



SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA
CONTEMPORARY CLAY PRODUCTS INDUSTRY ASSOCIATION OF SERBIA

XXVIII CONGRESS **DIMK** and IX CONGRESS **SIGP**
with INTERNATIONAL SYMPOSIUM
ON RESEARCHING AND APPLICATION OF CONTEMPORARY ACHIEVEMENTS
IN CIVIL ENGINEERING IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES
Divčibare, October 19-21, 2022.

Vedran Carević¹

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 spravljeni 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 vek (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 pro-posed, 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.

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

1. UVOD

Beton se obično smatra građevinskim materijalom koji ima dobra svojstva trajnosti. Međutim, slučajevi nezadovoljavajućeg upotrebnoeg veka nisu toliko retki, čak i u nekim od najrazvijenijih zemalja u kojima je očekivani kvalitet građevinskih radova veoma visok. Jedan od ključnih razloga propadanja armiranobetonskih (AB) konstrukcija je korozija armature, koja može dovesti do ozbiljnih oštećenja.

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). U AB konstrukcijama armatura je fizički i hemijski zaštićena okolnim, visoko alkalnim, zaštitnim slojem betona i tankim oksidacionim slojem – pasivizacionim slojem na armaturi. Na nivou materijala, zaštitni sloj betona do armature predstavlja zaštitu armature od eksternih uticaja kroz smanjenje transporta štetnih materija. Ukoliko pH vrednost padne ispod, približno, 9.5 pasivizacioni sloj se razgrađuje (depasivizuje) čime se omogućava početak korozije. Sa relativno niskom čvrstoćom betona na zatezanje, u AB konstrukcijama pojava prslina koje presecaju zaštitni sloj je gotovo neizbežna posledica skupljanja, termičkog širenja, mehaničkih/hemijskih oštećenja ili jednostavno posledica dejstva opterećenja. 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.

U dosadašnjoj istraživačkoj praksi, deterioracioni procesi i njihovi transportni mehanizmi izučavani su i ispitivani uglavnom na neisprskalim betonskim uzorcima. Kao što je već objašnjeno, prslina mogu uticati na deterioracione procese (karbonatizacija, penetracija hlorida i dejstvo mraza i soli za odmrzavanje) i koroziju koja nastaje tim putem kroz povećanje transporta štetnih materija. Imajući sve to u vidu, potrebno je analizirati kakva je uloga zaštitnog sloja betona ispresecanog mrežom prslina u obezbeđivanju upotrebnoeg veka. Shodno tome, ulogu naponskih prslina ne bi trebalo zanemariti u sagledavanju upotrebnoeg veka AB konstrukcija. Međutim, prslina još uvek nisu uzete u obzir kao parametar u modelima predikcije koji se koriste za definisanje upotrebnoeg veka AB konstrukcija (npr. *fib*-Model Code 2010). Naprotiv, smatra se da odgovarajući kvalitet zaštitnog sloja i ograničenje širine prslina osiguravaju dovoljno dug upotrebni vek (≥ 50 godina) bez dodatne zaštite [3]. U zavisnosti od uslova izloženosti i klase konstrukcije, ograničenje širine prslina obično se definiše kao karakteristična vrednost (95% fraktil) u rasponu od 0.2 do 0.4 mm [4].

Korozija izazvana hloridima bila je predmet mnogih istraživanja proteklih godina, uključujući i uticaj prslina na ovaj deterioracioni mehanizam [5]–[7]. Za razliku od nje, u literaturi postoji vrlo malo podataka o uticaju prslina na koroziju armature izazvanu karbonatizacijom, pogotovo na razvoj korozije tokom vremena. Kroz sveobuhvatni pregled literature, 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 (CO₂) čija se koncentracija konstantno povećava tokom vremena. Zbog toga je karbonatizacija postala važno pitanje u analizi trajnosti AB konstrukcija.

Karbonatizacija je proces neutralizacije cementne matrice koji dovodi do smanjenja pH vrednosti betona (sa 13 na ispod 9), što smanjuje hemijsku zaštitu armature. Beton je porozan materijal koji omogućava različitim supstancama da prodru kroz mrežu međusobno povezanih kapilarnih pora. Transport CO₂ kroz zaštitni sloj betona odvija se difuzijom koja se, prema pretpostavci, odvija u skladu sa Prvim *Fick*-ovim zakonom difuzije, usvajajući da je koncentracija atmosferskog CO₂ konstantna u toku vremena. Iskustva sa postojećim konstrukcijama pokazala su veću dubinu karbonatizacije na mestu prslina u poređenju sa neisprskanim delovima konstrukcije [1].

Pored prslina, na sam proces karbonatizacije utiče i različit sastav betona. Od početka XXI veka, mnoge ljudske aktivnosti usmerene su ka očuvanju životne sredine, a posebna pažnja se posvećuje velikim količinama otpada ili nusproizvoda koje stvaraju različite industrije. Najefikasnija opcija za značajno smanjenje ovih materijala u mnogim industrijama je njihova ponovna upotreba ili recikliranje. Procenjuje se da 7–10% celokupne emisije CO₂ antropogenog porekla nastaje tokom proizvodnje cementa [8]. 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. Pored upotrebe prirodnih sirovina, potrošnje energije i proizvodnje otpada, veliki deo negativnog uticaja (ekoloških i ekonomskih) građevinske industrije potiče od procesa potrebnih za sanaciju i održavanje konstrukcija tokom njihovog upotrebnoeg veka. Troškovi potrebni za sanaciju i održavanje često prevazilaze i troškove izgradnje samog objekta. Zbog toga je u novije vreme tendencija da se o trajnosti sistematski razmišlja još u toku projektovanja – projektovanje prema upotrebnoem veku (*eng. Service Life Design*).

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 [9], [10] i ponašanje pod dugotrajnim opterećenjem [11] 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.

Kao rezultat upotrebe RA u proizvodnji betona, mikrostruktura se značajno komplikuje zbog dve tranzitne (prelazne) zone. Nekoliko autora istraživala su karbonatizacionu otpornost betona sa RA, ali se na osnovu podataka iz literature ne može doneti jasan zaključak [12]–[16]. Slična je situacija i kod betona sa LP. Upotreba LP u betonu dovodi do gušće strukture usled formiranja dodatne C-S-H veze tokom pucolanske reakcije, što dalje rezultuje smanjenjem difuzije CO₂. Sa druge strane, pucolanska reakcija konzumira Ca(OH)₂ iz cementne paste i samim tim smanjuje njegovu količinu koja je

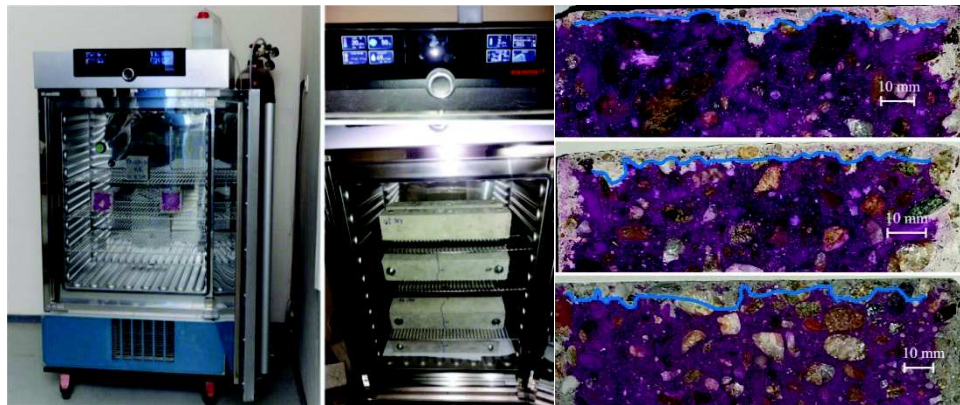
dostupna za reakciju sa CO_2 , što može uzrokovati brže pomeranje karbonatizacionog fronta [17]. Zbog manje količine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ stepen vezivanja CO_2 (reakcija $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i CO_2) će biti manji nego kod običnih cementnih betona [18]. Proces karbonatizacije može povećati poroznost betona sa mineralnim dodacima i na taj način smanjiti njihov upotrební vek [19]–[21]. Ovaj fenomen je obrnut u odnosu na cementne betone kod kojih dolazi do pada poroznosti kao rezultata procesa formiranja CaCO_3 .

