$  (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ ) i inicijalna sorpcija  $I_0$  (mm) za upijanje prije i nakon prijelomne točke (*engl. nick point*). Koeficijent sorpcije  $S$  i inicijalna sorpcija  $I_0$  određeni su iz krivulja upijanja prije i nakon prijelomne točke, prikazani na slici 9. Prijelomna točka je definirana kao točka sjecišta ove dvije krivulje. S obzirom da ove krivulje imaju različite nagibe, one će također imati različite koeficijente upijanja [45].

Za dobivanje krivulja prije i nakon prijelomne točke koristi se slijedeći izraz:

$$\frac{W}{\rho A} = S\sqrt{t} + I_0 \quad (20)$$

gdje je  $W$  porast mase (kg),  $\rho$  gustoća vode (kg/m<sup>3</sup>),  $A$  površina uzorka (m<sup>2</sup>) i  $S$  koeficijent sorpcije (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ ) za rano razdoblje, ako je  $1 \text{ min} < t < 7\text{h}$ , koeficijent sorpcije za kasnije razdoblje, ako je  $t > 1$  dan i  $I_0$  inicijalna (početna) sorpcija (mm).

---



Slika 9. Eksperimentalno određivanje koeficijenta sorpcije za kratkotrajno i dugotrajno upijanje [45]

Uzimajući u obzir da se vrijednost  $S_{ACT}$  se povećava s vremenom upijanja, rizik od oštećenja se raste s porastom vremena adsorpcije. Do oštećenja će doći kada vrijedi:

$$S_{ACT} > S_{CR} \quad (21)$$

Uvrštavanjem jednadžbe  $S_{ACT} = S_b + et^d$  u jednadžbu (21) dobije se maksimalni potencijalni vijek trajanja uz pretpostavku neprekidnog upijanja vode:

$$t_{trajanje} = \left[ \frac{(S_{CR} - S_b)}{e} \right]^{\frac{1}{d}} \quad (22)$$

Potencijalno vrijeme trajanja se može usporediti s ekvivalentnim vremenom upijanja i ukoliko je potencijalno vrijeme manje od ekvivalentnog vremena doći će do oštećenja. Vijek trajanja se može izračunati ako se definira najveći prihvatljivi rizik [43].

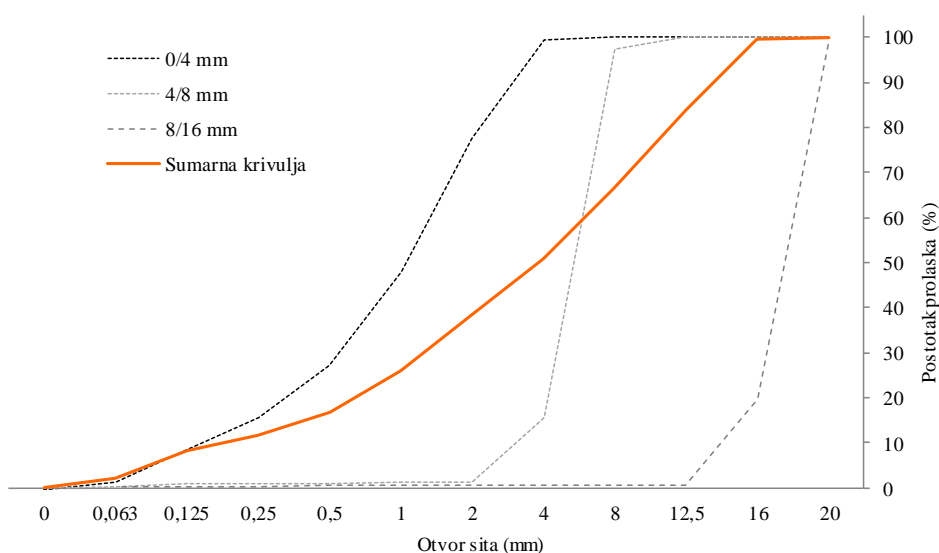
## 6 EKSPERIMENTALNI RAD

Osnovni cilj eksperimentalnog rada je prikupljanje podataka potrebnih za modeliranje uporabnog vijeka elemenata izgrađenih od mikroarmiranih betona s polimernim vlaknima iz otpadnih guma. Eksperimentalni program je koncipiran s ciljem utvrđivanja svih parametara potrebnih za utvrđivanje uporabnog vijeka kolničke konstrukcije mosta u kontinentalnom i obalnom području Republike Hrvatske. U sklopu modeliranja uporabnog vijeka razmatra se utjecaj slijedećih razreda okoliša: kontinentalna Hrvatska - XC4, XD3, XF4 i priobalno područje – XC4, XD3, XS1, XF4. Indikatori trajnosti za navedene razrede definirani su u tablici 1 i predstavljaju prvi korak u ocjeni istraživanih mješavina.

Istraživanje predstavlja nastavak rada na međunarodnom istraživačkom projektu Anagennisi – Innovative reuse of all tyre components in concrete [7], zbog čega ovaj eksperimentalni rad čini nadopunu dosadašnjih rezultata, a koji su objavljeni u sklopu [22, 31, 46 - 52] te će sve svi ravnopravno koristiti u modeliranju.

### 6.1 Materijali

Za izradu betona korišten je CEM II B-M (S-V) 42,5 N (proizvođač Holcim); miješani portlandski cement s udjelom klinkera od 65 - 79 %, 21 – 35 % miješanog dodatka (granulirana zgura visoke peći (S) i silicijski leteći pepeo (V)), te superplastifikator na bazi polikarboksilnih etera proizvođača BASF. Agregat je bio vapnenačkog podrijetla iz kamenoloma Zvečaj, proizvođača Arkada, a korištene su frakcije 0/4mm, 4/8 mm i 8/16 mm čija je granulometrija prikazana slikom 10.



Slika 10. Krivulje prosijavanja agregata i sumarna granulometriska krivulja

Za armiranje betona su korištena fibrilirana i monofilamentna polipropilenska vlakna, kao referentna vlakna čija su osnovna svojstva prikazana u tablici 2.

**Tablica 2 Svojstva polipropilenskih vlakana**

Dužina, mm	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	Vlačna čvrstoća, MPa
19 mm	0,915	280 - 770
6 mm	0,91	> 270

Tijekom mehaničke reciklaže otpadnih guma nastaju dvije vrste recikliranih polimernih vlakana iz gume oznake RTPF (*engl. Recycled Tyre Polymer Fibres*), vrsta 1 i vrsta 2, slika 11 a) i 11 b), a koje se zajedno transportiraju, miješaju i odlažu pri čemu nastaju miješana RTPFm vlakna (*engl. mixed RTPF*, slika 11 c). Geometrijske karakteristike RTPF vlakana prikazana su u tablici 3.



**Slika 11 Polimerna vlakna nastala u procesu mehaničke reciklaže otpadnih guma: a) Vrsta 1 RTPF vlakana, b) Vrsta 2 RTPF vlakana c) Miješana RTPF (vrsta1 +vrsta2) [49]**

Analiza ovih vlakana pokazala je da sadrže velik dio otpadne gume (> 60% ukupnog uzorka), zbog čega je u sklopu projekta anagennisi razvijen sustav za pročišćavanje [49, 50]. Vlakna nastala procesom čišćenja oslobođena su zaostalih gumenih granula i označavaju se RTPFs (*engl. sorted Recycled Tyre Polymer Fibres*), slika 12.

U sklopu ovog rada korištena su miješana RTPF vlakana (oznake RTPF<sub>m</sub>), vrsta 1 RTPF vlakana (oznake RTPF<sub>m1</sub>) i pročišćena RTPF vlakna vrste 1 (oznake RTPF<sub>s</sub>). Detaljna karakterizacija i postupak dobivanja opisan u [52].

**Tablica 3 Geometrijske karakteristike RTPFvlakana**

Parametri	Miješana RTPF vlakna		Pročišćena RTPF vlakna
Duljina, mm	Vrsta 1	8.4 ± 3.8	9.5 ± 4.6
Promjer, μm	Vrsta 2	30.9 ± 2.5	30.1 ± 2.0
	Vrsta 3	20.7 ± 1.8	20.2 ± 1.7



**Slika 12** Pročišćena RTPF nakon drugog stadija mehaničkog pročišćavanja gume [49]

## **6.2 Sastav mješavina**

Polipropilenska vlakna se dodaju betonu u cilju poboljšanja svojstva u ranoj starosti i/ili pri izloženosti visokim temperaturama. Dosadašnja istraživanja RTPF pokazuju da ista imaju pozitivan utjecaj na volumne deformacije u ranoj starosti, odgađaju pojavu odlamanja pri visokim temperaturama, a ne narušavaju preostala mehanička svojstva betona [31, 46 - 50]. Temeljem navedenog iste mješavine su korištene za određivanje indikatora trajnosti i modeliranje uporabnog vijeka mikroarmiranih betona s RTPF vlaknima. Cilj je dokazati da njihova primjena ne narušava trajnosna svojstva betona, odnosno da ih u pojedinim slučajevima može i dodatno unaprijediti, i na taj način zamijeniti upotrebnu uobičajeno korištenih kemijskih dodataka betonu.

Polipropilenska vlakna se ovisno o namjeni u betonu doziraju od 1 – 3 kg po metru kubnom. Uzimajući u obzir detaljnu karakterizaciju RTPF danu u [49, 52] sastav mješavina s RTPF vlaknima imao je veće udjele vlakana u slučaju miješanih RTPF<sub>m1</sub> i RTPF<sub>m</sub>, a manje kod pročišćenih vlakana RTPF<sub>s</sub>. Razlog tomu je što miješana RTPF vlakna sadrže veliki udio gume, zbog čega je u uzorku od 5 kg vlakana utvrđeno postojanje svega 0,75 do 1 kg pročišćenih vlakna.

Sastav mješavina korištenih u eksperimentalnom radu naveden je u tablici 4. Referentne mješavine čine: obični beton (PC), mikroarmirani beton s industrijski proizvedenim monofilamentnim (PP<sub>m</sub>) i fibriliranim (PP<sub>f</sub>) polipropilenskim vlaknima u ukupnoj količini od 1 kg /m<sup>3</sup>. Mješavine s miješanim RTPF<sub>m</sub> i recikliranim vlaknima vrste 1, RTPF<sub>m1</sub>, sadrže 5, 10 i 15 kg navedenih RTPF vlakana po metru kubnom, dok su mješavine s pročišćenim vlaknima imale 1, 2 i 5 kg RTPF<sub>s</sub> po metru kubnom betona.

Tablica 4 Sastav mješavina korišten u eksperimentalnom radu

Komponente (kg/m <sup>3</sup> )	PC	PP <sub>f</sub>	PP <sub>m</sub>	5RTPF <sub>m</sub>	10RTPF <sub>m</sub>	15RTPF <sub>m</sub>	5RTPF <sub>m1</sub>	10RTPF <sub>m1</sub>	15RTPF <sub>m1</sub>	1RTPF <sub>s</sub>	2RTPF <sub>s</sub>	5RTPF <sub>s</sub>
Cement	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370
Voda	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
Superplastifikator	2,22	2,22	2,05	2,22	3,21	3,54	1,95	2,15	2,65	1,29	1,67	2,67
v/c	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
<b>Vlakna</b>												
Fibrilirana PP vlakna	--	<b>1</b>		--	--	--						
Monofilamentna PP			<b>1</b>									
RTPF <sub>m</sub>				<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>						
RTPF <sub>m1</sub>							<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>			
RTPF <sub>s</sub>										<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>
<b>Agregat</b>												
0-4	899	898	880	893	887	879	876	868	862	880	878	875
4-8	347	347	344	345	342	339	342	340	337	344	344	342
8-16	590	589	603	586	581	577	599	595	590	603	602	599

### **6.3 Izrada uzoraka i njegovanje**

Agregat je miješan u suho sa vlaknima dvije minute, nakon čega je dodana polovina vode potrebne za hidrataciju cementa. Da se osigura upijanje vode u agregat, napravljena je pauza dvije minute i dodani preostali sastojci u miješalicu. Nakon čega je nastavljeno miješanje. Beton se ugrađivao ručno u kalupe i vibrirao na vibro-stolu. Uzorci su nakon 24 sata izvađeni iz kalupa i čuvani do starosti od 28 dana u vlažnoj komori gdje je temperatura  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  i relativne vlažnosti 95%, prikazano slikom 11.



**Slika 13 Način njegovanja uzoraka tijekom prva 24 sata**

### **6.4 Metode ispitivanja**

Sva ispitivanja svojstva betona u svježem i očvrnulom stanju provedena su prema trenutno važećim normama, a koje su navedene niže u tablici 5. i tablici 6., zbog čega se neće posebno objašnjavati.

**Tablica 5 Metode ispitivanja svojstva u svježem stanju**

SVOJSTVO	NORMA
Ispitivanje slijeganjem	HRN EN 12350-2
Ispitivanje gustoće	HRN EN 12350-6
Sadržaj pora/tlačne metode	HRN EN 12350-7
Mjerenje temperature svježeg betona	HRN U.M1.032

Dodatno će se u analizi koristiti rezultati ispitivanja difuzije klorida i Otpornost betona na smrzavanje odmrzavanje – ljuštenje, a koji su određeni u sklopu projekta Anagennisi [31].

---

**Tablica 6 Metode ispitivanja svojstva u očvrnulom stanju**

Svojstvo	Norme/preporuke	Uzorci		
		Oblik	Dimenzije	Broj uzoraka
Tlačna čvrstoća	HRN EN 12390-3	Kocke	15x15x15 cm	3 uzorka po mješavini
Dubina prodiranja vode pod tlakom	EN 12390-8	Kocke	15x15x15 cm	3 uzorka po mješavini
Kapilarno upijanje	EN 13057	Cilindri	10x5 cm	3 uzorka po mješavini
Otpornost na smrzavanje odmrzavanje – Unutrašnje oštećenje	CEN/TR 15177	Kocke	15x15x5 cm	3 uzorka po mješavini

## 6.5 Analiza rezultata ispitivanja

### 6.5.1 Svojstva u svježem stanju

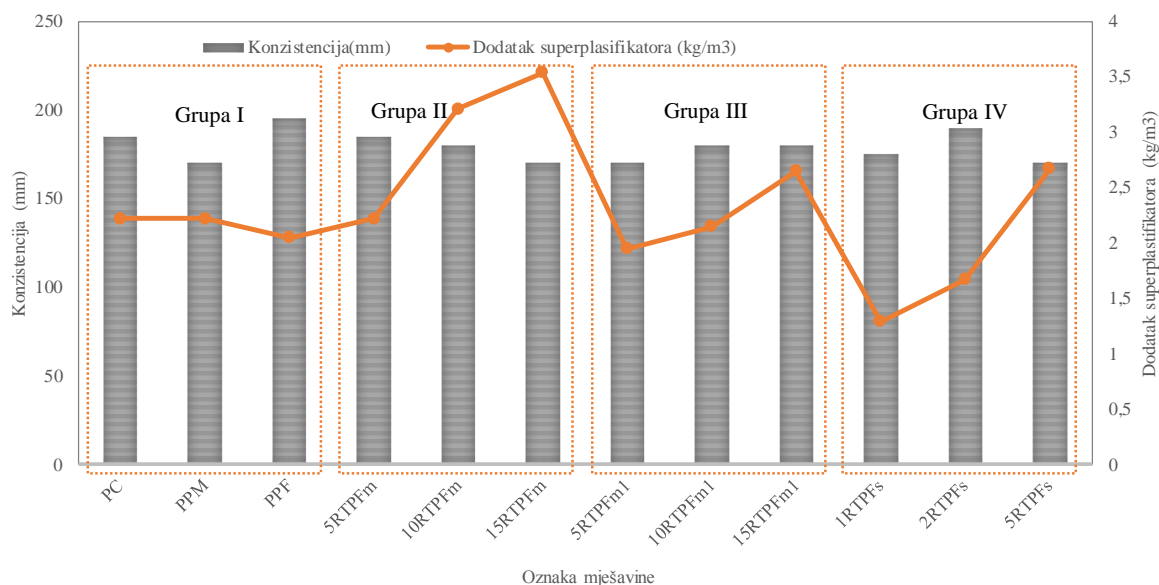
Rezultati ispitivanja svojstava u svježem stanju prikazana su u tablici 7. Usporedbom rezultata prikazanih u tablici 7 i na slici 14 jasno je da sve ispitane mješavine spadaju u isti razred konzistencije slijeganjem S4 (160-210 mm) jer su mjereni rezultati u rasponu 170 – 190 mm.

**Tablica 7 Svojstva u svježem stanju**

Oznaka mješavine	Konzistencija(mm)	Udio pora (%)	Temperatura (°C)	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )
PC	185	2,6	23,3	2,375
PP <sub>M</sub>	170	3,1	24	2,345
PP <sub>F</sub>	195	2,3	24,3	2,376
5RTPF <sub>m</sub>	185	2,6	23,6	2,370
10RTPF <sub>m</sub>	180	3,6	24,8	2,325
15RTPF <sub>m</sub>	170	3	21,9	2,333
5RTPF <sub>mi</sub>	170	2,8	21,6	2,368
10RTPF <sub>mi</sub>	180	3,6	24,8	2,325
15RTPF <sub>mi</sub>	180	5,1	21,1	2,273
1RTPF <sub>s</sub>	175	1,9	20,2	2,379
2RTPF <sub>s</sub>	190	2,00	21,1	2,389
5RTPF <sub>s</sub>	170	2,6	21,6	2,363

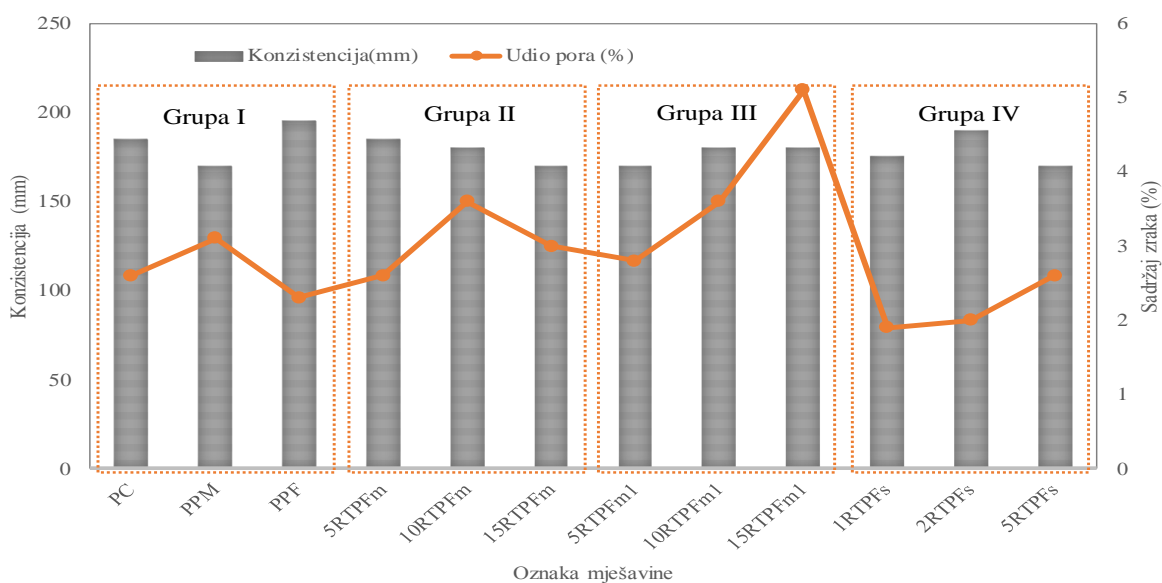
Usporednom mješavina s različitim udjelom i vrstom RTPF vlakana, jasno je da povećanje udjela RTPF utječe na povećane zahtjeve za superplastifikatorom, a da bi se ostvarila ista razina obradivosti. Zahtjev za povećanim udjelom superplastifikatora upućuje da dodatak RTPF utječe na smanjenu obradivost svježeg betona, a što je prethodno dokazano u [47, 53]s. Analiza rezultata ispitivanja istodobno pokazuje da za isti sastav betona, dodatak polipropilenskih vlakana u udjelu od 1 kg/m<sup>3</sup> ima zanemariv utjecaj na obradivost betona.





