

Vedran Carević<sup>1</sup>

## UTICAJ PRSLINA NA TRAJNOST ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA

**Rezime:** Pojava prslina dovodi do narušavanja strukture zaštitnog sloja betona i do ubrzanja transporta štetnih materija, čime utiču na trajnost armiranobetonskih (AB) konstrukcija. Kroz sveobuhvatni pregled literature, zaključeno je da deterioracija AB konstrukcija izazvana karbonatizacijom predstavlja jedan od glavnih problema trajnosti širom sveta. Za potrebe ispitivanja, u okviru doktorske disertacije, 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 RA i LP. Ustanovljena je veza između karbonatizacione otpornosti i čvrstoće pri pritisku na osnovu koje je izvršena analiza upotrebnoeg veka kroz definisanje debljine zaštitnog sloja različitih vrsta betona. Za potrebe ispitivanja uticaja prslina na upotrebni vek spravljeni 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. Na kraju, predloženo je ograničenje napona u armaturi čime se omogućava da celokupni upotrebni vek (period inicijacije i propagacije) AB konstrukcija zadovolji propisane zahteve trajnosti.

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

## INFLUENCE OF CRACKS ON THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

**Summary:** The appearance of cracks leads to the deterioration of concrete cover and to acceleration of the transport of harmful agents, which affects the durability of reinforced concrete (RC) structures. Through a comprehensive review of the literature, it was concluded that the deterioration of RC structures caused by carbonation represents one of the main durability problems worldwide. For testing purposes, as part of the PhD Thesis, reference concrete, concrete with 50% fly ash (FA) and concrete with 100% recycled concrete aggregate (RCA) were produced. Existing models for carbonation depth prediction were analyzed and their modification was proposed for concretes with RCA and FA. The relationship between carbonation resistance and compressive strength was established, on the basis of which the service life analysis was performed by defining the concrete cover depth for different types of concrete. For the purposes of researching the effect of cracks on service life, samples with 5 different crack widths (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 and 0.30 mm) were made, as well as reference samples without cracks. Finally, a steel reinforce stress limitation was proposed, which enables the entire service life (initiation and propagation period) of the RC structure to meet the prescribed durability requirements.

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

---

<sup>1</sup> Docent, Građevinski fakultet Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, vedran@imk.grf.bg.ac.rs

## 1. UVOD

Beton se godinama smatrao građevinskim materijalom sa dobrim svojstvima trajnosti. Međutim, slučajevi nezadovoljavajućeg upotrebnoeg veka nisu toliko retki, čak i u nekim od najrazvijenijih zemalja. Trajnost betona definisana je otpornošću na dejstvo štetnih agenasa iz spoljašnje sredine koji dovode do različitih vrsta oštećenja. Glavni mehanizmi oštećenja (deterioracioni mehanizmi) koji utiču na trajnost betona su penetracija hlorida, karbonatizacija, alkalno-silikatna reakcija, dejstvo mraza sa soli za odmrzavanje 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 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 područja karakterišu različiti mehanizmi deterioracije. Tri mehanizma deterioracije koji predstavljaju najveću opasnost za objekte u Srbiji su karbonatizacija, penetracija hlorida i dejstvo mraza sa soli za odmrzavanje [1].

Otpornost betona se kod cementnih betona sa prirodnim agregatom obezbeđuje adekvatnim zaštitnim slojem i propisanim sastavom (minimalna količina cementa i maksimalni vodo-vezivni faktor). U armiranobetonskim (AB) konstrukcijama armatura je fizički i hemijski zaštićena okolnim, visoko alkalnim, betonom i tankim oksidacionim (pasivizacionim) slojem na armaturi. Na nivou materijala, zaštitni sloj betona predstavlja zaštitu armature od spoljašnjih uticaja kroz smanjenje transporta štetnih materija. Ukoliko pH vrednost padne ispod 9 pasivizacioni sloj se razgrađuje (depasivizuje) čime se omogućava početak korozije. Sa relativno niskom čvrstoćom betona na zatezanje, pojava prslina u AB konstrukcijama koje presecaju zaštitni sloj je gotovo neizbežna. Prsline se u AB konstrukciji pojavljuju kao posledica skupljanja, termičkog širenja, mehaničkih/hemijskih oštećenja ili jednostavno kao posledica dejstva opterećenja. Pojava prslina dovodi do narušavanja strukture zaštitnog sloja betona i do ubrzanja transporta štetnih materija kroz beton, čime utiču na trajnost AB konstrukcija [2]. Održavanje niskog stepena propustljivosti betona od presudne je važnosti za trajnost.

U dosadašnjoj istraživačkoj praksi, deterioracioni procesi i transportni mehanizmi kojih ih pokreću izučavani su i ispitivani uglavnom na neisprskalim betonskim uzorcima. Kao što je već objašnjeno, prsline mogu uticati na deterioracione procese (karbonatizacija, penetracija hlorida i dejstvo mraza sa soli za odmrzavanje) i koroziju koja nastaje tim putem kroz povećanje transporta štetnih materija. Imajući to u vidu, potrebno je analizirati ulogu zaštitnog sloja betona, ispresecanog mrežom prslina, u obezbeđivanju upotrebnoeg veka. Shodno tome, ulogu prslina prouzrokovanih opterećenjem ne bi trebalo zanemariti u sagledavanju upotrebnoeg veka AB konstrukcija. Međutim, prsline još uvek nisu uzete u obzir kao parametar u modelima predikcije 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 ( $\geq 50$  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].

Iako su se mnogi autori bavili uticajem prslina na deterioracione mehanizme, u literaturi se može pronaći mali broj predloženih modela predikcije koji uzimaju u obzir uticaj prslina na te mehanizme [5–7]. Međutim svi ovi modeli se odnose na prodor hlorida iz morske vode kroz prslinu, a neki od njih nisu do kraja ni razvijeni i ispitani za sve širine prslina [5,6]. U manjem broju se mogu pronaći modeli koji uzimaju u obzir uticaj prslina na dubinu karbonatizacije [8,9]. Ovi modeli se uglavnom svode na vezu između dubine karbonatizacije i širine prsline [8] ili napona zatezanja u armaturi [9]. Castel i ostali [9] su uspostavili vezu između dubine karbonatizacije i napona zatezanja u armaturi, ali samo za napone do 240 MPa. Ovu vezu bi u budućnosti trebalo definisati i za veće vrednosti napona zatezanja u armaturi, jer se oni mogu javiti u toku eksploatacije AB konstrukcija. Blagojević (2016) je uspostavio vezu između napona u armaturi na mestu prsline i oštećenja koja nastaju usled korozije armature izazvane hloridima. Analiza dostupne literature je pokazala da ne postoje modeli koji se odnose na uticaj prslina na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje.

U nastavku je prikazan pregled dostupnih rezultata iz literature o uticaju prslina na trajnost AB elemenata.

## 2. UTICAJ PRSLINA NA MEHANIZME DETERIORACIJE – PREGLED LITERATURE

### 2.1. Karbonatizacija

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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  konstantna u toku vremena. Iskustva sa postojećim konstrukcijama pokazala su veću dubinu karbonatizacije na mestu prsline u poređenju sa neisprskalim delovima konstrukcije.