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 različitih vrsta 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 nadvošnjaka. Zapreminsku masu u suvom stanju iznosila je 2370 kg/m^3 , dok je upijanje vode bilo 3.9% nakon 24 sata. LP korišten u ovom ispitivanju dobijen je iz termoelektrane "Nikola Tesla B" u Obrenovcu i imao je zapreminsku masu od 2300 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 za NAC, RAC i HVFAC betone respektivno) i istu klasu ugradljivosti (klasa S3).

Kako karbonatizacija betona u prirodnim uslovima traje godinama odlučeno je da se ovaj proces ubrza povećavanjem koncentracije CO_2 u specijalizovanim komorama predviđenim za takvo ispitivanje (slika 1).

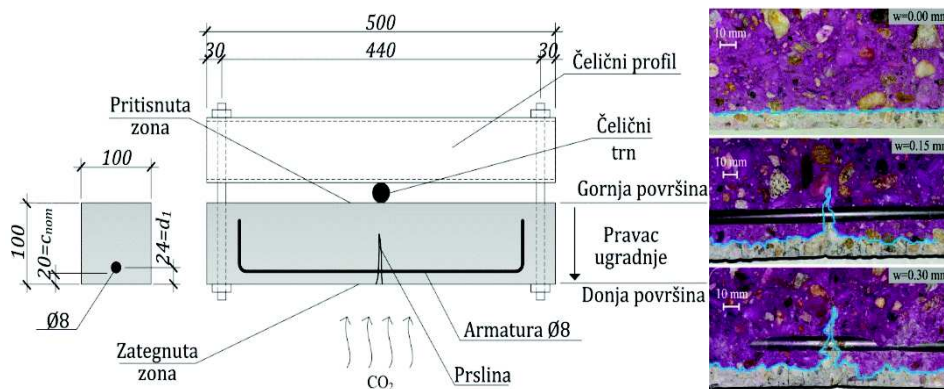


Slika 1. Uzorci u komori za karbonatizaciju i izmerene dubine karbonatizacije NAC, RAC i HVFAC betona, respektivno

Zbog toga je pre početka sprovođenja eksperimentalnog ispitivanja uticaja prslina na dubinu karbonatizacije bilo neophodno ispitati uticaj koncentracije CO₂ 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 CO₂ (1%, 2%, 4% i 16%) na kinetiku procesa karbonatizacije i posledice koje pri tome nastaju kod sve tri vrste ispitivanih betona. Merenje dubine karbonatizacije vršeno je pomoću fenolftaleinskog testa u skladu sa EN 14630 [22]. Nakon sprovedene analize pokazalo se da je koncentracija do 2% CO₂ optimalna za ubrzanje procesa karbonatizacije bez posledica na kinetiku procesa kod sve tri vrste ispitivanih betona.

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) zaključeno je da metoda savijanja ima najviše prednosti. Prsline indukovane 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. Zbog toga je odlučeno da će se u ovom eksperimentalnom ispitivanju koristiti metod savijanja u sredini raspona.

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 [4], – 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

Nakon 90 dana starosti uzorci su izloženi savijanju sa silom u sredini raspona. Starost od 90 dana izabrana je kako bi HVFAC betoni dostigli odgovarajuću čvrstoću pri pritisku [10]. Kruti (nedeformabilni) čelični profil postavljen je na gornjoj površini uzorka i služio je kao oslonac čitavom sistemu. Između njih je postavljen čelični cilindar

preko kojeg se sila prenosila u sredini raspona. Čelični profil i betonski uzorak povezani su međusobno navojnim šipkama prečnika $\varnothing 12$. Te šipke su provučene kroz cevi $\varnothing 21.6$ koje su ubetonirane u uzorak i rupe koje su izbušene na čeličnom profilu. Sila se u čitav sistem unosila pomoću pritezanja navojnih šipki moment-ključem. Sa povećanjem momenta utezanja rasla je sila unutar povezanog sistema koja se na betonski uzorak prenosila kao koncentrisana sila u sredini raspona pomoću čeličnog trna. Nakon što je iscrpljena nosivost betona na zatezanje došlo je do pojave prsline sa donje strane uzorka. Daljim povećanjem momenta utezanja širina prsline je rasla. Kada je prsline dostigla odgovarajuću širinu na površini betona, prestalo se sa utezanjem navojnih šipki. Širina prsline na površini kontrolisana je pomoću digitalne kamere *DNT Entwicklungs und Vertrieb* sa uvećanjem 45 puta.

Uzorci za ispitivanje uticaja prsline na dubinu karbonatizacije su nakon starosti od 90 dana stavljeni u komoru za karbonatizaciju *Memmert ICH 260C* (slika 2) kako bi se ubrzao proces deterioracije. Tokom narednih 28 dana uzorci su izlagani visokoj koncentraciji CO_2 od 2%, relativnoj vlažnosti (*RH*) $65 \pm 5\%$ i temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$, u skladu sa [23]. Merenje dubine karbonatizacije vršeno je nakon 28 dana izloženosti uzoraka u komori za karbonatizaciju (ukupna starost uzoraka je bila 118 dana). Nakon što su uzorci podužno prepolovljeni i izmerena dubina karbonatizacije, iz uzoraka je izvađena armaturna šipka kako bi se merila površina korozija i smanjenje poprečnog preseka šipke. Korozija armature merena je pomoću plastične folije sa milimetarskom podelom, dok je gubitak poprečnog preseka meren pomoću *Olympus CX41* elektronskog mikroskopa na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

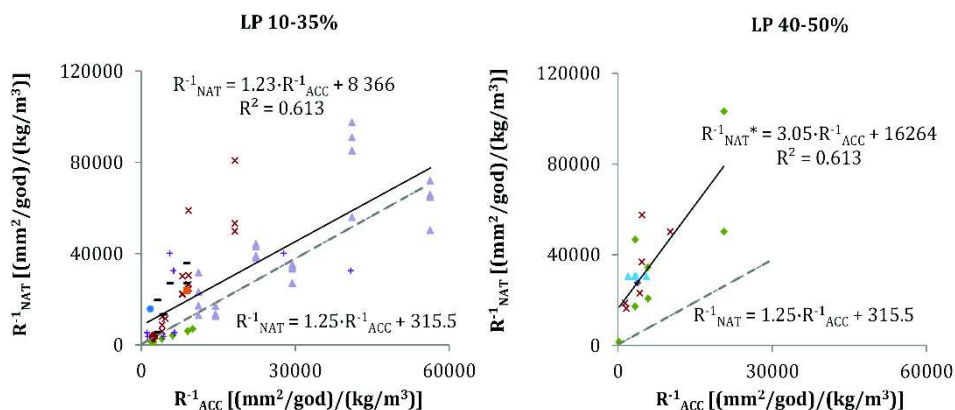
Uticaj prsline i napona pritiska u betonu na upotrebni vek analiziran je pomoću dostupnog probabilističkog modela predikcije *fib-Model Code 2010* [3] za određivanje upotrebnog veka.

3. KARBONATIZACIONA OTPORNOST RAZLIČITIH VRSTA BETONA

Kako RA i LP utiču na proces karbonatizacije [24] 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 ubrzanim i prirodnim uslovima na uzorcima bez prsline. Sprovedena je opsežna analiza zasnovana na sopstvenim eksperimentalnim rezultatima i rezultatima dostupnim 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.