Slika 14 Utjecaj udjela vlakana na obradivost mikroarmiranih betona

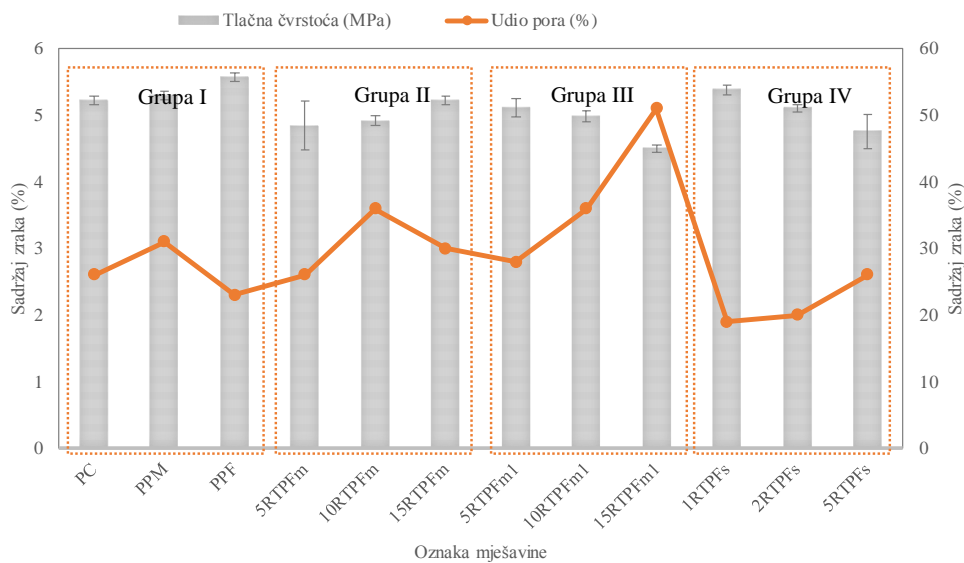
Analiza rezultata mjerenoj sadržaja zraka pokazuje da dodatak svih vrsta vlakana utječe na porast vrijednosti zraka u svježem betonu. Sadržaj zraka za PC je iznosio 1,83% dok je za mikroarmirani beton isti parametar iznosi od 2,03 do 5,10%, slika 14. Ujedno je sadržaj zraka rastao linearno s porastom udjela vlakana unutar svake grupe. Ukupno gledano veći udio zraka je zabilježen za grupu II i III gdje su korištena vlakna s većim udjelom gume, a što potvrđuje dosadašnje rezultate istraživanja [31] prema kojima guma zbog svoje površine utječe na povećane količine zahvaćenog zraka unutar betona. Gustoća analiziranih mješavina je bila između 2,27 kg/dm<sup>3</sup> (za 15RTPFm<sub>1</sub>) i 2,40 kg/dm<sup>3</sup> (za obični beton, PC).



Slika 15 Utjecaj udjela vlakana na svojstvo obradivosti i sadržaj zraka u svježem betonu

### 6.5.2 Tlačna čvrstoća

Prethodna istraživanja su pokazala da dodatak recikliranih tekstilnih vlakana (RTPF) ne utječe na tlačnu čvrstoću uzoraka [31, 46, 47]. Tijekom ovog istraživanja je potvrđeno navedeno saznanje. Tlačna čvrstoća referentnog betona oznake PC prati ostale rezultate. Količina i vrsta vlakana ne utječu na vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka. Međutim primjećuje se veza između sadržaja pora u svježem stanju i dobivenih tlačnih čvrstoća, slika 16. Uzorak 15RTPF<sub>m1</sub> koji ima najnižu vrijednost tlačne čvrstoće ima ujedno i najveći udio pora od 5,1% dok uzorak 1RTPF<sub>s</sub> sa većom vrijednosti tlačne čvrstoće ima i najmanji udio pora od 1,9%. Uzorak PP<sub>f</sub> sa najvećom vrijednosti tlačne čvrstoće ima 2.3% pora u svježem stanju i dodatak fibriliranih vlakana.



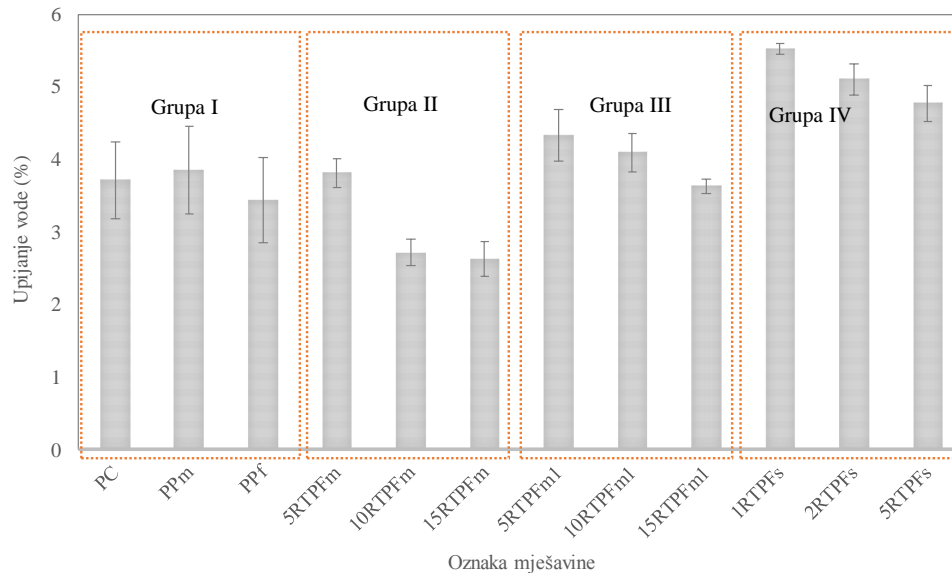
**Slika 16 Utjecaj udjela zraka u svježem stanju na vrijednosti tlačne čvrstoće mikroarmiranih betona**

### 6.5.3 Kapilarno upijanje

Na slici 17 prikazane su vrijednosti upijanja za sve 4 grupe mješavina. Rezultati potvrđuju pozitivan utjecaj polimernih vlakana na vrijednosti kapilarnog upijanja, gdje se taj učinak pripisuje smanjenoj propusnosti zbog zatvaranje dijela kapilarnih pora prisutnim vlaknima što ostavlja manju količinu dostupnih otvorenih pora za prirast vode zbog djelovanja kapilarnih sila [54].

Mješavine s pročišćenim RTPF prate dosadašnja istraživanja i ostvaruju najveće upijanje u odnosu na ostale ispitane mješavine. Navedena vlakna su postupkom pročišćavanja oslobođena granula gume u odnosu na RTPF<sub>m</sub> i RTPF<sub>m1</sub>. Mješavine skupine II s miješanim RTPF i najvećim udjelom gumenih granula imaju najmanje upijanje, a što je posljedica hidrofobnim svojstava gume. Dok pročišćena vlakna (grupa IV) povećavaju kapilarnu apsorpciju u odnosu na referentne mješavine. Mješavine s dodatkom fibriliranih polipropilenskih vlakana (PP<sub>f</sub>) ostvarile su manje upijanje u odnosu na istu količinu monofilamentnih polipropilenskih vlakana dodanih u mješavinu PP<sub>m</sub>. Bolji rezultat

možemo objasniti razlikom u geometrijskim karakteristikama vlakana, gdje je duljina korištenih fibriliranih vlakana 3 puta veća u odnosu na monofilamenta vlakna. U konačnici možemo zaključiti da kod mješavina s RTPF najveći doprinos smanjenom kapilarnom upijanju imaju prisutne granule gume zaostale iz procesa reciklaže.

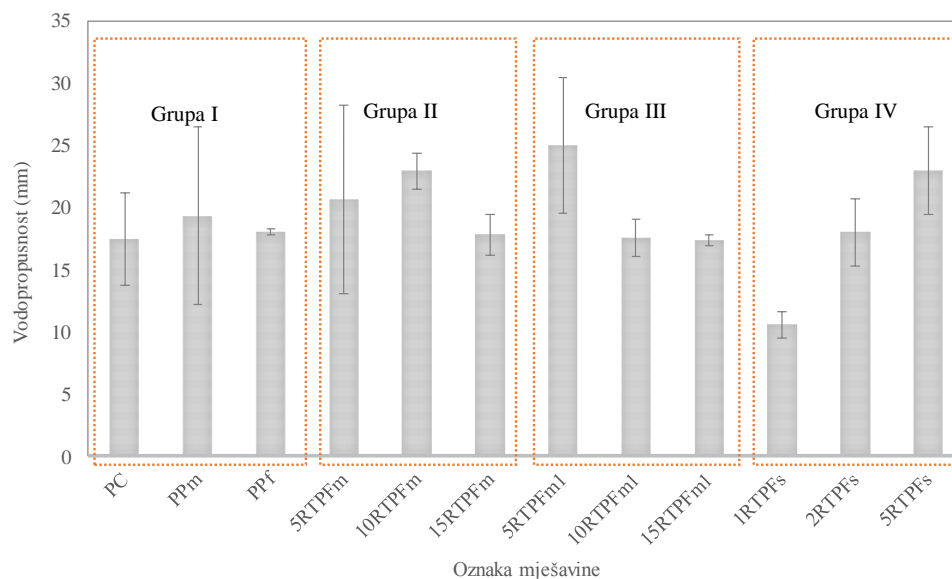


Slika 17 Utjecaj udjela RTPF na vrijednost upijene vode tijekom vremena

#### 6.5.4 Vodonepropusnost

Pozitivan utjecaj miješanih RTPF s zaostalom gumom iz procesa reciklaže u slučaju tečenja vode pod pritiskom nije zamijećen. Posljedica je to pojave da se uslijed fizikalnih karakteristika gume ona pod pritiskom deformira i na taj način otvara put vodi u strukturu materijala. Uzorak sa polipropilenskim monofilibriranim vlaknima ne pokazuje poboljšanje u odnosu na ostale uzorke.

Uzorci koji sadrže pročišćena vlakna pokazuju poboljšanje. Najmanja vrijednost prodiranja pripada uzorku 1RTPF<sub>s</sub> koji ima najmanji udio vlakana u sastavu. Uzorak sa 5 kg/m<sup>3</sup> pročišćenih vlakana ima 48% lošiji rezultat u odnosu na uzorak sa 1kg/m<sup>3</sup> pročišćenih vlakana. Rezultati, prikazani slikom 18, mogu se povezati sa udjelom pora u svježem stanju, kako se povećava poroznost tako raste i dubina prodiranja vode. Prema normi HRN EN 1128 rezultati se rangiraju u 3 razreda vodonepropusnosti prema srednjem prodoru vode u strukturu. Uzorak 1RTPF<sub>s</sub> zadovoljava najstroži (VDP3) razred kojem je propisana maksimalna vrijednost 15 mm. Dok ostali uzorci zadovoljavaju VDP2 razred sa graničnom vrijednošću od 30 mm.



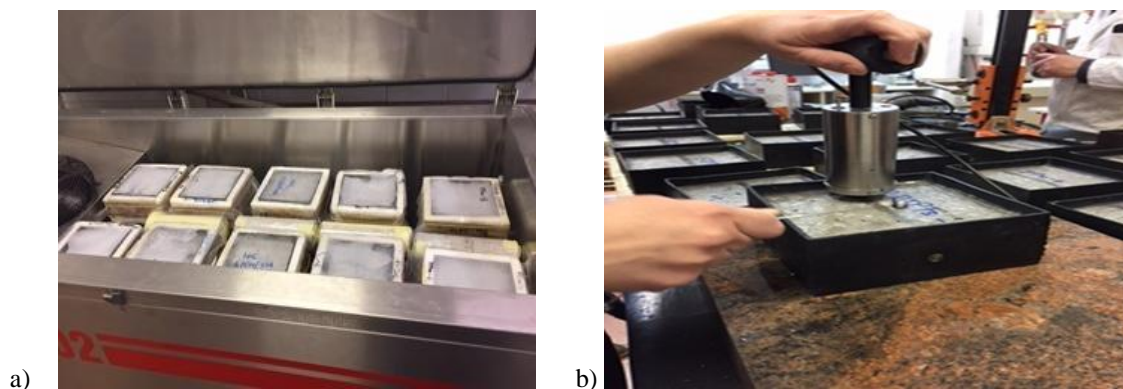
**Slika 18 Utjecaj udjela RTPF na vrijednost maksimalnog prodora vode pod pritiskom**

#### 6.5.5 Ispitivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje – oštećenje unutarnje strukture

Ispitivanje betona na smrzavanje odmrzavanje ljuštenjem se može provoditi prema CEN/TS 123-9:2006 (Ispitivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje – Metoda ljuštenjem) i CEN/TS 15177:2006 (Ispitivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje - Oštećenje unutrašnje strukture). Metoda ljuštenjem prati gubitak materijala sa površine betonskog uzorka dok metoda ispitivanja unutrašnjeg oštećenja ukazuje na razaranje strukture koje nije vidljivo na površini.

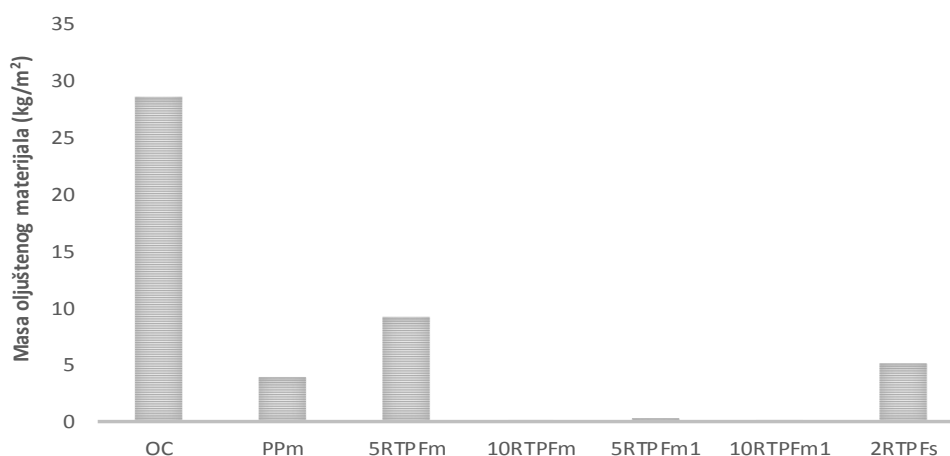
##### 6.5.5.1 Metoda temeljne transverzalne frekvencije

Metoda ispitivanja smrzavanja odmrzavanja ljuštenjem nije prikladna za betone armirane vlaknima [31]. Oljušteni dijelovi betona ostaju vlaknima pričvršćeni za betonski uzorak zbog čega rezultati ispitivanja nisu pouzdani. Za betone sa dodatkom vlakana prikladnija je metoda temeljne transverzalne frekvencije koja se temelji na širenju longitudinalnih valova kroz materijal. Temeljna transverzalna frekvencija se određuje Impact echo metodom, slika 19 b), a vrijednost oštećenja prikazuje padom dinamičkog modula elastičnosti. Kratkotrajnim udarcem čeličnim udaraljka dolazi do generiranja niskofrekventnog tlačnog vala koji se širi kroz materijal. Reflektiranje tlačnog vala izaziva pomake na površini koji se registriraju akcelerometrom. Računalo prikazuje zapis pomaka površine u vremenu tj. zapis u vremenskoj domeni. Podatke obrađujemo Fourierovim transformacijama kako bi smo dobili frekvencijsku domenu koja nam daje spektar amplituda sa ciljem da očitamo vrijednost dominantne frekvencije [55].



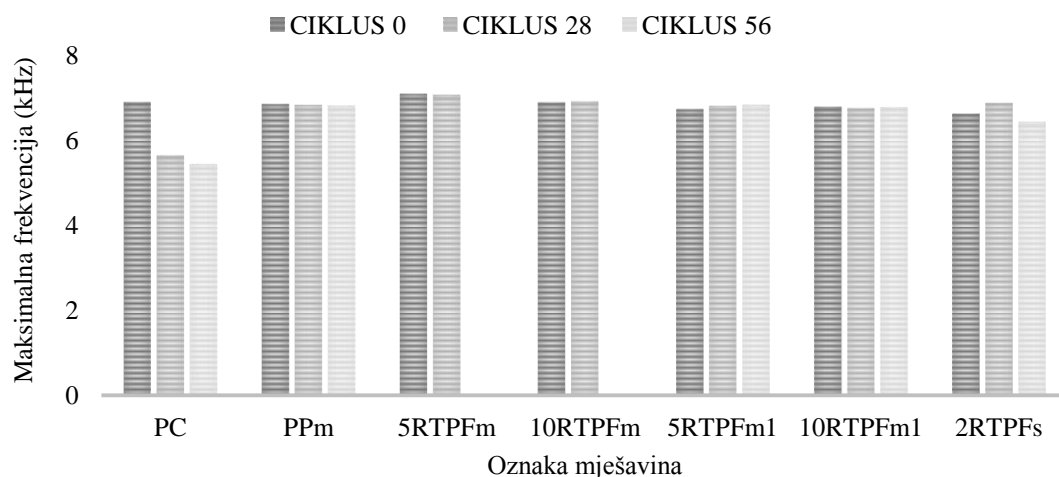
**Slika 19** Određivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje – unutarnje oštećenje strukture: a) položaj uzoraka u škrinji, b) određivanje temeljne transverzalne frekvencije Impact echometodom

Uzimajući u obzir rezultate ispitivanja otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja sa soli [31], odabrane su najbolje mješavine s RTPF (5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub>, 5RTPF<sub>m1</sub>, 10RTPF<sub>m1</sub>, 2RTPF<sub>s</sub>) i dvije referentne mješavine (PC, PP<sub>m</sub>), slika 18 a). Dobiveni rezultati pokazuju da se mješavine 10RTPF<sub>m</sub>, 5RTPF<sub>m1</sub>, 10RTPF<sub>m1</sub> mogu koristiti čak i u razredu XF4, a bez primjene uobičajnih kemijskih dodataka za postizanje tražene otpornosti na smrzavanja i odmrzavanja, s obzirom da je gubitak mase ljuštenjem manji od 0.5 kg/m<sup>2</sup>.

