



**DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE
MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE**



INSTITUT IMS AD, BEOGRAD



**UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET**



INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE

Konferencija
SAVREMENI MATERIJALI I
KONSTRUKCIJE SA REGULATIVOM

Zbornik radova

Beograd, 17. jun 2016. godine

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

691:66.017(082)
620.1:691(082)

КОНФЕРЕНЦИЈА Савремени материјали и конструкције са
регулативом (2016 ;
Београд)

Zbornik radova / Konferencija Savremeni materijali i
konstrukcije sa
regulativom, Beograd 17. jun 2016. ; [organizatori] Društvo
za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija
Srbije ... [et al.] ; [editor Dragica Jevtić]. - Beograd :
Društvo za ispitivanje i istraživanje i konstrukcija
Srbije, 2016 (Đurinci : Atom štampa). - [10], 130 str. :
ilustr. ; 25 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Str. [9-10]: Predgovor /
Dragica Jevtić. - Tiraž 150. - Bibliografija uz svaki rad.
- Rezimei ; Summaries.

ISBN 978-86-87615-07-6

a) Грађевински материјали - Зборници
COBISS.SR-ID 224025356

Izdavač: **Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije**
Beograd, Kneza Miloša 9/I

Editor: **Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.**
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

Štampa: "Atom štampa" - Karađorđeva 81, 11450 Sopot

Tiraž: 150 primeraka

Konferenciju **SAVREMENI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE SA
REGULATIVOM**, koja se održava u Beogradu 17. juna 2016. godine, organizovali su
Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije i **Institut IMS**.

Skup je organizovan uz podršku: **MINISTARSTVA PROSVETE, NAUKE I
TEHNOLOŠKOG RAZVOJA** i **INŽENJERSKE KOMORE SRBIJE**

Beograd, 17. jun 2016. godine

NAUČNI KOMITET

1. Prof. dr Radomir Folić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
2. Prof. dr Dragoslav Stojić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
3. Prof. dr Mirjana Malešev, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
4. Vanr. prof. dr Gordana Topličić-Ćurčić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
5. Dr Zagorka Radojević, Institut IMS, Beograd
6. Dr Nenad Šušić, Institut IMS, Beograd
7. Dr Ksenija Janković, Institut IMS, Beograd
8. Dr Milorad Smiljanić, Institut za puteve, Beograd
9. Professor Mihailo Trifunac, Civil Eng. Department University of Southern California, Los Angeles, USA
10. Prof.dr Dubravka Bjegović, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakulte, Zagreb, Hrvatska
11. Predrag Popović, Wiss, Janney, Elstner Associates, Northbrook, Illinois, USA
12. Professor Asterios Lionis, Democratus University of Trace, Faculty of Civil Eng., Greece
13. Professor Ivan Damnjanović, Texas A&M University, College Station, TX Zachry Department of Civil Engineering, USA
14. Prof. dr Meri Cvetkovska, Građevinski fakultet, Univ. „Sv. Kiril i Metodij“, Skoplje, Makedonija
15. Prof. dr Miloš Knežević, Građevinski fakultet, Podgorica, Crna Gora
16. Prof. dr Damir Zenunović, Univerzitet u Tuzli, BIH

ORGANIZACIONI ODBOR

1. Prof. dr Dragica Jevtić, Građevinski fakultet, Beograd
2. Dr Vencislav Grabulov, Institut IMS, Beograd
3. Prof. dr Branko Božić, Građevinski fakultet, Beograd
4. Prof. dr Mihailo Muravljev, Građevinski fakultet, Beograd
5. Prof. dr Boško Stevanović, Građevinski fakultet, Beograd
6. Prof. dr Zoran Grdić, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš
7. Prof. dr Dragoslav Šumarac, Građevinski fakultet, Beograd
8. Prof. dr Vlastimir Radonjanin, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
9. Prof. dr Karolj Kasaš, Građevinski fakultet, Subotica
10. Prof. dr Milan Dimkić, Institut "Jaroslav Černi", Beograd
11. Milutin Ignjatović, generalni direktor Saobraćajnog Instituta CIP, Beograd
12. Pal Kermeci, inž.tehn. "Potisje Kanjiža", Kanjiža
13. Vesna Zvekić, dipl.inž.tehn., „Polet“ Novi Bečej



Konferencija
SAVREMENI MATERIJALI I KONSTRUKCIJE SA REGULATIVOM

Beograd, 17. jun 2016.