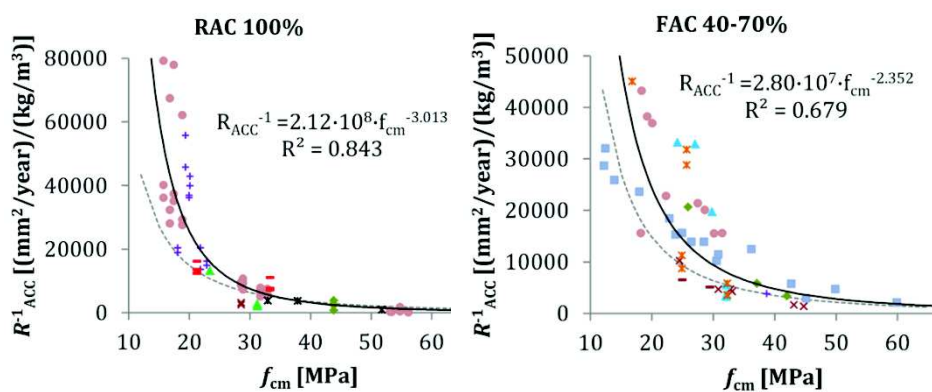
Na osnovu sprovedene analize zaključeno je da se *fib-ov* [23] model predikcije može primenjivati na sve vrste ispitivanih betona uz modifikacije linearne veze između prirodne i ubrzanе karbonatizacione otpornosti za betone sa LP [25]. Trend linija dobijene veze između prirodne i ubrzanе inverzne efektivne karbonatizacione otpornosti za betone sa različitim sadržajem LP prikazana je na slici 3 zajedno sa linijom koju predlaže *fib-Model Code 2010*. Vrednost k_t definiše nagib ovih pravih. U slučaju betona sa sadržajem LP do 35% ukupnih vezivnih materijala, ove dve linije su gotovo paralelne: 1.23 u poređenju sa 1.25 koliko predlaže *fib-Model Code 2010*, pa će se u nastavku koristiti vrednost definisana u *fib-Model Code 2010*. Razlika među njima je jedino u mestu gde prava preseca ordinatu (8366 u poređenju sa 315.5). Ova vrednost predstavlja fizičko

značenje funkcije greška (ε_i) u transformaciji između ubrzane i prirodne inverzne karbonatizacione otpornosti (iz R_{ACC}^{-1} u R_{NAT}^{-1}). U slučaju HVFAC betona postojale su značajnije razlike i u nagibu prave i u odsečku na ordinati.



Slika 3. Odnos između prirodne i ubrzane inverzne karbonatizacione otpornosti betona sa LP

Nakon što je ustanovljena veza između prirodne i ubrzane inverzne efektivne karbonatizacione otpornosti za betone sa LP može se vršiti predikcija dubine karbonatizacije, a samim tim i upotrebnog veka. Da bi se to moglo ostvariti potrebno je izvršiti ubrzani karbonatizacioni test i sračunati vrednost R_{ACC}^{-1} . Kako to nije uvek moguće, pogotovo u slučaju postojećih konstrukcija, vrednost R_{ACC}^{-1} mogla bi se odrediti na osnovu poznate čvrstoće betona pri pritisku, koja se najčešće koristi kao indikator kvaliteta betona. Zbog toga je uspostavljena veza između srednje čvrstoće betona pri pritisku pri starosti od 28 dana (f_{cm}) i ubrzane inverzne efektivne karbonatizacione otpornosti betona [25], [26] (slika 4).



Slika 4. Odnos između karbonatizacione otpornosti i čvrstoće betona pri pritisku (f_{cm}) za betone sa RA i LP

U odabranim istraživanjima, čvrstoća pri pritisku (f_{cm}) je bila u rasponu od 11.5 do 67.0 MPa (mereno na standardnom cilindru Ø150·300 mm), RH je bio u rasponu od 55% do 83%, dok se CO₂ koncentracija tokom ubrzanih testova kretala između 1% i 20%.

Funkcija predložena za NAC betone odgovarala je rezultatima prikupljenim za RAC betone sa procentom zamene do 50% [25]. Do istog zaključka došli su i autori Silva i ostali [15] u svom istraživanju. Na osnovu dostupnih rezultata može se zaključiti da manji procenti zamene (do 50%) neće uticati na karbonatizacionu otpornost betona. U slučaju betona sa 100% RA (RAC 100%) ostvaren je koeficijent determinacije (R^2) od 0.843, odnosno, 84.3% rezultata inverzne karbonatizacione otpornosti se može opisati predloženom relacijom sa f_{cm} na 28 dana (slika 4). Ostatak se može objasniti velikim brojem faktora koji se razlikuju u svakom eksperimentalnom istraživanju. Ovo uključuje ugradnju, uslove nege, vrstu cementa, količinu cementa, w/c odnos pa čak i samu poroznost RA. Broj i varijabilnost korišćenih podataka čini ovaj rezultat relevantnijim.

Analizirajući regresionu krivu NAC i betona sa 10-35% zamene cementa sa LP (LP 10-35%), uočeno je da je njihov trend veoma sličan [25]. Razlike koje su javljale mogle su se uočiti samo kod betona sa čvrstoćom manjom od 20 MPa. S obzirom da se ovo istraživanje nije bavilo betonima čija je srednja čvrstoća manja od 20 MPa (ne spadaju u betone za konstruktivnu upotrebu) posledice razlike u otpornosti NAC i betona sa LP čije su čvrstoće manje od 20 MPa mogu se zanemariti. Drugim rečima, ne postoji značajnija razlika između funkcije predložene za NAC i regresione funkcije određene za betone sa 10-35% LP koji imaju čvrstoću pri pritisku veću od 20 MPa. Zbog toga će se u nastavku za proračun R^I_{ACC} betona sa 10-35% LP koristiti funkcija zavisnosti koja je predložena za NAC betone.

U slučaju HVFAC betona sa 40-70% LP ostvaren je koeficijent determinacije od 0.679. Imajući u vidu veliki broj faktora koji se razlikuju u svakom eksperimentalnom istraživanju, pogotovo kod upotrebe ovako velikog procenta LP, rezultat se može smatrati relevantnim. Analizirajući regresionu krivu NAC i HVFAC betona, prikazanu na slici 4, može se videti da postoji razlika između ove dve vrste betona. Pri manjim vrednostima čvrstoće pri pritisku, karbonatizaciona otpornost HVFAC betona je značajno manja u poređenju sa NAC betonima. Međutim, sa porastom čvrstoće pri pritisku razlike se smanjuju. U nastavku je se za proračun R^I_{ACC} HVFAC betona koristiti funkcija zavisnosti koja je definisana na slici 4.

Nakon što je ustanovljena veza između ubrzane inverzne efektivne karbonatizacione otpornosti i čvrstoće pri pritisku na 28 dana (slika 4), može se izvršiti predikcija dubine karbonatizacije, a samim tim i upotrebnoг veka koristeći koristeći modifikovani *fib* model predikcije dubine karbonatizacije. Ovaj model se smatra efikasnim načinom za procenu vremena kada se očekuje da karbonatizacioni front dosegne armaturu i pokrene depasivizaciju. Na osnovu tog modela definisana je osnovna funkcija graničnog stanja depasivizacije armature izazvane karbonatizacijom [1]. Primenjen je puni probablistički pristup koji omogućava određivanje upotrebnoг veka koji se odlikuje znatno manjom verovatnoćom otkaza (neuspeha) u poređenju sa drugim pristupima (polu-probablističkim i determinističkim). Indeks pouzdanosti (β) i verovatnoće otkaza (P_f), povezani sa funkcijom graničnog stanja, izračunati su korišćenjem metode pouzdanosti prvog reda (FORM–*First Order Reability Method*) dostupne u softveru VaP. U skladu sa *fib* Bulletin 34 [23], ovi parametri moraju da zadovolje zahteve za granično stanje depasivizacije ($\beta \geq 1.3$ i $P_f \leq 0.10$) kako bi se mogli kvalifikovati za upotrebu. Preporučene minimalne debljine zaštitnog sloja za različite vrste betona prikazane su u Tabeli 1.