Kao što je već napomenuto, prsline još uvek nisu uzete u obzir kao parametar u modelima karbonatizacije koji se koriste za definisanje upotrebnoeg veka AB konstrukcija. Istraživanja od pre gotovo 30 godina [10,11] zaključila su da, iako prisutnost prslina predstavlja rizik, njihova širina ne može biti direktno povezana sa

razvojem korozije. Međutim, nekoliko studija u prethodnoj deceniji bavilo se ispitivanjem fenomena difuzije CO<sub>2</sub> u uzorcima sa prslinama [12–17]. Rezultati dobijeni u tim istraživanjima prikazani su u tabeli 1. Izraz "kritična širina prsline" odnosi se na širinu prsline čijim daljim povećanjem se znatno ubrzava difuzija CO<sub>2</sub>. Širina prsline ispod kritične vrednosti ne utiče na dubinu karbonatizacije, dok šire prsline povećavaju dubinu karbonatizacije u poređenju sa neisprskalim uzorcima.

Tabela 1. Uticaj širine prsline na difuziju CO<sub>2</sub>

Referenca	Metod za proizvodnju prsline	CO <sub>2</sub> (%)	Kritična širina prsline (mm)
Neville (2006) [12]	–	–	nema uticaja
Sillanpää (2010) [13]	cepanje klinom	prirodna	nema uticaja
Alahmad et al. (2009) [14]	ekspanzivno jezgro	50%	0.01
Torres and Andrade (2013) [15]	savijanje	prirodna	0.08*
Zhang et al. (2011) [16]	ugrađena pločica	20%	0.10*
Wang et al. (2018) [17]	savijanje	4%	0.10*

\* Manje širine prsline nisu ispitivane

Analizirajući rezultate iz tabele 1, očigledno se ne može izvući jasan zaključak o uticaju prsline na trajnost AB konstrukcija. Iako postoje zaključci da prsline ne utiču na dubinu karbonatizacije [12,13], neki eksperimentalni rezultati pokazali su da je, i sa malim širinama prsline (do 0.10 mm), došlo do povećanja difuzije CO<sub>2</sub> unutar betona, tj. povećanja dubine karbonatizacije [14–17]. Sve određene kritične širine u tim istraživanjima bile su manje od dozvoljenih širina prsline definisanih u evropskom standardu EN 1992-1-1 [4] – za date uslove izloženosti maksimalna širina prsline definisana je kao 0.3 mm.

Kao što se može videti, uticaj širine prsline i mehaničkih opterećenja na proces karbonatizacije još uvek nije potpuno definisan. Iako postoji nekoliko istraživanja na ovu temu, još uvek nedostaju rezultati dovoljni za izvođenje opštih zaključaka o njihovom uticaju na difuziju CO<sub>2</sub>. Iz tog razloga neophodna je analiza uticaja širine prsline i mehaničkog opterećenja na dubinu karbonatizacije i modele predikcije. Takođe, potrebno je ispitati uticaj napona zatezanja u armaturi na proces karbonatizacije. Imajući u vidu da je napon zatezanja u armaturi direktno povezan sa širinom prsline, on može predstavljati kriterijum trajnosti kao prag mikroskopskog oštećenja betona. Napon u armaturi se već koristi u propisima kao faktor ograničenja širine prsline iz uslova upotrebljivosti i trajnosti.

## 2.2. Mraz sa soli za odmrzavanje

Iako prsline utiču na sve deterioracione mehanizme, njihov uticaj na dejstvo mraza sa soli za odmrzavanje do sada nije u velikoj meri ispitivan. Pojava prsline u betonu dovodi do povećanje kapilarnog upijanja u materijalu [18–20]. Prisustvo prsline uzrokuje povećano inicijalno upijanje vode [20], što smanjuje otpornost na dejstvo mraza i soli. Inicijalno upijanje značajnije je uslovljeno širinom prsline nego ukupno upijanje, čija je promena samo u manjoj meri uslovljena efektom širine.

Detaljna istraživanja veze između širine prsline i upijanja fluida tokom vremena pokazala su da važnu ulogu igra i geometrija prsline [19]. Međutim, većina ovih istraživanja sprovedena je na uzorcima čije su prsline nastale dejstvom mraza, pa se malo toga zna o uticaju prsline izazvanih opterećenjem na mehanizam kapilarnog upijanja. Ako se uzme u obzir da je kapilarno upijanje jedan od načina transpota hlorida kroz beton onda ova pojava predstavlja vrlo važan podatak za definisanje trajnosti AB konstrukcija, samim tim i širine prsline kao ograničavajućeg faktora. Međutim, sva istraživanja pokazala su da je uticaj širine značajan samo za vrednost početnog (inicijalnog) upijanja, dok ukupno upijanje nije u značajnijoj meri uslovljeno širinom prsline.

Pojedina istraživanja su ispitivala uticaj napona zatezanja u betonu na njegovu otpornost na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje [21]. Iako prsline nisu bile prisutne u ovom ispitivanju, pokazalo se da sa povećanjem napona zatezanja u betonu dolazi do značajnog smanjenja njegove otpornosti na dejstvo mraza i soli.

## 2.3. Hloridi

Prisustvo prsline u AB konstrukcijama omogućava na jednostavan način brži prodor hloridnih jona, što može dovesti do ubrzane korozije armature. Nekoliko praktičnih primera ovog fenomena pokazalo je pojavu korozije upravo na mestima prsline [22]. U novije vreme eksperimentalna istraživanja bavila su se uticajem prsline na pojavu korozije armature izazvane hloridima, kao najagresivnijim deterioracionim mehanizmom koji deluje na AB konstrukciju. Istraživanja koja se mogu pronaći u literaturi mogla bi se podeliti na dva dela: ona koja se bave istraživanjem korozije [18,23,5] i ona koja se bave promenama difuznih svojstava betona izazvanih pojavom prsline [13,24–30]. Sva ova istraživanja zaključila su da je širina prsline presudan faktor za povećanje koeficijenta difuzije i za povećanje stepena korozije armature unutar betona.

Uprkos tome, prsline još uvek nisu uzete u obzir kao parametar u modelima predikcije dubine hlorida koji se koriste za definisanje upotrebnoog veka AB konstrukcija. Nekoliko studija u prethodnoj deceniji bavilo se

ispitivanjem fenomena transporta hlorida u uzorcima sa prslinama. Rezultati dobijeni u tim istraživanjima prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Uticaj širine prsline na penetraciju hlorida

Referenca	Metod za proizvodnju prsline	Kritična širina prsline (mm)
Sillanpää (2010) [13]	cepanje klinom	0.04
Yoon and Schlangen (2010) [29]	cepanje klinom	0.05
Ismail et al. (2004) [24]	ekspanzivno jezgro	0.053
Jang et al. (2011) [25]	Brazilski opit cepanjem	0.08
Djerbi et al. (2008) [28]	Brazilski opit cepanjem	0.08
Rodriguez and Hooton (2003) [30]	Brazilski opit cepanjem	0.08
Sahmaran and Yaman (2008) [26]	savijanje	0.135
Audenaert et al. (2009) [27]	Brazilski opit cepanjem	0.20

Kod uzoraka sa prslinama širih od granične vrednosti iz tabele 2 dolazi do povećanja koeficijenta difuzije sa povećanjem širine prsline, dok je kod prsline užih od datih graničnih vrednosti ova promena veoma mala [13,24–26]. Sve ove granične širine manje su od dopuštenih vrednosti prema evropskim i američkim propisima za date uslove izloženosti, koje iznose 0.3 i 0.15 mm respektivno. Izuzetak predstavlja istraživanje prikazano u [27] gde je konstatovana kritična širina prsline od 0.20 mm. Ovo bi značilo da se promena u mehanizmima difuzije i kapilarne apsorpcije dešava pri značajno manjim širinama prsline od onih za koje se smatra da nemaju nikakvog uticaja na trajnost AB konstrukcija. Sa druge strane, pojedini autori su zaključili da se porast koeficijenta difuzije odvija samo do granične vrednosti širine prsline nakon čega ostaje konstantan, bez obzira na dalje povećanje širine [27].

