



Vedran Carević<sup>1</sup>

## UTICAJ PRSLINA NA MEHANIZME DETERIORACIJE I TRAJNOST ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA

### *Rezime:*

Na deterioracione mehanizme i koroziju koja nastaje njihovim dejstvom u velikoj meri utiče prisustvo prslina, pa se uloga prslina prouzrokovanih opterećenjem ne sme zanemariti u sagledavanju upotrebnog veka armiranobetonskih (AB) konstrukcija. Za potrebe ispitivanja spravljani su referentni beton, beton sa 50% letećeg pepela (LP) i beton sa 100% recikliranog agregata (RA). Analizirani su postojeći modeli predikcije dubine karbonatizacije i predložena je njihova modifikacija u slučaju betona sa LP i RA. Nakon što je ustanovljena veza između karbonatizacione otpornosti i čvrstoće pri pritisku, izvršena je analiza upotrebnog veka kroz definisanje potrebne debljine zaštitnog sloja različitih vrsta betona. Pripremljeni su uzorci sa 5 različitih širina prslina (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 i 0.30 mm) kao i referentni uzorci bez prslina. Predloženo je ograničenje napona u armaturi koji omogućava da celokupni upotrebnog veka (period inicijacije i propagacije) AB elemenata zadovolji propisane zahteve trajnosti.

*Ključne reči: trajnost, prslina, karbonatizacija, leteći pepeo, reciklirani agregat, korozija*

## INFLUENCE OF CRACKS ON THE DETERIORATION MECHANISMS AND DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

### *Summary:*

The most important factor that affects concrete deterioration is the appearance of cracks on reinforced concrete (RC) structures, so the influence of loading cracks should not be neglected when the service life is analyzed. For the purposes of this research, reference concrete and concretes with 50% fly ash (FA) and with 100% recycled aggregate (RCA) were prepared. The existing carbonation prediction models were analyzed and modification was proposed in the case of FA and RCA concretes. After establishing the relationship between carbonation resistance and compressive strength, the service life analysis was performed by defining the required concrete cover depth for different concrete types. Samples with 5 different crack widths (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 and 0.30mm) and samples without cracks were prepared and subjected to accelerated carbonation. For all concrete types steel stress limitation was proposed, which allows the entire service life of RC elements to meet the prescribed requirements.

*Key words: durability, cracks, carbonation, fly ash, recycled concrete aggregate, corrosion*

---

<sup>1</sup> Docent, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija, vedran@imk.grf.bg.ac.rs

## 1. UVOD

Trajnost betona definisana je njegovom otpornošću na dejstvo štetnih agenasa iz spoljašnje sredine koji dovode do različitih vrsta oštećenja (mehanizmi deterioracije). Glavni deterioracioni mehanizmi koji utiču na trajnost betona su karbonatizacija, penetracija hlorida, dejstvo mraza sa ili bez soli za odmrzavanje, alkalno-silikatna reakcija i dejstvo sulfata. Svi ovi mehanizmi dele se u dve grupe u zavisnosti od vrste oštećenja koju proizvode. Mehanizmi deterioracije mogu uticati na strukturu betona (mraz sa ili bez soli za odmrzavanje, alkalno-silikatna reakcija i dejstvo sulfata) ili na pojavu korozije armature unutar betona (karbonatizacija i penetracija hlorida). Deterioracioni mehanizmi zavise od uslova sredine kojima je beton izložen, pa različita geografska područja karakterišu određeni mehanizmi deterioracije. Tri mehanizma deterioracije koji predstavljaju najveću opasnost za objekte u Srbiji su: karbonatizacija, penetracija hlorida i dejstvo mraza i soli za odmrzavanje [1].

Otpornost betona na dejstvo ovih mehanizama deterioracije trenutno se kod cementnih betona sa prirodnim agregatom obezbeđuje adekvatnim zaštitnim slojem betona do armature i propisanim sastavom (minimalna količina cementa i maksimalni vodo-vezivni faktor). Zaštitni sloj betona predstavlja zaštitu armature od ekstremnih uticaja kroz smanjenje transporta štetnih materija koji mogu uzrokovati koroziju. Međutim, u armiranobetonskim (AB) konstrukcijama pojava prslina koje presecaju zaštitni sloj je gotovo neizbežna posledica skupljanja, termičkog širenja, mehaničkih/hemijskih oštećenja ili jednostavno posledica dejstva opterećenja i relativno niske čvrstoće betona na zatezanje. Pojava prslina dovodi do narušavanja strukture zaštitnog sloja betona i do ubrzanja transporta štetnih materija kroz beton do armature, čime utiču na trajnost AB konstrukcija [2]. Održavanje niskog stepena propustljivosti betona (za gasove ili rastvore) od presudne je važnosti za trajnost.

