

PROJEKTOVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA PREMA UPOTREBNOM VEKU: DEO 2 – PRORAČUNSKI DOKAZI ZA RAZLIČITE DETERIORIZACIONE MEHANIZME

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 624.012.3:620.179.7 = 861

1 UVOD

Predlog novog Modela propisa [7] koji se odnosi na obezbeđivanje trajnosti betonskih konstrukcija, donosi novi pristup projektovanju betonskih konstrukcija s obzirom na njihov upotrební vek. Osnovni koraci takvog koncepta su:

- definisanje modela deterioracionog mehanizma i kvantifikovanje parametara u modelu,
- definisanje graničnog stanja prema kome treba projektovati konstrukciju,
- definisanje tipa graničnog stanja (granično stanje nosivosti ili upotrebljivosti),
- izvođenje proračunskog dokaza odgovarajućeg graničnog stanja.

Osnovni pojmovi kao što su upotrební vek konstrukcije, deterioracioni procesi, moguća granična stanja, pouzdanost i različiti proračunski dokazi, objašnjeni su u prvom delu rada koji se odnosi na temu projektovanja prema upotrebnom veku konstrukcije [8]. U ovom delu rada biće objašnjena dva različita deterioraciona mehanizma: korozija armature usled karbonizacije betona i korozija armature usled dejstva hlorida, kvantifikacija parametara u modelima koji ih opisuju i proračunski dokazi odgovarajućih graničnih stanja .

2 PRORAČUNSKI DOKAZ GRANIČNOG STANJA DEPASIVIZACIJE ARMATURE USLED KARBONIZACIJE, PRIMENOM PUNE PROBABILISTIČKE METODE

Preduslov za primenu pune probablističke metode je postojanje korektnog modela koji opisuje deterioracioni proces, kao i definisanje svih parametara modela. Svaki parametar koji predstavlja stohastičku veličinu, treba da bude predstavljen pomoću odgovarajuće funkcije raspodele. Naredni korak metode je definisanje jednačine graničnog stanja u kojoj su grupisane vrednosti uticaja od dejstava E i nosivosti R . Suština probablističke metode sadržana je u uslovu jednačine, da verovatnoća događaja $R < E$ bude manja od neke ciljne vrednosti p_0 .

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{R - E < 0\} < p_0 \quad (1)$$

Ciljna vrednost verovatnoće pomenutog događaja p_0 , može biti izražena i preko indeksa pouzdanosti β [8]. Određivanje vrednosti uticaja od dejstava i/ili nosivosti primenom pune probablističke metode vrlo često predstavlja zametan posao, a proces se usložnjava sa povećanjem broja parametara (stohastičkih veličina) koji definišu razmatrani uticaj. To je osnovni razlog što se ova metoda koristi samo kod izuzetnih objekata, a probablistička priroda problema u većini slučajeva tretira kroz primenu parcijalnih koeficijenata sigurnosti.

Osnovna jednačina graničnog stanja depasivizacije armature usled karbonizacije koja mora biti ispunjena, glasi:

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{a - x_c(t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (2)$$

gde je:

- $p\{ \}$ – verovatnoća da se desi depasivizacija armature
- a – debljina zaštitnog sloja [mm]
- $x_c(t_{SL})$ – dubina karbonizacije nakon vremena t_{SL} [mm]
- t_{SL} – proračunski upotrební vek [godine]

Adresa autora:

Ivan Ignjatović, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73,
11000 Beograd, Srbija; e-mail: ivani@imk.grf.bg.ac.yu
Snežana Marinković, vanredni profesor, dr, dipl.građ.inž.,
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja
Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija; e-mail:
sneska@imk.grf.bg.ac.yu

p_0 – zahtevana (ciljna) vrednost verovatnoće pojave loma.

Obe promenljive, a i $x_c(t_{SL})$ se određuju potpunim probabilističkim pristupom, uz kvantifikaciju svih parametara od kojih one zavise. Dubina karbonizacije u određenom trenutku vremena, t , definiše se na sledeći način [7]:

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + e_t) \cdot C_S \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (3)$$

gde je:

$x_c(t)$ – dubina karbonizacije u određenom trenutku vremena t [mm]

t – vreme [godine]

k_e – funkcija okoline

k_c – parametar izvođenja

k_t – parametar povraćaja

$R_{ACC,0}^{-1}$ – inverzna vrednost otpornosti betona na karbonizaciju [(mm²/god)/(kg/m³)]

e_t – greška

C_S – koncentracija CO₂ u vazduhu [kg/m³]

$W(t)$ – funkcija vremenskih prilika.

Jednačina kojom se proračunava dubina karbonizacije betona (3), razvijena je u okviru dva velika evropska istraživačka projekta posvećena trajnosti betona: DuraCrete i Darts [2], [7]. Bazira se na difuziji kao dominantom načinu transportnog mehanizma CO₂ u betonu i važi za neisprskao beton. Za beton koji je isprskao od naprezanja koja potiču od opterećenja, treba obezbediti istu pouzdanost kao za neisprskao beton [7]. Može se reći da je postupak proračuna isti kao za neisprskao beton uz zadovoljenje uslova standarda koji se odnose na maksimalnu širinu prslina, [8].

2.1 Kvantifikacija parametara

2.1.1 Zaštitni sloj a

Kako je već rečeno, trajnost betona se ocenjuje stepenom oštećenja koje je beton pretrpeo usled hemijskih reakcija. Pri tome se u prvom redu misli na oštećenja zaštitnog sloja. Od kvaliteta zaštitnog sloja betona zavisi transport hemijski aktivnih supstanci, a time i stepen oštećenja. Penetracija ugljen-dioksida koji izaziva karbonizaciju ili prodor hlorida dešava se kroz zaštitni sloj koji obavlja armaturu i čini je pasivnom u odnosu na koroziju, pa je od izuzetne važnosti da zaštitni sloj bude zadovoljavajućeg kvaliteta, odnosno da ima ograničenu propustljivost. Ova karakteristika betona uslovljena je:

- vodo cementnim faktorom (niži vodo cementni faktor- niža propustljivost),

- tipom cementa i mineralnim dodacima (cementi sa dodacima mogu uticati na to da beton bude bolje propustljivosti od betona koji je samo na bazi Portland cementa),

- zbijanje (beton sa sačastom strukturom, tj. sa vidljivom segregacijom na površini ima veću propustljivost),

- kvalitet nege (nega određuje kvalitet očrščavanja površine betona i kontroliše pojavu termičkih prslina kao i prslina usled plastičnog skupljanja).