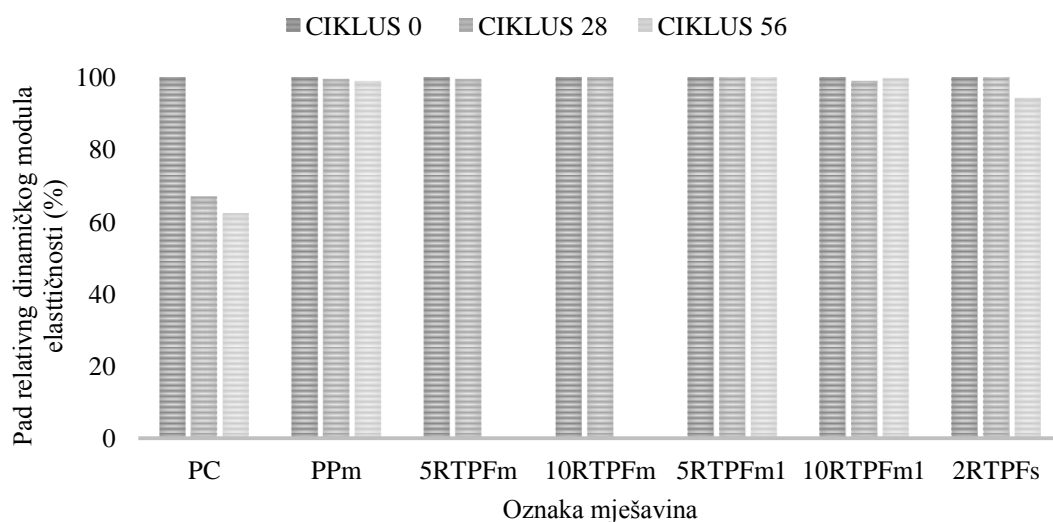


**Slika 20** Gubitak mase ljuštenjem za odabrane mješavine [31]

Odabrane mješavine su potom izložene djelovanju smrzavanja i odmrzavanja bez dodatka soli za odmrzavanje, a pojedinačni rezultati nakon 0, 28 i 56 ciklusa prikazani su na slikama 23, 24 i 25 dok su srednje vrijednosti relativnog dinamičkog modula elastičnosti (RDM) su prikazani na slikama 20 i 21. Veće vrijednosti RDM indikacija su veće otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Kao što proizlazi iz slika 16 i 17, smrzavanje i odmrzavanje betona s PP<sub>m</sub> i RTPF pokazuje jako dobru otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja.

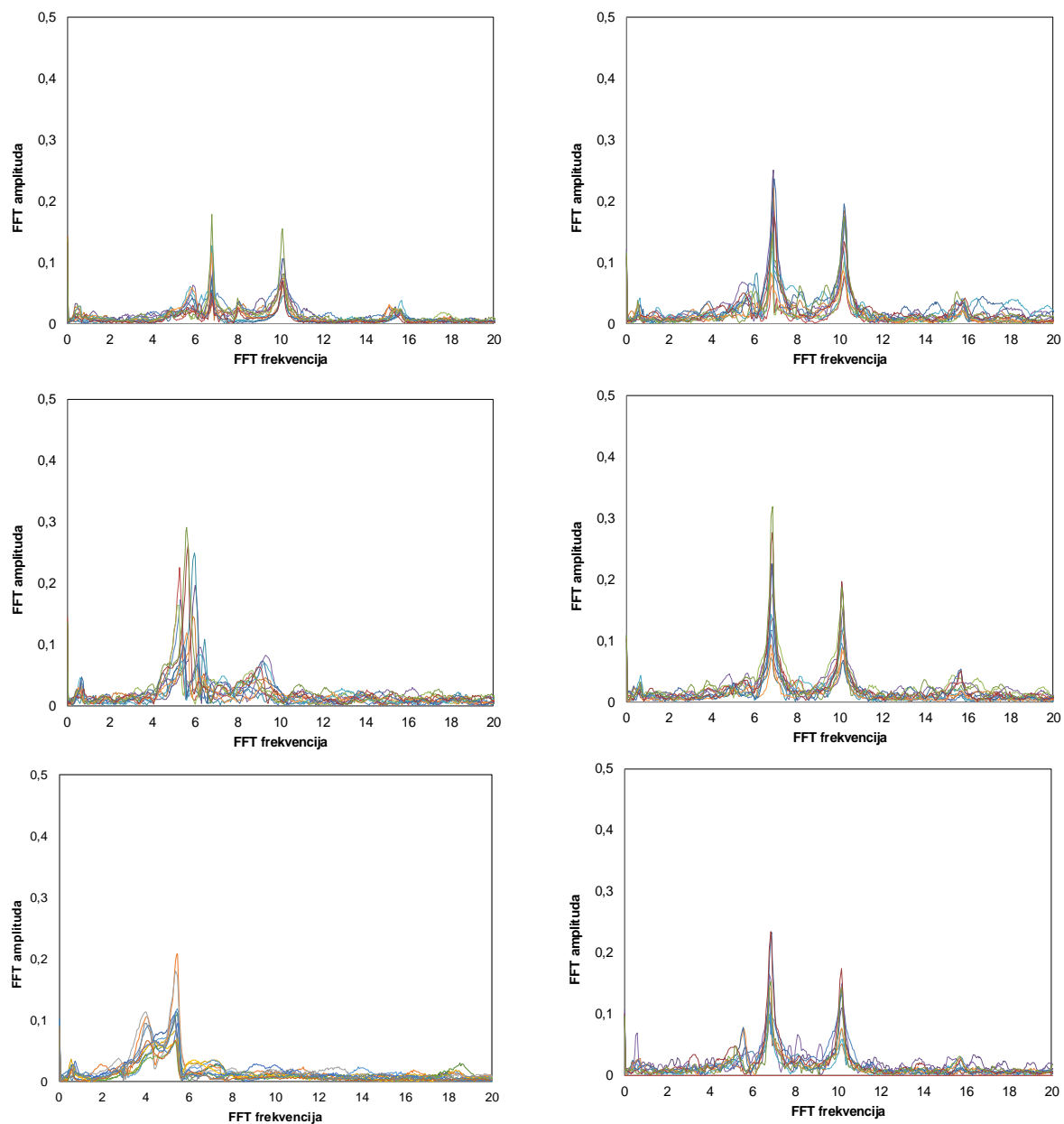


Slika 21 Promjena maksimalne transverzalne frekvencije tijekom vremena

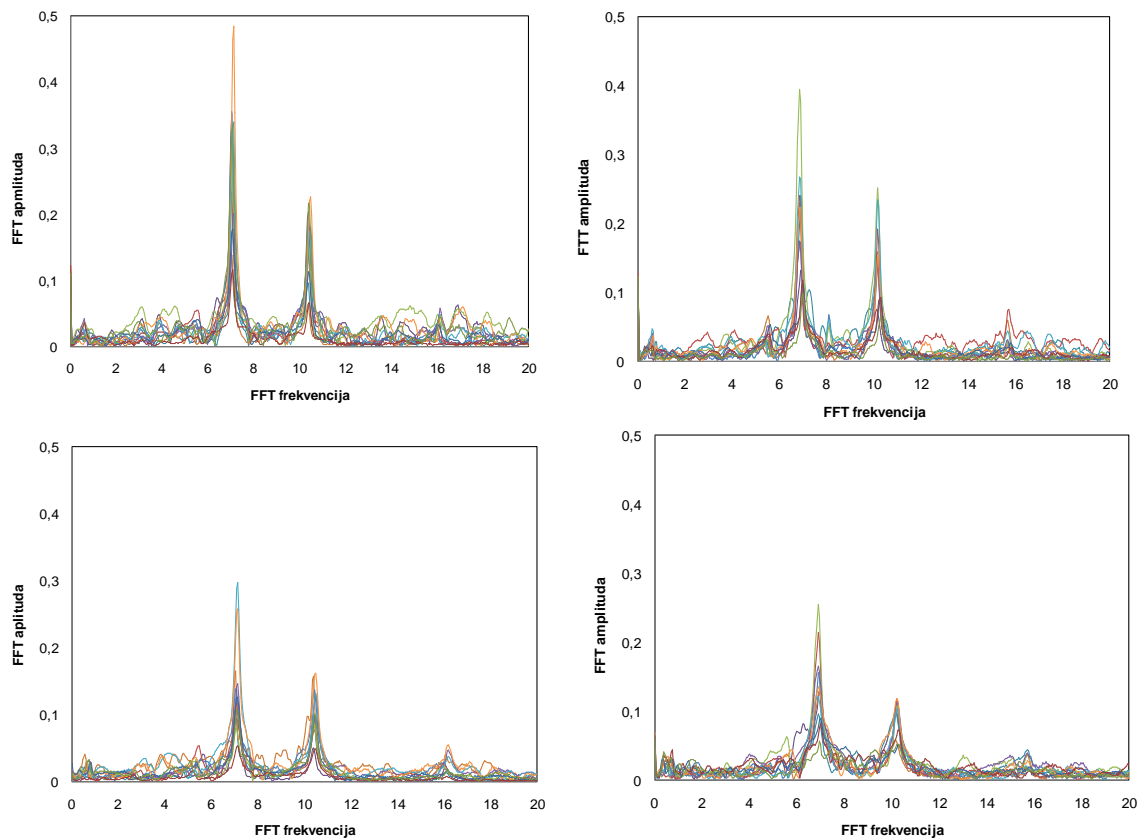


Slika 22 Pad relativnog dinamičkog modula tijekom vremena

Pad temeljne transverzalne frekvencije je uvjetovan većim unutrašnjim oštećenjem strukture betona. Da bi uzorci zadovoljili razred izloženosti XF3 maksimalni pad relativnog modula elastičnosti treba biti manji od  $15\% \pm 2\%$  nakon 56 ciklusa, za uporabni vijek od 50 godina. Za razred izloženosti XF1, pad dinamičkog modula treba biti manji od  $25\% \pm 5\%$  nakon 28 ciklusa. Promatrajući samo vrijednosti temeljne transverzalne frekvencije jasno je da sve ispitane mješavine pokazuju vrlo dobru otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, sve izuzev mješavine običnog betona, slika 21.

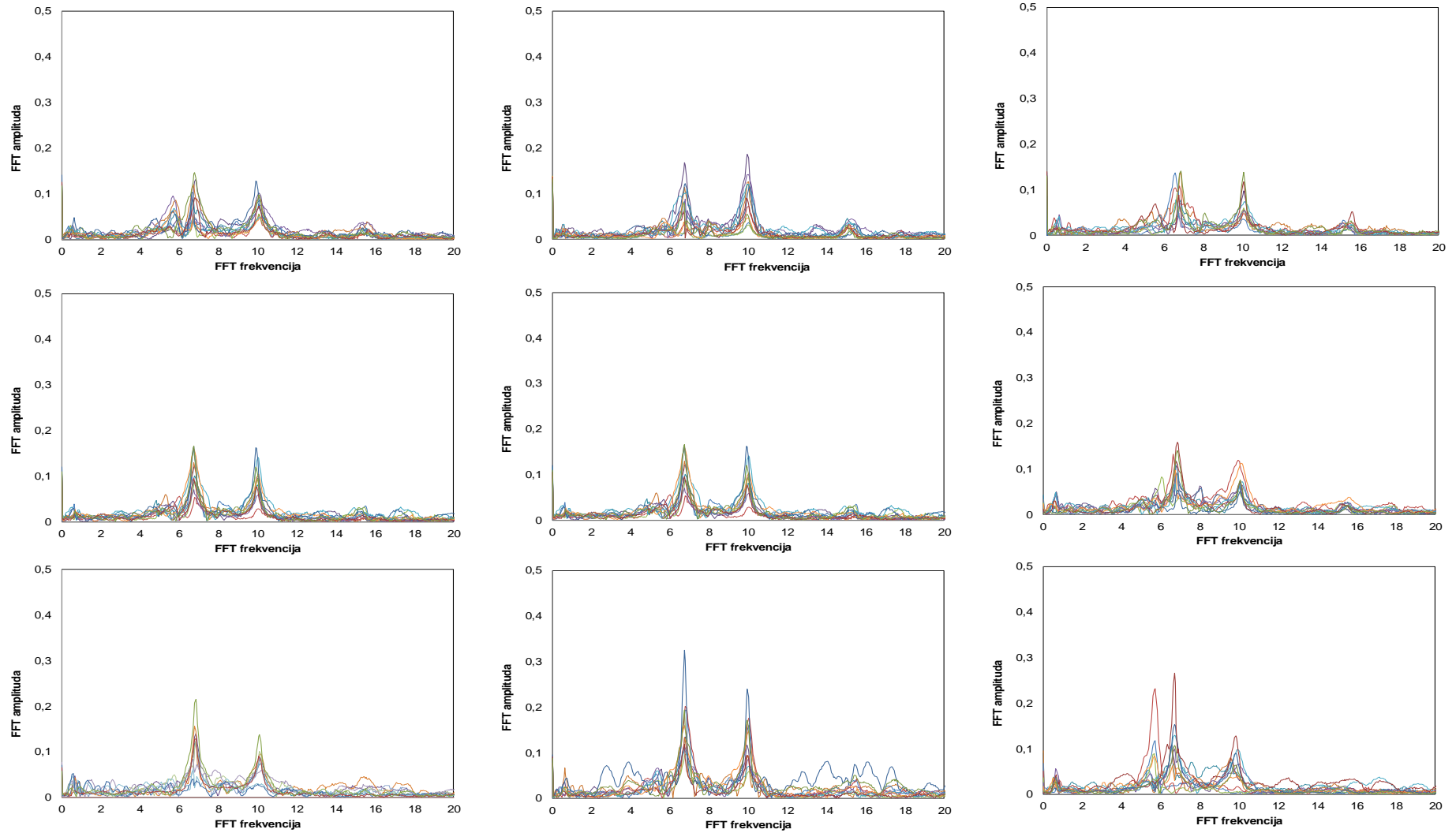


Slika 23 Temeljna transverzalna frekvencija za mješavine: PC i PP<sub>m</sub> nakon: a) 0 ciklusa, b) 28 ciklusa, c) 56 ciklusa



Slika 24 Temeljna transferzalna frekvencija za mješavine: 5RTPFm i 10RTPFm nakon: a) 0 ciklusa b) 28 ciklusa





Slika 25 Temeljna transversalna frekvencija za mješavine: 5RTPF<sub>m1</sub>, 10RTPF<sub>m1</sub>, 2RTPF<sub>3</sub> nakon: a) 0 ciklusa, b) 28 ciklusa, c) 56 ciklusa

### 6.5.6 *Diskusija*

Utjecaj udjela vlakana na obradivost mikroarmiranih betona dana je na slici 14. Usporedbom mješavina jasno je da povećanje udjela RTPF utječe na povećane zahtjeve za superplastifikatorom, a da bi se ostvarila ista radina obradivosti. Analiza rezultata mjerenog sadržaja zraka dana je na slici 15. Iz koje se vidi da dodatak svih vrsta vlakana utječe na porast vrijednosti zraka u svježem betonu. Veći udio zraka zabilježen je za grupu II i III gdje su korištena vlakna s većim udjelom gume.

Utjecaj udjela zraka u svježem stanju na vrijednosti tlačne čvrstoće mikroarmiranih betona dana je slikom 16. Primjećuje se veza između sadržaja pora u svježem stanju i dobivenih tlačnih čvrstoća. Uzorak 15RTPF<sub>m</sub> koji ima najnižu vrijednost tlačne čvrstoće, ima najveći udio pora dok uzorak 1RTPF<sub>s</sub> sa većom vrijednosti tlačne ima najmanji udio pora.

Rezultati, prikazani slikom 17. potvrđuju pozitivan utjecaj polimernih vlakana na vrijednosti kapilarnog upijanja što se pripisuje smanjenoj propusnosti dijela kapilarnih pora prisutnim vlaknima što ostavlja manju količinu dostupnih otvorenih pora za prirast vode zbog djelovanja kapilarnih sila [54]. Utjecaj udjela RTPF na vrijednost maksimalnog prodora vode pod pritiskom prikazan je slikom 18. Uzorak 1RTPF<sub>s</sub> zadovoljava najstroži (VDP3) razred koje je propisana maksimalna vrijednost od 15 mm, dok ostali uzorci zadovoljavaju na VDP2 razred s graničnom vrijednošću od 30 mm.

Pad relativnog dinamičkog modula elastičnosti tijekom vremena određivanjem temeljne transverzalne frekvencije Impact echo metodom, prikazan na slici 21, ostvaren je samo kod običnog betona dok su ostale mješavine pokazale dobru otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Dobra otpornost betona s recikliranim tekstilnim vlaknima može se povezati sa većom količinom zahvaćenog zraka pri miješanju, svojstvima i postotku miješanih RTPF vlakana koji sadrže više od 60 % gume koja amortizira unutrašnje naprezanje uslijed promjene agregatnog stanja vode, a praćeno povećanjem volumena.

## **6.6 Eksperimentalno određivanje parametara za modeliranje uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju smrzavanja i odmrzavanja**

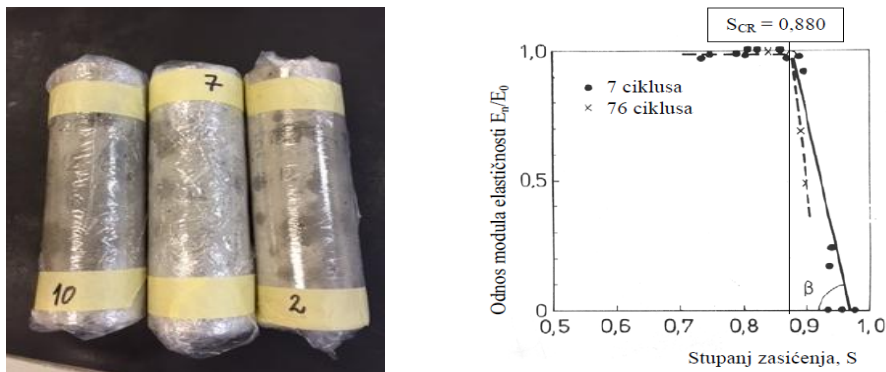
### 6.6.1 *Određivanje kritičnog stupnja saturacije $S_{cr}$*

Određivanje kritičnog stupnja saturacije  $S_{CR}$  provedeno je eksperimentalno na mješavinama 2RTPF<sub>s</sub>, 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub>. Zbog složenosti kondicioniranja uzoraka i određivanja kritičnog stupnja saturacije odabrane su samo mješavine kod kojih je ispitivanjem otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje sa i bez soli utvrđena iznimna otpornost. Postupak određivanja kritičnog stupnja saturacije  $S_{cr}$  određen je prema [26, 56].