Prsline mogu uticati na deterioracione procese (karbonatizacija, penetracija hlorida i dejstvo mraza i soli za odmrzavanje) i koroziju koja nastaje tim putem. Imajući to u vidu, postavlja se pitanje kakva je uloga zaštitnog sloja betona ispresecanog mrežom prslina u obezbeđivanju upotrebnog veka. Shodno tome, ulogu naponskih prslina ne bi trebalo zanemariti u sagledavanju upotrebnog veka AB konstrukcija. U dosadašnjoj istraživačkoj praksi, deterioracioni procesi i njihovi transportni mehanizmi izučavani su i ispitivani uglavnom na neisprskalim betonskim uzorcima.

Korozija izazvana hloridima bila je predmet mnogih istraživanja proteklih godina, uključujući i uticaj prslina na ovaj deterioracioni mehanizam [3–5]. Za razliku od nje, u literaturi postoji vrlo malo podataka o uticaju prslina na koroziju armature izazvanu karbonatizacijom, pogotovo na razvoj korozije tokom vremena. Došlo se do zaključka da deterioracija AB konstrukcija usled korozije armature izazvane karbonatizacijom predstavlja jedan od glavnih problema trajnosti širom sveta, imajući u vidu da je veliki broj infrastrukturnih objekata izložen okruženju bogatom ugljen-dioksidom ( $\text{CO}_2$ ) čija se koncentracija konstantno povećava. Zbog toga je karbonatizacija postala važno pitanje u analizi trajnosti AB konstrukcija.

Procenjuje se da 7–10% celokupne emisije  $\text{CO}_2$  antropogenog porekla nastaje tokom proizvodnje cementa [6]. Ogroman uticaj građevinske industrije na životnu sredinu uglavnom je posledica velike proizvodnje betona, pa je upotreba prirodnih sirovina, potrošnja energije i proizvodnja otpada takođe velika. Jedan od načina da se očuvaju prirodni resursi i beton učini ekološki prihvatljivijim je primena letećeg pepela (LP) i recikliranog agregata (RA) koja je

korisna i sa ekonomskog i sa ekološkog aspekta. Međutim, zamena prirodnog agregata (PA) sa RA ili zamena cementa sa LP uveliko utiče na fizička, mehanička i svojstva trajnosti betona. Uticaj upotrebe RA i LP na graničnu nosivost [7,8] i ponašanje pod dugotrajnim opterećenjem [9] AB elemenata ispitivana su poslednjih godina na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Međutim, da bi se osigurala održiva primena ovih zelenih alternativa proizvodnji cementnih betona sa PA, moraju se proveriti njihova svojstva trajnosti.

Da bi se generisalo novo znanje i doprinelo poboljšanju postojećih standarda i inženjerske prakse, razvijena je odgovarajuća eksperimentalna postavka kako bi se ispitao uticaj prslina na dubinu karbonatizacije i trajnost AB elemenata napravljenih od različitih vrsta betona.

## 2. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Eksperimentalno ispitivanje sprovedeno je od 2017. do 2020. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Na početku eksperimentalnog programa izvršeno je projektovanje i ispitivanje tri vrste betonskih mešavina. Cilj ovog procesa je bio proizvodnja betona a da se pri tome zadovolji klasa betona potrebna za njegovu konstrukcijsku primenu. Spravljene su tri vrste betonskih mešavina: referenrni cementni beton sa PA (NAC), cementni beton sa 100% krupnog RA kao zamena PA (RAC) i beton sa 50% LP kao zamena cementa (HVFAC). Krupni RA korišćen u ovom ispitivanju je dobijen recikliranjem betona 40 godina starog nadvožnjaka. Imao je zapreminsku masu u suvom stanju od  $2370 \text{ kg/m}^3$  kao i upijanje vode od 3.9% nakon 24 sata. LP je dobijen iz termoelektrane "Nikola Tesla B" u Obrenovcu i imao je zapreminsku masu od  $2300 \text{ kg/m}^3$  kao i srednju veličinu čestica od  $8.53 \mu\text{m}$ . Svi betoni imali su da sličnu čvrstoću pri pritisku (41.0, 41.7 i 42.1 MPa, respektivno) i istu klasu ugradljivosti (klasa S3).