Izbor debljine zaštitnog sloja je jedna od faza u procesu projektovanja. Debljina zaštitnog sloja saglasno

izvođačkoj praksi varira, pa je zato treba posmatrati pre kao stohastičku nego kao konstantnu veličinu. Za statistički opis debljine zaštitnog sloja i njegovih varijacija koriste se beta, Weibull- ova, lognormalna ili Neville- ova raspodela, dok je primena normalne raspodele ograničena činjenicom da kod statističkih opisa tankih zaštitnih slojeva (nom $a \leq 20$ mm), omogućava pojavu negativnih vrednosti, što u slučaju razmatranog parametra nema smisla. Nominalna debljina zaštitnog sloja (nom a) praktično predstavlja i srednju vrednost debljine, s obzirom na činjenicu da je veličina nominalnog zaštitnog sloja obezbeđena postavljanjem distancera odgovarajućih dimenzija. Za funkciju raspodele debljih zaštitnih slojeva (nom $a \geq 25$ mm), može se primeniti i normalna raspodela sa srednjom vrednošću od $\mu = \text{nom } a$ [mm], dok je standardno odstupanje za zaštitni sloj a , prema funkciji normalne raspodele:

$$\sigma = 8 - 10 \text{ mm bez posebnih zahteva pri izvođenju}$$

$$\sigma = 6 \text{ mm sa posebnim zahtevima za izvođenje}$$

2.1.2 Proračunski upotrební vek t_{SL}

Dužina upotrebnog veka definisana je trajanjem procesa inicijalizacije, tj. traje do trenutka dostizanja graničnog stanja depasivizacije armature, mada je u određenim situacijama moguće da traje i duže [8]. Indikativne vrednosti proračunskog upotrebnog veka date su u tabeli 1. Prema EN 1990: 2002 [3], pomenute vrednosti u tabeli odnose se na proračunski eksploatacioni vek (engl. *design working life*).

2.1.3 Funkcija okoline k_e

Funkcija okoline uzima u obzir uticaj nivoa vlažnosti na difuzioni koeficijent, pa tako i na otpornost betona na karbonizaciju. Referentni klimatski podaci su temperatura vazduha $T = +20^\circ\text{C}$ i relativna vlažnost vazduha $RH = 65\%$.

Fukcija okoline k_e može se opisati pomoću jednačine:

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (4)$$

gde je:

RH_{real} – relativna vlažnost karbonizovanog sloja [%]

RH_{ref} – referentna relativna vlažnost [%]

f_e – eksponent

g_e – eksponent.

Strogo gledano, relativna vlažnost karbonizovanog sloja se mora uzeti u obzir. S obzirom da je veoma teško obezbediti takve podatke, i zahvaljujući činjenici da se proces karbonizacije dešava od spoljne površine betona ka unutra, kao dovoljno tačni smatraju se podaci o relativnoj vlažnosti vazduha u okolini konstrukcije. Kao ulazni podaci za relativnu vlažnost karbonizovanog sloja RH_{real} mogu se koristiti podaci iz najbliže meteorološke stanice. Kako relativna vlažnost varira u vrednostima od 0 do 100%, ograničena raspodela sa gornjom granicom treba da se koristi za opisivanje ova promenljive. U zavi-

Tabela 1. Proračunski upotrební vek u funkciji vrste objekta [3]

proračunski upotrební vek [god]	Primeri
10	Privremene konstrukcije (konstrukcije ili delovi konstrukcije koje se mogu raskopiti pa sa stanovišta ponovne upotrebe ne bi se trebalo smatrati privremenim)
10 - 25	Zamenjivi delovi konstrukcije (portalni nosači, ležišta)
15 - 30	Poljoprivredni i slični objekti
50	Zgrade i druge uobičajene konstrukcije
100	Monumentalne konstrukcije zgrada, mostovi i drugi građevinski objekti

snosti od geografske oblasti, donja granica relativne vlažnosti može biti značajno različita od nule. U takvom slučaju čini se razumnim da se grupe podataka opišu pomoću funkcije raspodele sa gornjom i donjom granicom, na primer beta ili Weibull- ovom raspodelom. Referentna relativna vlažnost mora da se uzme u saglasnosti sa uslovima testa za određivanje otpornosti betona na karbonizaciju. Za preporučeni ACC test (opisan u okviru poglavlja 2.1.5), referentne vrednosti su $T = +20^{\circ}\text{C}$ i $RH = 65\%$. Dakle, RH_{ref} je konstantan parametar koji ima vrednost 65. Parametri g_e , f_e imaju konstantne vrednosti 2,5 i 5,0 respektivno.

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c} \quad (5)$$

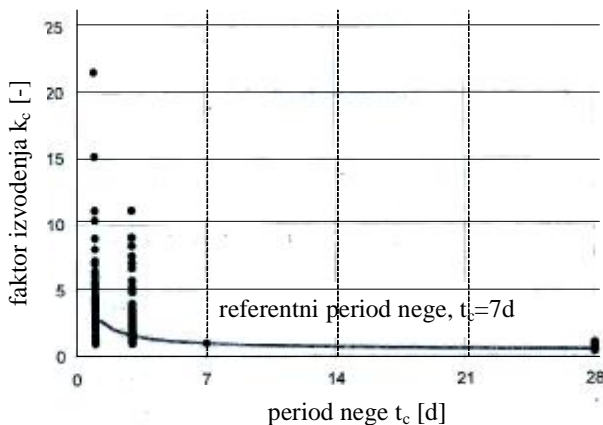
gde je:

- k_c - parametar izvođenja
- b_c - eksponent regresije
- t_c - period negovanja [dani].