---

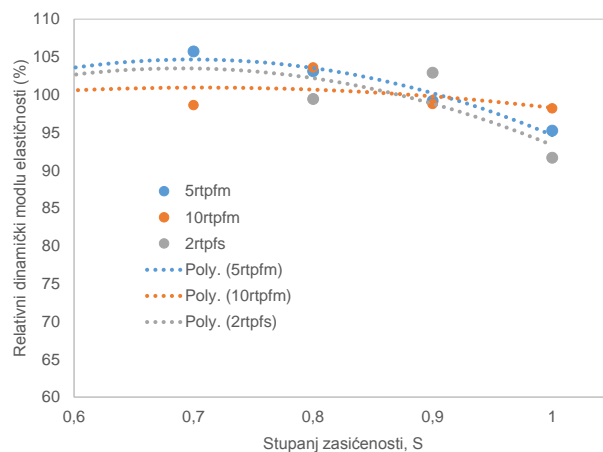
Za određivanje kritičnog stupnja saturacije  $S_{cr}$  korišteni su valjkasti uzroci dimenzija 7,5 x 22 cm. Kondicioniranje je provedeno na način da su uzorci prvo sušeni do stalne mase ( $m_d$ ). Nakon čega su uronjeni u vodu tijekom 14 dana, potom su tijekom 2 sata vakumirani u praznom eksikatoru i dodatna 4 sata vakumirani potopljeni pod vodom. Nakon opisanog postupka utvrđena je masa zasićenih površinski suhih uzoraka ( $m_z$ ). Uzorci su zatim dodatno sušeni kako bi postigli traženi stupanj saturacije od 0,7 - 1,0 te su zamotani u foliju kako ne bi dobivali ni gubili na vlažnosti (slika 26 a).

Prije izlaganja uzoraka ciklusima smrzavanja i odmrzavanja provedeno je početno ultrazvučno ispitivanje na uzorcima. Uzorci su izloženi djelovanju 14 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja nakon čega je određena brzina prolaska ultrazvučnog vala. Kritični stupanj saturacije određuje se u točki pada vrijednosti relativnog dinamičkog modula elastičnosti, slika 26 b) [41].

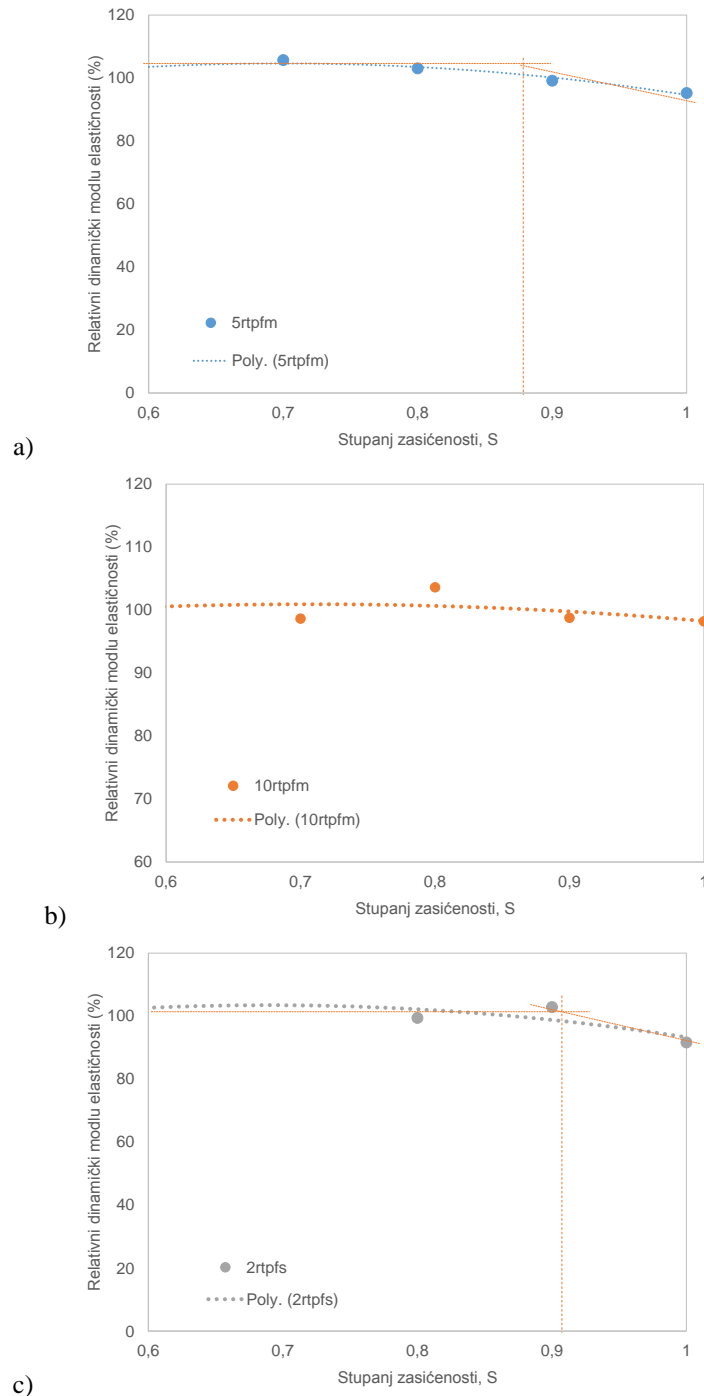


Slika 26 a) uzorci za određivanje kritičnog stupnja saturacije, b) pad modula elastičnosti u odnosu na kritični stupanj saturacije

Kritični stupanj saturacije  $S_{CR}$  je definiran kao maksimalna zasićenost vodom u uzorku prilikom koje ne dolazi do oštećenja strukture betona. Na slici 27. je prikazan pad relativnog dinamičkog modula elastičnosti u odnosu na stupanj saturacije uzoraka.



Slika 27 Određivanje kritičnog stupnja saturacije uzimajući u obzir pad dinamičkog modula elastičnosti



**Slika 28** Određivanje kritičnog stupnja saturacije uzimajući u obzir pad dinamičkog modula elastičnosti za: a) mješavinu 5RTPF<sub>m</sub>, b) mješavinu 10RTPF<sub>m</sub> i c) mješavinu 2RTPF<sub>s</sub>

Uzorci mješavine 10RTPF<sub>m</sub> ne pokazuju pad relativnog dinamičkog modula elastičnosti nakon 14 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja, slika 28b. Uzorci serija 5RTPF<sub>m</sub> pokazuju pad pri 89%, a 2RTPF<sub>s</sub> pokazuju pad pri zasićenosti pri 91%, slika 28a i 28c. Svi uzorci imaju istu količinu cementa od 370 kg/m<sup>3</sup>, miješani su i njegovani pod istim uvjetima. Najveću količinu zahvaćenog zraka u svježem stanju ima uzorak 10RTPF<sub>m</sub> (Tablica 7). Zaključujemo sa uzorak 10RTPF<sub>m</sub> ima dobru

otpornost na smrzavanje i odmrzavanje pri potpunom zasićenju. Navedeno se može objasniti dostatnom količinom uvučenog zraka, svojstvima i postotku miješanih vlakana koji sadrže više od 60% gume koja amortizira unutrašnje naprezanje nastalo ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Uzorci 5RTPF<sub>m</sub> i 2RTPF<sub>s</sub> također pokazuju dobre rezultate za neaerirane pri visokim stupnjevima zasićenja.

#### 6.6.2 Stvarni sadržaj vode $S_{ACT}$

$S_{ACT}$  definira stvarnu količinu vode koju beton upije tijekom određenog vremena. Eksperimentalno je određen metodom kapilarnog upijanja prema normi HRN EN 13057, slika 28. Kratkotrajno upijanje određeno je iz dijela krivulje upijanja do prijelomne točke. Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja prije prijelomne točke za sastave betona 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub> i 2RTPF<sub>s</sub> dani su tablicama 8, 9 i 10.



Slika 29 Ispitivanje kapilarnog upijanja tijekom 180 sati

Tablica 8 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja prije prijelomne točke za sastave betona 5RTPF<sub>m</sub>

5RTPF <sub>m</sub>										
Oznaka uzorka		5RTPF <sub>m</sub> -1			5RTPF <sub>m</sub> -2			5RTPF <sub>m</sub> -3		
Φ	(mm)	100,01			99,80			99,50		
h	(mm)	45,26			45,80			45,28		
P	(mm <sup>2</sup> )	7851,6			7818,6			7771,7		
Vrijeme		m	i	Ku	m	i	Ku	m	i	Ku
(min)	(√h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)
0	0,00	790,50	0,00	0,00	810,00	0,00	0,00	794,10	0,00	0,00
1	0,13	791,81	0,17	1,29	811,25	0,16	1,24	795,29	0,15	1,19
5	0,29	792,86	0,30	1,04	812,16	0,28	0,96	796,14	0,26	0,91
15	0,50	794,36	0,49	0,98	813,63	0,46	0,93	797,36	0,42	0,84
30	0,71	795,94	0,69	0,98	815,06	0,65	0,92	798,65	0,59	0,83
60	1,00	798,20	0,98	0,98	817,06	0,90	0,90	800,58	0,83	0,83
120	1,41	801,46	1,40	0,99	819,80	1,25	0,89	803,41	1,20	0,85
240	2,00	805,67	1,93	0,97	823,39	1,71	0,86	807,29	1,70	0,85
1440	4,90	822,62	4,09	0,84	838,69	3,67	0,75	823,40	3,77	0,77
1500	5,00	<b>823,00</b>	4,14	0,83	839,00	3,71	0,74	823,85	3,83	0,77
2880	6,93	827,38	4,70	0,68	843,88	4,33	0,63	830,52	4,69	0,68
4320	8,49	829,88	5,02	0,59	<b>846,90</b>	4,72	0,56	<b>832,77</b>	4,98	0,59

**Tablica 9 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja prije prijelomne točke za sastave betona 10RTPF<sub>m</sub>**

10RTPF <sub>m</sub>										
Oznaka uzorka		10RTPF <sub>m</sub> -1			10RTPF <sub>m</sub> -2			10RTPF <sub>m</sub> -3		
Φ	(mm)	100,44			99,91			99,82		
h	(mm)	44,03			45,82			43,60		
P	(mm <sup>2</sup> )	7919,2			7835,9			7821,8		
Vrijeme		m	i	Ku	m	i	Ku	m	i	Ku
(min)	(√h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)
0	0,00	751,57	0,00	0,00	794,84	0,00	0,00	756,29	0,00	0,00
1	0,13	753,09	0,19	1,49	796,98	0,27	2,12	757,91	0,21	1,60
5	0,29	753,53	0,25	0,86	797,52	0,34	1,18	758,19	0,24	0,84
15	0,50	754,44	0,36	0,72	798,75	0,50	1,00	759,08	0,36	0,71
30	0,71	755,73	0,53	0,74	800,05	0,66	0,94	760,10	0,49	0,69
60	1,00	756,88	0,67	0,67	801,98	0,91	0,91	761,11	0,62	0,62
120	1,41	758,79	0,91	0,64	804,09	1,18	0,83	762,76	0,83	0,58
240	2,00	761,19	1,21	0,61	806,71	1,51	0,76	764,90	1,10	0,55
1440	4,90	770,78	2,43	0,50	817,32	2,87	0,59	773,45	2,19	0,45
1500	5,00	770,85	2,43	0,49	817,47	2,89	0,58	773,74	2,23	0,45
2880	6,93	775,98	3,08	0,44	822,58	3,54	0,51	778,23	2,80	0,40

**Tablica 10 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja prije prijelomne točke za sastave betona 2RTPF<sub>s</sub>**

2RTPF <sub>s</sub>										
Oznaka uzorka		2RTPF <sub>s</sub> -1			2RTPF <sub>s</sub> -2			2RTPF <sub>s</sub> -3		
Φ	(mm)	100,70			99,50			100,56		
h	(mm)	50,66			50,31			49,25		
P	(mm <sup>2</sup> )	7960,3			7771,7			7938,2		
Vrijeme		m	i	Ku	m	i	Ku	m	i	Ku
(min)	(√h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)
0	0,00	882,12	0,00	0,00	883,06	0,00	0,00	877,14	0,00	0,00
1	0,13	883,91	0,22	1,74	885,31	0,29	2,24	879,04	0,24	1,85
5	0,29	885,39	0,41	1,42	886,81	0,48	1,67	880,89	0,47	1,64
15	0,50	887,46	0,67	1,34	889,00	0,76	1,53	883,01	0,74	1,48
30	0,71	889,86	0,97	1,38	891,53	1,09	1,54	885,28	1,03	1,45
60	1,00	892,56	1,31	1,31	894,53	1,48	1,48	887,99	1,37	1,37
120	1,41	896,36	1,79	1,26	898,81	2,03	1,43	892,01	1,87	1,32
240	2,00	902,45	2,55	1,28	905,70	2,91	1,46	898,49	2,69	1,34
1440	4,90	923,54	5,20	1,06	929,86	6,02	1,23	921,35	5,57	1,14
1500	5,00	924,37	5,31	1,06	930,70	6,13	1,23	922,06	5,66	1,13
2880	6,93	931,96	6,26	0,90	932,86	6,41	0,92	923,84	5,88	0,85

Dugotrajno upijanje opaža se nakon prijelomne točke. Rezultati ispitivanja koeficijenta kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja nakon prijelomne točke za sastave betona 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub> i 2RTPF<sub>s</sub> dani su tablicama 11, 12 i 13.

**Tablica 11 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja nakon prijelomne točke za saastave betona 5RTPF<sub>m</sub>**

5RTPF <sub>m</sub>										
Oznaka uzorka		5RTPF <sub>m</sub> -1			5RTPF <sub>m</sub> -2			5RTPF <sub>m</sub> -3		
Φ	(mm)	100,01			99,80			99,50		
h	(mm)	45,26			45,80			45,28		
P	(mm <sup>2</sup> )	7851,6			7818,6			7771,7		
Vrijeme		m	i	Ku	m	i	Ku	m	i	Ku
(min)	(√h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)
5760	9,80	832,49	5,35	0,55	849,66	5,07	0,52	835,18	5,29	0,54
7200	10,95	832,84	5,39	0,49	849,66	5,07	0,46	835,43	5,32	0,49
8640	12,00	833,26	5,45	0,45	849,95	5,11	0,43	835,78	5,36	0,45
10800	13,42	830,44	5,09	0,38	848,01	4,86	0,36	833,87	5,12	0,38

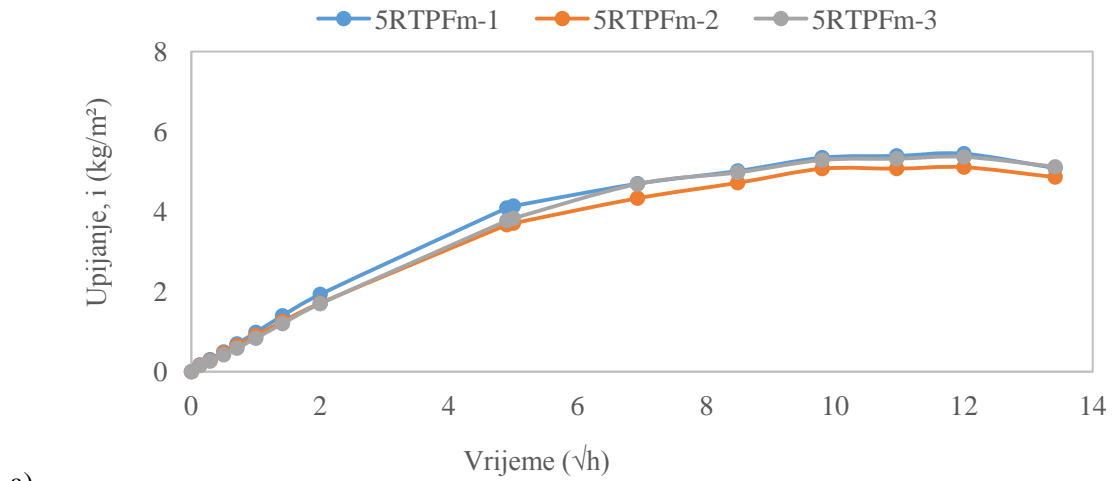
**Tablica 12 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja nakon prijelomne točke za saastave betona 10RTPF<sub>m</sub>**

10RTPF <sub>m</sub>										
Oznaka uzorka		10RTPF <sub>m</sub> -1			10RTPF <sub>m</sub> -2			10RTPF <sub>m</sub> -3		
Φ	(mm)	100,44			99,91			99,82		
h	(mm)	44,03			45,82			43,60		
P	(mm <sup>2</sup> )	7919,2			7835,9			7821,8		
Vrijeme		m	i	Ku	m	i	Ku	m	i	Ku
(min)	(√h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)
4320	8,49	781,47	3,78	0,44	824,72	3,81	0,45	780,51	3,10	0,36
5760	9,80	782,17	3,86	0,39	828,38	4,28	0,44	783,40	3,47	0,35
7200	10,95	782,63	3,92	0,36	829,44	4,42	0,40	784,16	3,56	0,33
8640	12,00	783,11	3,98	0,33	830,21	4,51	0,38	784,91	3,66	0,30
10800	13,42	783,06	3,98	0,30	830,58	4,56	0,34	785,29	3,71	0,28