Analizirajući rezultate iz tabele 2, očigledno se može izvući zaključak da prsline utiču na transport hlorida unutar AB konstrukcija, a samim tim i na njihovu trajnost. Sve određene kritične širine u pomenutim istraživanjima bile su manje od dozvoljenih širina prsline definisanim u evropskom standardu EN 1992-1-1 [4]. Na ovaj način se omogućava brz početak korozije armature.

## 2.4. Korozija armature

Generalno, oštećenja unutar AB konstrukcija odvijaju se u dve glavne faze: period inicijacije (depasivizacije) i propagacije korozije. Tokom prve faze armatura je zaštićena okolnim betonom kao što je ranije objašnjeno. Stvarno oštećenje armature, ali i betona, događa se samo u drugoj fazi. To uključuje formiranje proizvoda reakcije korozije, postepeni gubitak efektivnog poprečnog preseka, pucanje i otpadanje zaštitnog sloja zbog povećane zapremine produkata korozije i na kraju otkaza cele AB konstrukcije/elementa zbog neprihvatljivog otpadanja betona ili gubitka poprečnog preseka armature.

Korozija armature je elektrohemijska reakcija oksidacije armature uz prisustvo vlage pri određenoj temperaturi. Za proces korozije neophodno je postojanje anode i katode. Anodu predstavlja lokalizovani deo armature (na mestu prsline) napadnute jonima koja ima dosta niži potencijal, dok je preostali deo armature (između prsline) koji ostaje u pasivnom stanju katoda. Korozija se javlja na anodnom delu armature i struja "teče" od anode ka katodi uz pomoć elektrolita. Struja se vraća nazad kroz armaturu čime je kolo zatvoreno. Konstantna dostupnost kiseonika i vode na mestu katode neophodna je za nastavak korozije.

Pojava prsline na jednostavan način omogućava brži prodor štetnih agenasa, što dovodi do ubrzane korozije armature [18,23,5]. Produkti korozije armature imaju i do 6 puta veću zapreminu u odnosu na zapreminu armaturene šipke što dovodi do povećanja lokalnog napona u betonu i odvaljivanja zaštitnog sloja. Prsline tako direktno ugrožavaju trajnost AB konstrukcija koje su izložene dejstvu agresivnih agenasa.

Korozija armature uzrokovana karbonatizacijom nije tako široko izučavana u literaturi u odnosu na onu izazvanu hloridima, iako može biti opasna i dovesti do gubitka poprečnog preseka armaturene šipke. Prsline dovode do povećanog stepena korozije armature u poređenju sa neisprskanim betonom. Istraživanje koje su sprovedli Torres i Andrade [15] obuhvatilo je ispitivanje korozije armature izazvane karbonatizacijom na uzorcima sa širinama prsline u opsegu 0.10–0.60 mm. Rezultati njihovog ispitivanja su pokazali da sa porastom širine prsline dolazi i do povećanog stepena korozije. Kao graničnu vrednost širine prsline definisali su 0.08 mm, nakon čega dolazi do pojave prvih mesta lokalne korozije na armaturi. Inicijacija korozije izazvana karbonatizacijom brža je kod isprskalih uzoraka u odnosu na neisprskale. Međutim, ispitivanja su pokazala da su pojava prsline i vreme izloženosti agresivnim uticajima značajniji faktor za razvoj korozije nego sama širina prsline [31].

U literaturi postoji vrlo malo podataka o uticaju prsline na koroziju armature izazvanu karbonatizacijom, pogotovo na razvoj korozije tokom vremena. Zbog toga bi se u budućnosti trebao istražiti ovaj fenomen, imajući u vidu da je karbonatizacija važan deterioracioni mehanizam. Sa druge strane, korozija izazvana hloridima u isprskanim AB elementima bila je predmet mnogih ispitivanja poslednjih godina [23,26,32–34]. Kada hloridni joni dostignu dubinu na kojoj se nalazi armatura u dovoljnoj količini, lokalna korozija počinje.

Međutim, hloridni joni ostaju zarobljeni unutar prsline i korozija nastavlja u dubinu armaturne šipke. Tokom ovog procesa pH vrednost lokalno može da padne i ispod 5, rezultujući ubrzanom korozijom [23]. U tabeli 3 prikazan je sumarni pregled rezultata istraživanja uticaja prsline na koroziju izazvanu hloridima.

Tabela 3. Uticaj širine prsline na razvoj korozije izazvane hloridima

Referenca	Metod za proizvodnju prsline	Kritična širina prsline (mm)
Francois et al. (2011) [33]	ekspanzivno jezgro	0.50
Otieno (2008) [34]	savijanje	0.40
Scott and Alexander (2007) [32]	savijanje	0.20
Sahmaran and Yaman (2008) [26]	savijanje	0.14

Prsline manje od granične vrednosti (tabela 3) nisu imale uticaja na razvoj korozije, dok su šire prsline imale uticaj na smanjivanje perioda inicijacije i propagacije korozije armature. Iz tabele 3 očigledno je da su neke od definisanih graničnih širina veće [33,34] a neke manje [26,32] od dopuštenih širina prsline u evropskim propisima za date uslove izloženosti – 0.3 mm [4]. Prema tome, očigledno je da prsline utiču na razvoj korozije usled dejstva hlorida, ali se na osnovu rezultata iz literature ne može doneti jasan zaključak da li prsline uže od dozvoljenih [4] predstavljaju kritičnu vrednost za razvoj korozije. Takođe, istraživanja su pokazala da na propagaciju korozije bitno utiče i nivo oštećenja na mestu kontakta betona i armature [18]. Zbog toga je Blagojević [23] definisao napon u armaturi na mestu prsline kao ograničavajući faktor za prevenciju oštećenja uslede korozije izazvane hloridima.

## 2.5. Zaključak pregleda literature

Korozija izazvana hloridima bila je predmet mnogih istraživanja proteklih godina, uključujući i uticaj prsline na ovaj deterioracioni mehanizam. Za razliku od nje, u literaturi postoji vrlo malo podataka o uticaju prsline 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 CO<sub>2</sub> čija se koncentracija konstantno povećava tokom vremena. Zbog toga je karbonatizacija postala važno pitanje u analizi trajnosti AB konstrukcija.

Kako bi se dopunila postojeća baza znanja u nastavku je analiziran uticaj prsline na karbonatizacionu otpornost AB elemenata napravljenih od različitih vrsta betona.