Promenljiva b_c može se opisati pomoću normalne raspodele sa srednjom vrednošću od $\mu = -0,567$ i standardnom devijacijom $\sigma = 0,024$, dok je t_c konstantan parametar čija je vrednost jednaka periodu nege izraženim u danima.

2.1.4 Parametar izvođenja k_c

Parametar izvođenja k_c uzima u obzir uticaj nege na efektivnu otpornost betona na karbonizaciju. U ovom kontekstu, sve veličine koje se odnose na prevenciju prevremenog sušenja betona blizu površine, smatraju se parametrima nege. Dijagram na slici 1 ilustruje uticaj trajanja nege na efekte nege.



Slika 1. Faktor izvođenja u zavisnosti od trajanja nege betona [7]

Statistička kvantifikacija parametara k_c je izvedena prema Bayes-ovoj jednačini:

2.1.5 Inverzna karbonizaciona otpornost $R_{ACC,0}^{-1}$

U jednačini (3) za proračun dubine karbonizacije, kao jedan od faktora figuriše inverzna vrednost karbonizacione otpornosti betona. Usvojeno je da se karbonizaciona otpornost betona određuje ubrzanim karbonizacionim testovima (ACC test), prema kojima se laboratorijski čuvani uzorci testiraju pod definisanim uslovima u referentnom vremenu t_0 . Izvođenje ACC testa podrazumeva sledeće procedure:

- Proizvodnja betonskih uzoraka sa dimenzijama visina/širina/dužina = 100/100/150 [mm].
- Nakon uklanjanja oplata uzorci se potapaju u vodu sa temperaturom od $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$ tokom sedam dana (referentna nega).
- Nakon sedam dana, uzorci se vade iz vode i čuvaju narednih 21 dan u standardizovanim klimatskim uslovima ($T_{ref} = +20^{\circ}\text{C}$ i $RH = 65\%$).
- Nakon 28 dana ($t_{ref} = 28$ d) uzorci se polažu u komoru za karbonizaciju sa standardizovanim klimatskim uslovima ($T_{ref} = +20^{\circ}\text{C}$ i $RH = 65\%$). U komori, uzorci su izloženi koncentraciji CO_2 od $C_S = 2,0$ vol.-% tokom 28 dana.
- Nakon vađenja iz komore uzorci se lome i meri se dubina karbonizacije u ravni loma sa indikatorom rastvora koji sadrži 1,0g fenolfaleina po litru.
- Na osnovu izmerene dubine karbonizacije može se odrediti srednja vrednost inverzne karbonizacione otpornosti, prema sledećoj jednačini:

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{t} \right)^2 \quad (6)$$

gde je:

$R_{ACC,0}^{-1}$ – inverzna karbonizaciona otpornost betona [(m²/s)/(kg/m³)]

t – vremenska konstanta [(s/(kg/m³)^{0,5}], za opisane uslove, $t = 420$

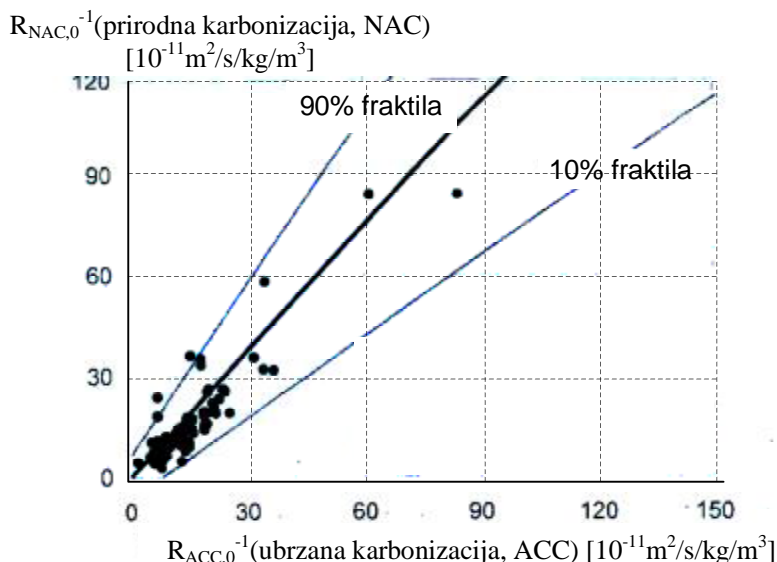
x_c – merena dubina karbonizacije [m].

Parametar $R_{ACC,0}^{-1}$ se može opisati funkcijom normalne raspodele čija je srednja vrednost data

jednačinom (6), a standardno odstupanje se računa pomoću izraza:

$$R_{ACC,0}^{-1} \text{ standardna devijacija} = 0,69 \times R_{ACC,0}^{-1} \text{ srednja vrednost}^{0,78} \quad (7)$$

Ukoliko ne postoje rezultati testa, kao približne vrednosti se mogu koristiti podaci iz literature [7]. Odnos između inverzne karbonizacione otpornosti određene pod prirodnim uslovima ($R_{NAC,0}^{-1}$) i ubrzanim testovima ($R_{ACC,0}^{-1}$) ilustrovan je na slici 2.



Slika 2. Odnos između inverzne karbonizacione otpornosti dobijene pod prirodnim uslovima i putem ubrzanog testa [7]

Inverzna karbonizaciona otpornost $R_{NAC,0}^{-1}$ određena pod prirodnim karbonizacionim uslovima biće veća od odgovarajuće otpornosti određene ACC testom za oko 25%. Ovo se može objasniti činjenicom da kod ubrzanog testa, sušenje ne prodire tako duboko u beton kao što je to slučaj kod betona u prirodnim uslovima ($T = +20^\circ\text{C}$ i $RH = 65\%$), što će malo usporiti proces karbonizacije pod ACC uslovima. Za veoma suve betone, ovo bi dalo teorijsku vrednost $R_{ACC,0}^{-1} = 0$. Kako beton nema beskonačnu otpornost, uveden je takozvani faktor greške $\varepsilon_t > 0$. Analitički izraz za vezu između inverznih karbonizacionih otpornosti betona pod laboratorijskim i prirodnim uslovima glasi:

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \quad (8)$$

gde je:

$R_{ACC,0}^{-1}$ – inverzna karbonizaciona otpornost suvog betona određena u određenom trenutku vremena t_0 na uzorcima, pomoću ubrzanog karbonizacionog testa ACC [(mm²/god)/(kg/m³)]

$R_{NAC,0}^{-1}$ – inverzna karbonizaciona otpornost suvog betona ($RH = 65\%$), određena u određenom trenutku vremena t_0 na uzorcima, pomoću prirodnog karbonizacionog testa NAC [(mm²/god)/(kg/m³)]

k_t – parametar regresije koji uzima u obzir uticaj ubrzanog testa na rezultate dobijene pod prirodnim uslovima

ε_t – faktor greške koji uzima u obzir netačnosti koje se dešavaju povremeno kada se koristi ACC test [(mm²/god)/(kg/m³)].