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 probablističkog 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 [4], obezbeđujući pri tome upotrebnii vek od 50 godina.

Vrsta betona	$C_{min,dur}$ (mm)			
	XC1	XC2	XC3	XC4
Indikativna klasa betona	C 25/30	C 25/30	C 30/37	C 30/37
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

Tabela 1. Vrednosti minimalnih debljina zaštitnog sloja za različite vrste betona za upotrebnii vek $t_{SL} = 50$ godina [1]

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 upotrebnog 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 [27]. 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.

Sračunate minimalne debljine zaštitnih slojeva za sve klase betona (bez obzira na minimalnu indikativnu klasu) za upotrebnii vek od 50 godina prikazane su u tabeli 2. U slučaju upotrebnog veka različitog od 50 godina, koliko je definisano za klasu konstrukcije S4 [4], potrebno je sprovesti proračun koristeći graničnu funkciju. Rešavanje granične funkcije primenom metode pouzdanosti prvog reda predstavlja komplikovan pristup u inženjerskoj praksi. Da bi se pojednostavila upotreba betona sa RA i LP u pogledu trajnosti, potrebno je primeniti pristup definisan za NAC u EN 1992-1-1 (tabela 4.4N u standardu). Na taj način bi se definisali minimalni zaštitni slojevi iz uslova trajnosti ($C_{min,dur}$) u funkciji različitih klasa konstrukcije (S1–S6) za betone sa RA i LP, na isti način kako je to već urađeno za NAC.

Standard EN 1990 [28] definiše pet različitih upotrebnih vekova (od 10 do 100 godina) u zavisnosti od namene konstrukcije. Može se uspostaviti veza između upotrebnog veka definisanog u EN 1990 [28] i klasa konstrukcije koje definiše EN 1992-1-1. Da bi se definisala ova veza mora se uzeti u obzir da se određeni upotrebnii vek može postići kombinovanjem dva parametra: kvalitet betona i debljina zaštitnog sloja (veći kvalitet betona i manji zaštitni sloj i obrnuto). Klase konstrukcije ne predstavljaju određeni upotrebnii vek, već način kako se on ostvaruje, kombinujući između ostalog ova dva parametra. Međutim, projektovani upotrebnii vek definisan za različite kategorije objekata

(1 do 5) u funkciji njegove namene [28] može se indikativno dovesti u vezu sa određenom klasom konstrukcije [4]. Pri tome, kategorija objekta 1 odgovara klasi S1, 2 odgovara S2, 3 odgovara S3, 4 odgovara S4 i 5 odgovara S6 samo ukoliko se pri tome primene definisane indikativne klase čvrstoće betona [4]. Ovo ne znači nužno da klasa konstrukcije S3 (ili bilo koja druga) ne može imati upotrebnog veka od 50 ili 100 godina, već da se on može ostvariti uz definisane zaštitne slojeve za tu klasu konstrukcije isključivo uz primenu više klase betona od minimalne indikativne klase.

Vrsta betona	Klasa izl.	$c_{min,dur}$ (mm)				
		C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50
NAC i RAC 10-50%	XC1	18	15	13	12	11
	XC2	30	25	22	20	18
	XC3	36	30	25	23	21
	XC4	34	30	30	23	20
RAC 100%	XC1	20	16	13	12	11
	XC2	33	26	22	20	18
	XC3	40	31	25	23	21
	XC4	39	30	30	23	20
LP 10-35%	XC1	24	22	21	20	19
	XC2	39	35	34	32	31
	XC3	46	42	40	38	36
	XC4	45	41	39	37	36
HVFAC (LP 40-70%)	XC1	40	35	32	30	29
	XC2	66	58	53	50	47
	XC3	78	69	62	58	55
	XC4	76	67	61	57	54

Tabela 2. Sračunate minimalne debljine zaštitnog sloja za različite vrste i klase betona za upotrebnog veka $t_{SL} = 50$ godina [1]

Primenjujući vezu između projektovanog upotrebnog veka i klase konstrukcije moguće je sračunati $c_{min,dur}$ za različite vrste betona primenjujući graničnu funkciju. Sračunate vrednosti $c_{min,dur}$ u funkciji različitih klasa konstrukcije za sve vrste razmatranih betona prikazane su u tabeli 3.

Prikazane vrednosti $c_{min,dur}$ za NAC i RAC 10-50% usvojene su na osnovu EN 1992-1-1 (tabela 4.4N u standardu). Ove vrednosti, iako su propisane, analizirane su primenom probablističkog modela kako bi se proverila mogućnost njegove primene i na druge vrste betona. Potrebno je naglasiti da je u slučaju NAC betona za klase izloženosti XC2 i XC3 debljina minimalnog zaštitnog sloja za klasu konstrukcije S1 bila 12 mm, što je više od propisanih 10 mm [4]. Slična situacija je bila i u slučaju klase konstrukcije S2, gde je debljina minimalnog zaštitnog sloja iznosila 18 mm, umesto propisanih 15 mm. Za sve ostale klase konstrukcije i klase izloženosti propisane vrednosti [4] odgovarale su vrednostima dobijenim primenom probablističkog pristupa u rešavanju granične funkcije.

Vrednosti sračunate za RAC 100% bile su neznatno veće u poređenju sa vrednostima definisanim za NAC i RAC 10-50% (maksimalna razlika je iznosila 2 mm). U slučaju LP 10-35% razlike su bile veće i rasle su sa porastom klase konstrukcije. U slučaju nižih klasa konstrukcije (S1 i S2) razlike su bile od 5 do 10 mm, dok su za pojedine klase konstrukcije (S6) iznosile i 20 mm. Najveće razlike ostvarene su između definisanih

vrednosti za NAC i sračunatih za LP 40-70%. Bez obzira na klasu konstrukcije razlike su bili približno dva puta.

Vrsta betona	Klasa konstr.	C _{min,dur} (mm)			
		XC1	XC2	XC3	XC4
NAC i RAC 10-50%	S1	10	12	12	15
	S2	10	18	18	20
	S3	10	20	20	25
	S4	15	25	25	30
	S5	20	30	30	35
	S6	25	35	35	40
RAC 100%	S1	10	12	12	15
	S2	11	18	18	20
	S3	12	20	20	25
	S4	16	26	25	30
	S5	20	31	32	35
	S6	25	37	37	40
LP 10-35%	S1	10	16	18	18
	S2	15	25	28	27
	S3	17	28	31	30
	S4	22	35	40	39
	S5	28	47	53	50
	S6	30	50	55	54
HVFAC (LP 40-70%)	S1	16	26	28	27
	S2	25	41	44	43
	S3	27	45	48	47
	S4	35	58	62	61
	S5	45	75	82	76
	S6	50	83	88	87

Tabela 3. Preporučene vrednosti minimalnih zaštitnih slojeva za različite klase konstrukcija [1]

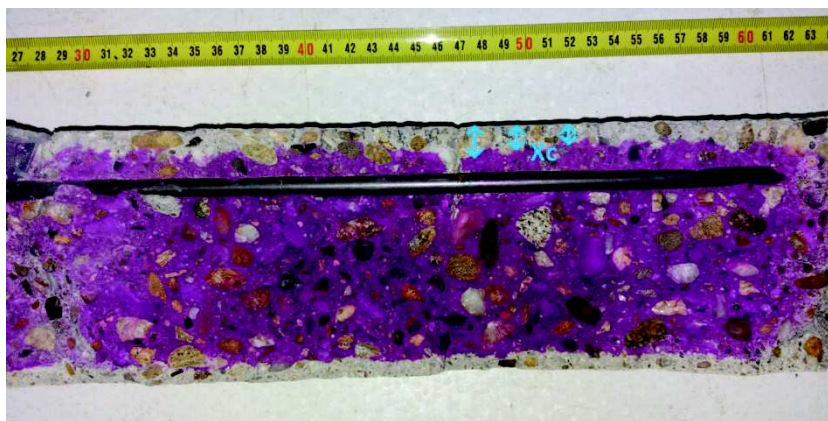
Sračunate vrednosti debljina zaštitnog sloja prikazane u tabeli 2 predstavljaju upotrebnii vek AB konstruktivnih elemenata iz uslova depasivizacije armature. Povećanje klase betona očekivano dovodi do smanjivanja debljine zaštitnog sloja. Međutim, smanjivanje debljine zaštitnog sloja zbog povećanja klase betona će uticati na povećanje širine prslina na površini betona što će biti analizirano u nastavku.