Vedran Carević¹
Ivan Ignjatović²

UDK: 620.193.2:666.972.1
620.193.2:691.322

**ISPITIVANJE OTPORNOSTI BETONA SA PRIRODNIM I RECIKLIRANIM
AGREGATOM UBRZANIM KARBONATIZACIONIM TESTOVIMA**

Rezime: Korozija armature usled karbonatizacije je jedan od osnovnih mehanizama oštećenja armiranobetonskih konstrukcija. U aktuelnim proračunskim modelima karbonatizacije, na kojima je zasnovana metodologija projektovanja prema upotrebnom veku konstrukcije, ključni parametar je karbonatizaciona otpornost betona. Ovo svojstvo materijala ispituje se ubrzanim testovima koji podrazumevaju izloženost relativno visokim koncentracijama CO₂, a zatim se dubina tako karbonatizovane zone dovodi u vezu sa projektovanom dubinom u uslovima realne izloženosti. U radu su prikazani rezultati ubrzanih karbonatizacionih testova sprovedenih u uslovima koncentracije CO₂ od 1%, 2% i 4% na betonima spravljenim sa prirodnim i recikliranim agregatom. Rezultati ispitivanja ukazuju na efekte promene koncentracije CO₂ na kinetiku procesa karbonatizacije.

Ključne reči: beton, reciklirani agregat, karbonatizacija, ubrzani karbonatizacioni test.

**RESISTANCE OF CONCRETE WITH NATURAL AND RECYCLED
AGGREGATES ON ACCELERATED CARBONATION TESTS**

Abstract: Reinforcement corrosion due to carbonation is one of the main deterioration mechanisms of reinforced concrete structures. The key parameter in the model of carbonation applied in service life design methodology is the carbonation resistance of concrete. This property of the material is tested on accelerated tests, which consider exposure to relatively high concentration of CO₂, measurement of the carbonation depth and it's correlation with the designed concrete cover. The paper presents the results of accelerated carbonates tests conducted in conditions of CO₂ concentration of 1%, 2% and 4%, on the concrete samples made with natural and recycled aggregates. Test results show the effect of CO₂ concentration change on the kinetics of the carbonation process.

Key words: concrete, recycled aggregate, carbonation, accelerated carbonation test.

¹ Mast.inž.grad, asistent, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, ivani@imk.grf.bg.ac.rs

² Docent, dr, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, vedran@imk.grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Beton se generalno smatra građevinskim materijalom koji poseduje dobru trajnost. Međutim, slučajevi nezadovoljavajuće trajnosti objekata, od kojih su neki izgrađeni u najrazvijenijim delovima sveta gde je očekivani nivo kvaliteta gradnje veoma visok, pojavljuju se sve češće. Vodeći problem predstavlja korozija armature u armiranobetonskim konstruktivnim elementima. Jedan od najvažnijih procesa koji dovode do depasivizacije armature i stvaranja uslova za koroziju, pored penetracije hlorida, je karbonatizacija. Karbonatizacija predstavlja proces neutralizacije cementne matrice usled reakcije sa ugljendioksidom (CO₂) iz spoljašnje sredine. S obzirom da se nivo ugljendioksida u atmosferi konstantno povećava, pogotovo u urbanim zonama u kojima se i nalazi najveći deo fonda građevinskih objekata, raste značaj analize uticaja karbonatizacije na njihovu trajnost. Takođe, postoji trend primene zelenih betonskih kompozita u savremenim armiranobetonskim konstrukcijama, čija je otpornost na karbonatizaciju još uvek nedovoljno istražena. Konačno, za specifične konstrukcije (npr. tunele) karbonatizacija zbog povećane koncentracije CO₂ iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem predstavlja dominantni mehanizam oštećenja.

2. KARBONATIZACIJA KAO FIZIČKO-HEMIJSKI PROCES

Karbonatizacija betona je složen fizičko-hemijski proces koji se odvija u cementnoj matrici zaštitnog sloja betona do armature. Beton je porozan materijal kroz koji različite supstance mogu prodrati kroz mrežu međusobno povezanih kapilarnih pora. Transportni mehanizam ugljen- dioksida kroz betonski zaštitni sloj je difuzija koja se, prema pretpostavci, odvija u skladu sa 1. Fick-ovim zakonom difuzije, usvajajući da je koncentracija atmosferskog CO₂ konstantna u toku vremena.