Parametar regresije k_t opisuje se normalnom raspedelom sa srednjom vrednošću $\mu = 1,25$ i standardnom devijacijom $\sigma = 0,35$, dok faktor greške, ε_t , za istu statističku raspodelu ima srednju vrednost $\mu = 315,5$ i standardno odstupanje $\sigma = 48$.

2.1.6 Uticaj sredine C_S

Koncentracija CO₂ u vazduhu predstavlja direktan uticaj sredine na betonske konstrukcije. Ovaj uticaj se može opisati sledećom jednačinom:

$$C_S = C_{S,atm.} + C_{S,emi.} \quad (9)$$

gde je:

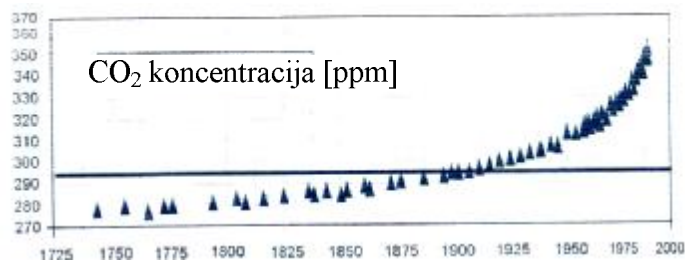
C_S – koncentracija CO₂ u vazduhu [kg/m³]

$C_{S,atm.}$ – koncentracija CO₂ u atmosferi [kg/m³]

$C_{S,emi.}$ – dodatna koncentracija CO₂ u vazduhu od emisionih izvora [kg/m³].

Povećanje CO₂ koncentracije se može primeniti kod, na primer, tunelskih konstrukcija ili kod konstrukcija koje su izložene radu motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Za uobičajene konstrukcije, prethodna jednačina se može redukovati na:

$$C_S = C_{S,atm.} \quad (10)$$



Slika 3. Porast srednje koncentracije CO₂ u atmosferi [7]

Trenutni sadržaj CO₂ u atmosferi nalazi se u granicama od 350 do 380 ppm (engl. *parts per million*). Ovo odgovara koncentraciji od 0,00057 do 0,00062 kg/m³. Standardno odstupanje sadržaja CO₂ je skoro konstanta sa maksimalnom vrednošću od 10 ppm. Ekstrapolacijom srednje koncentracije CO₂ u atmosferi (slika 3), dobija se očekivano povećanje koncentracije od 1,5 ppm po godini. Na osnovu predhodnih procena usvojeno je da se veličina C_{S,atm} [kg/m³] opiše funkcijom normalne raspodele sa srednjom vrednošću od μ=0,00082 i standardnim odstupanjem od σ = 0,0001.

2.1.7 Funkcija vremenskih prilika

Funkcija vremenskih prilika *W* uzima u obzir lokalne klimatske uslove na spoljašnjim površinama posmatranog elementa konstrukcije, usled vlaženja površine betona:

$$W = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^w \quad (11)$$

gde je:

*t*₀ – referentno vreme [god], konstantan parametar čija je vrednost 0,0767

w – eksponent vremena

ToW – vreme vlaženja :

$$ToW = \frac{\text{broj_kišnih_dana_u_godini}}{365} \quad (12)$$

*p*_{SR} – verovatnoća jake kiše

*b*_w – eksponent regresije, sa srednjom vrednošću od μ=0,446 i standardnim odstupanjem od σ = 0,163, pri normalnoj raspodeli.

Efekat kiše na otpornost betona na karbonizaciju zavisi od orijentacije i geometrijskih karakteristika konstrukcije, i da bi se on odredio, potrebno je kvantifikovati vreme vlaženja *ToW* i verovatnoću jake kiše *p*_{SR}. Vreme vlaženja je prosečan broj kišnih dana u godini. Kišni dan se definiše kao dan sa minimalnom količinom padavina od 2,5 mm/m². Podaci za određivanje parametra *ToW* se mogu prikupiti obradom podataka iz najbliže meteorološke stanice. S druge strane, verovatnoća jake kiše definiše se kao "prosečna raspodela pravca duvanja vetra tokom padanja kiše" [7]. Ukoliko se razmatraju vertikalni elementi konstrukcije, parametar *p*_{SR} treba da se odredi na osnovu podataka iz najbliže meteorološke stanice, dok za horizontalne elemente ima vrednost 1,0. U slučaju unutrašnjih elemenata, tj. elemenata koji nisu izloženi dejstvu kiše, *p*_{SR}=0.

3 PRORAČUNSKI DOKAZ GRANIČNOG STANJA DEPASIVIZACIJE ARMATURE USLED KARBONIZACIJE, PRIMENOM METODE PARCIJALNIH KOEFICIJENATA SIGURNOSTI

Proračunski dokaz primenom metode parcijalnih koeficijenata sigurnosti za koroziju usled karbonizacije, granično stanje depasivizacije armature, prezentovan u ovom poglavlju, zasniva se na punom probablističkom pristupu koji je opisan u prethodnom poglavlju. Cilj primene metode parcijalnih koeficijenata je da se omogući, da se projektovanje prema zahtevima trajnosti (upotrebnom veku) sprovodi kao jednostavan dokaz, bez dodatnih razmatranja koja se odnose na probablističke raspodele ulaznih parametara. Razlika u pristupu dimenzionisanja zaštitnog sloja koji je ovde predstavljen i veličina koje se koriste u današnjoj praksi, uočljiva je na slici 4.