4. UTICAJ PRSLINA NA UPOTREBNI VEK AB KONSTRUKCIJA

Nakon što je određena optimalna koncentracija CO₂ za ubrzavanje procesa, ispitan uticaj RA i LP na proces karbonatizacije, izvršena korekcija postojećih modela predikcije i data preporuka debljina zaštitnih slojeva različitih vrsta betona sa RA i LP, pristupilo se drugoj fazi istraživanja koja je podrazumevala ispitivanje uticaja prslina na proces

karbonatizacije. Analiziran je uticaj širine prslina i napona pritiska u betonu na dubinu karbonatizacije, kao i dužina na kojoj se vrši osrednjavanje rezultata merenja.

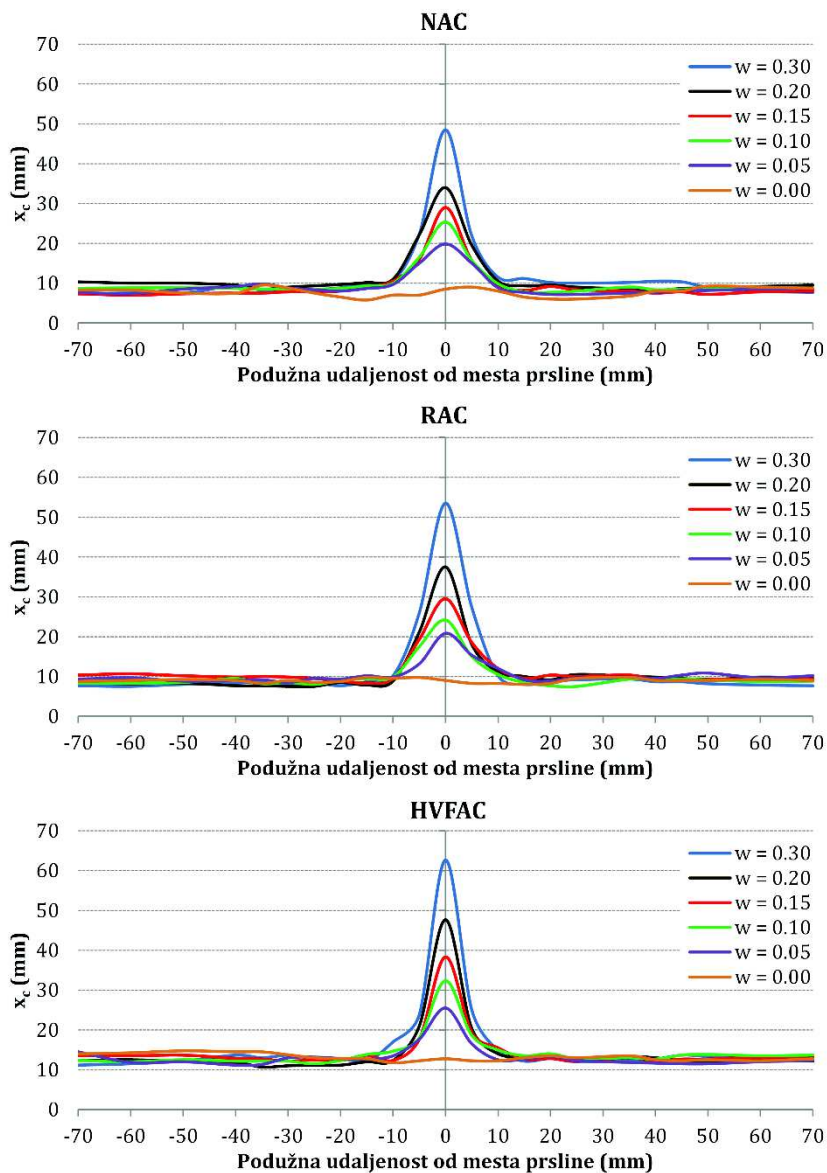
Uzorci koji su korišćeni u ovom eksperimentalnom ispitivanju bile su AB prizme dimenzija 100x100x500 mm (slika 2). Uzorci su podeljeni u tri serije, gde svaku seriju čine po jedan uzorak svih unapred definisanih širina prslina (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 i 0.30 mm kao i referentni uzorci bez prslina). Ukupno je ispitano 18 uzoraka po jednoj vrsti betona. Pored oznake svakog uzorka prikazana je širina prslina (w) na tom uzorku. Dubina karbonatizacije (x_c), izražena u mm, predstavljala je dubinu merenu od površine betona do početka ljubičaste boje (nekarbonatizovane zone) kao što je prikazano na slici 5. Dubina karbonatizacije je merena na svakih 5 mm po gornjoj/donjoj strani uzorka. Ukupno je bilo 58 merenja (29 sa svake strane) po uzorku. Merenje je vršeno pomoću lenjira sa tačnošću 0.5 mm.



Slika 5. Merenje dubine karbonatizacije

4.1. Uticaj prslina na dubinu karbonatizacije

Analiza uticaja prslina na koroziju izazvanu karbonatizacijom sprovedena je na osnovu sopstvenih eksperimentalnih rezultata, kao i primenom dostupnim standarda i modela predikcije. Uticaj prslina na karbonatizacioni front je bio sličan (približno 20 mm) bez obzira na širinu prslina (slika 6). Sa porastom širine prslina rasla je i dubina karbonatizacije na njenom mestu.



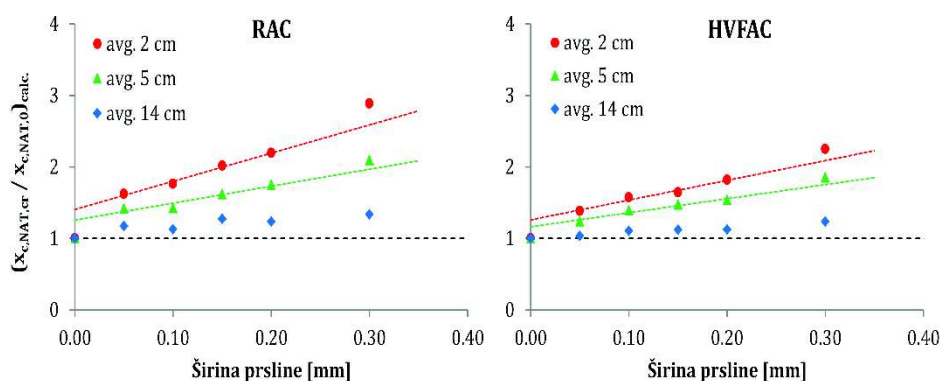
Slika 6. Srednja vrednost izmerenog karbonizacionog fronta ispitivanih betona

U svim slučajevima, čak i sa najmanjom širinom prslina od 0.05 mm, prslina se ponašala kao dodatna izložena površina kroz koju su molekuli CO_2 prodirali unutar betona upravno na stranicu prslina. Ovaj fenomen je bio prisutan kod svih vrsta ispitivanih betona. Takođe, maksimalna dubina karbonatizacije uzoraka bez prslina 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 neisprskanih uzoraka u poređenju sa NAC betonima, ovo ukazuje

da je pojava prslina 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 upotrebnog veka. Izabrane su tri dužine osrednjavanja: 20 mm (*avg. 2 cm*) što predstavlja uticajnu zonu prslina 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 prslina u ovom eksperimentalnom ispitivanju.

Na slici 7 se može videti da se odnos između sračunatih dubina karbonatizacije uzoraka sa i bez prslina. 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.