Kako karbonatizacija betona u prirodnim uslovima traje godinama odlučeno je da se ovaj proces ubrza povećavanjem koncentracije  $\text{CO}_2$  u specijalizovanim komorama predviđenim za takvo ispitivanje (slika 1).



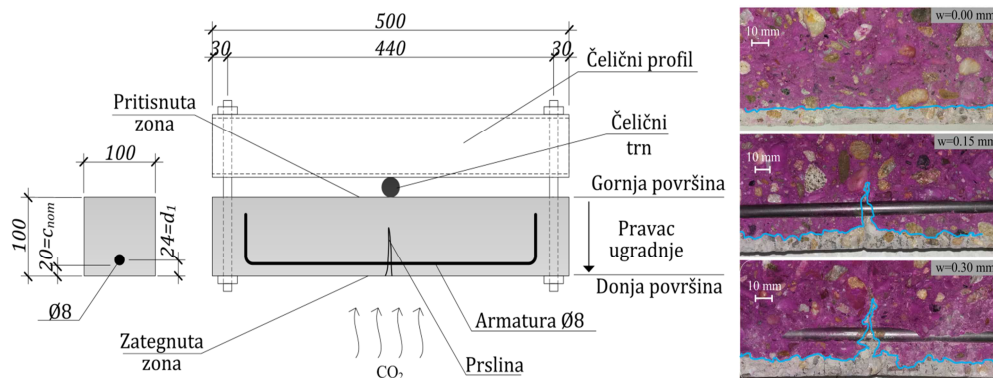
Slika 1 – Uzorci u komori za karbonatizaciju i izmerene dubine karbonatizacije NAC, RAC i HVFAC betona, respektivno

Zbog toga je pre početka sprovođenja eksperimentalnog ispitivanja uticaja prslina na dubinu karbonatizacije bilo neophodno ispitati uticaj koncentracije  $\text{CO}_2$  na sam proces karbonatizacije, kao i mogućnosti primene postojećih modela predikcije na različitim vrstama betona korišćenim u ovom istraživanju. Sprovedeno je komparativno ispitivanje u ubrzanim i

prirodnim uslovima. Analiziran je uticaj koncentracije CO<sub>2</sub> (1%, 2%, 4% i 16%) na proces karbonatizacije kod sve tri vrste ispitivanih betona i pokazalo se da je koncentracija do 2% CO<sub>2</sub> optimalna za ubrzavanje procesa karbonatizacije bez posledica na kinetiku procesa.

U poslednjih dvadeset godina razvijene su razne metode za indukciju prslina u uzorcima nakon standardnog postupka pripreme i nege uzoraka [1]. Na osnovu analize svih dostupnih metoda za indukovanje prslina (metod cepanja klinom, Brazilski opit cepanja, metod ekspanzivnog jezgra, formiranje prslina pomoću umetaka i metod savijanja) uočeno je da metoda savijanja ima najviše prednosti. Prsline indukivane ovom metodom imaju V-oblik i odgovaraju po obliku prslinama nastalim savijanjem u AB konstrukcijama. Prednost u odnosu na ostale metode jeste da nakon formiranja prslina, uzorak se može izložiti ubrzanim testovima deterioracije u opterećenom stanju. U opterećenom stanju, pored uticaja prslina, može se ispitati i uticaj napona pritiska. Još jedna prednost u odnosu na ostale metode je upotreba armature, koja omogućava merenje i praćenje korozije tokom vremena.

Pripremljeni su uzorci sa 5 različitih širina prslina (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 i 0.30 mm) kao i referentni uzorci bez prslina. Sve definisane širine prslina bile su manje od dozvoljenih širina definisanih u EN 1992-1-1 [10], – za definisane uslove izloženosti karbonatizaciji maksimalna dozvoljena širina prsline iznosi 0.3 mm. Na slici 2 prikazana je postavka eksperimenta za određivanje uticaja širine prslina na dubinu karbonatizacije i trajnost AB elemenata.