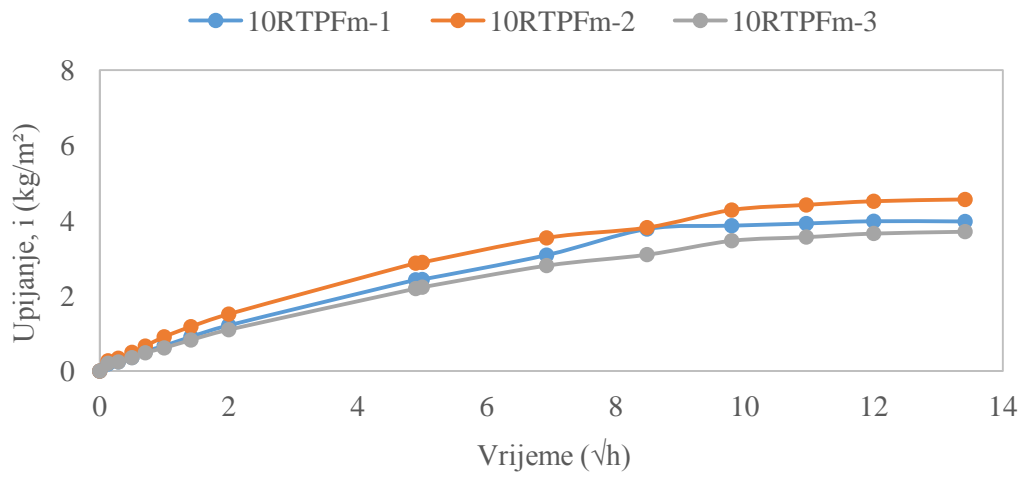
**Tablica 13 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja nakon prijelomne točke za saastave betona 2RTPF<sub>s</sub>**

2RTPF <sub>s</sub>										
Oznaka uzorka		2RTPF <sub>s</sub> -1			2RTPF <sub>s</sub> -2			2RTPF <sub>s</sub> -3		
Φ	(mm)	100,70			99,50			100,56		
h	(mm)	50,66			50,31			49,25		
P	(mm <sup>2</sup> )	7960,3			7771,7			7938,2		
Vrijeme		m	i	Ku	m	i	Ku	m	i	Ku
(min)	(√h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)	(g)	(kg/m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>2</sup> √h)
4320	8,49	932,47	6,33	0,75	933,39	6,48	0,76	924,30	5,94	0,70
5760	9,80	932,85	6,37	0,65	933,94	6,55	0,67	924,90	6,02	0,61
7200	10,95	932,72	6,36	0,58	933,78	6,53	0,60	924,53	5,97	0,54
8640	12,00	932,92	6,38	0,53	934,06	6,56	0,55	924,83	6,01	0,50
10800	13,42	933,00	6,39	0,48	934,58	6,63	0,49	925,44	6,08	0,45

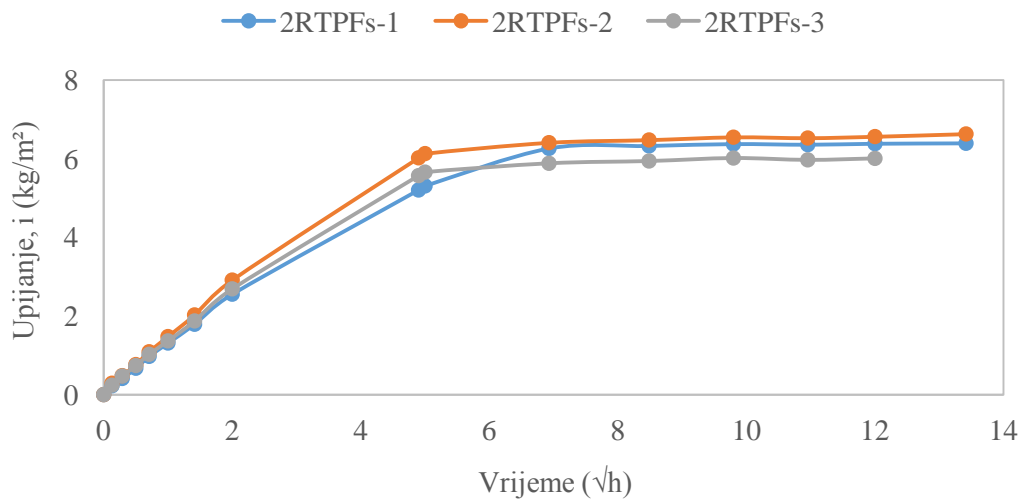
Na slici 30 prikazana je ovisnost kapilarnog upijanja o korijenu vremena za period prije i nakon prijelomne točke upijanja za sastave betona 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub>, 2RTPF<sub>s</sub>.



a)



b)



c)

Slika 30 Ovisnost kapilarnog upijanja o korijenu vremena za period prije i nakon prijelomne točke upijanja u trajanju od 180 sati



Dobivene vrijednosti apsorpcije metodom kapilarnog upijanja vode izražene u  $\text{kg/m}^2$ , potrebno je izraziti u vrijednostima stupnja zasićenja, što je prikazano tablicom 14.

**Tablica 14 Sadržaj vode izražen u vrijednostima stupnja zasićenja za početnu i prijelomnu točku u ispitivanju koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja za sastave 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub>, 2RTPF<sub>s</sub>**

Oznaka uzorka	$a_0(\%)$	$V_{UZ}(\text{dm}^3)$	$m_z(\text{g})$	$m_d(\text{g})$	$m_0(\text{g})$	$S_0$	$m_b(\text{g})$	$S_b$
<b>5RTPF<sub>m</sub></b>								
1	2,6	0,355	833,3	790,50	791,81	0,025	823,0	0,605
2	2,6	0,358	849,95	810,0	811,25	0,025	846,9	0,673
3	2,6	0,352	837,78	794,10	795,29	0,023	835,18	0,762
<b>10RTPF<sub>m</sub></b>								
1	3,6	0,349	783,11	751,57	753,09	0,034	775,98	0,554
2	3,6	0,359	830,58	794,84	796,98	0,044	822,58	0,574
3	3,6	0,341	785,29	756,29	757,91	0,039	778,23	0,528
<b>2RTPF<sub>s</sub></b>								
1	2,0	0,403	933,00	882,12	883,91	0,030	931,96	0,848
2	2,0	0,391	934,58	883,06	885,31	0,039	932,86	0,840
3	2,0	0,391	925,44	877,16	879,04	0,033	923,84	0,832

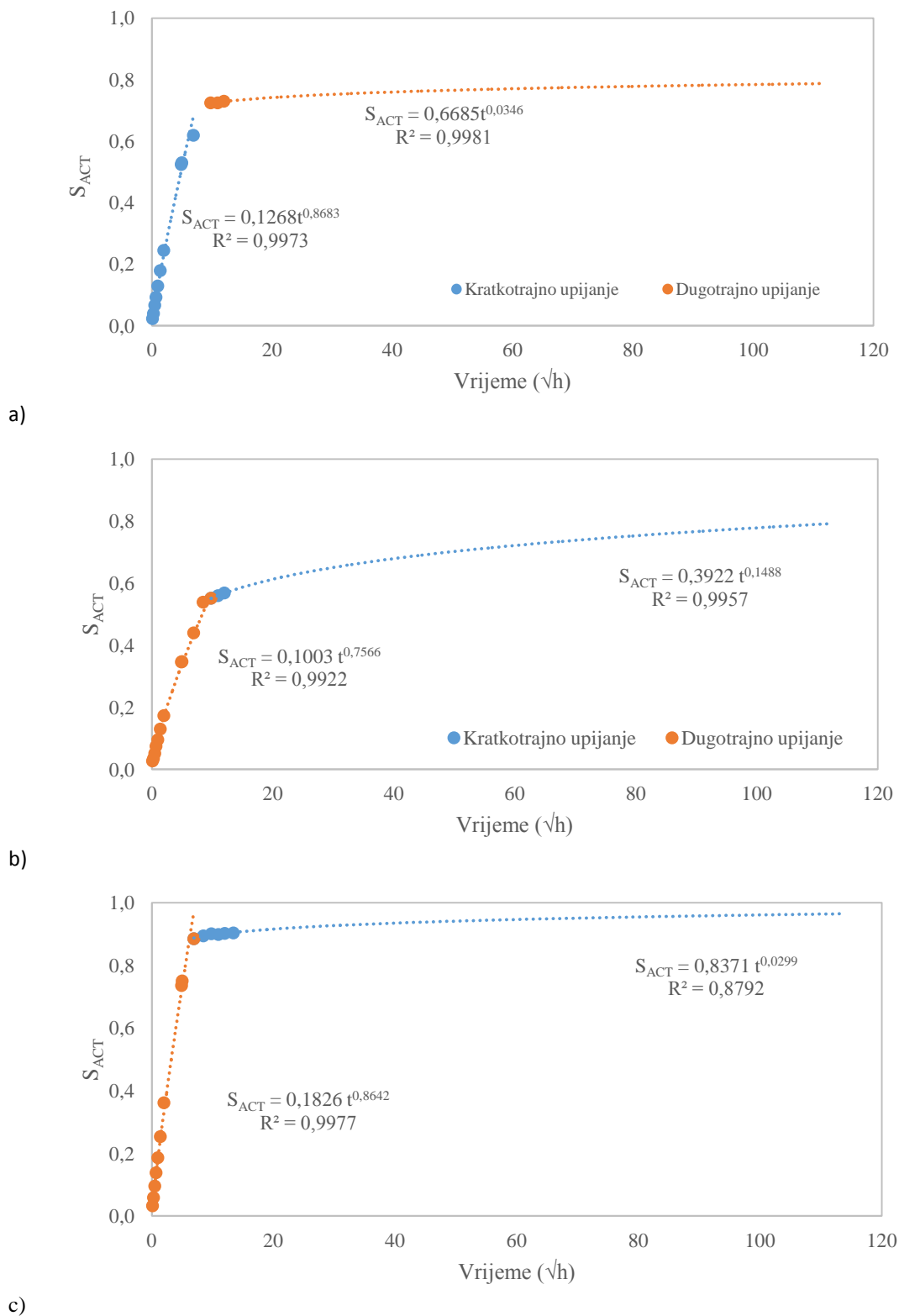
Vrijednosti kapilarnog upijanja vode izraženog preko stupnja zasićenja  $S$  dobijemo prebacivanjem vrijednosti kapilarnog upijanja vode izraženog preko  $i$  ( $\text{kg/m}^2$ ), prikazanog na slici 31, koristeći jednadžbe pravca kroz dvije točke te izračunate vrijednosti  $S_0$  i  $S_b$  dane u tablici 14.

Prva točka u jednadžbi pravca je početna točka ispitivanja kapilarnog upijanja  $A_1 (i_0; S_0)$ , dok je druga točka prijelomna točka ispitivanja kapilarnog upijanja  $A_2 (i_b; S_b)$  [41, 43].  $A_1$  i  $A_2$  uvrste se u jednadžbu pravca kroz dvije točke te se dobije općeniti izraz za stupanj zasićenja  $S_t$  za određeno vrijeme  $t$ , koje odgovara vrijednosti  $i_t$  ( $\text{kg/m}^2$ ) za to vrijeme upijanja :

$$S_t = k_p(i_t - i_0) + S_0 \quad (23)$$

gdje je koeficijent pravca:  $k_p = \frac{S_b - S_0}{i_b - i_0}$ .

Eksperimentalno dobivene vrijednosti kapilarne adsorpcije metodom kapilarnog upijanja izražene pomoću stupnja zasićenja u periodu od 180 h su ekstrapolirane na vremenski period od cca jedne godine. Prikazana je ovisnost vrijednosti stupnja zasićenja o korijenu vremena za betone sastava 5RTPF<sub>m</sub> (slika 31a), 10RTPF<sub>m</sub> (slika 31b) i 2RTPF<sub>s</sub> (slika 31c). Prikazan je period upijanja od cca jedne godine.



Slika 31 Rezultati kapilarne adsorpcije metodom kapilarnog upijanja izražene pomoću stupnja zasićenja u ovisnosti u korijenu vremena i ekstrapolirane vrijednosti na vremenski period od cca jedne godine za mješavine: a) 5RTPFm/uzorak 2, b) 10RTPFm/uzorak 1, c) 2RTPF/uzorak 2

Koeficijenti  $e$  i  $d$  dobiveni su tako što su se vrijednosti rezultata kapilarne adsorpcije izražene pomoću stupnja zasićenja u ovisnosti u korijenu vremena prilagodili krivulji 'Power' korištene u programu Excel. Za dobivanje koeficijenata  $e$  i  $d$  korištena je krivulja upijanja nakon prijelomne točke te kasnije pridružena krivulji upijanja prije prijelomne točke. Slika 31. prikazuje jednadžbe za  $S_{ACT}$  nakon pridruživanja krivulje za dugotrajno upijanje krivulji za kratkotrajno upijanje, stoga je na slici u prikazu za  $S_{ACT}$  već pridružen stupanj zasićenja u prijelomnoj točki  $S_b$ . Zbog jednostavnosti prikaza rezultata povećanja stupnja saturacije u vremenu, korišten je po jedan uzorak iz svake mješavine te uzet kao reprezentativan.

**Tablica 12. Koeficijenti  $S_b$ ,  $e$  i  $d$  za pojedine mješavine**

Srednja vrijednost	5RTPFm			10RTPFm			2RTPFs		
	$S_b$	$e$	$d$	$S_b$	$e$	$d$	$S_b$	$e$	$d$
	0,67	0,0244	0,3341	0,55	0,0962	0,2285	0,84	0,0077	0,4987

Uvrštavanjem koeficijenata u jednadžbu (11) dobijemo eksperimentalne krivulje vremena adsorpcije za betone sastava 5RTPFm, 10RTPFm i 2RTPFs.

$$S_{ACT} = 0,67 + 0,0244t^{0,3341} \quad \text{za beton sastava 5RTPFm/uzorak 2,}$$

$$S_{ACT} = 0,55 + 0,0962t^{0,2285} \quad \text{za beton sastava 10RTPFm/uzorak 1,}$$

$$S_{ACT} = 0,84 + 0,0077t^{0,4987} \quad \text{za beton sastava 2RTPFs/uzorak 2.}$$

Uvrštavanjem određenog vremena adsorpcije u krivulju adsorpcije dobijemo vrijednost povećanja stupnja saturacije  $S_{ACT}$  u vremenu  $t$  (izraženog kao  $\sqrt{h}$ ). Vrijednosti  $S_{ACT}$  u vremenu  $t$  za sastav betona 5RTPFm prikazane su u tablici 15, 10RTPFm u tablici 16 te za 2RTPFs u tablici 17.

**Tablica 15 Izračunate vrijednosti  $S_{ACT}$  u vremenu  $t$  za sastav betona 5RTPFm**

Vrijeme upijanja vode, $t$ ( $\sqrt{h}$ )	$S_{ACT} = 0,67 + 0,0244t^{0,3341}$	$S_{CR} = 0,89$
Na prijelomnoj točki	0,67	
24 h (4,89)	0,71	
1 tjedan (12,96)	0,73	
1 mjesec (26,83)	0,74	
6 mjeseci (65,72)	0,77	
2 godine (132,36)	0,79	
5 godina (209,28)	0,81	
10 godina (295,97)	0,83	
15 godina (362,49)	0,84	
20 godina (418,56)	0,85	
50 godina (661,82)	0,88	
75 godina (804,98)	0,90	

**Tablica 16 Izračunate vrijednosti  $S_{ACT}$  u vremenu  $t$  za sastav betona 10RTPFm**

Vrijeme upijanja vode, $t$ ( $\sqrt{h}$ )	$S_{ACT} = 0,55 + 0,0962t^{0,2285}$	$S_{CR} = 1$
Na prijelomnoj točki	0,55	
24 h (4,89)	0,68	
1 tjedan (12,96)	0,72	
1 mjesec (26,83)	0,75	
6 mjeseci (65,72)	0,80	
2 godine (132,36)	0,84	
5 godina (209,28)	0,88	
10 godina (295,97)	0,90	
15 godina (362,49)	0,92	
20 godina (418,56)	0,93	
50 godina (661,82)	0,97	
75 godina (804,98)	0,99	

**Tablica 17 Izračunate vrijednosti  $S_{ACT}$  u vremenu  $t$  za sastav betona 2RTPFs**

$t$ – vrijeme upijanja vode ( $\sqrt{h}$ )	$S_{ACT} = 0,84 + 0,0077t^{0,4987}$	$S_{CR} = 0,92$
Na prijelomnoj točki	0,84	
24 h (4,89)	0,86	
1 tjedan (12,96)	0,87	
1 mjesec (26,83)	0,88	
6 mjeseci (65,72)	0,90	
1 godina (93,59)	0,91	
<b>2 godine (132,36)</b>	<b>0,92</b>	
5 godina (209,28)	0,95	
10 godina (295,97)	0,97	
15 godina (362,49)	0,98	
20 godina (418,56)	0,99	
50 godina (661,82)	1,04	
75 godina (804,98)	1,06	

## 6.7 Proračun uporabnog vijeka

Uzimajući u obzir vrijednost  $S_{cr}$  i  $S_b$ , moguće je izračunati životni vijek elemenata izrađenih od ispitivanih sastava betona. Prema tome ako izrazimo  $t$  ( $\sqrt{h}$ ) kao:  $t = \sqrt[e]{\frac{d(S_{cr} - S_b)}{e}}$  dobijemo da je uporabni vijek za mješavine slijedeći:

a) za mješavinu 5RTPFm  $t = \sqrt[e]{\frac{0,3341(0,89 - 0,67)}{0,0244}} = 721,88 \sqrt{h}$ , odnosno cca 60 godina.

b) za mješavinu 10RTPFm  $t = \frac{0,2285 \sqrt{1,00 - 0,55}}{\sqrt{0,0962}} = 855,91 \sqrt{h}$ , odnosno cca 84 godina.

c) za mješavinu 2RTPFs  $t = \frac{0,4987 \sqrt{0,92 - 0,84}}{\sqrt{0,0077}} = 109 \sqrt{h}$ , odnosno cca 1,5 godina.

## 7 PRORAČUN UPORABNOG VIJEKA – PRIMJER

Rezultati dobiveni eksperimentalnim radom će se koristiti kao parametri za modeliranje uporabnog vijeka kolničke konstrukcije mosta u različitim razredima izloženosti. Radi opsežnije usporede i dokazivanja doprinosa inovativnih materijala trajnosti armiranobetonskih konstrukcija provesti će se usporedba ispitvanih mješavina s rezultatima istraživanja provedenih u sklopu rada [41].

Dokazivanje dugotrajnog ponašanja inovativnih materijala ključno je za njihovu daljnju primjenu. U radu će se primjenom matematičkih modela razvijenih u sklopu programa Life-365 i ConCLIFE odrediti dugotrajno ponašanje ispitvanih mješavina, a primjenom eksperimentalno dobivenih podataka. U obzir će se uzeti duljina uporabnog vijeka mješavina u slučaju izloženosti djelovanju klorida i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.

### 7.1 Sastav mješavina

Za modeliranje uporabnog vijeka konstrukcije korištene su mješavine navedene u tablici xx. Odabrane su mješavine sa dodatkom miješanih vlakana u udjelu od 5 i 10 kg/m<sup>3</sup> RTPF (oznake: 5RTPF<sub>m</sub> i 10RTPF<sub>m</sub>) te mješavina sa pročišćenim RTPF vlaknima u udjelu od 2 kg/m<sup>3</sup> (oznake: 2RTPF<sub>s</sub>). Navedene mješavine su pokazale dobru otpornost na cikluse smrzavanja i odmrzavanja metodom ljuštenja i metodom unutarnjeg oštećenja te su iz tog razloga odabrane za proračun uporabnog vijeka.