## 3. POSTAVKA EKSPERIMENTA

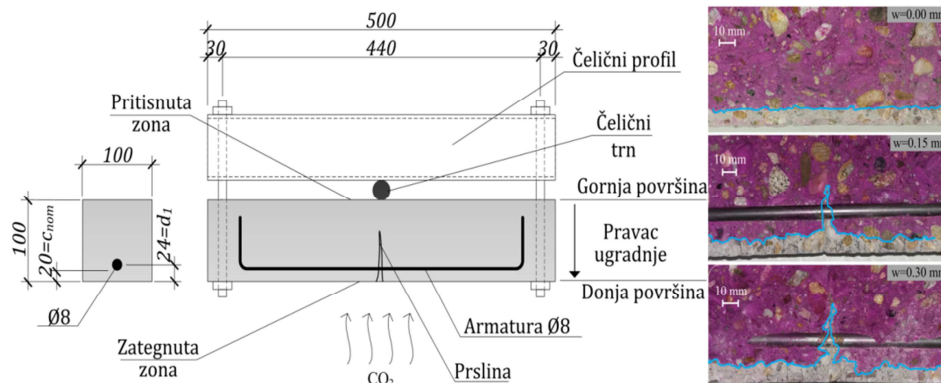
Eksperimentalno ispitivanje sprovedeno je u periodu 2017.–2020. godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Na početku eksperimentalnog programa izvršeno je projektovanje i ispitivanje tri vrste betonskih mešavina. Cilj ovog procesa je bio proizvodnja različitih vrsta betona a da se pri tome zadovolji klasa betona potrebna za njegovu konstrukcijsku primenu. Spravljene su tri vrste betonskih mešavina [1]: referenrni cementni beton sa prirodnim agregatom (NAC), cementni beton sa 100% krupnog recikliranog agregata (RA) kao zamena prirodnom (RAC) i beton sa 50% letećeg pepela (LP) kao zamena cementa (HVFAC). Krupni RA korišćen u ovom ispitivanju je dobijen recikliranjem betona 40 godina starog nadvožnjaka. Zapreminsku masu u suvom stanju iznosila je 2370 kg/m<sup>3</sup>, 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<sup>3</sup> kao i srednju veličinu čestica od 8.53 μm. 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).

S obzirom da karbonatizacija betona u prirodnim uslovima traje godinama ovaj proces je ubrzan povećavanjem koncentracije CO<sub>2</sub> u specijalizovanim komorama predviđenim za takvo ispitivanje. Zbog toga je, pre početka sprovođenja eksperimentalnog ispitivanja uticaja prsline na dubinu karbonatizacije, bilo neophodno ispitati uticaj koncentracije CO<sub>2</sub> na proces karbonatizacije, kao i mogućnosti primene postojećih modela predikcije na različitim vrstama betona korišćenim u ovom istraživanju. Sprovedeno je komparativno ispitivanje u ubrzanom i prirodnim uslovima. Analiziran je uticaj koncentracije CO<sub>2</sub> kinetiku procesa karbonatizacije u rasponu od 1-16% kao i posledice koje pri tome nastaju kod sve tri vrste ispitivanih betona. Nakon sprovedene analize pokazalo se da je koncentracija do 2% CO<sub>2</sub> optimalna za ubrzavanje procesa karbonatizacije bez posledica na kinetiku procesa kod sve tri vrste ispitivanih betona.

U poslednjih dvadeset godina razvijene su razne metode za indukciju prsline u uzorcima nakon standardnog postupka pripreme i nege uzoraka [1]. Na osnovu analize svih dostupnih metoda za indukovanje prsline (metod cepanja klinom, Brazilski opit cepanja, metod ekspanzivnog jezgra, formiranje prsline pomoću umetaka i metod savijanja) zaključeno je da metoda savijanja ima najviše prednosti. Prsline indukovane ovom metodom imaju V-oblik i odgovaraju po obliku prsline nastalim savijanjem u AB konstrukcijama. Prednost u odnosu na ostale metode jeste da nakon formiranja prsline, uzorak se može izložiti ubrzanom

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 se u ovom eksperimentalnom ispitivanju koristi metod savijanja u sredini raspona. Savijanje u trećinama raspona, iako bolji metod zbog konstantnog momenta savijanja, nije bilo moguće zbog ograničenja prostora u komori za karbonatizaciju.

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 proizvedene širine prslina bile su manje od dozvoljenih širina definisanih u EN 1992-1-1 [4]. Na slici 1 prikazana je postavka eksperimenta za određivanje uticaja širine prslina na dubinu karbonatizacije i trajnost AB elemenata.



Slika 1. Postavka eksperimenta [35]

Nakon starosti od 90 dana, uzorci su izloženi savijanju sa silom u sredini raspona. Starost od 90 dana izabrana je kako bi HVFAC betoni dostigli odgovarajuću čvrstoću pri pritisku [36]. Kruti (nedeformabilni) čelični profil postavljen je na gornjoj površini uzorka i služio je kao oslonac čitavom sistemu. Između njih je postavljen čelični cilindar (trn) 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 prslina sa donje strane uzorka. Daljim povećanjem momenta utezanja širina prslina je rasla. Kada je prslina dostigla odgovarajuću širinu na površini betona, prestalo se sa utezanjem navojnih šipki.

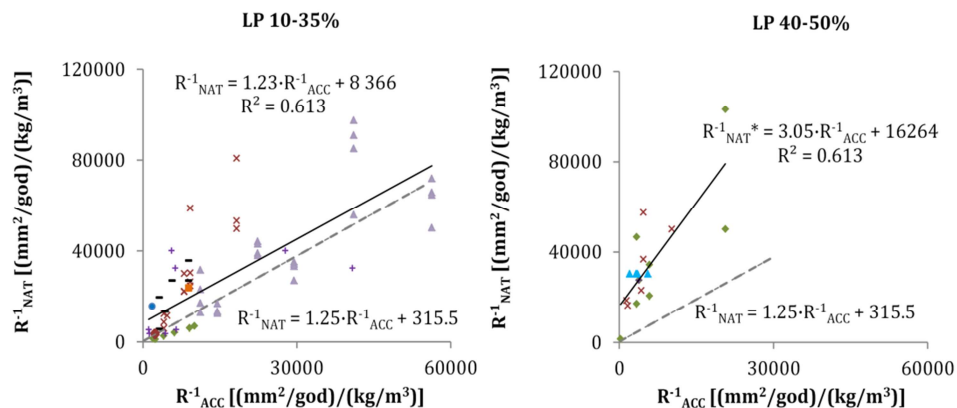
Uzorci su nakon toga stavljeni u komoru za karbonatizaciju Memmert ICH 260C kako bi se ubrzao proces deterioracije. Tokom narednih 28 dana uzorci su izlagani koncentraciji  $\text{CO}_2$  od 2%, relativnoj vlažnosti (RH)  $65 \pm 5\%$  i temperaturi  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , u skladu sa [37]. Nakon završetka ispitivanja uzorci su podužno prepolovljeni i izmerena je dubina karbonatizacije. 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 prslina i napona pritiska u betonu na upotrebnog vek analiziran je pomoću dostupnog probablističkog modela predikcije *fib-Model Code 2010* [3] za određivanje upotrebnog veka.

#### 4. KARBONATIZACIONA OTPORNOST BETONA

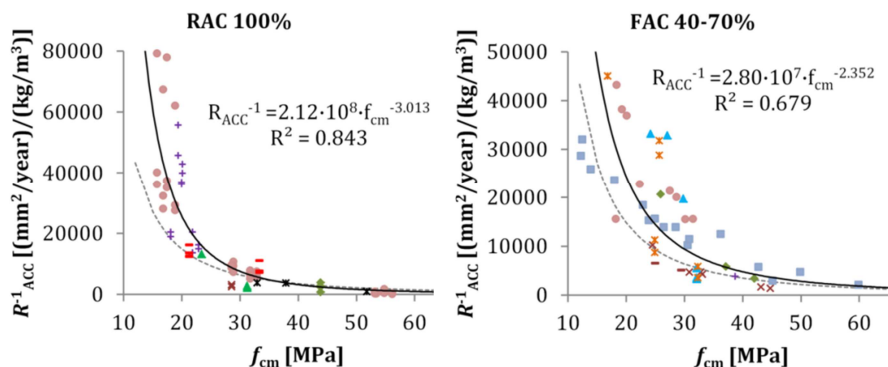
S obzirom da RA i LP utiču na proces karbonatizacije bilo je potrebno ispitati mogućnosti primene postojećih modela predikcije na zelenim betonima korišćenim u ovom istraživanju. Kako bi to bilo moguće, sprovedeno je komparativno ispitivanje u ubrzanim i prirodnim uslovima na uzorcima bez prslina. Sprovedena je 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* [37] model predikcije može primenjivati za sve vrste ispitivanih betona uz modifikacije linearne veze između prirodne i ubrzane karbonatizacione otpornosti za betone sa LP [38]. Trend linija dobijene veze između prirodne i ubrzane inverzne karbonatizacione otpornosti za betone sa različitim sadržajem LP prikazana je na slici 2. Vrednost koeficijenta  $k_t$  definiše nagib prave linije. U slučaju betona sa sadržajem LP do 35% ukupnih vezivnih materijala, predložena trend linija ima sličan nagib (1.23) kao i prava predložena *fib-Model Code 2010* (1.25), 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 ( $\epsilon_t$ ) u transformaciji između prirodne i ubrzane karbonatizacione otpornosti. U slučaju betona sa sadržajem LP od 40% ili više postojele su značajnije razlike i u nagibu prave i u odsečku na ordinati.