Slika 2 – Postavka eksperimenta za određivanje uticaja širine prslina na dubinu karbonatizacije i trajnost AB elemenata

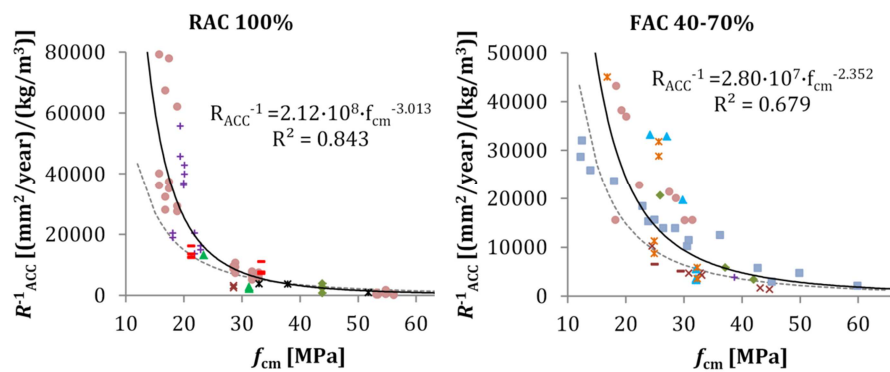
Uticaj prslina i napona pritiska u betonu na upotrebnog vek analiziran je pomoću dostupnog probabilističkog modela predikcije *fib-Model Code 2010* [11] za određivanje upotrebnog veka.

### 3. KARBONATIZACIONA OTPORNOST RAZLIČITIH VRSTA BETONA

Kako ubrzavanje karbonatizacije utiče na kinetiku procesa [12] bilo je neophodno ispitati mogućnosti primene postojećih modela predikcije na zelenim betonima korišćenim u ovom istraživanju. Kako bi to bilo moguće uraditi, sprovedeno je komparativno ispitivanje u ubrzanom i prirodnim uslovima na uzorcima bez prslina. Sprovedena je opsežna analiza zasnovana na sopstvenim eksperimentalnim rezultatima i rezultatima objavljenim u literaturi. Vrednosti dubine karbonatizacije u ubrzanim uslovima i odgovarajuća čvrstoća pri pritisku pronađene su u 15 radova za NAC betone, 8 radova za RAC i 17 radova za betone sa LP (*fly*

ash concrete – FAC). Ukupno 115, 109 i 138 rezultata je prikupljeno za NAC, RAC i FAC betone respektivno.

Na osnovu sprovedene analize zaključeno je da se *fib*-ov [13] model predikcije može primenjivati na sve vrste ispitivanih betona uz modifikacije za betone sa LP [14]. Da bi se omogućila primena ovog modela predikcije, neophodno je sprovesti ubrzani karbonizacioni test. S obzirom da ovo nije uvek moguće data je veza između karbonizacione otpornosti i čvrstoće betona pri pritisku nakon 28 dana starosti ( $f_{cm}$ ), koja se najčešće koristi kao indikator kvaliteta betona [14,15] (slika 3).



Slika 3 – Odnos između karbonizacione otpornosti i čvrstoće betona pri pritisku ( $f_{cm}$ ) za betone sa RA i LP

Nakon što je ustanovljena veza između ubrzane inverzne efektivne karbonizacione otpornosti i čvrstoće pri pritisku na 28 dana (slika 3) primenjen je puni probabilistički pristup za određivanje dužine upotrebnog veka koristeći modifikovani *fib* model predikcije dubine karbonizacije. Preporučene minimalne debljine zaštitnog sloja za različite vrste betona prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1 – Vrednosti minimalnih debljina zaštitnog sloja za različite vrste betona za upotrebnog veka  $t_{SL} = 50$  godina [1]

Vrsta betona	$C_{min,dur}$ (mm)			
	XC1	XC2	XC3	XC4
<b>Indikativna klasa betona</b>	<b>C 25/30</b>	<b>C 25/30</b>	<b>C 30/37</b>	<b>C 30/37</b>
Referentni beton	15	25	25	30
RAC (10-50% zamene PA)	15	25	25	30
RAC (100% zamene PA)	16	26	25	30
FAC (10-35% LP)	22	35	40	39
HVFAC (40-70% LP)	35	58	62	61

Iz tabele 1 se vidi da je u slučaju RAC 100% razlika u veličini zaštitnog sloja za klase izloženosti XC1 i XC2 u odnosu na NAC betone bila zanemarljiva (1 mm). Imajući u vidu tačnost probabilističkog modela i posmatranu razliku (6%) može se zaključiti na osnovu