Na slici 4 korišćene su sledeće oznake:

min c – minimalni zaštitni sloj [mm],

nom c – nominalni zaštitni sloj [mm],

Δc – oblast između minimalnog i nominalnog zaštitnog sloja [mm],

*x*_{c,m}(*t*) – srednja vrednost dubine karbonizacije u vremenu *t* [mm],

*x*_{c,d}(*t*) – proračunska vrednost dubine karbonizacije u vremenu *t* [mm].

Element konstrukcije ispunjava zahteve trajnosti kada je u pitanju korozija usled karbonizacije, granično stanje depasivizacije, ukoliko je ispunjena jednačina graničnog stanja:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0 \quad (13)$$

gde je:

*a*_d – proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja [mm]

*x*_{c,d}(*t*_{SL}) – proračunska vrednost dubine karbonizacije u vremenu *t*_{SL} [mm].

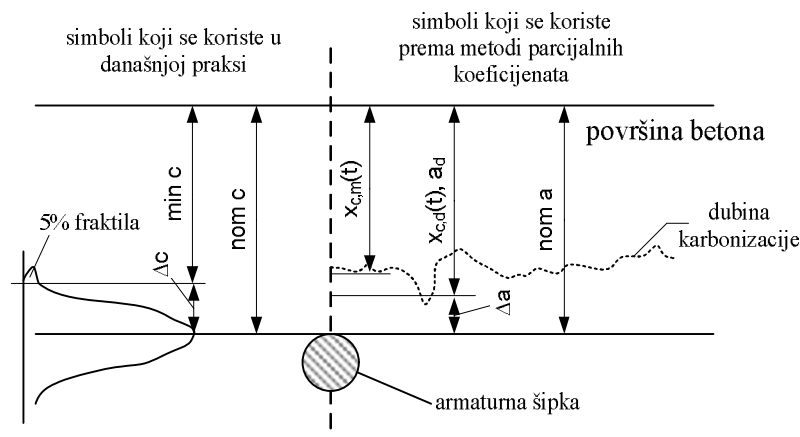
Proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja se računa kao:

$$a_d = a_k - \Delta a \quad (14)$$

gde je:

*a*_k – karakteristična vrednost debljine zaštitnog sloja [mm],

Δa – sigurnosna rezerva debljine zaštitnog sloja [mm].



Slika 4. Simboli koji se koriste u današnjoj praksi i prema metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti

Proračunska vrednost dubine karbonizacije u vremenu t_{SL} , $x_{c,d}(t_{SL})$ se računa kao:

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R^{-1}_{ACC,0,k} \cdot g_R + e_{t,d}) \cdot C_{S,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})} \quad (15)$$

gde je:

t_{SL} – proračunski upotrebnii vek [godine]
 $k_{e,d}$ – proračunska vrednost funkcije okoline

$$k_{e,d} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real,k}}{g_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (16)$$

$RH_{real,k}$ – karakteristična vrednost relativne vlažnosti karbonizovanog sloja [%]

RH_{ref} – referentna relativna vlažnost [%]

f_e , g_e – eksponenti sa vrednostima 5,0 i 2,5, respektivno

γ_{RH} – parcijalni koeficijent sigurnosti za relativnu vlažnost RH_{real}

$k_{c,d}$ – proračunska vrednost parametra izvođenja, koja se računa prema izrazu (12) za odgovarajući period nege

γ_R – parcijalni koeficijent sigurnosti za inverznu otpornost na karbonizaciju $R^{-1}_{ACC,0,k}$

Može se uočiti da je izraz za određivanje dubine karbonizacije prema metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti (15) gotovo identičan izrazu koji određuje istu veličinu putem pune probabilističke metode (3). Jedina razlika je što se u izrazu (15) koriste proračunske vrednosti parametara (engl. *design value*). Kao proračunske vrednosti uzimaju se ili srednje vrednosti veličina čija je kvantifikacija prikazana u poglavlju 2.1 ili, za ključne parametre, karakteristične vrednosti pomnožene odgovarajućim koeficijentima sigurnosti.

4 PRIMER PRORAČUNA POTREBNE DEBLJINE ZAŠITNOG SLOJA BETONA IZLOŽENOG KARBONIZACIJI

U brojnom primeru koji sledi, primenom metode parcijalnih koeficijenata sigurnosti, tj. korišćenjem jednačine (13), sračunata je potrebna debljina zašitnog sloja u funkciji željenog upotrebnog veka konstrukcije, tj. vremena izloženosti konstrukcije procesu karbonizacije. Konstrukcija u ovom primeru predstavlja vertikalni fasadni element napravljen od betona sa vodocementnim faktorom $w/c=0,6$, koji je izložen naizmeničnom vlaženju i sušenju u klimatskom području Srednje Evrope.

Parcijalni koeficijenti sigurnosti kojima se obuhvata probablistička priroda parametara treba da se odrede saglasno standardu ISO 2394: 1998 (Opšti principi pouzdanosti konstrukcija, engl. *General principles on reliability for structures*) [7]. Standard definiše proceduru parametarske studije kojom se određuju ključni parametri posmatranog mehanizma. Za proces karbonizacije koji je u ovom radu razmatran, utvrđeno je da su ključni parametri - funkcija okoline k_e , debljina zašitnog sloja a , kao i inverzna karbonizaciona otpornost betona određena ubrzanim testovima $R_{ACC,0}^{-1}$. Za te parametre uvedeni su koeficijenti sigurnosti γ_{RH} , γ_R , i sigurnosna rezerva Δa . Vrednosti koeficijenata sigurnosti koje su date u tabeli 2 su sračunate za upotrebnii vek od $t_{SL}=50$ godina i za indeks pouzdanosti $\beta=1,3$. Ovaj indeks pouzdanosti odgovara graničnom stanju "depasivizacija armature usled karbonizacije", koje je u ovom primeru definisano kao granično stanje upotrebljivosti, SLS, [8]. Dakle, ukoliko se želi veća pouzdanost, ili izabrano granično stanje može uticati na lom konstrukcije pa pripada graničnim stanjima nosivosti (ULS), moraju se modifikovati (povećati) parcijalni koeficijenti u skladu sa procedurama standarda ISO 2394.