Postoji nekoliko parametara koji utiču na difuziju ugljen- dioksida kroz strukturu betona, kao što su poroznost, temperatura, vlažnost. Unutrašnja difuzija pomoću koje se molekuli transportuju kroz beton zavisi od veličine i povezanosti sistema pora. Sa porastom temperature difuzija gasa se povećava zbog povećane molekularne aktivnosti. Vlažnost predstavlja veoma važan parametar, s obzirom da se proces usporava ukoliko su pore zasićene vodom. U tom slučaju CO₂ veoma teško reaguje zbog niskog stepena difuzije u vodi. Sa druge strane, ukoliko je beton previše suv, CO₂ ne može da se rastvori u tankom sloju vode koji pokriva zidove pora čime se reakcija znatno usporava. Proces karbonatizacije najintenzivniji je pri umerenoj relativnoj vlažnosti, između 50% i 70% [7].

Karbonatizacija nastaje kada ugljen- dioksid (CO₂) iz atmosfere reaguje sa vodom (H₂O) u porama betona formirajući ugljenu kiselinu (H₂CO₃). Ona dalje reaguje sa kalcijum hidroksidom (Ca(OH)₂) kao produktom hidratacije i/ili kalcijum bogatom CSH vezom u betonu, odnosno C-A-H [13], formirajući kalcijum karbonat (CaCO₃):



Rezultat ove reakcije je smanjenje alkalnosti betona sa pH vrednosti od oko 13,5 do ispod 9, čime se gubi hemijska zaštita armature - pasivizacioni sloj oko armature je

narušen i stvoreni su uslovi za početak korozije armature. Kako se u procesu oslobađa voda, karbonatizacija je neprekidan proces, s obzirom da je ona neophodna za početak reakcije. Formiranje kalcita (CaCO_3) ne prestaje kada se sav portlandit (Ca(OH)_2) rastvori. Ca^{2+} joni dalje se izdvajaju iz CSH veze što vodi do dekalifikacije [2]. Alkalni joni sada mogu zameniti kalcijumove jone na mestima gde su ostale praznine. Dekalcifikacija, a time i polimerizacija CSH veze su ključni procesi koji prave razliku u ponašanju betona pri različitim koncentracijama CO_2 . Istraživanja pokazuju da se polovina ugljen- dioksida u betonu troši na reakciju sa Ca(OH)_2 , dok druga polovina reaguje sa CSH vezom [13].

3. ISPITIVANJE DUBINE KARBONATIZACIJE BETONA

Postoji nekoliko metoda detekcije karbonatizovanog fronta u betonu. Zbog redukcije pH vrednosti u karbonatizovanom betonu, karbonatizovana zona se obično identifikuje pomoću obojenih indikatora baznosti sredine, kakav je i fenolftaleinski test. Važeća tehnička regulativa [5],[6],[10],[12] koristi upravo ovaj test za određivanje dubine karbonatizovanog fronta. Karbonatizovana zona betona čija je pH vrednost manja od približno 9 ostaće nebojena, dok će beton sa većom pH vrednošću postati ljubičast kao posledica reakcije fenolftaleinskog rastvora i slobodnog portlandita (kalcijum hidroksida). Ipak, određene studije su pokazale da karbonatizovani front nije oštar kako se to ovom metodom dobija, već blago promenljiv [2],[3]. U radu [3] pomoću termogravimetrijske (TGA) i rentgenske (XRD) metode utvrđeno je da dubina potpuno karbonatizovane zone koja se može odrediti fenolftaleinskim testom, predstavlja samo polovinu dubine karbonatizovanog fronta. Na osnovu rezultata dobijenih primenom ovih metoda mogu se definisati 3 zone: potpuno karbonatizovana, delimično karbonatizovana i nekarbonatizovana [3]. Važno je istaći da se TGA i XRD metode koriste kako bi se shvatila priroda procesa koji se odvija unutar betonske strukture, a ne kao metode koje bi se mogle koristiti u praksi zbog svoje komplikovanosti. Fenolftaleinski test ostaje kao inženjerski najprihvatljivija metoda koja se sa dovoljnom tačnošću može koristiti i na terenu i u laboratorijskim uslovima.

U praksi, očekivana dubina karbonatizacije u prirodnim uslovima je najvažnija informacija koja interesuje inženjere, kada govorimo o projektovanju zaštitnog sloja armiranobetonskih konstrukcija i obezbeđivanju trajnosti, tj. upotrebnog veka istih. Vrednost koncentracije ugljendioksida u atmosferi značajno varira u zavisnosti od geografskog područja. Uobičajeno, prirodne koncentracije CO_2 u atmosferi usvajaju se u granicama od 0,03% u ruralnim i 0,3% u urbanim oblastima [4]. Pri takvim uslovima izloženosti potrebne su bar dve godine kako bi se merenjima prikupili validni podaci samo za kvalitativnu (komparativnu) ocenu novoprojektovanog betona u smislu karbonatizacione otpornosti. Potreba da se simuliraju stvarni uslovi izloženosti konstrukcija tokom eksploatacionog veka i realno ostvarene dubine karbonatizacije, ali i skрати vreme testiranja materijala, iznedrili su brojne ubrzane testove karbonatizacije. Ubrzanje procesa karbonatizacije, tj. skraćivanje dužine ispitivanja, postiže se prvenstveno povećanim koncentracijama ugljendioksida kojim se izlažu uzorci.