Slika 7. Odnos između sračunatih dubina karbonatizacije uzoraka sa ($x_{c,NAT,cr}$) i bez ($x_{c,NAT,0}$) prslina za različite dužine osrednjavanja

Takođe, na slici 7 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 prslina. U slučaju RAC i HVFAC uzoraka ova promena je nastupila pri širini prslina između 0.20 i 0.30 mm.

Može se primetiti da je razlika dubina karbonatizacije između uzoraka sa prslinom od 0.05 do 0.20 mm bila manja (do 30%) nego između uzoraka sa prslinom 0.05 mm i neisprskalih uzoraka. Ovo je bilo prisutno kod svih vrsta ispitivanih betona i dužina osrednjavanja.

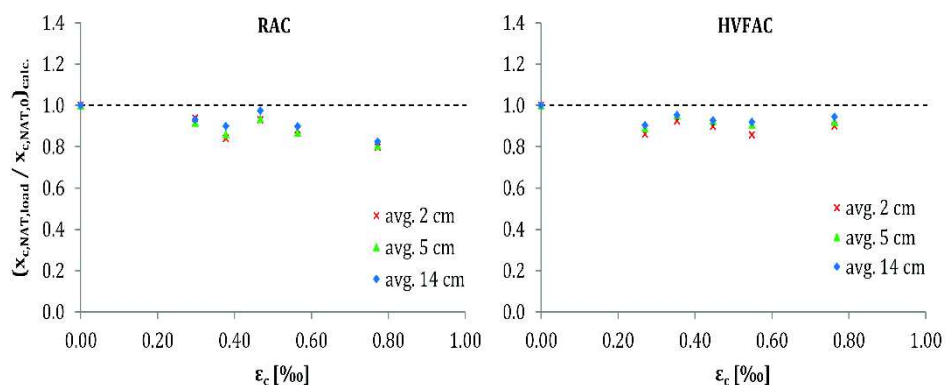
4.2. Uticaj napona pritiska na dubinu karbonatizacije

Većina istraživanja obavljenih do sada o uticaju napona na dubinu karbonatizacije analizirala su uticaj prslina ili napona zatezanja na karbonatizacionu otpornost, ali samo neka od njih su analizirala uticaj napona pritiska [29]–[32]. Takođe, napon pritiska u većini

tih istraživanja kretao se do nivoa nosivosti betona na pritisak, što nije slučaj tokom eksploatacije AB konstrukcija. Vrlo malo pažnje posvećeno je eksploatacionim naponima pritiska (do $0.45 \cdot f_{ck}$), gde je odnos napona i dilatacije u betonu linearan.

Kako je ovde reč o pritisnutoj strani ispitivanog uzorka prikazanog na slici 2, umesto širine prsline, koja ne predstavlja faktor za pritisnutu stranu, uveden je pojam dilatacije pritiska na površini betona. Maksimalna dilatacija pritiska u direktnoj je vezi sa širinom prsline. 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 8 je prikazan odnos sračunatih dubina karbonatizacije opterećenih i neopterećenih uzoraka.

Napon pritiska je pozitivno uticao na dubinu karbonatizacije u poređenju sa neopterećenim uzorcima. Sa slike 8 se može videti da je napon pritiska imao više uticaja na RAC uzorke u poređenju sa HVFAC. Međutim, za razliku od zategnute strane kod koje je jasno vidljivo da je sa porastom širine prsline rasla i dubina karbonatizacije na njenom mestu, ovde nije bilo tako jasnog trenda, pogotovo kod HVFAC uzoraka. Najmanja vrednost odnosa opterećenih i neopterećenih HVFAC uzoraka je bila 0.89 pri dilataciji $\varepsilon_c = 0.27\text{‰}$, dok je za veću dilataciju $\varepsilon_c = 0.76\text{‰}$ vrednost odnosa iznosila 0.92. Sa druge strane, povećanje dilatacije pritiska u slučaju RAC uzoraka dovelo je do linearnog smanjenja odnosa dubina karbonatizacije opterećenih i neopterećenih uzoraka kao što se može videti na slici 8. Najmanja vrednost odnosa bila je 0.81 upravo na maksimalnoj dilataciji $\varepsilon_c = 0.77\text{‰}$.



Slika 8. 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.

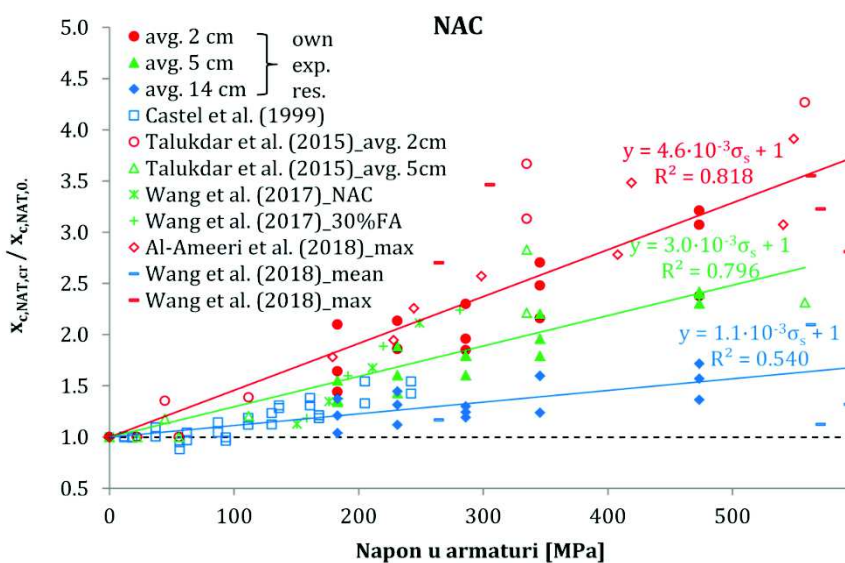
Sa smanjenjem dužine osrednjavanja nije primećena značajnija razlika u dubini karbonatizacije, za razliku od zategnute zone gde je ovaj efekat bio značajan.

S obzirom da napon pritiska nije imao značajni efekat na smanjenje dubine karbonatizacije (do 19%), u nastavku se neće razmatrati uticaj napona pritiska na upotrebnii vek AB konstrukcija.

5. UTICAJ NAPONA U ARMATURI NA UPOTREBNI VEK

Širina prsline na površini betona u AB elementima zavisi od nekoliko parametara: debljine zaštitnog sloja, količine armature i napona prijanjanja. Postavlja se pitanje da li je moguće ograničiti širinu prsline iz uslova trajnosti betona ako se zna da na njenu širinu utiču svi navedeni parametri, koji se razlikuju od konstrukcije do konstrukcije? Prvi korak ka rešavanju ovog problema je uspostavljanje analitičke veze napona u armaturi i širine prsline na površini betona. Upotreba maksimalnog napona u armaturi kao moguće ograničenje uticaja prsline, izazvanih opterećenjem, na razvoj korozije armature pokazala se kao korisno rešenje. Ograničenje napona u armaturi već se koristi u propisima kao faktor ograničenja širine prsline iz uslova upotrebljivosti.

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 pri pritisku, debljine zaštitnih slojeva i uslove izloženosti na osnovu sopstvenih eksperimentalnih i rezultata dostupnih u literaturi [29], [33]–[36]. 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. Zaštitni sloj betona do podužne armature u ovim istraživanjima kretao se od 10 mm do 40 mm, čime su obuhvaćene sve debljine zaštitnih slojeva definisanih u EN 1992-1-1 [4] iz uslova izloženosti karbonatizaciji. Ispitivanja su sprovedena u prirodnim i ubrzanim uslovima karbonatizacije tokom koje se CO₂ koncentracija kretala od 4-20%. Veza između odnosa dubina karbonatizacije isprskalih i neisprskalih uzoraka i napona u armaturi prikazana je na slici 9.