Slika 2 – Odnos između prirodne i ubrzane inverzne karbonatizacije otpornosti betona sa LP [35]

Nakon ustanovljanja veze između prirodne i ubrzane karbonatizacije otpornosti za betone sa LP može se uraditi predikcija dubine karbonatizacije. Da bi to moglo bilo moguće, bilo je potrebno izvršiti ubrzani karbonatizacioni test. Kako to nije uvek moguće, pogotovo u slučaju postojećih konstrukcija, vrednost  $R^{-1}_{ACC}$  se može 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 ( $f_{cm}$ ) i  $R^{-1}_{ACC}$  [38,39]. Na slici 3 prikazana je ova veza za betone sa 100% RA i sa sadržajem LP većim od 40%.



Slika 3 – Odnos između karbonatizacione otpornosti i čvrstoće betona pri pritisku ( $f_{cm}$ ) za betone sa RA i LP [35]

Funkcija predložena za NAC betone odgovarala je rezultatima prikupljenim za RAC betone sa procentom zamene do 50% [38]. 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 funkcijom (slika 3). Ovako visok koeficijent determinacije potvrđuje dobru vezu između ubrzane karbonatizacione otpornosti i čvrstoće betona pri pritisku.

Analizirajući regresionu krivu NAC i betona sa 10-35% zamene cementa sa LP uočeno je da je njihov trend veoma sličan [38]. Razlike koje su javljale mogle su se uočiti samo kod betona sa čvrstoćom manjom od 20 MPa. S obzirom da betoni sa čvrstoćom manjom od 20 MPa ne spadaju u betone za konstruktivnu upotrebu razlike se mogu zanemariti. Zbog toga je u nastavku za proračun  $R^{-1}_{ACC}$  betona sa 10-35% LP korištena funkcija zavisnosti koja je predložena za NAC betone.

U slučaju 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 betone sa preko 40% LP (slika 3) može se videti da postoji razlika između ove dve vrste betona. Pri manjim vrednostima čvrstoće pri pritisku, karbonatizaciona otpornost betona sa LP je značajno manja u poređenju sa NAC betonima. Međutim, sa porastom čvrstoće pri pritisku razlike se smanjuju. U nastavku je za proračun  $R^{-1}_{ACC}$  kod betona sa sadržajem LP većim od 40% korištena funkcija zavisnosti koja je definisana na slici 3.

Nakon što je ustanovljena veza između ubrzane karbonatizacione otpornosti i čvrstoće pri pritisku izvršena je predikcija dubine karbonatizacije koristeći modifikovani *fib*-ov model predikcije. Ovaj model se smatra efikasnim načinom za procenu vremena kada se očekuje da karbonatizacioni front dostigne armaturu (depasivizacija). Na osnovu tog modela definisana je osnovna funkcija graničnog stanja depasivizacije armature izazvane karbonatizacijom [1].

Primenjen je puni probablistički pristup koji omogućava određivanje upotrebnoog veka koji se odlikuje znatno manjom verovatnoćom neuspeha (otkaza) u poređenju sa drugim pristupima (polu-probablističkim i determinističkim). Indeks pouzdanosti ( $\beta$ ) i verovatnoće otkaza ( $P_f$ ), povezani sa funkcijom graničnog stanja, sračunati su korišćenjem metode pouzdanosti prvog reda (FORM—First Order Reability Method) dostupne u softveru VaP. U skladu sa *fib* Bulletin 34 [37], 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 (sračunate)

minimalne debljine zaštitnih slojeva za različite vrste betona prikazane su u Tabeli 4.

Tabela 4. Vrednosti minimalnih debljina zaštitnog sloja za različite vrste betona za upotrebnog vek  $t_{SL}=50$  godina [1]

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% RA)	15	25	25	30
RAC (100% RA)	16	26	25	30
FAC (10-35% LP)	22	35	40	39
HVFAC (40-70% LP)	35	58	62	61

Iz tabele 4 se vidi da je u slučaju betona sa 100% RA razlika u veličini zaštitnog sloja za klase izloženosti XC1 i XC2 u odnosu na NAC betone zanemarljiva (1 mm). Imajući u vidu tačnost probablističkog modela i posmatranu razliku (6%) može se zaključiti da se za sve betone sa RA, bez obzira na procenat zamene, mogu koristiti zaštitni slojevi definisani u EN 1992-1-1 [4], obezbeđujući pri tome upotrebnog vek od 50 godina.

Primena LP kao zamene cementa značajnije je uticala na debljinu zaštitnog sloja. Za betone do 35% LP 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 betona sa 40-70% LP u ukupnom vezivnom materijalu situacija je bila još drastičnija.

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 [40]. Na ovaj način je moguće usvojiti potrebnu debljinu zaštitnog sloja za definisanu klasu izloženosti, na osnovu otpornosti betona na karbonizaciju. Sračunate minimalne debljine zaštitnih slojeva za sve klase betona (bez obzira na minimalnu indikativnu klasu) za upotrebnog vek od 50 godina prikazane su u tabeli 5.

Tabela 5. Sračunate minimalne debljine zaštitnog sloja za različite vrste i klase betona za upotrebnog vek  $t_{SL}=50$  godina [1]

Vrsta betona	Klasa izloženosti	$C_{min,dur}$ (mm)				
		C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50
NAC i RAC (10-50% RA)	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% RA)	XC1	20	16	13	12	11
	XC2	33	26	22	20	18
	XC3	40	31	25	23	21
	XC4	39	30	30	23	20
FAC (10-35% LP)	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 (40-70% LP)	XC1	40	35	32	30	29
	XC2	66	58	53	50	47
	XC3	78	69	62	58	55
	XC4	76	67	61	57	54

Sračunate vrednosti debljina zaštitnog sloja prikazane u tabeli 5 predstavljaju upotrebnog 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 prsline na površini betona što će biti analizirano u nastavku.