Postoje različiti modeli kojima se opisuje karbonatizacija betona i daje predikcija dubine karbonatizovane zone zaštitnog sloja u funkciji vremena [5],[8],[11]. Generalno, usvojen je princip da kada se izjednače dubina karbonatizacije i debljina zaštitnog sloja, smatra se da dolazi do kraja perioda inicijalizacije, počinje depasivizacija armature i

najčešće se taj trenutak smatra krajem upotrebnog veka [9]. Praktično svi analitički izrazi za proračun dubine karbonatizacije svode se na relaciju [8]:

$$x_c = K \cdot \sqrt{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

gde je

- x_c - dubina karbonatizacije [m]
- K - koeficijent koji zavisi od svojstava betona
- CO_2 - koncentracija CO_2 [%]
- t - vreme izloženosti [dani]

U literaturi se na različite načine definiše koeficijent K [5],[8],[11]. Međutim, sve relacije počivaju na nezavisnosti koeficijenta K od koncentracije CO_2 , što čini važnu pretpostavku koja omogućava upotrebu ubrzanih karbonatizovanih testova sa različitim koncentracijama ugljen- dioksida.

Postoje različite preporuke za ispitivanje ubrzane karbonatizacione otpornosti na betonskim uzorcima [5],[6],[10]. Iako nema naročite razlike u načinu definisanja dimenzija i izboru uzorka, postoje razlike u definisanju koncentracije ugljendioksida (CO_2) kojima su uzorci izloženi, tabela 1.

Tehnička regulativa	CO_2 [%]	RH [%]	T [°C]	Vreme merenja [dani]
[5]	2	65	20	28
[6]	4	55	20	28, 42, 56
[10]	3	55	22	56, 63, 70
*Belgija	1	55	20	3, 7, 14, 28, 35, 42, 56
*Nemačka	2	65	20	28
*UK	4±0,5	55±5	20±2	Različite starosti do 14 dana
*Francuska	50±5	65±5	20±2	7, 14, 28
*Italija	50	50	20	3, 6, 9, 12, 15
*Nordijske zemlje	20±3	65±10	23	Na svaka 2 dana, ukupno 8

* Podaci preuzeti iz [7]

Tabela 1. Pregled standarda za ispitivanje dubine karbonatizacije

Ipak, određivanje karbonatizacione otpornosti posmatranog betona u kvantitativnom smislu, moguće je samo upotrebom [5], gde je rezultat ispitivanja vrednost inverzne karbonatizacione otpornosti R_{ACC}^{-1} . Ovo je jedan od ključnih parametara za projektovanje prema upotrebnom veku konstrukcije. Primenom svih ostalih standarda iz tabele 1 dobijaju se vrednosti koje služe dominantno za poređenje sa vrednostima dobijenim na drugim ili referentnim (standardom definisanim) betonima pri istim uslovima izloženosti.

4. POREĐENJE UBRZANOG I PRIRODNOG KARBONATIZACIONOG TESTA

Kao što je već navedeno, postoje različiti ubrzani testovi kojima se želi u laboratorijskim uslovima značajno skratiti vreme testa. U tu svrhu, na osnovu jednačine (3) formirana je i matematička zavisnost (4) između dubina karbonatizacije pri različitim koncentracijama i vremenima izloženosti. Da bi se ova relacija mogla prihvatiti potrebno je usvojiti pretpostavku da za isti materijal neće doći do promene procesa karbonatizacije pri različitim koncentracijama izloženosti. Takođe, izraz (4) podrazumeva uslove konstantne vlažnosti RH=65% i temperature 20°C:

$$\frac{x_{c,ACT}}{x_{c,NCT}} = \sqrt{\frac{[CO_2]_{ACT}}{[CO_2]_{NCT}}} \cdot \sqrt{\frac{t_{ACT}}{t_{NCT}}} \quad (4)$$

gde je,

- $x_{c,ACT}$ - dubina karbonatizacije nakon ubrzanog testa [mm]
- $x_{c,NCT}$ - dubina karbonatizacije uzorka izloženog prirodnim uslovima CO₂ [mm]
- t_{ACT} - vreme izloženosti kod ubrzanog testa [dani]
- t_{NCT} - vreme izloženosti prirodnim uslovima CO₂ [dani]
- $[CO_2]_{ACT}$ - koncentracija CO₂ kod ubrzanog testa [%]
- $[CO_2]_{NCT}$ - koncentracija CO₂ u prirodnim uslovima [%]