Slika 9. Veza između odnosa dubina karbonatizacije isprskalih i neisprskalih uzoraka i napona u armaturi kod NAC betona

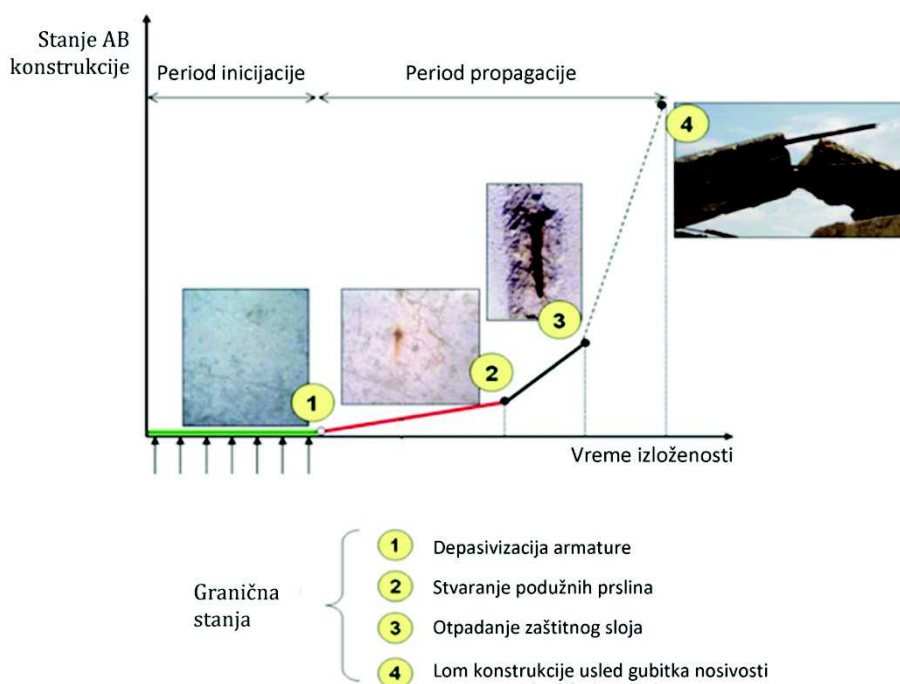
Sa slike 9 se može videti da je veza između odnosa dubina karbonatizacije isprskalih i neisprskalih uzoraka i napona u armaturi bila linearna za sve korišćene dužine osrednjavanja. Za predložene regresione jednačine sa linearnom vezom koeficijenti

determinacije bili su 0.818, 0.796 i 0.540 za dužine osrednjavanja 20 mm, 50 mm i 140 mm respektivno. Naravno, sa smanjenjem dužine osrednjavanja došlo je do rasta nagiba prave, jer sa smanjenjem dužine osrednjavanja raste i uticaj prsline na dubinu karbonatizacije.

Uspostavljanjem linearne relacije moguće je napraviti predikciju dubine karbonatizacije elemenata sa prslinama poznajući napon u armaturi i karbonatizacionu otpornost neisprsklaih 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. Rezultati su pokazali da nivo napona u armaturi kod AB elemenata igra značajnu ulogu u prodoru CO₂ kroz očigledno povećanje mikroprsline [1].

6. KOROZIJA ARMATURE

Nakon izgradnje AB konstrukcija prolazi kroz dva razičita perioda: period inicijacije (depasivizacije) i period propagacije (slika 10). Prisustvo prsline koje presecaju armaturu prekidaju pasivizacioni sloj i omogućavaju početak korozije i pre nego što se karbonatizacioni front uniformno približi ostatku armature. Razvoj korozije predstavlja period propagacije za AB konstrukcije. Tokom perioda propagacije produkti korozije izazivaju pojavu prsline u zaštitnom sloju betona, a zatim i njegovo otpadanje (slika 10). Kao posledica toga dolazi do gubitka adhezije između armature i betona, odnosno do dostizanja graničnog stanja nosivosti (ULS).

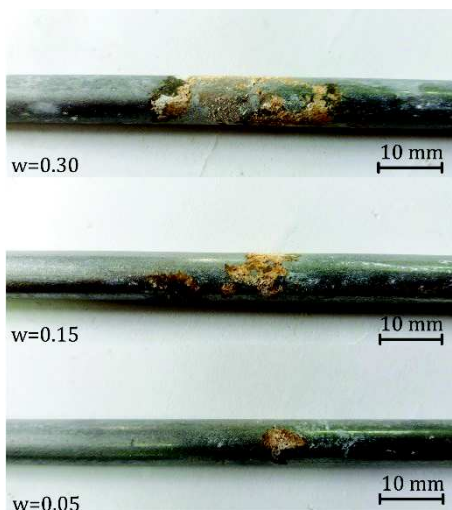


Slika 10. Životni vek AB konstrukcija [23]

Korozija armature u betonu je elektrohemijski proces. Rastvaranje gvožđa iz armature rezultuje gubitkom poprečnog preseka šipke koji može biti pretežno ravnomerno raspoređen po dužini i obimu šipke (uniformna korozija) ili pokazuje koncentraciju na lokalizovanim mestima (lokalna korozija). Efekti ova dva oblika korozionih oštećenja na gubitak nosivosti armature se razlikuju.

Uniformna korozija je obično povezana sa formiranjem smeđih oksida gvožđa koji zauzimaju veću zapreminu od osnovnog metala, dovode do povećanja obima šipke dok korodira, i do pucanja i eventualnog odlamanja zaštitnog sloja betona. U lokalnoj koroziji, površina anode (gde dolazi do otapanja metala) može biti relativno mala. S obzirom da je snabdevanje kiseonikom ograničeno zbog prisustva zaštitnog sloja, proizvodi korozionih reakcija pokazuju manji stepen zapreminske ekspanzije (kao što je „smeđa rđa“), a tendencija da se zaštitni sloj betona odlomi je manja.

Pojava lokalne korozije bila je prisutna kod svih uzoraka sa prslinom, što se može i videti na slici 11. Važno je naglasiti da u slučaju korozije na mestu prsline javlja lokalna korozija umesto uniformne korozije duž šipke. Sa druge strane, uzimajući u obzir da su prsline najčešće uniformno raspoređene u zoni maksimalnih napreznjanja, lokalna korozija će se pojaviti na mestu svake prsline, kontinualno duž armaturne šipke. Međutim, oštećenja koja su registrovana kod lokalne korozije na mestu prsline bila su manja u poređenju sa oštećenjima na armaturi koja su nastala kao posledica uniformne korozije.



Slika 11. Korozija armature na mestu prsline nakon 28 dana izloženosti 2% CO₂

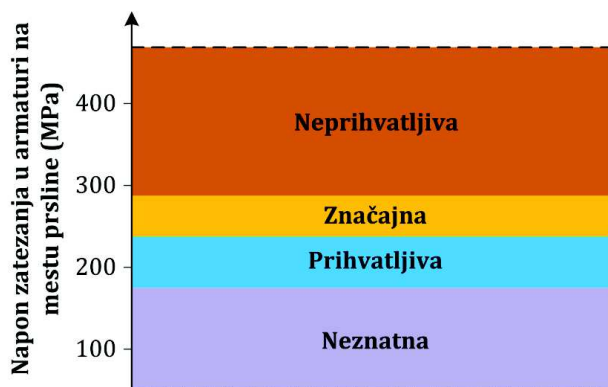
S obzirom da se pokazalo da period depasivizacije armature izazvan lokalnom depasivizacijom usled pojave prsline ne znači nužno i kraj upotrebnog veka, analiziran je period propagacije korozije armature u isprskanim AB elementima. Izvršena je analiza rezultata sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja primenom polu-probabilističkog modela. Polu-probabilistička granična funkcija za period propagacije korozije omogućava procenu vremena do formiranja neprihvatljivih oštećenja zaštitnog sloja u graničnom stanju upotrebljivost (eng. *Serviceability Limit State*) izazvanih korozijom armature.