## 5. UTICAJ PRSLINA NA DUBINU KARBONATIZACIJE

Nakon što je izvršena korekcija postojećih modela predikcije i data preporuka debljina zaštitnih slojeva različitih vrsta betona sa RA i LP, prešlo se u drugu fazu istraživanja koja je podrazumevala ispitivanje uticaja prsline na proces karbonatizacije. Analiziran je uticaj širine prsline 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. Uzorci su podeljeni u tri serije, gde svaku seriju čine po jedan uzorak svih unapred definisanih širina (w) prsline (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 i 0.30 mm kao i

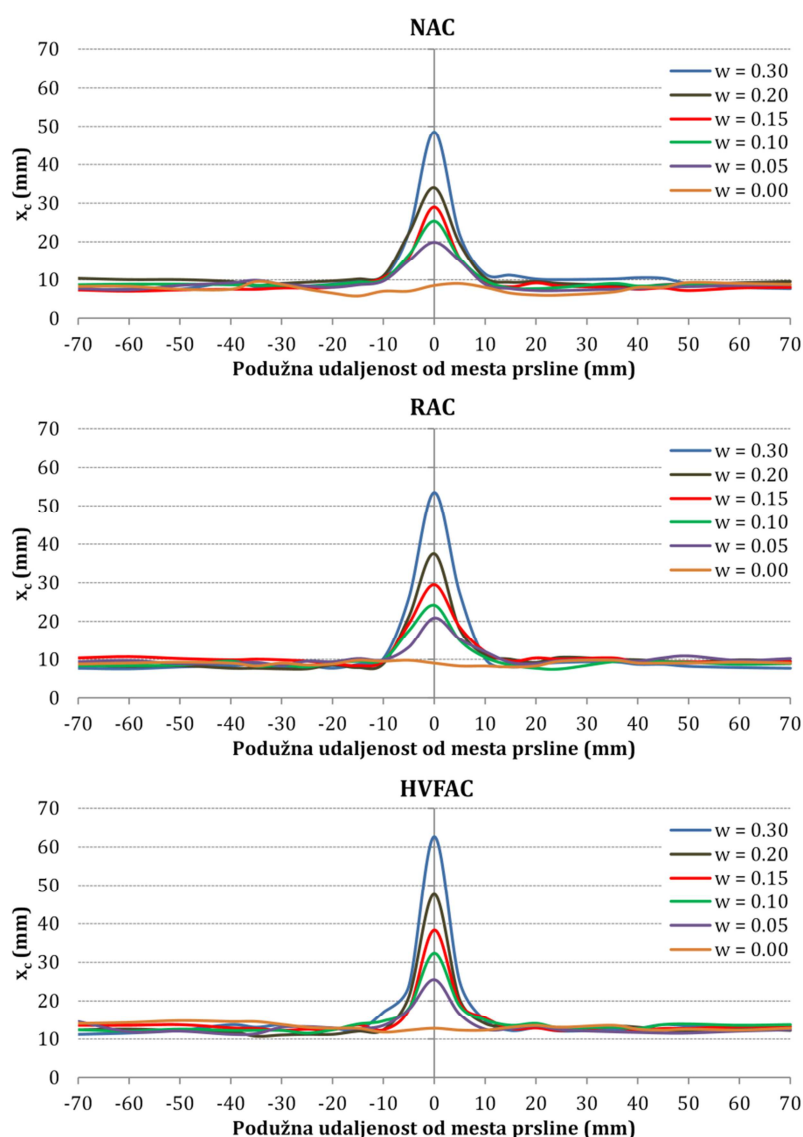


referentni uzorci bez prslina). Ukupno je ispitano 18 uzoraka po jednoj vrsti betona. Dubina karbonatizacije ( $x_c$ ), izražena u mm, predstavlja dubinu merenu od površine betona do početka ljubičaste (nekarbonatizovane) zone kao što je prikazano na slici 4.



Slika 4 – Merenje dubine karbonatizacije [35]

Analiza uticaja prslina na dubinu karbonatizacije 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 5). Sa porastom širine prsline rasla je i dubina karbonatizacije na njenom mestu.

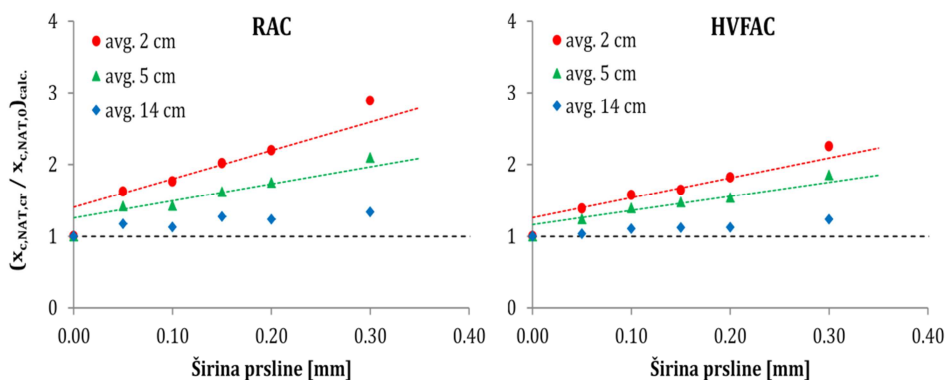


Slika 5 – Srednja vrednost izmerenog karbonatizacionog fronta ispitivanih betona [1]

U svim slučajevima, čak i sa najmanjom širinom prslina od 0.05 mm, prslina se ponašala kao dodatna izložena površina kroz koju su molekuli  $\text{CO}_2$  prodirali unutar betona upravno na zid 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, definisana je i osrednjena dubina 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 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 6 je prikazan odnos između sračunatih dubina karbonatizacije uzoraka sa i bez prsline. Ovaj odnos se kretao do vrednosti 2.9 kod NAC i RAC uzoraka, čak i za malu dužinu osrednjavanja (avg. 2 cm). Kod HVFAC uzoraka ovaj odnos je bio manji i iznosio je 2.3. Kod uzoraka sa prslinom 0.30 mm u prirodnim uslovima izloženosti dubina karbonatizacije će 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.

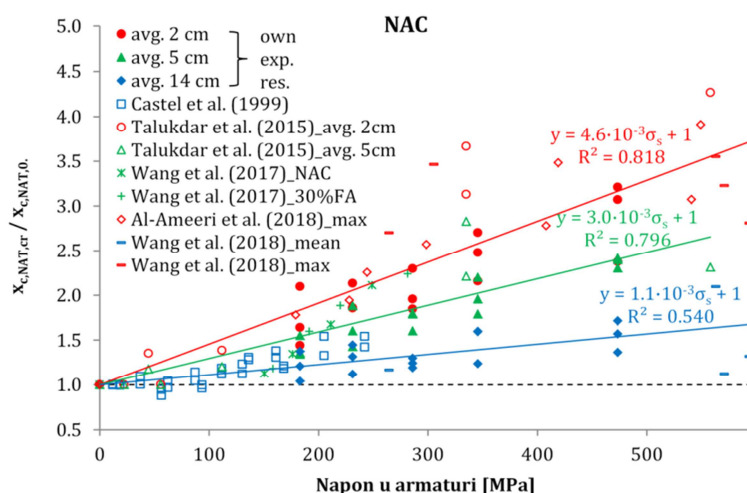


Slika 6 – Odnos između sračunatih dubina karbonatizacije uzoraka sa ( $x_{c,NAT,cr}$ ) i bez ( $x_{c,NAT,0}$ ) prsline za različite dužine osrednjavanja [1]

## 6. UTICAJ NAPONA U ARMATURI

Širina prsline na površini AB elementa zavisi od nekoliko parametara, ali prvenstveno od debljine zaštitnog sloja i količine zategnute armature. Ograničavanje širine prsline iz uslova trajnosti nije jednostavno uzimajući u obzir 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 između napona u armaturi i širine prsline na površini betona. Upotreba maksimalnog napona u armaturi kao moguće ograničenje razvoja korozije armature pokazalo se kao korisno rešenje. Ograničenje napona u armaturi se već koristi u propisima kao iz uslova upotrebljivosti.