Na osnovu relacije (4) sledi da će se ista dubina karbonatizacije u prirodnim uslovima ostvariti za ono vreme koje je jednako vremenu trajanja ubrzanog testa pomnoženo odnosom koncentracija CO₂:

$$t_{NCT} = \frac{[CO_2]_{ACT}}{[CO_2]_{NCT}} \cdot t_{ACT} \quad (5)$$

Međutim, primena različitih koncentracija ugljendioksida dovodi do promene u kinetici procesa [2],[7],[8], što može da narušiti definisanu relaciju. U radu [2] ispitivan je uticaj različitih koncentracija CO₂ na strukturu cementne paste u poređenju sa prirodno izloženim uzorcima. Na osnovu eksperimentalnog istraživanja došlo se do zaključka da koncentracije CO₂ do 3% predstavljaju optimalne vrednosti koncentracije CO₂ koja dovoljno ubrzava proces u okviru razumno kratkog vremena, a ne narušava dramatično mikrostrukturu u odnosu na prirodnu karbonatizaciju.

5. UTICAJ RECIKLIRANOG AGREGATA NA PROCES KARBONATIZACIJE

Kao rezultat upotrebe recikliranog agregata u spravljanju betona, mikrostruktura se značajno komplikuje. Kod betona na bazi recikliranog agregata (RAC) postoje 2 prelazne, tranzitne (ITZ) zone: stara zona između originalnog prirodnog agregata i prvobitnog maltera, i nova zona između starog i novog maltera. Ovo komplikuje mikrostrukturu i otežava izučavanje pitanje trajnosti ovakvih betona. Sa povećanjem količine recikliranog agregata u mešavini povećava se zapremina ITZ zone što dovodi do negativnog uticaja na karbonatizacionu otpornost [14].

Kada govorimo o kinetici procesa, u radu [1] konstatovano je, u studiji ubrzane karbonatizacije, da se kinetika procesa karbonatizacije betona sa recikliranim agregatom ne razlikuje u odnosu na betone sa prirodnim agregatom. Ipak, postoje dva nova faktora kod RAC betona koji se izdvajaju u odnosu na betone na bazi prirodnog agregata (NAC). Porozan reciklirani agregat prouzrokuje veću poroznost betona u poređenju sa betonom od prirodnog agregata i manju karbonatizacionu otpornost. Sa druge strane, RAC betoni mogu imati veću količinu veziva i samim tim veću količinu alkalija koje se moraju karbonatizovati tokom procesa. Tome doprinosi i stari malter koji se nalazi na zrnju prirodnog agregata. Dakle, reciklirani agregat se ne može smatrati inertnim jer sadrži veće količine alkalija koje mogu formirati etringit u ITZ zoni između recikliranog agregata i nove cementne paste [1]. To doprinosi smanjenju poroznosti i difuznosti CO₂. Prema tome postoje dva međusobno suprotstavljena faktora koja utiču na karbonatizaciono ponašanje betona sa recikliranim agregatom. Kada je procenat zamene nizak, negativan efekat povećane poroznosti nadjačava pozitivan efekat povećanja alkalnih supstanci. Dubina karbonatizacije dostiže maksimum pri 70% zamene krupnog agregata recikliranim [14]. Nakon toga dolazi do pada dubine usled nadjačavanja pozitivnog efekta povećanja cementa [14].

6. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

Za potrebe eksperimentalnog istraživanja spravljeni su dva betona - beton sa 100% zamene krupnog agregata recikliranim (RAC) i beton sa prirodnim agregatom (NAC). Rezultati ispitivanja zapreminske mase u svežem ($\gamma_{c,sveže}$) i očvrslom stanju (γ_c), uvučenog vazduha, sleganja i čvrstoće pri pritisku pri starosti od 14 ($f_{c,14}$) i 28 dana ($f_{c,28}$), prikazani su u tabeli 2. Čvrstoće pri pritisku određene su na probnim telima oblika kocke dimenzija 10 cm.