dostupnih rezultata i sprovedene analize da se za sve betone sa RA mogu koristiti zaštitni slojevi definisani za NAC u EN 1992-1-1 [10], obezbeđujući pri tome upotrebnii vek od 50 godina. Primena LP kao zamene cementa značajnije je uticala na upotrebnii vek. Za betone do 35% LP u ukupnom vezivnom materijalu debljine zaštitnih slojeva potrebnih za obezbeđenje zahtevanog upotrebnoeg veka veće su prosečno za 1.46 puta u poređenju sa NAC betonima, uzimajući u obzir iste indikativne klase čvrstoće. Kod HVFAC betona (40-70% LP u ukupnom vezivnom materijalu) situacija je bila još drastičnija. Predloženo je povećanje debljine zaštitnih slojeva kod betona sa LP kako bi se omogućio upotrebnii vek od 50 godina za predložene indikativne klase čvrstoće. Pored određivanja debljine zaštitnih slojeva za različite klase izloženosti i različite vrste betona, sprovedena je i analiza očekivanih rezultata ubrzane karbonatizacije otpornosti betona kako bi se zadovoljili različiti uslovi izloženosti sa propisanim debljinama zaštitnih slojeva [16]. Na ovaj način je moguće usvojiti potrebnu debljinu betonskog pokrivača za definisanu klasu izloženosti, na osnovu otpornosti betona na karbonizaciju, kao i dobiti ranu indikaciju kvaliteta betona u pogledu otpornosti na karbonizaciju.

Povećavanje klase betona očekivano dovodi do smanjivanja debljine zaštitnog sloja. Međutim, ovo smanjivanje debljine zaštitnog sloja zbog povećanja klase betona će uticati na povećanje širine prsline na mestu armature što će biti analizirano u nastavku.

#### **4. UTICAJ PRSLINA NA UPOTREBNI VEK AB KONSTRUKCIJA**

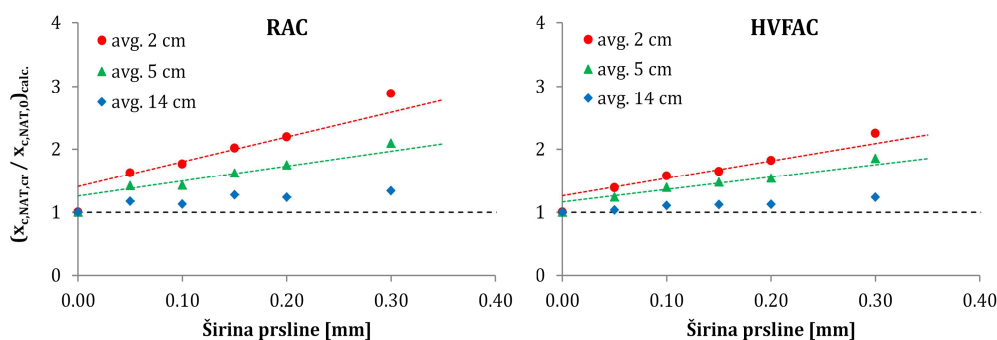
##### **1.1. UTICAJ PRSLINA NA DUBINU KARBONATIZACIJE**

Analiza uticaja prsline na koroziju izazavanu karbonatizacijom sprovedena je na osnovu sopstvenih eksperimentalnih rezultata, kao i primenom dostupnim standarda i modela predikcije. Uticaj prsline na karbonatizacioni front je bio sličan (približno 20 mm) bez obzira na širinu prsline (slika 2). U svim slučajevima, čak i sa najmanjom širinom prsline od 0.05 mm, prsline se ponašala kao dodatna izložena površina kroz koju su molekuli CO<sub>2</sub> prodirali unutar betona upravno na stranicu prsline. Ovaj fenomen je bio prisutan kod svih vrsta ispitivanih betona. Takođe, maksimalna dubina karbonatizacije uzoraka bez prsline je bila i do tri puta manja u poređenju sa uzorcima sa prslinama, pri čemu nije bilo razlike između različitih vrsta betona. Ako se uzme u obzir da su RAC i HVFAC betoni imali 40%, odnosno 115%, veću dubinu karbonatizacije neisprskalih uzoraka u poređenju sa NAC betonima, ovo ukazuje da je pojava prsline imala daleko veći uticaj na dubinu karbonatizacije u poređenju sa uticajem vrste betona.

Pored maksimalne dubine karbonatizacije, potrebno je definisati i osrednjenu dubinu karbonatizacije na svim uzorcima. Osrednjena dubina karbonatizacije predstavlja prosečnu dubinu karbonatizacije na određenoj dužini merenja i koristi se pri proračunu upotrebnoeg veka. Izabrane su tri dužine osrednjavanja: 20 mm (*avg. 2 cm*) što predstavlja uticajnu zonu prsline na karbonatizacioni front, 50 mm (*avg. 5 cm*) što predstavlja uobičajenu dužinu osrednjavanja koja se koristi u standardima za ispitivanje i 140 mm (*avg. 14 cm*) što predstavlja srednje računsko rastojanje između prsline u ovom eksperimentalnom ispitivanju.