Uspostavljena je analitička veza između napona u armaturi i izmerene širine prsline na površini betona [1]. 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 [9,17,41–43]. U odabranim istraživanjima 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 CO<sub>2</sub> koncentracija kretala od 4-20%. Veza između odnosa dubina karbonatizacije isprskalih i neisprskalih uzoraka i napona u armaturi prikazana je na slici 7.



Slika 7 – Veza između odnosa dubina karbonatizacije isprskalih i neisprskalih uzoraka i napona u armaturi kod NAC betona [1]

Na slici 7 se vidi da je veza između odnosa dubina karbonatizacije isprskalnih i neisprskalnih uzoraka i napona u armaturi linearna za sve korišćene dužine osrednjavanja. Za predložene linearne veze 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 smanjenje dužine osrednjavanja povećava uticaj prsline na dubinu karbonatizacije.

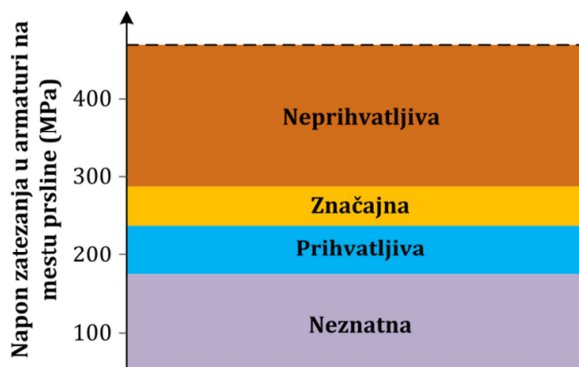
Uspostavljanjem linearne veze moguće je napraviti predikciju dubine karbonatizacije elemenata sa prslinama uz poznavanje napona u armaturi i karbonatizacione otpornosti neisprskalnih uzoraka. Ovo omogućava da se kod AB konstrukcija ne definiše minimalni zaštitni sloj i maksimalni w/c faktor kao uslov trajnosti, već napon u armaturi. Međutim, kao što je već naglašeno, dubina karbonatizacije utiče samo na period depasivizacije. S obzirom da prsline značajno smanjuju vreme depasivizacije, potrebno je razmotriti i uticaj prsline na razvoj korozije armature, kako bi se sagledao celokupni životni vek AB konstrukcije.

## 7. KOROZIJA ARMATURE

Životni vek AB konstrukcija se sastoji iz dva perioda: period inicijacije (depasivizacije) i period propagacije. Prisustvo prsline koje presecaju armaturu 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. Kao posledica toga dolazi do gubitka adhezije između armature i betona, odnosno do dostizanja graničnog stanja nosivosti.

Uniformna korozija je obično povezana sa formiranjem smeđih oksida gvožđa koji 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) je relativno mala. S obzirom da je snabdevanje kiseonikom ograničeno zbog prisustva zaštitnog sloja, proizvodi korozionih reakcija pokazuju manji stepen zapreminske ekspanzije, a tendencija da se zaštitni sloj betona odlomi je manja. Pojava lokalne korozije u eksperimentalnom ispitivanju bila je prisutna kod svih uzoraka sa prslinom. Uzimajući u obzir da su prsline najčešće uniformno raspoređene u zoni maksimalnih naprezanja, lokalna korozija će se pojaviti na mestu svake prsline, kontinualno duž armaturene 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 [1].

S obzirom da lokalna depasivizacija armature usled pojave prsline ne znači nužno i kraj upotrebnog veka, analiziran je period propagacije korozije armature. Izvršena je analiza rezultata sopstvenih eksperimentalnih ispitivanja primenom polu-probabilističkog modela koji omogućava procenu vremena do formiranja neprihvatljivih oštećenja zaštitnog sloja u graničnom stanju upotrebljivosti. Ovo neprihvatljivo oštećenje je povezano sa kritičnom širinom podužne prsline ( $w_{cr}$ ) od 1.0 mm, koja označava početak pucanja zaštitnog sloja betona [44]. 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 8).



Slika 8 – Veza između napona zatezanja u armaturi na mestu prsline i oštećenja koja nastaju kao posledica korozije za slučaj klasu izloženosti XC2 [1]

Celokupni upotrebnog vek isprskalnih uzoraka može se smatrati jednakim upotrebnom veku neisprskalnih 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 neisprskalnim uzorcima. Radi praktične primene ovo ograničenje se može prikazati i preko širine prsline na površini betona što je u ovom slučaju odgovaralo širini prsline od 0.10 mm. Međutim, primena ovih preporuka za određivanje upotrebnog veka kod isprskalnih 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.

## 8. ZAKLJUČAK

Pojava prslina dovodi do narušavanja strukture zaštitnog sloja betona i do ubrzanja transporta štetnih materija kroz beton, čime utiču na trajnost AB konstrukcija. 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 CO<sub>2</sub> čija se koncentracija konstantno povećava tokom vremena. Analizirani su postojeći modeli predikcije dubine karbonatizacije i predložena je njihova modifikacija u slučaju betona sa RA i LP. Nakon što je ustanovljena veza između ubrzanje karbonatizacije otpornosti i čvrstoće pri pritisku, izvršena je analiza upotrebnog veka kroz definisanje debljine zaštitnog sloja različitih vrsta betona.

Nakon toga analiziran je uticaj širine prsline na dubinu karbonatizacije i trajnost AB konstrukcija kroz rezultate ispitivanja prikazane u doktorskoj disertaciji [1]. Pripremljeni su uzorci sa 5 različitih širina prsline (0.05, 0.10, 0.15, 0.20 i 0.30 mm) kao i referentni uzorci bez prsline. Uticaj prsline na dubinu karbonatizacije postojao na otprilike ±10 mm u odnosu na položaj prsline, bez obzira na vrstu betona i širinu prsline.

Uspostavljena je veza između napona u armaturi i širine prsline na površini betona na osnovu sopstvenih eksperimentalnih rezultata i rezultata dostupnih u literaturi. S obzirom da ova veza primarno zavisi od veličine zaštitnog sloja betona, napon u armaturi analiziran je kao kriterijum trajnosti jer predstavlja prag mikroskopskog oštećenja betona na kontaktu sa armaturom.

Ustanovljeno je da period depasivizacije armature ne znači nužno i kraj životnog veka, analiziran je period propagacije korozije armature u isprskanim AB elementima. Prikazani su sopstveni eksperimentalni rezultati i izvršena je analiza istih primenom polu-probabilističkog modela dostupnog iz literature. Na kraju je na osnovu analitičke veze odnosa napona u armaturi i širine prsline, 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.