Tablica 18 Sastav mješavina korištenih za proračun uporabnog vijeka

Komponente (kg/m <sup>3</sup> )	2RTPF <sub>s</sub>	5RTPF <sub>m</sub>	10RTPF <sub>m</sub>	ILLE1	ILLE2	ILLE3
Cement	370	370	370	280	400	420
Voda	170	170	170	170,80	208,0	168,0
Superplastifikator	1,67	2,22	3,21	-	2,0	2,10
Aerant	-	-	-	-	-	0,17
v/c	0,46	0,46	0,46	0,61	0,52	0,40
Miješana RTPF vlakna	-	5	10	-	-	-
Pročišćena RTPF	2	-	-	-	-	-
Agregat	1824	1824	1810	1971,65	1761,26	1716,16

Također će se koristiti mješavine preuzete iz magistarskog rada M. Ille [41] kako bi se usporedili dobiveni rezultati. Korištene su tri mješavine od kojih je mješavina oznake ILLE 3 aerirana i koja pokazuje dobru otpornost na smrzavanje dok preostale dvije (ILLE 1 i ILLE 2) nisu otporne na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Za izradu betona korišten je cement CEM II B-M/S-V 42,5N (proizvođač Holcim) i prirodni agregat. Za mješavine sastava ILLE 2 i ILLE 3 je korišten

superplastifikator Glenium 510 Sky u udjelu od 0,5 % na masu cementa. Sastav 3 ima dodatak aeranta Meta air u udjelu od 0,04 % na masu cementa.

## **7.2 Ulazni parametri za modeliranje uporabnog vijeka**

Za modeliranje uporabnog vijek u programskom paketu Life 365 osnovni ulazni je koeficijent difuzije klorida. Za mješavine 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub> i 2RTPF<sub>s</sub> koriste se koeficijenti difuzije klorida dobiveni prema normi NT BUILD 492 u ranijim istraživanjima Anagennisi projekta [31]. Za mješavine ILLE1, ILLE2, ILLE3 izračunat je teorijski koeficijent difuzije za starost od 28 dana prema formuli [38, 39]:

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40 \times \frac{v}{c})} m^2/s$$

Koeficijenti difuzije klorida i s za odabrane mješavine su prikazani tablicom 19.

**Tablica 19 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa LIFE-365**

Oznaka mješavine	$D_{28}$ ( $m^2/s$ )
5RTPF <sub>m</sub>	$9,00 \times 10^{-12}$
10RTPF <sub>m</sub>	$9,36 \times 10^{-12}$
2RTPF <sub>s</sub>	$8,87 \times 10^{-12}$
ILLE 1	$2,40 \times 10^{-11}$
ILLE 2	$1,54 \times 10^{-11}$
ILLE 3	$7,94 \times 10^{-11}$

Podaci potrebni za proračun ulaznih parametara programskog paketa ConcLIFE pri proračunu uporabnog vijeka za sastave betona 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub>, 2RTPF<sub>s</sub> te sastava ILLE1, ILLE2 i ILLE3 dani su tablicama 20, 21, 22 i 23.

**Tablica 20** Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton sastava 5RTPFm

$\sqrt{\text{min}}$	$\sqrt{\text{h}}$	masa (g)	$\Delta m$ (g)	površina (mm)
0	0,00	790,50	0	0
1	0,13	791,81	1,31	0,166879
2,236068	0,29	792,86	2,36	0,300637
3,872983	0,50	794,36	3,86	0,49172
5,477226	0,71	795,94	5,44	0,692994
7,745967	1,00	798,20	7,70	0,980892
10,95445	1,41	801,46	10,96	1,396178
15,49193	2,00	805,67	15,17	1,932484
37,94733	4,90	822,62	32,12	4,09172
38,72983	5,00	823,00	32,50	4,140127
53,66563	6,93	827,38	36,88	4,698089
65,72671	8,49	829,88	39,38	5,016561
75,89466	9,80	832,49	41,99	5,349045
84,85281	10,95	832,84	42,34	5,393631
92,9516	12,00	833,26	42,76	5,447134

**Tablica 21** Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton sastava 10RTPFm

$\sqrt{\text{min}}$	$\sqrt{\text{h}}$	masa (g)	$\Delta m$ (g)	površina (mm)
0	0,00	751,57	0	0
1	0,13	753,09	1,52	0,193631
2,236068	0,29	753,53	1,96	0,249682
3,872983	0,50	754,44	2,87	0,365605
5,477226	0,71	755,73	4,16	0,529936
7,745967	1,00	756,88	5,31	0,676433
10,95445	1,41	758,79	7,22	0,919745
15,49193	2,00	761,19	9,62	1,225478
37,94733	4,90	770,78	19,21	2,447134
38,72983	5,00	770,85	19,28	2,456051
53,66563	6,93	775,98	24,41	3,109554
65,72671	8,49	781,47	29,90	3,808917
75,89466	9,80	782,17	30,60	3,898089
84,85281	10,95	782,63	31,06	3,956688
92,9516	12,00	783,11	31,54	4,017834



**Tablica 22** Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton sastava 2RTPFs

$\sqrt{\text{min}}$	$\sqrt{h}$	masa (g)	$\Delta m$ (g)	površina (mm)
0	0,00	882,12	0	0
1	0,13	883,91	1,79	0,228025
2,236068	0,29	885,39	3,27	0,416561
3,872983	0,50	887,46	5,34	0,680255
5,477226	0,71	889,86	7,74	0,985987
7,745967	1,00	892,56	10,44	1,329936
10,95445	1,41	896,36	14,24	1,814013
15,49193	2,00	902,45	20,33	2,589809
37,94733	4,90	923,54	41,42	5,276433
38,72983	5,00	924,37	42,25	5,382166
53,66563	6,93	931,96	49,84	6,349045
65,72671	8,49	932,47	50,35	6,414013
75,89466	9,80	932,85	50,73	6,46242
84,85281	10,95	932,72	50,60	6,44586
92,9516	12,00	932,92	50,80	6,471338

**Tablica 23** Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton ILLE1

Oznaka uzorka		ILLE 1		
$\Phi$	(mm)	99,70		
h	(mm)	49,70		
P	(mm <sup>2</sup> )	7803,0		
Vrijeme		m	$\Delta m$	površina
(min)	( $\sqrt{\text{min}}$ )	(g)	(g)	(mm)
0	0,00	906,91	0,00	0,00
300	17,32	919,34	12,43	1,59
1380	37,15	933,30	26,39	3,38
1440	37,95	933,80	26,89	3,45
1620	40,25	935,05	28,14	3,61
1800	42,43	936,06	29,15	3,74
2820	53,10	939,59	32,68	4,19
3060	55,32	939,91	33,00	4,23
3240	56,92	940,22	33,31	4,27
4200	64,81	941,41	34,50	4,42
4680	68,41	941,09	34,18	4,38
4500	67,08	940,99	34,08	4,37
5640	75,10	941,30	34,39	4,41
6060	77,85	941,35	34,44	4,41
7380	85,91	941,50	34,59	4,43
9960	99,80	941,73	34,82	4,46
12840	113,31	941,90	34,99	4,48
14340	119,75	942,16	35,25	4,52

**Tablica 24** Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton  
**ILLE 2**

Oznaka uzorka		ILLE 2		
Φ	(mm)	100,40		
h	(mm)	49,70		
P	(mm <sup>2</sup> )	7912,9		
Vrijeme		m	Δ m	površina
(min)	(√min)	(g)	(g)	(mm)
0	0,00	908,91	0,00	0,00
300	17,32	919,09	10,18	1,29
1380	37,15	930,19	21,28	2,69
1440	37,95	930,65	21,74	2,75
1620	40,25	931,89	22,98	2,90
1800	42,43	933,01	24,10	3,05
2820	53,10	938,60	29,69	3,75
3060	55,32	939,26	30,35	3,84
3240	56,92	939,81	30,90	3,90
4200	64,81	941,71	32,80	4,15
4680	68,41	941,45	32,54	4,11
4500	67,08	941,39	32,48	4,10
5640	75,10	941,90	32,99	4,17
6060	77,85	941,72	32,81	4,15
7380	85,91	942,10	33,19	4,19
9960	99,80	942,16	33,25	4,20
12840	113,31	942,42	33,51	4,23
14340	119,75	942,55	33,64	4,25

**Tablica 25** Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton  
**ILLE 3**

Oznaka uzorka		ILLE 3		
Φ	(mm)	99,40		
h	(mm)	49,70		
P	(mm <sup>2</sup> )	7756,1		
Vrijeme		m	Δm	površina
(min)	(√min)	(g)	(g)	(mm)
0	0,00	924,17	0,00	0,00
300	17,32	929,65	5,48	0,71
1380	37,15	936,04	11,87	1,53
1440	37,95	936,40	12,23	1,58
1620	40,25	936,91	12,74	1,64
1800	42,43	937,54	13,37	1,72
2820	53,10	940,66	16,49	2,13
3060	55,32	941,09	16,92	2,18
3240	56,92	941,47	17,30	2,23
4200	64,81	943,44	19,27	2,48
4680	68,41	943,76	19,59	2,53
4500	67,08	944,05	19,88	2,56
5640	75,10	945,53	21,36	2,75
6060	77,85	945,79	21,62	2,79
7380	85,91	946,84	22,67	2,92
9960	99,80	948,02	23,85	3,08
12840	113,31	948,70	24,53	3,16
14340	119,75	949,05	24,88	3,21

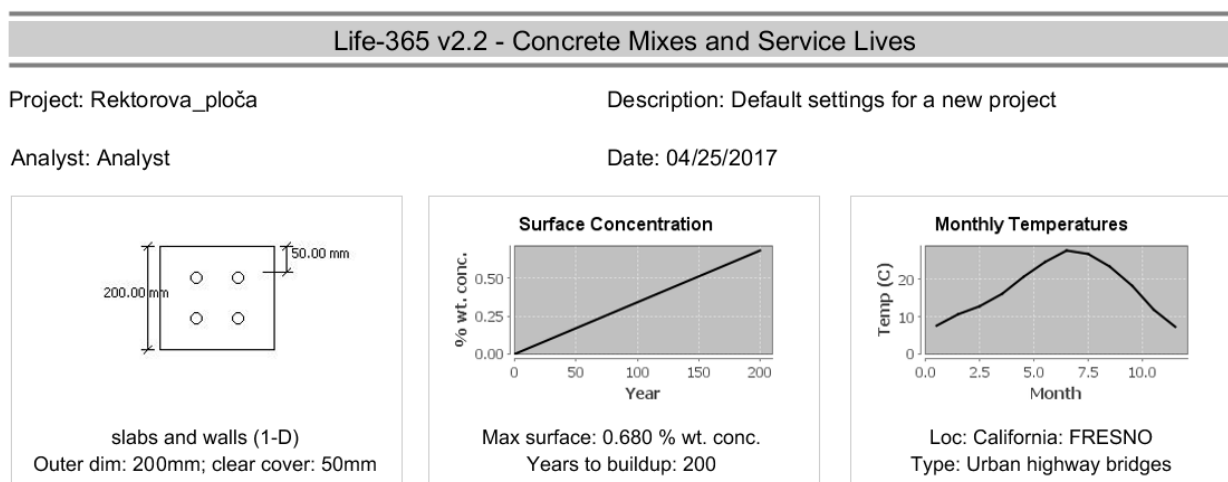
Ulazni parametri za proračun uporabnog vijeka pomoću programskog paketa Conclife dani su tablicom 26.

**Tablica 26 Ulazni parametri za Conclife**

Sastav	$S_{CR}$	Poroznost (%)	Udio zraka (%)	inicijalna	Koeficijent	inicijalna	Koeficijent	Točka sjecišta, t (h)
				sorpcija, $I_0$ (mm)	sorpcije, $S_0$ (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ )	sorpcija, $I_0$ (mm)	sorpcije, $S_0$ (mm/ $\sqrt{\text{min}}$ )	
				Kratkotrajno upijanje	Dugotrajno upijanje			
5RTPFm	0,89	5,4	2,6	0,0278	0,1233	3,2017	0,0261	17,00
10RTPFm	1,0	4,0	3,6	0,1063	0,0073	1,3986	0,039	23,99
2RTPFs	0,91	5,39	2,0	0,0637	0,1624	4,7618	0,0211	18,00
ILLE1	0,85	10,65	1,07	0,8357	0,0668	4,2484	0,0023	24,00
ILLE2	0,85	9,80	1,39	0,3508	0,0621	3,9716	0,0024	24,00
ILLE3	0,88	10,20	3,94	0,0194	0,0419	1,1163	0,019	24,00

### 7.3 Primjer proračuna – kolnička ploča mosta

Proračun uporabnog vijeka kolničke ploče mosta je analiziran u programskom paketu Life 365 i Conclife. Kao referentno područje je uzeto je kontinentalno i obalno područje Republike Hrvatske. Program prepoznaje samo američke gradove tako da je za primjer klime u priobalnoj Hrvatskoj uzeta Kalifornija, a kao primjer kontinentalne Hrvatske Nebraska. Proračun je napravljen za debljinu zaštitnog sloja od 30 mm i 50 mm, a promatrani period je 50 godina, slika 32. Korišten je model kolničke ploče debljine od 200 mm i površinom od 10000 m<sup>2</sup>.



**Slika 32 Skica iz programa Life-365**

Proračun uporabnog vijeka proveden je za kolničku ploču mosta koja je svrstana u slijedeće razrede okoliša: kontinentalna Hrvatska - XC4, XD3, XF4 i priobalno područje – XC4, XD3, XS1,

XF4. Prema poglavlju 4.3 Indikatori trajnosti, armirano betonska ploča izložena djelovanjima iz navedenih razreda treba zadovoljiti slijedeće uvjete:

- a. za razred izloženosti XF4 gubitak mase  $< 0.5 \pm 0.1 \text{ kg/m}^3$  nakon 56 ciklusa, za uporabni vijek od 50 godina; s obzirom da se radi o MAB relevantnijim se smatra ispitivanje unutarnjeg oštećenja zbog čega se kao mjerodavni uzima razred izloženosti XF3 maksimalni pad relativnog modula elastičnosti treba biti manji od  $15\% \pm 2\%$  nakon 56 ciklusa, za uporabni vijek od 50 godina.
- b. za razred izloženosti XS i XD3, granična vrijednost koeficijenta difuzije je:  $D_f = 8 \pm 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ .

### 7.3.1 Primjeri proračuna uporabnog vijeka -kolnička ploča mosta

U tablicama 27 – 29 su navedeni ulazni parametri i rezultat proračuna uporabnog vijeka i troškova građenja, popravka i cjeloživotni troškovi izračunati u programskom paketu LIFE365 za blagu mediteransku klimu obalnog područja i oštru kontinentalnu klimu za debljinu zaštitnog sloja  $x_d = 30 \text{ mm}$ .

**Tablica 27 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime –  $x_d = 30 \text{ mm}$**

Ulazni parametri		
Površinska koncentracija klorida	$C_s$ (% na $m_{bet}$ )	0,68
Kritična koncentracija na masu betona	$C_{crit}$ (% na $m_{bet}$ )	0,05
Debljina zaštitnog sloja	$x_d$ (mm)	30
Promatrani period	T (godina)	50

**Tablica 28 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime –  $x_d = 30 \text{ mm}$**

Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja ( $\$/m^2$ )	Troškovi popravka ( $\$/m^2$ )	Cjeloživotni troškovi ( $\$/m^2$ )
5RTPFm	0,20	30,10	6	36,1	30,21	73,82	104,03
10RTPFm	0,20	29,70	6	35,7	30,35	73,96	104,32
2RTPFs	0,20	30,20	6	36,2	30,58	73,82	104,39
ILLE 1	0,20	23,70	6	29,1	28,8	111,17	139,98
ILLE 2	0,20	26,20	6	32,2	31,50	74,4	105,45
ILLE 3	0,20	31,20	6	37,2	31,25	73,67	104,92

**Tablica 29 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime –  $x_d = 30$  mm**

Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja (\$/m <sup>2</sup> )	Troškovi popravka (\$/m <sup>2</sup> )	Cjeloživotni troškovi (\$/m <sup>2</sup> )
5RTPFm	0,20	15,0	6,0	21	30,21	112,93	143,14
10RTPFm	0,20	14,8	6,0	20,8	30,35	113,15	143,51
2RTPFs	0,20	15,2	6,0	21,2	30,58	112,93	143,51
ILLE 1	0,20	10,6	6,0	16,6	28,8	150,59	179,4
ILLE 2	0,20	12,4	6,0	18,4	31,50	150	181,05
ILLE 3	0,20	15,8	6,0	21,8	31,25	112,93	144,18

U tablicama 30 – 32 su navedeni ulazni parametri i rezultat proračuna uporabnog vijeka i troškova građenja, popravka i cjeloživotni troškovi izračunati u programskom paketu LIFE365 za blagu mediteransku klimu i oštru kontinentalnu klimu za debljinu zaštitnog sloja  $X_d = 50$  mm.