Na slici 4 se može videti da se odnos između sračunatih dubina karbonatizacije uzoraka sa i bez prsline. Ovaj odnos se kretao do vrednosti 2.9 kod NAC i RAC uzoraka, za malu dužinu osrednjavanja (*avg. 2 cm*). Kod HVFAC uzoraka ovaj odnos je bio manji i iznosio je 2.3. To praktično znači da će dubina karbonatizacije uzoraka sa prslinom 0.30 mm u prirodnim

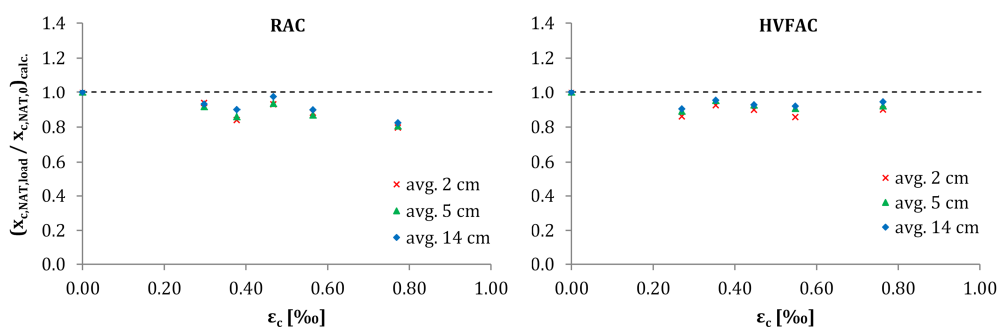
uslovima izloženosti biti i do 3 puta veća u poređenju sa neisprskalim uzorcima. Čak i kada se koristi veća dužina osrednjavanja (avg. 14 cm), dubina karbonatizacije biće 1.5 puta veća u poređenju sa neisprskalim NAC uzorcima. Na slici 4 se može videti da je za sve vrste betona, pri malim dužinama osrednjavanja (20 i 50 mm) došlo do značajnijeg porasta odnosa dubina karbonatizacije isprskalih i neisprskalih uzoraka nakon određene širine prsline. U slučaju RAC i HVFAC uzoraka ova promena je nastupila pri širini prsline između 0.20 i 0.30 mm.



Slika 4 – Odnos između sračunatih dubina karbonatizacije uzoraka sa ( $x_{c,NAT,cr}$ ) i bez ( $x_{c,NAT,0}$ ) prsline za različite dužine osrednjavanja

## 1.2. UTICAJ NAPONA PRITISKA NA DUBINU KARBONATIZACIJE

Većina istraživanja obavljenih do sada o uticaju napona na dubinu karbonatizacije analizirala su uticaj prsline ili napona zatezanja na karbonizacionu otpornost, ali samo neka od njih su analizirala uticaj napona pritiska [17–20]. Takođe, napon pritiska u većini tih istraživanja kretao se do nosivosti betona na pritisak, što nije slučaj tokom eksploatacije AB konstrukcija. Vrlo malo pažnje posvećeno je eksplatacionim naponima pritiska (do  $0.45 \cdot f_{ck}$ ), gde je odnos napona i dilatacije u betonu bio linearan. Kako je ovde reč o pritisnutoj strani uzorka umesto širine prsline, koja ne predstavlja faktor za pritisnutu stranu, uveden je pojam dilatacije pritiska na površini betona. Uticaj napona pritiska analiziran je na osnovu merenja dubine karbonatizacije na pritisnutoj strani uzoraka i sračunate vrednosti dilatacije pritiska. Dilatacija pritiska na pritisnutoj strani uzorka kretala se do 0.8%. Na slici 5 je prikazan odnos sračunatih dubina karbonatizacije opterećenih i neopterećenih uzoraka.



Slika 5 – Odnos između sračunatih dubina karbonatizacije opterećenih ( $x_{c,NAT,load}$ ) i neopterećenih ( $x_{c,NAT,0}$ ) uzoraka

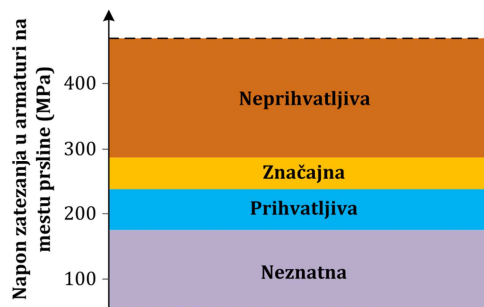
Može se zaključiti da je napon pritiska imao pozitivan efekat na karbonatizacionu otpornost. Pritisak unutar betona zatvara mikro pore i mikro prsline čime smanjuje stepen povezanosti pora, odnosno dovodi do progušćenja cementne matrice. Ovo je posebno bilo izraženo kod RAC uzoraka koji su imali najveću poroznost zbog prisustva stare cementne paste na zrnima agregata. S obzirom da napon pritiska nije imao značajni efekat na smanjenje dubine karbonatizacije (do 19%), u nastavku se neće razmatrati uticaj napona pritiska na upotrebnog vek AB konstrukcija.