Uzorak	$\gamma_{c,sveže}$ [kg/m ³]	γ_c [kg/m ³]	Uvučeni vazduh [%]	Sleganje [cm]	$f_{c,14}$ [MPa]	$f_{c,28}$ [MPa]
NAC	2342	2320	3,20	15,3	23,13	35,04
RAC	2281	2241	3,15	14,8	34,03	41,55

Tabela 2. Fizičko-mehanička svojstva ispitivanih betona

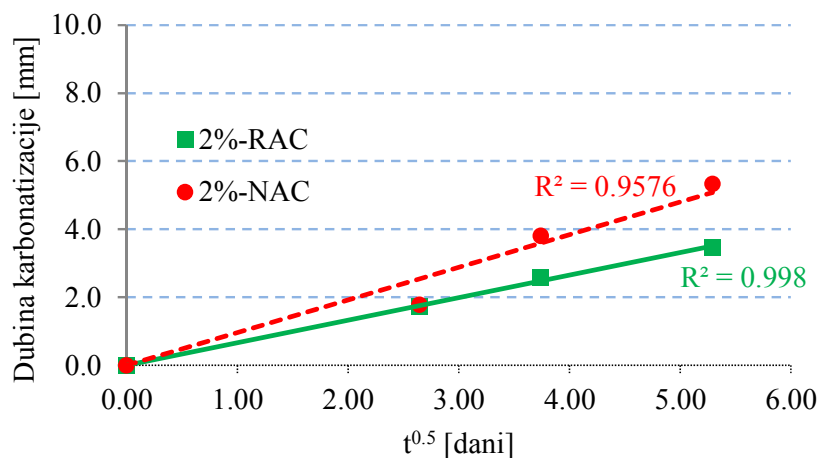
Nakon negovanja 28 dana u vodi uzorci su smešteni u komoru sa kontrolisanim uslovima vlažnosti, temperature i koncentracije CO₂, slika 1. Uzorci su bili izloženi različitim koncentracijama CO₂ od 1%, 2% i 4% kako bi se ispitala promena kinetike procesa pri različitim koncentracijama izloženosti. Dubina karbonatizacije određivana je fenolftaleinskim testom, u svemu prema standardu [12]. Kako bi se testirao uticaj koncentracije ugljendioksida na promenu kinetike procesa, dva uzorka (NAC-R, RAC-R) su izložena koncentraciji od 16% CO₂, ali samo u trajanju od tri dana. Nakon toga, u toku preostalog vremena do 28 dana, izloženi su koncentraciji od 2% CO₂. Preostalo vreme do 28 dana proračunato je na osnovu relacije (4), s obzirom da su uzorci bili izloženi različitim koncentracijama ugljendioksida.



Slika 1. Komora sa kontrolisanim uslovima CO₂, temperature i vlage

7. REZULTATI ISPITIVANJA KARBONATIZACIJE

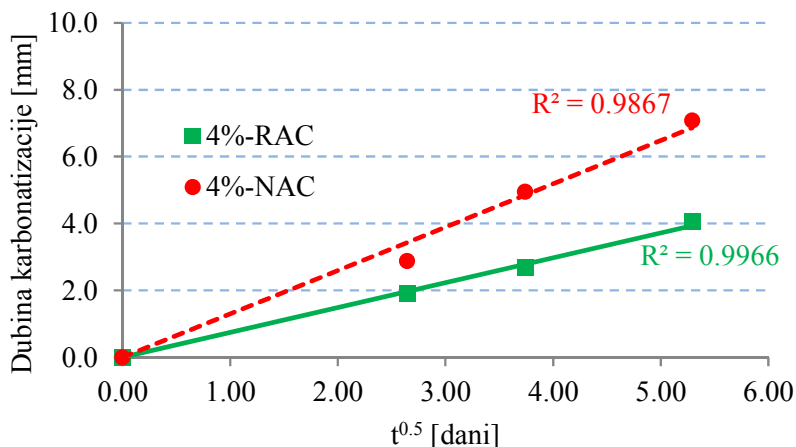
Sprovedeni rezultati ispitivanja karbonatizacije za dve vrste betona pri koncentraciji od 2% CO₂ prikazani su na slici 2 u funkciji kvadratnog korena vremena izloženosti. Može se uočiti da veću dubinu karbonatizacije imaju NAC betoni u odnosu na RAC. Razlog pre svega leži u činjenici da NAC betoni imaju manju čvrstoću pri pritisku, a samim tim i nešto veću permeabilnost koja je važan faktor za difuziju ugljendioksida. Sa porastom čvrstoće dolazi do pada dubine karbonatizacije. To se dešava zbog povećane kompaktnosti, što smanjuje poroznost i brzinu difuzije CO₂ kroz strukturu betona. Na taj način je smanjena i karbonatizovana zona.