## 9. LITERATURA

- [1] V. Carević, Uticaj Prsline na Mehanizme Deterioracije i Trajnost Armiranobetonskih Konstrukcija, PhD Thesis, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2020.
- [2] V. Carević, I. Ignjatović, Influence of loading cracks on the carbonation resistance of RC elements, *Constr. Build. Mater.* 227 (2019) 116583. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.309.
- [3] fib-Model Code, Model Code 2010. Volume 2, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2010.
- [4] CEN, EN 1992-1-1, in: CEN (Ed.), 1st ed., ISS, Belgrade, 2015.
- [5] M. Otieno, H. Beushausen, M. Alexander, Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete - Part II: Corrosion rate prediction models, *Cem. Concr. Res.* 79 (2016) 386–394. doi:10.1016/j.cemconres.2015.08.008.
- [6] S.J. Kwon, U.J. Na, S.S. Park, S.H. Jung, Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion, *Struct. Saf.* 31 (2009) 75–83. doi:10.1016/j.strusafe.2008.03.004.
- [7] B. Savija, Experimental and Numerical Investigation of chloride ingress in cracked concrete, Delft University of Technology, Netherland, 2014.
- [8] S.-J. Kwon, U.-J. Na, Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation Based on Probabilistic Approach, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 5 (2011) 11–18. doi:10.4334/ijcsm.2011.5.1.011.
- [9] A. Castel, R. François, G. Arliguie, Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 561–565. doi:10.1016/S0008-8846(99)00017-4.
- [10] P. Schießl, Cracking of concrete and durability of concrete structures, *Eur. Conf. Crack. Concr. Durab. Constr.* (1988).
- [11] C. Arya, F.K. Ofori-Darko, Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete, *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 345–353. doi:10.1016/S0008-8846(96)85022-8.
- [12] A. Neville, *Concrete: Neville's Insights and Issues*, Thomas Telford Publishing, London, UK, 2006. doi:10.1680/cniai.34686.
- [13] M. Sillanpää, The effect of cracking on chloride diffusion in concrete, Master Sci. Thesis. (2010) 134.
- [14] S. Alahmad, A. Toumi, J. Verdier, R. François, Effect of crack opening on carbon dioxide penetration in cracked mortar samples, *Mater. Struct.* 42 (2009) 559–566. doi:10.1617/s11527-008-9402-x.
- [15] J. Torres, C. Andrade, Influence of Crack Width on Long Term Degradation of Concrete Structures, in: C. Andrade, J. Gulikers, P. Rob (Eds.), *Durab. Reinf. Concr. from Compos. to Prot.*, Springer International Publishing, Delft, Netherlands, 2013: pp. 87–98. doi:10.1007/978-3-319-09921-7\_9.
- [16] S. Zhang, L. Zong, L. Dong, W. Zhang, Influence of Cracking on Carbonation of Cement-based Materials, *Adv. Mater. Res.* 261–263 (2011) 84–88. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.84.

- [17] X.H. Wang, D. V. Val, L. Zheng, M.R. Jones, Influence of loading and cracks on carbonation of RC elements made of different concrete types, *Constr. Build. Mater.* 164 (2018) 12–28. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.142.
- [18] B.J. Pease, Influence of concrete cracking on ingress and reinforcement corrosion, Technical University of Denmark, 2010.
- [19] J. Weiss, M.R. Geiker, K.K. Hansen, Using X-ray transmission/attenuation to quantify fluid absorption in cracked concrete, *Int. J. Struct. Integr.* 9 (2015) 3–20.
- [20] A. Duan, Z.Y. Li, W.C. Zhang, W.L. Jin, Flexural behaviour of reinforced concrete beams under freeze–thaw cycles and sustained load, *Struct. Infrastruct. Eng.* 13 (2017) 1350–1358. doi:10.1080/15732479.2016.1268172.
- [21] M. Kosior-Kazberuk, Effects of Interaction of Static Load and Frost on Damage Mechanism of Concrete Elements, *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.* 1 (2012). doi:10.5755/j01.sace.1.1.2616.
- [22] B. Pailles, Effect of Cracking on Reinforced Concrete Corrosion, ACI Spring 2018 Conv. (2018). <https://www.concrete.org/education/freewebsessions/completelisting/coursepreviews.aspx?ID=51713407> (accessed March 10, 2019).
- [23] A. Blagojevic, The Influence of Cracks on the Durability and Service Life of Reinforced Concrete Structures in relation to Chloride - Induced Corrosio A Look from a Different Perspective, Delft University of Technology, 2016.
- [24] M. Ismail, A. Toumi, R. François, R. Gagné, Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in inert materials, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 711–716. doi:10.1016/j.cemconres.2003.10.025.
- [25] S.Y. Jang, B.S. Kim, B.H. Oh, Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 9–19. doi:10.1016/j.cemconres.2010.08.018.
- [26] M. Şahmaran, İ.O. Yaman, Influence of transverse crack width on reinforcement corrosion initiation and propagation in mortar beams, *Can. J. Civ. Eng.* 35 (2008) 236–245. doi:10.1139/L07-117.
- [27] K. Audenaert, G. De Schutter, L. Marsavina, Influence of cracks and crack width on penetration depth of chlorides in concrete, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 13 (2009) 561–572. doi:10.1080/19648189.2009.9693134.
- [28] A. Djerbi, S. Bonnet, A. Khelidj, V. Baroghel-bouny, Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 877–883. doi:10.1016/j.cemconres.2007.10.007.
- [29] I.S. Yoon, E. Schlangen, Long / short term experimental study on chloride penetration in cracked concrete, *Key Eng. Mater.* 417–418 (2010) 765–768. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.417-418.765.
- [30] O.G. Rodriguez, R.D. Hooton, Influence of cracks on chloride ingress into concrete, *ACI Mater. J.* 100 (2003) 120–126. doi:10.14359/12551.
- [31] V.H. Dang, R. François, Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour of RC beam, *Eng. Struct.* 48 (2013) 558–568. doi:10.1016/j.engstruct.2012.09.021.
- [32] A. Scott, M.G. Alexander, The influence of binder type, cracking and cover on corrosion rates of steel in chloride-contaminated concrete, *Mag. Concr. Res.* 59 (2007) 495–505. doi:10.1680/mac.2007.59.7.495.
- [33] R. Francois, I. Khan, H. Mercado, A. Castel, Influence of mechanical cracks on the development of corrosion mechanism, in: C.L. and K.T. WAN (Ed.), *Int. RILEM Conf. Adv. Constr. Mater. Through Sci. Eng.*, RILEM Publications SARL, 2011: pp. 578–585.
- [34] M. Otieno, *Corrosion Propagation in cracked and uncracked concrete*, CRC Press, Cape Town, 2008.
- [35] V. Carević, Uticaj prslina na mehanizme deterioracije I trajnost armanobetonkih konstrukcija, in: XXVIII Kongr. DIMK I IX Kongr. SIGP, Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, Divčibare, 2022: pp. 1–22.
- [36] J. Dragaš, Ultimate capacity of high volume fly ash reinforced concrete beams, PhD Thesis, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2018.
- [37] fib-Bulletin 34, Model Code for Service Life Design, 1st ed., International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 2006.
- [38] V. Carević, I. Ignjatović, Evaluation of concrete cover depth for green concretes exposed to carbonation, *Struct. Concr.* (2020). doi:10.1002/suco.202000086.
- [39] S. Marinković, V. Carević, J. Dragaš, The role of service life in Life Cycle Assessment of concrete structures, *J. Clean. Prod.* 290 (2021) 125610. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125610.
- [40] V. Carevic, I. Ignjatovic, Limit values of accelerated carbonation resistance to meet EC2 durability requirements, *Build. Mater. Struct.* 65 (2022) 1–6. doi:10.5937/GRMK2201001C.
- [41] S. Talukdar, N. Banthia, J.R. Grace, Modelling the effects of structural cracking on carbonation front advance into concrete, *Int. J. Struct. Eng.* 6 (2015) 73–87.
- [42] W. Wang, C. Lu, Y. Li, G. Yuan, Q. Li, Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete, *Constr. Build. Mater.* 138 (2017) 486–495. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.039.

- [43] A. AL-Ameeri, M.I. Rafiq, O. Tsioulou, Influence of cracks on the carbonation resistance of concrete structures, in: Sixth Int. Conf. Durab. Concr. Struct., Leeds, UK, 2018: pp. 358–366.
- [44] DuraCrete, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures DuraCrete, 2000.