### 1.3. UTICAJ NAPONA U ARMATURI NA UPOTREBNI VEK

Širina prsline na površini betona ne treba da bude izolovani parametar povezan sa korozijom armature. Pokazalo se da je mnogo korisnije koristiti maksimalni napon u armaturi kao moguće ograničenje uticaja prsline izazvanih opterećenjem na razvoj korozije armature. Širina prsline u AB elementima zavisi od nekoliko parametara: debljine zaštitnog sloja, napona prijanjanja. Uspostavljena je analitička veza između napona u armaturi i izmerene širine prsline na površini betona kako bi se napon u armaturi mogao koristiti kao jedan od kriterijuma trajnosti. Ova veza je analizirana za različite w/c odnose, čvrstoće, debljine zaštitnih slojeva i uslove izloženosti na osnovu sopstvenih eksperimentalnih i rezultata dostupnih u literaturi. U odabranim istraživanjima, čvrstoća pri pritisku je bila u rasponu od 24.0 do 65.2 MPa, w/c odnos se kretao u granicama od 0.40 do 0.65, dok su prsline bile široke od 0.02 mm do 0.64 mm.

Uspostavljanjem linearne relacije moguće je napraviti predikciju dubine karbonatizacije elemenata sa prslinama poznajući napon u armaturi i karbonatizacionu otpornost neisprskalih uzoraka napravljenih od tog betona. Ovo omogućava da se kod AB elemenata ne definiše minimalni zaštitni sloj i maksimalni w/c odnos kao uslov trajnosti, već napon u armaturi koji zavisi od zaštitnog sloja betona i veličine naprezanja.

S obzirom da se pokazalo da period depasivacije armature ne znači nužno i kraj upotrebnog veka, analiziran je period propagacije korozije armature u isprskanim AB elementima. Izvršena je analiza rezultata sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja primenom polu-probabilističkog modela. Na kraju je na osnovu analitičke verifikacije odnosa napona u armaturi i širine prsline, za različite vrste betona, predloženo ograničenje napona u armaturi koji omogućava da celokupni upotrebnog vek (period inicijacije i propagacije) AB elemenata sa prslinama zadovolji propisane zahteve trajnosti (slika 6).



Slika 6 – Veza između napona zatezanja u armaturi na mestu prsline i oštećenja koja nastaju kao posledica korozije za slučaj klasu izloženosti XC2



## 5. ZAKLJUČAK

Na proces karbonatizacije i koroziju koja nastaje tim putem u velikoj meri utiče prisustvo prslina. Prsline koje nastaju kao posledica savijanja presecaju armaturu i znatno olakšavaju prodor kiseonika i vode. Shodno tome, uloga prslina prouzrokovanih opterećenjem ili deformacijama ne sme se zanemariti u sagledavanju upotrebnog veka armiranobetonskih konstrukcija.

Da bi ispitala mogućnost primene postojećih modela predikcije na zelenim betonima korišćenim u ovom istraživanju, sprovedeno je komparativno ispitivanje u prirodnim i ubrzanim uslovima. Analizirani su postojeći modeli predikcije dubine karbonatizacije i predložena je njihova modifikacija (parametri  $k_t$  i  $\varepsilon_t$ ) u slučaju betona sa RA i LP. Nakon što je ustanovljena veza između ubrzanog karbonatizacione otpornosti i čvrstoće pri pritisku, izvršena je analiza upotrebnog veka kroz definisanje debljine zaštitnog sloja različitih vrsta betona.

Drugi deo ovog istraživanja prikazuje rezultate ispitivanja uticaja širine prslina na dubinu karbonatizacije i trajnost AB konstrukcija. Pripremljeni su uzorci sa 5 različitih širina prslina (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 i 0.30 mm) kao i referentni uzorci bez prslina. Uticaj prslina na dubinu karbonatizacije postojao na otprilike  $\pm 10$  mm u odnosu na položaj prslina, bez obzira na vrstu betona i širinu prslina. Takođe, na osnovu izmerenih dubina karbonatizacije duž pritisnute strane uzorka zaključeno je da nije bilo jasnog trenda smanjenja dubine karbonatizacije sa porastom dilatacije pritiska.