Slika 2. Rezultati ispitivanja karbonatizacije pri koncentraciji od 2%

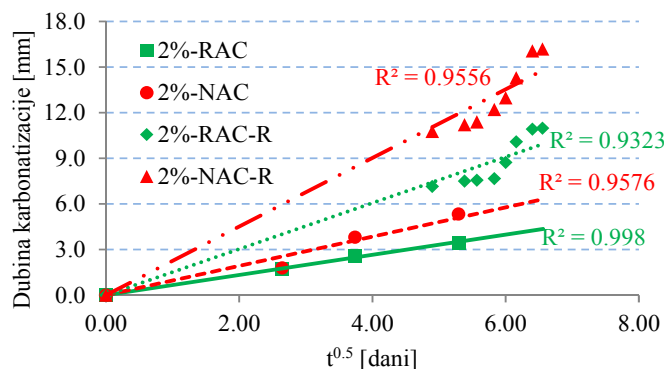
Na slici 3 nalaze se rezultati ispitivanja pri 4% CO₂. Primetan je isti trend kao i na prethodnom dijagramu. Činjenica je da pored veće čvrstoće, RAC betoni imaju i pozitivan efekat količine cementa koji je primetan pogotovo kod većih procenata zamene krupnog agregata što je ovde i slučaj (100%). Zbog toga i ne iznenađuje manja dubina karbonatizacije u poređenju sa NAC betonima. Ako se uporede rezultati sa slike 2 i slike 3, očekivano, za istu dužinu trajanja testa, veća dubina karbonatizacije ostvarena je pri većoj koncentraciji (4%), nezavisno od vrste betona – NAC ili RAC.

Takođe, rezultati merenja dubine karbonatizacije prikazani na slikama 2 i 3 pokazuju dosta visoku korelaciju sa kvadratnim korenom vremena, što potvrđuje validnost izraza (3), nezavisno od vrste betona – NAC ili RAC.



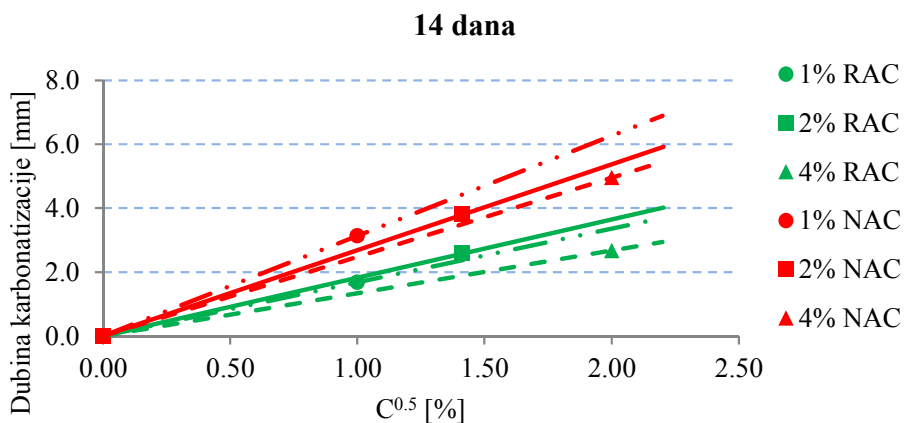
Slika 3. Rezultati ispitivanja karbonatizacije pri koncentraciji od 4%

Na slici 2 prikazani su rezultati ispitivanja dubine karbonatizacije na uzorcima koji su bili izloženi samo koncentraciji od 2% (NAC, RAC) i oni koji su na početku izloženi koncentraciji od 16%, a zatim preostalo računsko vreme do 28 dana koncentraciji od 2% (NAC-R, RAC-R). Ukoliko su relacije (4) i (5) tačne, onda bi vrednosti dubina karbonatizacije za jednu vrstu betona trebalo da budu približno jednake, bez obzira na način tretiranja ugljendioksidom. Međutim, na slici 4 uočava se da je dubina karbonatizacije betona koji su prethodno bili izloženi koncentraciji od 16% i do 2 puta veća u odnosu na uzorke koji su tretirani konstantno sa 2% CO₂. Može se, dakle, zaključiti da se na bazi prikazanih rezultata, izraz (4) ne može koristiti kao relacija za konverziju rezultata ispitivanja karbonatizacije na uzorcima koji su bili izloženi različitim koncentracijama tokom ubrzanog testa, bez obzira na vrstu betona.