Ovo neprihvatljivo oštećenje je povezano sa kritičnom širinom podužne prsline (w_{cr}) od 1.0 mm, koja označava početak pucanja zaštitnog sloja betona [37]. Treba napomenuti da ova vrednost predstavlja situaciju u kojoj se smatra da zaštitni sloj više ne

doprinosi zaštiti armature od atmosferskih uticaja. Širina podužne prsline takođe zavisi i od razmaka između šipki, debljine i kvaliteta zaštitnog sloja (čvrstoće na zatezanje).

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 12).

Celokupni upotrebnog vek isprskalih uzoraka može se smatrati jednakim upotrebnom veku (vremenu depasivizacije) neisprskalih uzoraka, ukoliko je napon zatezanja u armaturi manji od 230 MPa ($0.42 \cdot f_y$). Za napone u armaturi veće od 230 MPa, oštećenja koja nastaju kao posledica lokalne korozije dovode do smanjenja celokupnog upotrebnog veka u poređenju sa neisprskanim uzorcima. Radi praktične primene praćenja stanja postojećih konstrukcija, ovo ograničenje se može prikazati i preko širine prsline na površini betona što je u ovom slučaju odgovaralo širini prsline od 0.10 mm.



Slika 12. Veza između napona zatezanja u armaturi na mestu prsline i oštećenja koja nastaju kao posledica korozije za slučaj klasu izloženosti XC2

Međutim, primena ovih preporuka za određivanje upotrebnog veka kod isprskalih AB elemenata u agresivnom okruženju ne isključuje uticaj drugih parametara na projektovani upotrebnog vek. U budućem pristupu za projektovanje prema upotrebnom veku ulogu maksimalnog napona zatezanja u armaturi na mestu prsline pri eksploatacionom opterećenju, za određenu klasu izloženosti karbonatizaciji, treba sagledavati zajedno sa prečnikom šipke i debljinom zaštitnog sloja betona.

7. ZAKLJUČAK

Na proces karbonatizacije i koroziju koja nastaje tim putem u velikoj meri utiče prisustvo prsline. Prsline koje nastaju kao posledica savijanja presecaju armaturu i znatno olakšavaju prodor kiseonika i vode. Shodno tome, uloga prsline 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 ε_t) u slučaju betona sa

RA i LP. Nakon što je ustanovljena veza između ubrzane karbonatizacije 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 ± 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 polu-probabilističkog 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 upotrebnik vek (period inicijacije i propagacije) AB elemenata sa prslinama zadovolji propisane zahteve trajnosti.

8. ZAHVALNOST

U radu je prikazano istraživanje koje je pomoglo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (broj granta 200092).

9. REFERENCE

- [1] V. Carević, "Uticaj Prslina na Mehanizme Deterioracije i Trajnost Armiranobetonskih Konstrukcija, PhD Thesis," University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2020.
- [2] V. Carević and I. Ignjatović, "Influence of loading cracks on the carbonation resistance of RC elements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116583, 2019.
- [3] fib-Model Code, *Model Code 2010. Volume 2*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2010.
- [4] CEN, "EN 1992-1-1," 1st ed., vol. 1, CEN, Ed. Belgrade: ISS, 2015.
- [5] A. Blagojevic, "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.
- [6] B. J. Pease, "Influence of concrete cracking on ingress and reinforcement corrosion," Technical University of Denmark, 2010.
- [7] M. Otieno, H. Beushausen, and M. Alexander, "Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete - Part II: Corrosion rate prediction models," *Cem. Concr. Res.*, vol. 79, pp. 386–394, 2016.
- [8] K. L. Scrivener, V. M. John, and E. M. Gartner, "Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry," Paris, 2016.

- [9] I. Ignjatović, "Ultimate strength of reinforced recycled concrete beams (in Serbian), PhD Thesis," University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2013.
- [10] J. Dragaš, "Ultimate capacity of high volume fly ash reinforced concrete beams, PhD Thesis," University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2018.
- [11] N. Tošić, "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.
- [12] L. F. Jimenez and E. I. Moreno, "Durability Indicators in High Absorption Recycled Aggregate Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015, p. 8, 2015.
- [13] R. Hadjieva-Zaharieva and F. Buyle-Bodin, "Opportunity for using recycled aggregates in reinforced concrete: carbonation study," in *2nd Int. Symposium Integrated Lifetime Engineering of Buildings & Civil Infrastructures*, 2003, pp. 293–298.
- [14] A. Katz, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 703–711, 2003.
- [15] R. V. Silva, R. Neves, J. De Brito, and R. K. Dhir, "Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 22–32, 2015.
- [16] S. C. Kou and C. S. Poon, "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 69–76, 2012.
- [17] A. Younsi, P. Turcry, A. Ait-Mokhtar, and S. Staquet, "Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interaction between hydration and drying," *Cem. Concr. Res.*, vol. 43, pp. 25–33, 2013.
- [18] M. D. A. Thomas and J. D. Matthews, "Carbonation of fly ash concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 44, no. 160, pp. 217–228, 1992.
- [19] L. De Ceukelaire and D. Van Nieuweburg, "Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, pp. 442–452, 1993.
- [20] M. Thiery, G. Villain, P. Dangala, and G. Platret, "Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 1047–1058, 2007.
- [21] M. Thiery, P. Dangla, P. Belin, G. Habert, and N. Roussel, "Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 46, pp. 50–65, 2013.
- [22] EN 14630, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method." CEN/TS, Brussels, Belgium, p. 8, 2006.
- [23] fib-Bulletin 34, *Model Code for Service Life Design*, 1st ed. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib), 2006.
- [24] V. Carević, I. Ignjatović, and J. Dragaš, "Model for practical carbonation depth prediction for high volume fly ash concrete and recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 213, pp. 194–208, 2019.
- [25] V. Carević and I. Ignjatović, "Evaluation of concrete cover depth for green concretes exposed to carbonation," *Struct. Concr.*, 2020.
- [26] S. Marinković, V. Carević, and J. Dragaš, "The role of service life in Life Cycle Assessment of concrete structures," *J. Clean. Prod.*, vol. 290, p. 125610, 2021.
- [27] V. Carevic and I. Ignjatovic, "Limit values of accelerated carbonation resistance to meet EC2 durability requirements," *Build. Mater. Struct.*, vol. 65, pp. 1–6, 2022.
- [28] CEN, "EN 1990. Eurocode - Basis of structural design." 2005.
- [29] X. H. Wang, D. V. Val, L. Zheng, and M. R. Jones, "Influence of loading and cracks on carbonation of RC elements made of different concrete types," *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 12–28, 2018.
- [30] Y. Ren, Q. Huang, X. L. Liu, and Z. J. Tong, "A model of concrete carbonation depth under the coupling effects of load and environment," *Mater. Res. Innov.*, vol. 19, no. sup9, pp. S9-224-S9-228, 2015.

- [31] X. Wan, F. H. Wittmann, and T. Zhao, "Influence of mechanical load on service life of reinforced concrete structures under dominant influence of carbonation," *Restor. Build. Monum.*, vol. 17, no. 2, pp. 103–110, 2011.
- [32] J. Tang, J. Wu, Z. Zou, A. Yue, and A. Mueller, "Influence of axial loading and carbonation age on the carbonation resistance of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 173, pp. 707–717, 2018.
- [33] A. Castel, R. François, and G. Arliguie, "Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 561–565, 1999.
- [34] S. Talukdar, N. Banthia, and J. R. Grace, "Modelling the effects of structural cracking on carbonation front advance into concrete," *Int. J. Struct. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 73–87, 2015.
- [35] W. Wang, C. Lu, Y. Li, G. Yuan, and Q. Li, "Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 138, pp. 486–495, 2017.
- [36] A. AL-Ameeri, M. I. Rafiq, and O. Tsioulou, "Influence of cracks on the carbonation resistance of concrete structures," in *Sixth International Conference on the Durability of Concrete Structures*, 2018, no. July, pp. 358–366.
- [37] DuraCrete, "Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures DuraCrete," 2000.