Uspostavljena je analitička veza između napona u armaturi i izmerene širine prslina na površini betona. S obzirom da ova veza primarno zavisi od debljine zaštitnog sloja, napon u armaturi analiziran je kao kriterijum trajnosti jer predstavlja prag mikroskopskog oštećenja betona na kontaktu sa armaturom. Analizirani su sopstveni eksperimentalni rezultati i rezultati dostupni u literaturi.

Kako period depasivizacije armature ne znači nužno i kraj upotrebnog veka, analiziran je period propagacije korozije armature u isprskalim AB elementima. Prikazani su rezultati sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja i izvršena je analiza tih rezultata primenom poluprobabilističkog modela iz literature. Na kraju je na osnovu analitičke verifikacije odnosa napona u armaturi i širine prslina, za različite vrste betona, predloženo ograničenje napona u armaturi koji omogućava da celokupni upotrebnog veka (period inicijacije i propagacije) AB elemenata sa prslinama zadovolji propisane zahteve trajnosti.

## LITERATURA

- [1] Carević V. Uticaj Prslina na Mehanizme Deterioracije i Trajnost Armiranobetonskih Konstrukcija, PhD Thesis. University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2020.
- [2] Carević V, Ignjatović I. Influence of loading cracks on the carbonation resistance of RC elements. *Constr Build Mater* 2019;227:116583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.309>.
- [3] Blagojević A. The Influence of Cracks on the Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures in relation to Chloride - Induced Corrosion A Look from a Different Perspective. Delft University of Technology, 2016.
- [4] Pease BJ. Influence of concrete cracking on ingress and reinforcement corrosion. Technical University of Denmark, 2010.
- [5] Otieno M, Beushausen H, Alexander M. Chloride-induced corrosion of steel in cracked

- concrete - Part II: Corrosion rate prediction models. *Cem Concr Res* 2016;79:386–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.08.008>.
- [6] Scrivener KL, John VM, Gartner EM. *Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub>, cement-based materials industry*. Paris: 2016.
- [7] Ignjatović I. *Ultimate strength of reinforced recycled concrete beams (in Serbian)*, PhD Thesis. University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2013.
- [8] Dragaš J. *Ultimate capacity of high volume fly ash reinforced concrete beams*, PhD Thesis. University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2018.
- [9] Tošić N. *Behaviour of reinforced concrete beams made with recycled and waste materials under long-term loading*, PhD Thesis. University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2017.
- [10] CEN. EN 1992-1-1. In: CEN, editor. vol. 1. 1st ed., Belgrade: ISS; 2015.
- [11] fib-Model Code. *Model Code 2010. Volume 2*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib); 2010.
- [12] Carević V, Ignjatović I, Dragaš J. Model for practical carbonation depth prediction for high volume fly ash concrete and recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2019;213:194–208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.267>.
- [13] fib-Bulletin 34. *Model Code for Service Life Design*. 1st ed. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib); 2006.
- [14] Carević V, Ignjatović I. Evaluation of concrete cover depth for green concretes exposed to carbonation. *Struct Concr* 2020. <https://doi.org/10.1002/suco.202000086>.
- [15] Marinković S, Carević V, Dragaš J. The role of service life in Life Cycle Assessment of concrete structures. *J Clean Prod* 2021;290:125610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125610>.
- [16] Carevic V, Ignjatovic I. Limit values of accelerated carbonation resistance to meet EC2 durability requirements. *Build Mater Struct* 2022;65:1–6. <https://doi.org/10.5937/GRMK2201001C>.
- [17] Wang XH, Val D V., Zheng L, Jones MR. Influence of loading and cracks on carbonation of RC elements made of different concrete types. *Constr Build Mater* 2018;164:12–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.142>.
- [18] Ren Y, Huang Q, Liu XL, Tong ZJ. A model of concrete carbonation depth under the coupling effects of load and environment. *Mater Res Innov* 2015;19:S9-224-S9-228. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001970>.
- [19] Wan X, Wittmann FH, Zhao T. Influence of mechanical load on service life of reinforced concrete structures under dominant influence of carbonation. *Restor Build Monum* 2011;17:103–10. <https://doi.org/10.1515/rbm-2011-6437>.
- [20] Tang J, Wu J, Zou Z, Yue A, Mueller A. Influence of axial loading and carbonation age on the carbonation resistance of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 2018;173:707–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.269>.