**Tablica 30 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime –  $x_d = 50$  mm**

Ulazni parametri			
Površinska koncentracija klorida		$C_s$ (% na $m_{bet}$ )	0,68
Kritična koncentracija na masu betona		$C_{crit}$ (% na $m_{bet}$ )	0,05
Debljina zaštitnog sloja		$x_d$ (mm)	50
Promatrani period		T (godina)	50

**Tablica 31 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime –  $x_d = 50$  mm**

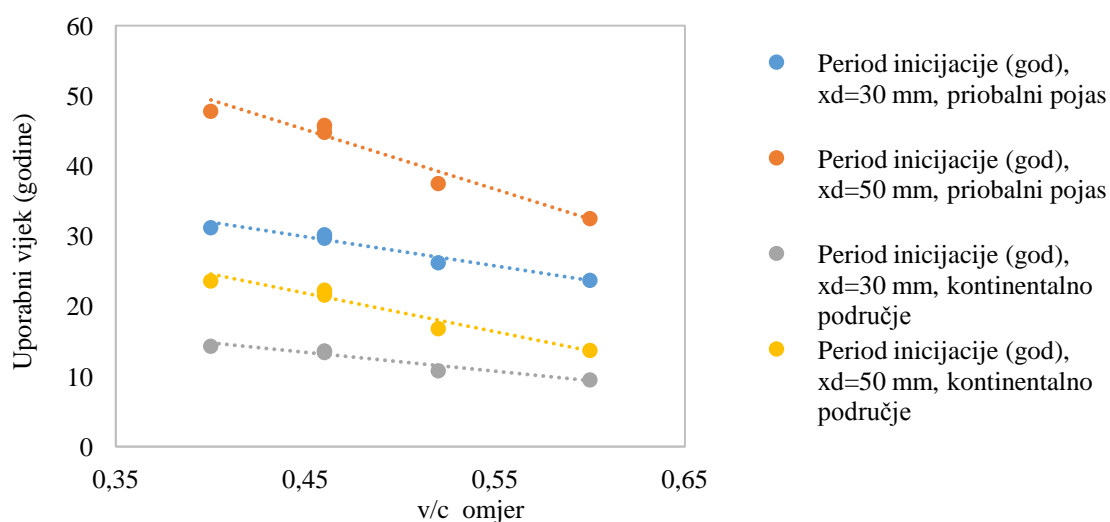
Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja (\$/m <sup>2</sup> )	Troškovi popravka (\$/m <sup>2</sup> )	Cjeloživotni troškovi (\$/m <sup>2</sup> )
5RTPFm	0,20	41,9	6,0	47,9	30,21	36,48	66,68
10RTPFm	0,20	41,4	6,0	47,4	30,35	36,55	66,90
2RTPFs	0,20	42,2	6,0	48,2	30,58	36,48	67,05
ILLE 1	0,20	30,6	6,0	36,6	28,80	73,82	102,62
ILLE 2	0,20	34,8	6,0	40,8	31,05	36,98	68,03
ILLE 3	0,20	43,9	6,0	49,9	31,25	36,40	67,65

**Tablica 32 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime –  $x_d = 50$  mm**

Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja (\$/m <sup>2</sup> )	Troškovi popravka (\$/m <sup>2</sup> )	Cjeloživotni troškovi (\$/m <sup>2</sup> )
5RTPFm	0,20	24,3	6	30,3	30,21	111,83	142,04
10RTPFm	0,20	23,7	6	29,7	30,35	111,83	142,18
2RTPFs	0,20	25,5	6	31,5	30,58	111,61	142,18
ILLE 1	0,20	15,4	6	21,4	28,80	149,71	178,51
ILLE 2	0,20	18,6	6	24,6	31,05	112,71	143,76
ILLE 3	0,20	25,8	6	31,8	31,25	111,39	142,64

Na slici 33 je prikazan odnos uporabnog vijeka i vodocementnog omjera. Vidi se kako povećanje zaštitnog sloja povećava otpornost betona na djelovanje klorida. Utjecaj vodocementnog faktora je bitan čimbenik koji svojim povećanjem utječe na smanjivanje uporabnog vijeka. Većim sadržajem vode u strukturi betona povećava se propusnost unutrašnje strukture betona i omogućava brži prodor klorida.

Usporedbom ostvarenog uporabnog vijeka u oba okoliša jasno proizlazi da su mješavine s RTPF vlaknima u svim udjelima, jednako vrijedne mješavini ILLE3 koja sadrži 420 kg cementa po metru kubnom i sa vodocementnim (v/c) faktorom jednakim 0.4, a uz dodatak superplastifikatora i kemijskog dodatka za poboljšanu otpornost na smrzavanja i odmrzavanja. Iz toga proizlazi da je primjenom inovativnih mikroarmiranih betona moguće ostvariti uštedu od 50 kg cementa po metru kubnom betona i bez upotrebe kemijskih dodataka za poboljšanu otpornost smrzavanju i odmrzavanju proizvesti beton otporan na izuzetno agresivne uvjete.



**Slika 33 Odnos uporabnog vijeka o v/c omjeru**

U tablicama 33 – 38 su navedeni ulazni parametri i rezultat proračuna uporabnog vijeka i troškova građenja, popravka i cjeloživotni troškovi izračunati u programskom paketu LIFE365 za blagu mediteransku klimu i ostru kontinentalnu klimu za debljinu zaštitnog sloja  $X_d = 30$  i  $50$  mm za promatrani period od 150 godina. Iako projektirane mješavine projektirane mješavine mogu imati višestruku namjenu, osnovni cilj je svakako produljenje uporabnog vijeka konstrukcija zbog čega se promatrani period produljio s ciljem utvrđivanja razlike u cjeloživotnim troškovima građevine.

**Tablica 33 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime –  $x_d = 30$  mm**

<b>Ulazni parametri</b>			
Površinska koncentracija klorida	$C_s$ (% na $m_{bet}$ )		0,68
Kritična koncentracija na masu betona	$C_{crit}$ (% na $m_{bet}$ )		0,05
Debljina zaštitnog sloja	$x_d$ (mm)		30
Promatrani period	T (godina)		150

**Tablica 34 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime –  $x_d = 30$  mm (150 godina)**

Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja (\$/m <sup>2</sup> )	Troškovi popravka (\$/m <sup>2</sup> )	Cjeloživotni troškovi (\$/m <sup>2</sup> )
5RTPFm	0,20	30,10	6	36,1	30,21	402,41	432,62
10RTPFm	0,20	29,70	6	35,7	30,35	403,2	433,56
2RTPFs	0,20	30,20	6	36,2	30,58	402,41	432,99
ILLE 1	0,20	23,70	6	29,1	28,8	437,84	466,64
ILLE 2	0,20	26,20	6	32,2	31,50	405,58	436,63
ILLE 3	0,20	31,20	6	37,2	31,25	401,62	432,87

**Tablica 35 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime –  $x_d = 30$  mm (150 godina)**

Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja (\$/m <sup>2</sup> )	Troškovi popravka (\$/m <sup>2</sup> )	Cjeloživotni troškovi (\$/m <sup>2</sup> )
5RTPFm	0,20	15,0	6,0	21	30,21	444,76	474,97
10RTPFm	0,20	14,8	6,0	20,8	30,35	445,64	475,99
2RTPFs	0,20	15,2	6,0	21,2	30,58	444,76	475,34
ILLE 1	0,20	10,6	6,0	16,6	28,8	479,18	507,99
ILLE 2	0,20	12,4	6,0	18,4	31,50	477,31	508,35
ILLE 3	0,20	15,8	6,0	21,8	31,25	444,76	476,01

**Tablica 36 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime –  $x_d = 50$  mm (150 godina)**

Ulazni parametri		
Površinska koncentracija klorida	$C_s$ (% na $m_{bet}$ )	0.68
Kritična koncentracija na masu betona	$C_{crit}$ (% na $m_{bet}$ )	0,05
Debljina zaštitnog sloja	$x_d$ (mm)	50
Promatrani period	T (godina)	150

**Tablica 37 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime –  $x_d = 50$  mm (150 godina)**

Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja (\$/m <sup>2</sup> )	Troškovi popravka (\$/m <sup>2</sup> )	Cjeloživotni troškovi (\$/m <sup>2</sup> )
5RTPFm	0,20	47,9	6,0	47,0	30,21	364,42	394,63
10RTPFm	0,20	47,4	6,0	46,4	30,35	364,42	394,78
2RTPFs	0,20	48,2	6,0	47,2	30,58	363,71	394,29
ILLE 1	0,20	36,6	6,0	36,0	28,80	402,41	431,21
ILLE 2	0,20	40,8	6,0	40,2	31,05	369,47	400,51
ILLE 3	0,20	49,9	6,0	48,9	31,25	363	394,24

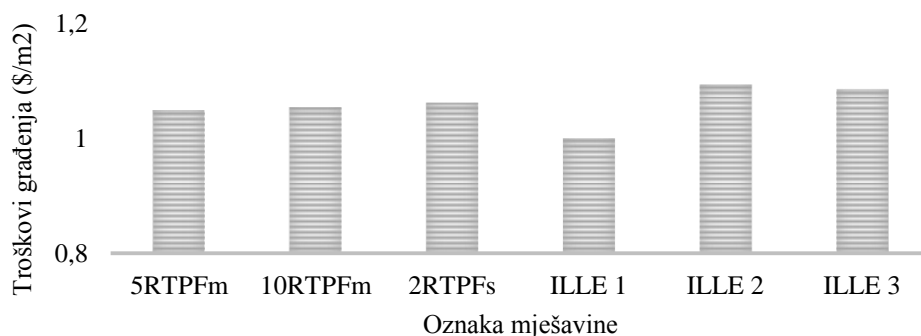
**Tablica 38 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime –  $x_d = 50$  mm (150 godina)**

Sastav	m	Vrijeme inicijacije korozije (god)	Vrijeme propagacije korozije (god)	Uporabni vijek (god)	Troškovi građenja (\$/m <sup>2</sup> )	Troškovi popravka (\$/m <sup>2</sup> )	Cjeloživotni troškovi (\$/m <sup>2</sup> )
5RTPFm	0,20	24,3	6	30,3	30,21	440,42	470,63
10RTPFm	0,20	23,7	6	29,7	30,35	440,42	470,77
2RTPFs	0,20	25,5	6	31,5	30,58	439,56	470,13
ILLE 1	0,20	15,4	6	21,4	28,80	476,37	505,18
ILLE 2	0,20	18,6	6	24,6	31,05	443,89	474,94
ILLE 3	0,20	25,8	6	31,8	31,25	438,70	469,94

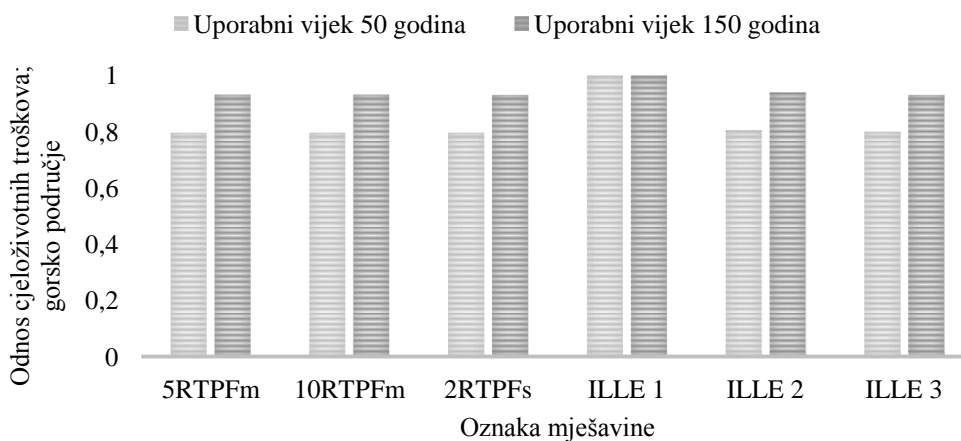
Na slikama 34 – 36 prikazani su troškovi građenja, tj betona, iskazani po metru kvadratnom te cjeloživotni troškovi koji uključuju troškove građenja i popravka za uporabni vijek od 50 i 150 godina za obalno i gorsko područje. Iako su troškovi građenja najniži za mješavinu ILLE 1, jasno je da su cjeloživotni troškovi za istu mješavinu od 6 do 35 % veći ovisno o razredu izloženosti. Istovremeno ako se pogledaju mješavine ILLE2 i ILLE3 i usporede s inovativnim MAB tada se može primjetiti da



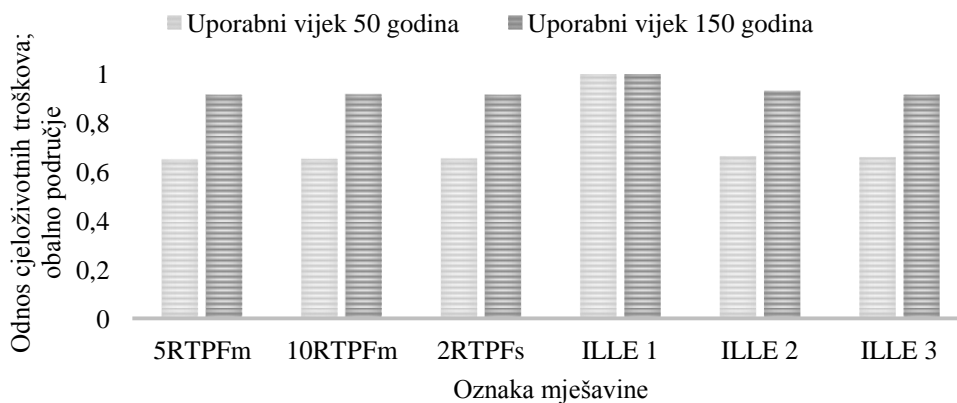
su cjeloživotni troškovi vrlo slični, ali treba imati na umu dodanu vrijednost istraživanih MAB koji na ovaj način za značajno manju potrošnju cementa, i do 50 kg po m<sup>3</sup> betona, smanjenu potrošnjom kemijskih dodataka i istovremenu primjenu recikliranih materijala osiguravaju jednako ili slično ponašanje materijala u agresivnom okolišu.



Slika 34 Troškovi građenja po m<sup>2</sup> iskazani u američkim dolarima



Slika 35 Cjeloživotni troškovi, uključujući građenje i popravaka iskazani po m<sup>2</sup> za građevine u gorskom području



Slika 36 Cjeloživotni troškovi, uključujući građenje i popravaka iskazani po m<sup>2</sup> za građevine u obalnom području

Nakon proračuna u programskom paketu LIFE365 napravljen je proračun u programskom paketu ConcLIFE s cilje utvrđivanja otpornosti mješavina na cikluse smrzavanja i odmrzavanja. Kao konačni uporabni vijek građevine odabrano je kritično vrijeme tijekom kojeg će doći do otkazivanja, odnosno potrebe za prvom sanacijom građevine. Jasno da je u obalnom području Republike Hrvatske kritični mehanizam degradacije predstavljaju kloridni ioni, odnosno korozija uzrokovana kloridima. Sve analizirane mješavine s RTPF vlaknima ostvaruju uporabni vijek dulji od mješavina običnog betona ILLE 1 i ILLE 2, a gotovo isti uporabni vijek kao mješavina ILLE 3. Treba naglasiti da mješavine s RTPF vlaknima imaju 30, odnosno 50 kg manje cementa po metru kubnom u odnosu na mješavine ILLE 2 i ILLE 3, te ukupno gledano manju količinu kemijskih dodataka, što svakako dobrinos dodanoj vrijednosti mješavina RTPF koje istovremeno osiguravaju i primjenu promjenu statusa otpada jer RTPF vlakna postaju visokovrijedan proizvod.

Prosječan uporabni vijek za mješavine s RTPF vlaknima iznosi 46,8 godina u obalnom području, dok iste mješavine u kontinentalnom području ostvaruju uporabni vijek od 26,7 godine u slučaju debljine zaštitnog sloja 50 mm. Najbolja mješavina običnog betona ILLE 3 za iste razrede izloženosti i istu debljinu zaštitnog sloja ostvaruje uporabni vijek od 36,6, odnosno 28,2 godine. Isto potvrđuje mogućnost primjene recikliranih polimernih vlakana za pripremu mikroarmiranih betona poboljšanih svojstava, prvenstveno smanjenjog autogenog skupljanja a što doprinosi manjem broju i smanjenoj širini pukotina [46, 47], istovremeno poboljšanom ponašanju tijekom izloženosti visokim temperaturama zbog smanjenje vjerojatnosti pojave eksplozivnog odlamanja [31] uz jednaki uporabni vijek u slučaju kada su takvi betoni izloženi djelovanju agresivnog okoliša, tj u slučaju prisutnosti klorida i djelovanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja.

**Tablica 39 Proračun uporabnog vijeka mikroarmiranog betona izloženog djelovanju kloridnih iona i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja**

UPORABNI VIJEK (godine)							
Oznaka mješavina	Primorska Hrvatska			Kontinentalna Hrvatska			Ručni proračun otpornosti na smr/odm
	LIFE365			LIFE365			
	$X_d = 30$ mm	$X_d = 50$ mm	Conclife	$X_d = 30$ mm	$X_d = 50$ mm	Conclife	
5RTPF <sub>m</sub>	36,1	47,9	>99	21	30,3	63	60
10RTPF <sub>m</sub>	35,7	47,4	>99	20,8	29,7	>99	84
2RTPF <sub>s</sub>	36,2	48,2	>99	21,2	31,5	32	1,5
ILLE 1	29,1	36,6	>99	16,6	21,4	12	Nije otporna
ILLE 2	32,2	40,8	>99	18,4	24,6	14	Nije otporna
ILLE 3	37,2	49,9	>99	21,8	31,8	>99	74

Rezultati provedenog eksperimentalnog istraživanja i proračun uporabnog vijeka dokazuju da se miješana RTPF vlakna zbog visokog udjela gume mogu koristiti kao zamjena kemijskih dodataka

za poboljšanu otpornost betona uslijed izloženosti smrzavanju i odmrzavanja, s obzirom da mješavine s miješanim RTPF i bez navedenog dodatka ostvaruju zahtijevane kriterije dane kroz indikatore trajnosti za razrede okoliša XF1 do XF4.

## **8 ZAKLJUČAK**

Budućnost građenja svakako se pronalazi u primjeni ekološki prihvatljivih materijala, što prvenstveno znači smanjenu potrošnju prirodnih resursa i ulaganje značajnih sredstava u edukaciju i podizanje svijesti o važnosti primjene otpada odnosno stvaranja kružnih ekonomija. Svjesni činjenice da broj automobila na zemlji svakim danom postaje sve veći, a samim time i broj otpadnih guma koje se mora zbrinuti, posve je jasno da će dostupna količina produkata mehaničke reciklaže otpadnih guma iz godine u godinu samo rasti. U sklopu ovog rada provedena su opsežna istraživanja koja se naslanjaju na dosadašnja saznanja proizašla iz međunarodnog projekta Anagennisi – Innovative reuse of all tyre components in concrete, a koja su za cilj imala utvrđivanje ponašanja inovativnih mikroarmiranih betona u agresivnom okolišu.

Provedene analize ukazuju da primjena polimernih vlakana utječe na smanjeno kapilarno upijanje zbog efekta „zapunjena“ kapilarnih pora, ali i hidrofobnih karakteristika gume pristune u vlaknima. Istovremeno, najznačajniji doprinos RTPF zabilježen je u slučaju izloženosti mikroarmiranih betona ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa i bez soli za odmrzavanje. Ovaj doprinos se također veže uz visok udio gume zaostale iz procesa reciklaže, posebno za miješana RTPF vlakna, gdje guma djeluje kao amortizer i absorbira naprezanja koja se razvijaju unutar strukture uslijed povećanja volumena vode tijekom prelaska u drugo agregatno stanje.