Za sledeće parametre koji se ne smatraju ključnim, kao proračunske vrednosti se usvajaju srednje vrednosti odgovarajućih veličina:

$k_{t,d}$ – proračunska vrednost parametra regresije, $k_{t,d}=1,25$

$\varepsilon_{t,d}$ – proračunska vrednost faktora greške, $\varepsilon_{t,d}=315,5$

$C_{S,d}$ – proračunska vrednost koncentracije CO₂ [kg/m³], $C_{S,d} = 0,00082$

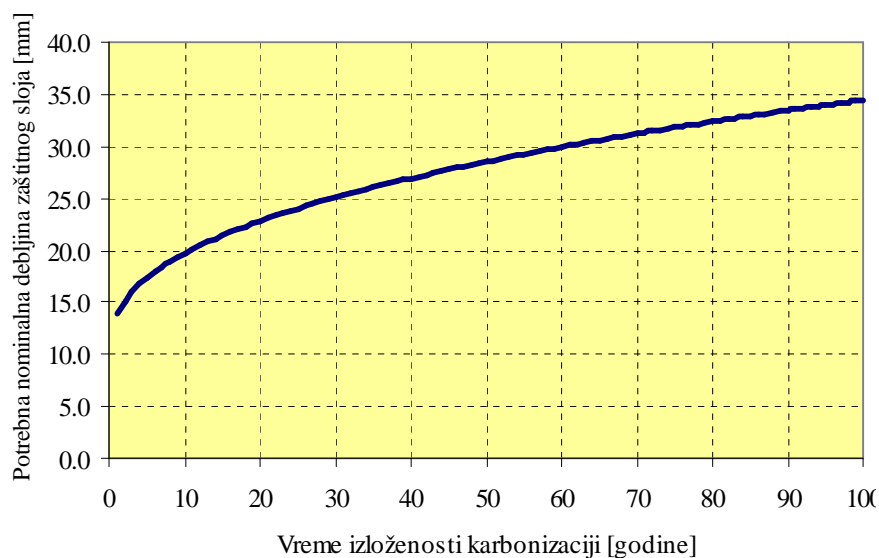
$b_{w,d}$ – proračunska vrednost eksponenta regresije, $b_{w,d} = 0,446$

Prikupljeni podaci koji se odnose na sredinu, difuzione karakteristike betona i nege betona, prikazani

su u tabeli 2, a dijagram zavisnosti nominalne debljine zaštitnog sloja od vremena izloženosti konstrukcije karbonizaciji prema jednačini (15), prikazan je na slici 5. Nominalna debljina zaštitnog sloja jednaka je zbiru proračunske vrednosti a_d i sigurnosne rezerve Δa .

Tabela 2. Ulazni podaci za sračunavanje dubine karbonizacije

Parametar		Jedinica	Ulazni podatak
$k_{e,d}$	RH _{real,k}	[% rel. vlažnosti]	80
	RH _{ref}	[% rel. vlažnosti]	65
	γ_{RH}	[-]	1.3
	g_e	[-]	2.5
	f_e	[-]	5.0
$k_{c,d}$	b_c	[-]	-0.567
	t_c	[dan]	3.0
$R_{NAC,0,d}^{-1}$	$k_{t,d}$	[-]	1.25
	$R_{ACC,0,k}^{-1}$	[(mm ² /god)/(kgCO ₂ /m ³)]	4500
	γ_R	[-]	1.5
	$\epsilon_{t,d}$	[(mm ² /god)/(kgCO ₂ /m ³)]	315.5
$C_{S,d}$		[kgCO ₂ /m ³]	0.00082
t_{SL}		[godine]	100
W	ToW	[-]	0.27
	$b_{w,d}$	[-]	0.446
	p _{SR}	[-]	0.1
	t_0	[god]	0.0767
a_d	a_{nom}	[mm]	?
	Δa	[mm]	10



Slika 5. Debljina zaštitnog sloja betona u funkciji vremena izloženosti procesu karbonizacije

5 PRORAČUNSKI DOKAZ GRANIČNOG STANJA DEPASIVIZACIJE ARMATURE USLED PENETRACIJE HLORIDA, PRIMENOM PUNE PROBABILISTIČKE METODE

U jednačini graničnog stanja za depasivizaciju armature usled penetracije hlorida, verovatnoća pojave koncentracije hlorida u betonu veće od kritične vrednosti koncentracije, treba da bude manja od neke ciljne vrednosti p_0 :

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{C_{crit} - C(a, t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (17)$$

odnosno, može se reći da depasivizacija armature počinje u trenutku kada koncentracija hlorida u betonu zaštitnog sloja dostigne kritičnu vrednost:

$$C_{crit} = C(x=a, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right] \quad (18)$$

gde je:

- C_{crit} – kritični sadržaj hlorida [tež.-%/beton],
- $C(x,t)$ – sadržaj hlorida u betonu na dubini x (površina betona: $x=0$) i u vremenu t [tež.-%/beton],
- C_0 – inicijalni sadržaj hlorida u betonu [tež.-%/c],
- $C_{S,\Delta x}$ – sadržaj hlorida u betonu na dubini Δx , u određenom trenutku vremena t [tež.-%/beton],
- x – dubina sa odgovarajućim sadržajem hlorida $C(x,t)$,
- a – debljina zaštitnog sloja [mm],
- Δx – dubina konvekcione zone [mm],
- $D_{app,C}$ – koeficijent difuzije hlorida kroz beton [mm^2/god],
- t – vreme [god],
- erf – funkcija greške (engl. *error function*).

Jednačina za proračun kritičnog sadržaja hlorida (18), kao i jednačina za proračun dubine karbonizacije (3), razvijena je u okviru pomenutih evropskih istraživačkih projekata posvećenih trajnosti betona: DuraCrete i Darts [2], [7].