Slika 4. Rezultati ispitivanja karbonatizacije uzoraka izloženih različitim koncentracija tokom vremena

Ako se uzme u obzir pretpostavka prikazana u jednačini (3), da koeficijent K ne zavisi od koncentracije CO_2 kojoj je uzorak izložen, onda se dubina karbonatizacije, u određenom vremenu izloženosti, može prikazati u funkciji korena koncentracije ugljen-dioksida. U tom slučaju trebala bi da postoji jedinstvena prava linija za određeni materijal pri različitim koncentracijama izloženosti CO_2 , a za isti interval trajanja ispitivanja. Nagib te linije predstavljaće koeficijent K. Na slici 5 prikazana je dubina karbonatizacije za NAC i RAC betone pri različitim koncentracijama, nakon 14 dana. Razlike između nagiba pravih za jedan beton nisu izrazito velike da bi se mogao izvesti zaključak o promeni kinetike samog procesa pri različitim koncentracijama ugljen dioksida. Zbog toga je potrebno sprovesti dodatno istraživanje na različitom spektru koncentracija kako bi se utvrdila granica pri kojoj dolazi do promene kinetike procesa. Na taj način bi se mogao izabrati ubrzani test na osnovu kojeg bi se mogla raditi pouzdana predikcija u realnom vremenu.



Slika 5. Dubina karbonatizacije nakon 14 dana u funkciji korena koncentracije CO_2

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih eksperimentalnih ispitivanja i teorijskih razmatranja, izvedeni su sledeći zaključci:

1. Betoni na bazi recikliranog agregata pokazali su veću karbonizacionu otpornost u odnosu na betone sa prirodnim agregatom, što je očekivano, s obzirom na izmerene razlike u čvrstoćama pri pritisku.

2. Izmerene dubine karbonatizacije pri koncentracijama od 2% i 4% u dobroj su korelaciji sa kvadratnim korenom vremena izloženosti, bez obzira na vrstu betona.

3. Primena odnosa korena koncentracija (4) ne može se primentiti za konverziju rezultata dubina karbonatizacije kod betona izloženih različitim koncentracijama CO₂ tokom ubrzanih testova.

9. REFERENCE

- [1] Bodin B.F., Zaharieva H.R.: Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties on concrete, *Material Structures*, 2002., str. 504-509.
- [2] Castellote Marta, Fernandez Lorenzo, Andrade Carmen, Alonso Cruz: Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations, *Materials and Structures*, 2009., str. 515-525.
- [3] Chang Cheng-Feng, Chen Jing-Wen: The experimental investigation of concrete carbonation depth, *Cement and Concrete Research*, 2006., str. 1760-1767.
- [4] Eguez E. Hugo, De Belie Nele, De Schutter Geert: The influence of carbonation on the scaling resistance of blast furnace slag concrete (BFSC), XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components, 2014., str. 138-1746.
- [5] fib Bulletin 34: Model Code for Service Life Design, International Federation for Structural Concrete (*fib*), Lozana, Švajcarska, 2006., str. 110.
- [6] FprEN 12390-12: Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method, 2010.
- [7] Harrison A. Thomas, Jones Martyn Roderick, Newlands Moray David, Kandasami Sivakumar, Khanna Gaurav: Experience of using the prTS Experience of using the prTS test to assess the relative performance of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 2012., str. 737-747.
- [8] Hyvert N, Sellier A., Duprat F., Rougeau P., Francisco P.: Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation, *Cement and Concrete Research*, 2010., str. 1582-1589.
- [9] Ignjatović I., Marinković S.: Projektovanje betonskih konstrukcija prema upotrebnom veku: Deo 1 – Osnovni pojmovi trajnosti i pouzdanosti, *Materijali i konstrukcije*, 2007, br. 4, str. 3-15.
- [10] ISO 1920-12: Testing of concrete - Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete - accelerated carbonation method, Ženeva, Švajcarska, 2015.
- [11] Papadakis V.G, Vayenas C.G, Fardis M.N: A Reaction Problem of Engineering Approach to the Concrete Carbonation, *AIChE Journal*, SAD, 1989., str. 1639-1650.
- [12] SRPS EN 12390-10: Ispitivanje očvrstlog betona - Deo 10: Određivanje relativne otpornosti betona prema karbonatizaciji, 2008.
- [13] Taludakar S., Banthia N., Grace J.R.: Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change - Part 1: Experimental results and model development, *Cement and Concrete Composites*, 2012., str. 924-930.
- [14] XIAO Jian Zhuang, LEI Bin, ZHANG Chuan Zeng: On carbonation behavior of recycled aggregate concrete, *Sci China Tech Sci*, 2012., str. 2609-2616.