Poseban doprinos ovog rada očituje se u modeliranju dugotrajnog ponašanja mikroarmiranih betona s RTPF vlaknima u morskom i kontinentalnom području. Za potrebe proračuna provedene su opsežne eksperimentalne analize iz kojih su proizašli ulazni parametri za programske pakete. Usporedba inovativnih materijala provedena je sa literaturno dostupnim podacima o običnom betonu, sastav koji uobičajeno pronalazimo na hrvatskom tržištu. Ako se projektirane mješavine usporede s mješavinom ILLE 3 koja je zadovoljila sve postavljene zahtjeve u oba razmatrana okoliša, tada se može zaključiti da se primjenom miješanih i pročišćenih RTPF vlakana može ostvariti jednaki uporabni vijek u obalnom području kao i za mješavinu običnog betona s dodatkom superplastifikatora i aeranta. Pri tome treba imati na umu da je u slučaju inovativnih MAB korištena količina cementa bila 50 kg manja po  $m^3$  kao i ukupni udio kemijskih dodataka. Usporedba iste mješavine (ILLE 3) s mješavinama s RTPF vlaknima u okolišu izloženom smrzavanju i odmrzavanju pokazuje da bi u tom slučaju prednost trebalo dati miješanim RTPF vlaknima, jer u tom slučaju visoki udio gume (> 60% masenog udjela) preuzima ulogu kemijskog dodatka za poboljšano ponašanje betona pri ciklusima smrzavanja i odmrzavanja, i osigurava jednaki i/ili produljeni uporabni vijek ponovno uz 50 kg cementa manje po  $m^3$  betona i bez posebnih kemijskih dodataka. Slijedi da se primjenom mikroarmiranih betona s RTPF vlaknima može u potpunosti zadovoljiti 7. temeljni zahtjev za građevine jer se može zajamčiti mogućnost reciklaže građevine i njezinih materijala, trajnost građevine i uporaba okolišu prihvatljivih sekundarnih materijala u građevinama.

---

## 9 LITERATURA

- [1] I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović, D. Mikulić: Matematički modeli za proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija, *GRAĐEVINAR* 59 (2007), 9, 753-766.
- [2] D. Bjegović, N. Štirmer: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [3] Zakon o gradnji NN (153/2013).
- [4] J. Beslač, D. Bjegović, R. Rosković: Inovativni materijali i tehnologije u građenju i održavanju betonskih konstrukcija, *GRAĐEVINAR* 57 (2005) 4, 247-255.
- [5] Council of the European Union: Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the land fill of waste, 1999.
- [6] M. Serdar, A. Baričević, S. Lakušić, D. Bjegović: Betonski proizvodi specijalne namjene od reciklata otpadne gume, *GRAĐEVINAR* 65 (2013) 9, 793-801.
- [7] FP7 projekt: Anagennisi - Innovative Reuse of all Tyre Components in Concrete, [www.anagennisi.org](http://www.anagennisi.org), University of Sheffield, UK, 2014 - 2017.
- [8] A. Benazzouk, O. Douzane, T. Langlet, K. Mezreb, J. Roucoult, and M. Queneudec: Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 10, 732-740, 2007.
- [9] N. Segre, C. Ostertag, P. J. M. Monteiro: Effect of Tire Rubber Particles on Crack Propagation in Cement Paste, *Mater. Res.*, vol. 9, no. 3, 311-320, 2006.
- [10] A. R. Khaloo, M. Dehestani, P. Rahmatabadi: Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles., *Waste Manag.*, vol. 28, no. 12, 2472-82, 2008.
- [11] F. Hernandezolivares, G. Barluenga, B. Pargalanda, M. Bollati, B. Witoszek: Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements, *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 10, 1918-1927, 2007.
- [12] O. Keleştemur: Utilization of waste vehicle tires in concrete and its effect on the corrosion behavior of reinforcing steels, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 17, no. 3, 363-370, 2010.
- [13] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, S. Jalali: Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview, *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, 714-724, 2012.
- [14] Z. B. Savas, S. Ahmad, D. Fedroff: Freeze-Thaw Durability of Concrete with Ground Waste Tire Rubber, *Transp. Res. Rec.*, vol. 1574, 80-88, 1996.
- [15] N. Oikonomou, S. Mavridou: Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 6, 403-407, 2009.
- [16] G. Skripiūnas, A. Grinys, E. Janavičius: Porosity and Durability of Rubberized Concrete, 2010.
- [17] H. Huynh, D. Raghavan: Durability of Simulated shredded rubber tire in highly alkaline Environments, *Adv. Cem. Based Mater.*, 1997.
- [18] K. Pilakoutas, K. Neocleous, H. Tlemat: Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement, *Proc. ICE Eng. Sustain.*, vol. 157, no. 3, 131-138, 2004.
- [19] A. Graeff, K. Pilakoutas, C. Lynsdale, K. Neocleous: Corrosion Durability of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete, *Intersections*, vol. 6, no. 7, 77-89, 2009.
- [20] H. Tlemat, K. Pilakoutas, and K. Neocleous: Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres,
-

*Mater. Struct.*, vol. 39, 365–377, 2006.

- [21] A. G. Graeff, K. Pilakoutas, K. Neocleous, M. V. N. N. Peres: Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres, *Eng. Struct.*, vol. 45, 385–395, 2012.
- [22] A. Baričević: Doprinos razvoju održivog hibridnog mikroarmiranog betona primjenom produkata reciklaže otpadnih guma, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Zagreb, 2014.
- [23] A. Baricevic, D. Bjegovic, M. Skazlic: Hybrid Fiber–Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibers, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 6, 2017.
- [24] J. Radić, J. Bleiziffer, I. Kalafatić: Novi pristup osiguranju trajnosti konstrukcija, *GRAĐEVINAR* 62 (2010) 11, 971-980.
- [25] ISO/FDIS 16204, Durability – Service life design of concrete structures, 2012
- [26] International Federation for Structural Concrete (fib): Model Code for Service Life Design (MC-SLD). 2010.
- [27] J. M. Baker, P. J. Nixon, A. J. Majumdar, H. Davies: DuraCrete: Service life design for concrete structures, 1–14, 1999.
- [28] J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije 4: sanacije, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [29] ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja: Tehnički propis za građevinske konstrukcije, NN 17/2017
- [30] RILEM TC 230-PSC: Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability, 2016.
- [31] A. Baricevic, M. Jelcic Rukavina, M. Pezer, M. Serdar, D. Bjegovic, N. Stirmer: Durability studies of concrete with RTPF, FP7 Projekt Anagennisi - Innovative Reuse of all Tyre Components in Concrete, 2016.
- [32] M. Gajić-Čapka, K. Zaninović, B. Andrić, I. Džeba, D. Dujmović: Termičko djelovanje na građevine – meteorološka podloga za hrvatske norme, *GRAĐEVINAR* 53 (2001) 7, 431-441
- [33] L. Buha, D. Car-Pušić, I. Marović: Procjena troškova uklanjanja postojeće i izvedbe nove armiranobetonske konstrukcije lansirne lampe za ispitivanje torpeda u Rijeci, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
- [34] V. Perić: Propisivanje koeficijenata difuzije kao indikatora trajnosti tijekom projektiranja konstrukcija na osnovu svojstava, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
- [35] I. Stipanović: Proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005.
- [36] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. B. Polder: Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [37] DURACRETE: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, 1999.
- [38] M.D.A., Thomas, E.C. Bentz: LIFE-365, Service Life Prediction Model, Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, University of Toronto, December 2001.
- [39] [www.life-265.org/](http://www.life-265.org/) 01.03.2017.
- [40] A. Hranilović, S. Uzelac: Metode ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje, *GRAĐEVINAR* 57 (2005) 5, 327-332.
- [41] M. Ille: Modeliranje trajnosti konstrukcija izloženih smrzavanju na osnovi kritičnog stupnja zasićenja, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2007.
-

- [42] Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo: Ispitivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje - Oštećenje unutarnje strukture (CEN/TR 15177:2006), 2006.
- [43] G. Fagerlund: Freeze-thaw resistance of concrete: destruction mechanisms, concrete technology, test methods, quality control: a contribution to the BRITE/EURAM project BREU-CT92-0591 - The Residual Service Life of Concrete Structures, 1995.
- [44] D. Bjegović, M. Serdar, A. Baričević, M. Jelčić Rukavina: Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 godina, GRAĐEVINAR 67 (2015) 12, 1155-1164.
- [45] D.P. Bentz, M.A. Ehlen, F.C. Ferraris, J.A. Winpiger: Service Life Prediction Based on Sorptivity for Highway Concrete Exposed to Sulfate Attack and Freeze-Thaw Conditions, National Institute of Standards and Technology, 2002.
- [46] M. Jelcic Rukavina, A. Baricevic, M. Serdar, M. Pezer, D. Bjegovic: Deliverable 4.1: RTPF reinforced concrete, FP7 Projekt Anagennisi - Innovative Reuse of all Tyre Components in Concrete, 2016.
- [47] M. Serdar, A. Baricevic, M. Jelcic Rukavina, M. Pezer, D. Bjegovic, N. Stirmer: Shrinkage Behaviour of Fibre Reinforced Concrete with Recycled Tyre Polymer Fibres, *Int. J. Polym. Sci.*, 2015.
- [48] M. Serdar, A. Baričević, S. Lakušić, and D. Bjegović: Special purpose concrete products from waste tyres recyclates, *J. Croat. Assoc. Civ. Eng.*, vol. 65, no. 9, 793–801, 2013.
- [49] Serdar, A. Baricevic, M. Jelcic Rukavina, M. Pezer: Deliverable 1.7: Characterised materials of sufficient quantities. FP7 Projekt Anagennisi - Innovative Reuse of all Tyre Components in Concrete, 2017.
- [50] M. Džaja, M. Held, P. Ružić: Eksperimentalno ispitivanje autogenog skupljanja samozbijajućeg betona s polimernim vlaknima iz automobilskih guma, rektorova nagrada, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [51] M. Pezer, M. Pavunc Samaržija, A. Baričević, E. Vujasinović, M. Jelčić Rukavina, N. Štirmer: Textile Fibres from Recycled Tyres, Book of Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Textile, Clothing & Design Conference 2016 – Magic World of Textiles, 474-479, 2016.
- [52] I. Pucić: Analysis of textile fibres for Anagennisi project, Ruđer Bošković Institute, Zagreb, 2014.
- [53] S. Mavridou: Utilization of textile fibres from worn automobile tires in cement based mortars, *Glob. Nest J.*, vol. 13, no. 2, 176–181, 2011.
- [54] A. A. Ramezaniapour, M. Esmaeili, S. A. Ghahari, M. H. Najafi: Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers, *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, 411–418, 2013.
- [55] M.J. Sansalone, W.B. Streett: Impact-Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press Ithaca, N.Y., 1997.
- [56] C. Fagerlund: The significance of critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials, *ACI SF – 47*, Vol 2, 1975.
-

## POPIS SLIKA

<i>Slika 1 Odlaganje recikliranih polimernih vlakana u reciklažnom postrojenju za otpadne gume.....</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2 Metodologija i plan istraživanja .....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 3. Metodologija projektiranja trajnosti konstrukcija [25] .....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4. Načini projektiranja trajnosti [26] .....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 5. Vjerojatnost zakazivanja i ciljani uporabni vijek [28].....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 6. Principi probabilističkog pristupa projektiranju trajnosti [30].....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 7. Životni vijek armiranobetonske konstrukcije [37] .....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 8 Eksperimentalno ispitivanje kapilarnog upijanja [41] .....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 9. Eksperimentalno određivanje koeficijenta sorpcije za kratkotrajno i dugotrajno upijanje [45] .....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 10. Krivulje prosijavanja agregata i sumarna granulometrijska krivulja.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 11 Polimerna vlakna nastala u procesu mehaničke reciklaže otpadnih guma: a) Vrsta 1 RTPF vlakana, b) Vrsta 2 RTPF vlakana c) Miješana RTPF (vrsta1 +vrsta2) [49] .....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 12 Pročišćena RTPF nakon drugog stadija mehaničkog pročišćavanja gume [49].....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 13 Način njegovanja uzoraka tijekom prvih 24 sata .....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 14 Utjecaj udjela vlakana na obradivost mikroarmiranih betona .....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 15 Utjecaj udjela vlakana na svojstvo obradivosti i sadržaj zraka u svježem betonu.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 16 Utjecaj udjela zraka u svježem stanju na vrijednosti tlačne čvrstoće mikroarmiranih betona .....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 17 Utjecaj udjela RTPF na vrijednost upijene vode tijekom vremena .....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 18 Utjecaj udjela RTPF na vrijednost maksimalnog prodora vode pod pritiskom .....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 19 Određivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje – unutarnje oštećenje strukture: a) položaj uzoraka u škrinji, b) određivanje temeljne transverzalne frekvencije Impact echometodom.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 20 Gubitak mase ljuštenjem za odabrane mješavine [31].....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 21 Promjena maksimalne transverzalne frekvencije tijekom vremena.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 22 Pad relativnog dinamičkog modula tijekom vremena .....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 23 Temeljna transverzalna frekvencija za mješavine: PC i PP<sub>m</sub> nakon: a) 0 ciklusa, b) 28 ciklusa, c) 56 ciklusa .....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 24 Temeljna transverzalna frekvencija za mješavine: 5RTPF<sub>m</sub> i 10RTPF<sub>m</sub> nakon: a) 0 ciklusa b) 28 ciklusa .....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 25 Temeljna transverzalna frekvencija za mješavine: 5RTPF<sub>m1</sub>, 10RTPF<sub>m1</sub>, 2RTPF<sub>f</sub> nakon: a) 0 ciklusa, b) 28 ciklusa, c) 56 ciklusa.....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 26 a) uzorci za određivanje kritičnog stupnja saturacije, b) pad modula elastičnosti u odnosu na kritični stupanj saturacije.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 27 Određivanje kritičnog stupnja saturacije uzimajući u obzir pad dinamičkog modula elastičnosti.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 28 Određivanje kritičnog stupnja saturacije uzimajući u obzir pad dinamičkog modula elastičnosti za: a) mješavinu 5RTPF, b) mješavinu 10RTPF i c) mješavinu 2RTPFs.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 29 Ispitivanje kapilarnog upijanja tijekom 180 sati.....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 30 Ovisnost kapilarnog upijanja o korijenu vremena za period prije i nakon prijelomne točke upijanja u trajanju od 180 sati.....</i>	<i>43</i>

---



Slika 31 Rezultati kapilarne adsorpcije metodom kapilarnog upijanja izražene pomoću stupnja zasićenja u ovisnosti u korijenu vremena i ekstrapolirane vrijednosti na vremenski period od cca jedne godine za mješavine: a) 5RTPFm/uzorak 2, b) 10RTPFm/uzorak 1, c) 2RTPF/uzorak 2 ..... 45

Slika 32 Skica iz programa Life-365 ..... 54

Slika 33 Odnos uporabnog vijeka o v/c omjeru ..... 57

Slika 34 Troškovi građenja po m<sup>2</sup> iskazani u američkim dolarima ..... 60

Slika 35 Cjeloživotni trokovi, uključujući građenje i popravaka iskazani po m<sup>2</sup> za građevine u gorskom području ..... 60

Slika 36 Cjeloživotni trokovi, uključujući građenje i popravaka iskazani po m<sup>2</sup> za građevine u obalnom području ..... 60

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Kriteriji za projektiranje trajnosti [31]..... 10

Tablica 2 Svojstva polipropilenskih vlakana ..... 23

Tablica 3 Geometrijske karakteristike RTPFvlakana ..... 23

Tablica 4 Sastav mješavina korišten u eksperimentalnom radu ..... 25

Tablica 5 Metode ispitivanja svojstva u svježem stanju..... 26

Tablica 6 Metode ispitivanja svojstva u očvrslom stanju..... 27

Tablica 7 Svojstva u svježem stanju ..... 27

Tablica 8 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja prije prijelomne točke za sastave betona 5RTPF<sub>m</sub>..... 40

Tablica 9 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja prije prijelomne točke za sastave betona 10RTPF<sub>m</sub>..... 41

Tablica 10 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja prije prijelomne točke za sastave betona 2RTPF<sub>s</sub>..... 41

Tablica 11 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja nakon prijelomne točke za saastave betona 5RTPF<sub>m</sub>..... 42

Tablica 12 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja nakon prijelomne točke za saastave betona 10RTPF<sub>m</sub>..... 42

Tablica 13 Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja vode iz dijela linije upijanja nakon prijelomne točke za saastave betona 2RTPF<sub>s</sub> ..... 42

Tablica 14 Sadržaj vode izražen u vrijednostima stupnja zasićenja za početnu i prijelomnu točku u ispitivanju koeficijenta apsorpcije betona metodom kapilarnog upijanja za sastave 5RTPF<sub>m</sub>, 10RTPF<sub>m</sub>, 2RTPF<sub>s</sub>..... 44

Tablica 15 Izračunate vrijednosti S<sub>ACT</sub> u vremenu t za sastav betona 5RTPF<sub>m</sub> ..... 46

Tablica 16 Izračunate vrijednosti S<sub>ACT</sub> u vremenu t za sastav betona 10RTPF<sub>m</sub> ..... 47

Tablica 17 Izračunate vrijednosti S<sub>ACT</sub> u vremenu t za sastav betona 2RTPF<sub>s</sub>..... 47

Tablica 18 Sastav mješavina korištenih za proračun uporabnog vijeka ..... 49

Tablica 19 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa LIFE-365..... 50

---

Tablica 20 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton sastava 5RTPFm.....	51
Tablica 21 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton sastava 10RTPFm.....	51
Tablica 22 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton sastava 2RTPFs.....	52
Tablica 23 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton ILLE1.....	52
Tablica 24 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton ILLE 2.....	53
Tablica 25 Vrijednosti potrebne za proračun ulaznih parametara programskog paketa Conclife za beton ILLE 3.....	53
Tablica 26 Ulazni parametri za Conclife.....	54
Tablica 27 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime – $x_d = 30$ mm.....	55
Tablica 28 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime – $x_d = 30$ mm.....	55
Tablica 29 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime – $x_d = 30$ mm.....	56
Tablica 30 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime – $x_d = 50$ mm.....	56
Tablica 31 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime – $x_d = 50$ mm.....	56
Tablica 32 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime – $x_d = 50$ mm.....	57
Tablica 33 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime – $x_d = 30$ mm.....	58
Tablica 34 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime – $x_d = 30$ mm (150 godina).....	58
Tablica 35 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime – $x_d = 30$ mm (150 godina).....	58
Tablica 36 Ulazni parametri za LIFE365 – proračun kolničke ploče izložene djelovanju blage mediteranske klime i oštre kontinentalne klime – $x_d = 50$ mm (150 godina).....	59
Tablica 37 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju blage mediteranske klime – $x_d = 50$ mm (150 godina).....	59
Tablica 38 Rezultati proračuna LIFE365 programa za kolničku ploču izloženu djelovanju oštre kontinentalne klime – $x_d = 50$ mm (150 godina).....	59
Tablica 39 Proračun uporabnog vijeka mikroarmiranog betona izloženog djelovanju kloridnih iona i ciklusima smrzavanja i odmrzavanja.....	61

---