Model kojim se opisuje mehanizam penetracije hlorida zasniva se na zakonima difuzije (2. Fikov zakon), uzimajući u obzir da većina istraživanja ukazuje na to da je prenos hlorida kroz beton difuziono kontrolisan. Površina betona je često izložena naizmjeničnim promenama vlažnosti i isparavanju pa se ova zona obično smatra za konvekcionsku zonu. S obzirom da u ovoj zoni prenosni mehanizam nije difuziono kontrolisan, primena zakona difuzije ne daje dobru aproksimaciju penetracije hlorida. Da bi se penetracija hlorida ipak opisala pomoću pomenutog zakona, podaci iz konvekcione zone se zanemaruju i 2. Fikov zakon se primenjuje počevši od rastojanja Δx od površine betona ($x \geq \Delta x$), sa zamenjujućom površinskom koncentracijom $C_{S,\Delta x}$.

Uobičajeno je da se koeficijent difuzije hlorida kroz beton ($D_{app,C}$) određuje primenom "Metode hloridnog profila" (engl. *Chloride profiling method*), [7]. Na ovaj način određen koeficijent ima konstantnu vrednost koja reprezentuje prosek za period vremena od početka izloženosti dejstvu hlorida do trenutka kada je uzet profil. Hloridni profil može biti uzet sa postojećih konstrukcija ili određen na uzorcima koji su čuvani u laboratoriji pod uslovima koji se očekuju u praksi. Kada se koeficijent $D_{app,C}$ određuje na postojećoj konstrukciji, minimalno vreme izloženosti hloridima je obično nekoliko meseci,

kako bi se dobili pouzdani podaci. S druge strane, određivanje koeficijenta $D_{app,C}$ na laboratorijskim uzorcima (pri projektovanju novih konstrukcija) je takođe vremenski zametan posao, pa se često pribegava empirijskim izrazima koji daju vezu između koeficijenta difuzije $D_{app,C}$ i koeficijenta migracije hlorida $D_{RCM,0}$:

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (19)$$

gde je:

- k_e – parametar prenosa uticaja sredine,
- $D_{RCM,0}$ – koeficijent migracije hlorida [mm^2/god],
- k_t – parametar prenosa,
- $A(t)$ – podfunkcija koje se odnosi na starenje.

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (20)$$

a – eksponent starenja,

t_0 – referentni trenutak vremena [god].

Pri tome se koeficijent migracije hlorida $D_{RCM,0}$ određuje na uzorcima u laboratoriji primenom neke od ubrzanih metoda (engl. *rapid test methods*), a zatim koriguje parametrima kojima se uvodi u obzir uticaj stvarne temperature okoline (k_e) i uticaj starosti betona (k_t). Kako se ovi parametri određuju na osnovu poređenja rezultata ubrzanih testova i velikog broja hloridnih profila uzetih sa postojećih konstrukcija, na taj način se vrši kalibracija ubrzanih testova prema "Metodi hloridnog profila", koja se obavlja pod prirodnim uslovima.

5.1 Kvantifikacija parametara

5.1.1 Koeficijent migracije hlorida $D_{RCM,0}$

Koeficijent migracije hlorida $D_{RCM,0}$ je jedan od najznačajnijih parametara za opisivanje karakteristika materijala u modelu za koroziju armature usled penetracije hlorida. Odgovarajući podaci za koeficijent $D_{RCM,0}$ mogu se obezbediti iz literature i koristiti kao početne promenljive u proračunu s obzirom na upotrebnost konstrukcije. Međutim, ukoliko se radi sa specijalnim betonskim mešavinama, sa veoma niskim vodocementnim faktorima i visokim sadržajem plastifikatora, kvantitativni rezultati iz literature nisu dostupni. Zato je izuzetno važno da se kroz osnovne testove odredi kvalitet materijala koji će se koristiti, da bi se utvrdila podesnost projektovane betonske mešavine.

Među mnogim metodama za određivanje koeficijenta migracije hlorida, Rapid Chloride Migration method (RCM) pokazao se kao teorijski jasan, eksperimentalno jednostavan i što se tiče preciznosti i ponovljivosti, zadovoljavajućim oruđem. Suština metode ogleda se u nanošenju spoljašnjeg napona aksijalno kroz uzorak što izaziva migraciju hloridnih jona iz rastvora soli, NaCl u uzorak. Posle određenog vremena, uzorak se podužno deli na dva dela i na jednu od strana se nanosi srebrni rastvor nitrata. Usled reakcije koja se dešava, delovi betona koji su zasićeni hloridnim jonima postaju belo obojeni. Meranjem dubine penetracije hlorida može se sračunati traženi koeficijent [12].

Ukoliko se ne raspolaze sa rezultatima testa, u orijentacione svrhe za srednje vrednosti koeficijenta

$D_{RCM,0}$ mogu se koristiti podaci iz tabele 3, dok je standardno odstupanje definisano jednačinom:

$$\sigma = 0,2 \cdot \mu \quad (21)$$

gde je:

σ – standardno odstupanje za $D_{RCM,0}$,

μ – srednja vrednost za $D_{RCM,0}$.

5.1.2 Parametar prenosa i eksponent starenja

Koeficijent difuzije $D_{app,C}$ je podložan značajnom rasipanju vrednosti i ima tendenciju opadanja vrednosti sa povećanjem vremena izloženosti. Uzimajući ovo u obzir prilikom modeliranja inicijalnog procesa, uveden je parametar prenosa k_t u kombinaciji sa takozvanim eksponentom starenja α . Funkcionalna veza između perioda izloženosti t i koeficijenta difuzije $D_{app,C}$, za tri različita tipa cementa prikazana je u sledećoj tabeli. Statistička kvantifikacija eksponenta starenja urađena je na osnovu poređenja vrednosti za $D_{app,C}$ dobijenih iz hloridnog profila betona postojećih konstrukcija i rezultata RCM testa.

Podaci iz tabele se odnose na uslove izloženosti koji se označavaju kao “zona zapljuskivanja” (engl. *splash zone*), “plimska zona” (engl. *tidal zone*), i “potopljena zona” (engl. *submerged zone*), ali usvojeno na strani sigurnosti, takođe se može primeniti za “zonu prskanja”

(engl. *spray zone*), i “atmosfersku zonu” (engl. *atmospheric zone*), izloženosti.

Eksponent starenja koji odgovara jednačini (20) i tabeli 4, ne može se izmeriti RCM testom. RCM test daje eksponent starenja koji predstavlja samo određeni deo čitavog efekta, a koji se odnosi na povećanu otpornost penetraciji hlorida usled hidratacije betona koja se dešava istovremeno. Ukoliko postoji potreba da se preciznije odredi efekat starenja na otpornost betona, mogu se sprovesti dodatni testovi pri starosti uzorka od 56 ili 90 dana.

Da bi se izvršila kvantifikacija eksponenta starenja, vrednost parametra k_t je usvojena kao konstanta, $k_t=1,0$. Referentni period vremena je izabran da bude $t_0=0,0767$ god ($t_0=28$ d).

5.1.3 Parametar prenosa uticaja sredine k_e

Parametar prenosa uticaja sredine k_e je uveden da bi se uzeo u obzir uticaj stvarne temperature T_{real} na difuzioni koeficijent. Taj uticaj je opisan Arrhenius-ovom jednačinom:

$$k_e = \exp \left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (22)$$

Tabela 3. Srednje vrednosti koeficijenta migracije hlorida za različite betonske mešavine [7]

$D_{RCM,0}$ [m^2/s]	$w/c_{eqv.}^{-1}$					
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
tip cementa						
CEM I 42.5 R	n.d. ²	$8.9 \cdot 10^{-12}$	$10.0 \cdot 10^{-12}$	$15.8 \cdot 10^{-12}$	$19.7 \cdot 10^{-12}$	$25.0 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + FA (k=0.5)	n.d. ²	$5.6 \cdot 10^{-12}$	$6.9 \cdot 10^{-12}$	$9.0 \cdot 10^{-12}$	$10.9 \cdot 10^{-12}$	$14.9 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + SF (k=2.0)	$4.4 \cdot 10^{-12}$	$4.8 \cdot 10^{-12}$	n.d. ²	n.d. ²	$5.3 \cdot 10^{-12}$	n.d. ²
CEM III/B 42.5	n.d. ²	$1.4 \cdot 10^{-12}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$	$2.8 \cdot 10^{-12}$	$3.0 \cdot 10^{-12}$	$3.4 \cdot 10^{-12}$

¹ ekvivalentni vodocementni faktor, uzimajući u obzir FA (leteći pepeo) ili SF (silikatna prašina) preko faktora uticaja k: u razmatranim mešavinama, sadržaj letećeg pepela je 22 % tež. u odnosu na cement, odnosno silikatne prašine 5 % tež. u odnosu na cement

² koeficijent migracije hlorida nije određen za ove betonske mešavine

Tabela 4. Statistička kvantifikacija eksponenta starenja [7]

beton	eksponent starenja α^5
Beton na bazi Portland cementa CEM I: $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.30$; $s^2=0.12$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)
Beton na bazi Portland cementa sa letecim pepelom $f \geq 0.20$; $k=0.50$; CEM I: $0.40 \leq w/c_{eqv} \leq 0.62$	Beta ($m^1=0.60$; $s^2=0.15$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)
Beton na bazi cementa sa zgurom CEM III/B: $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.45$; $s^2=0.20$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)

¹ m – srednja vrednost

² s – standardno odstupanje

³ a – donja granica

⁴ b – gornja granica

⁵ kvantifikacija se može primeniti za klase izloženosti: “zona zapljuskivanja”, “plimska zona” i “potopljena zona”

gde je:

k_e – parametar prenosa uticaja sredine,

b_e – regresiona promenljiva [K],

T_{ref} – standardna test temperatura [K],

T_{real} – temperatura elementa konstrukcije ili okolnog vazduha [K].

Da bi se rešila ova jednačina neophodno je da se odrede pomenuti parametri. Vrednost regresione promenljive varira između $b_e = 3500$ K i $b_e = 5500$ K i opisana je srednjom vrednošću od $\mu = 4800$ i standardnom devijacijom $\sigma = 700$.

Temperatura elementa konstrukcije ili ambijentalnog vazduha je opisana vrednostima promenljive T_{real} . T_{real} se može odrediti korišćenjem statističkih podataka (srednje vrednosti i standardnog odstupanja) iz najbliže meteorološke stanice. Standardna (referentna) test temperatura T_{ref} je određena kao 293 K (=20°C) i može se smatrati konstantom.

5.1.4 Inicijalni sadržaj hlorida u betonu C_0

Sadržaj hlorida u betonu ne zavisi samo od propustljivosti hlorida sa površine, već i od hloridima zagađenog agregata, cementa ili vode koji se koriste za proizvodnju betona. Naročito ako se gradi u primorskim uslovima, sadržaj hlorida u sitnom i krupnom agregatu i vodi može biti značajan. Za razliku od raspodele sadržaja hlorida koji prodire sa površine betona, inicijalna količine hlorida po poprečnom preseku može se usvojiti kao ravnomerana.

5.1.5 Sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}$

Sadržaj hlorida na površini betona C_S , kao i sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini na dubini Δx , $C_{S,\Delta x}$, su promenljive koje zavise od karakteristika materijala, geometrije konstrukcije kao i od uslova sredine. Karakteristike materijala koje treba uzeti u obzir su prvenstveno tip veziva i sastav betona. Najvažnija promenljiva koja opisuje uticaj sredine je ekvivalentna

koncentracija hlorida u vazduhu. Osim toga, od značaja mogu biti geometrija konstruktivnog elementa i rastojanje od izvora hlorida. Sve pomenute promenljive imaju direktan uticaj na sadržaj hlorida na površini betona i na sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}$. Podaci potrebni da se odrede C_S i $C_{S,\Delta x}$ prikazani su na slici 6.

Parametar okoline zapravo kvantifikuje potencijalni uticaj okoline (koja sadrži hloride) na beton, imajući u vidu da dubina penetracije hlorida zavisi i od koncentracije hlorida na izvoru (morska voda, so za posipanje puteva.). Za konstrukcije u primorskom i priobalnom području, ovaj parametar koji se naziva potencijal hlorida, jednak je prirodnom sadržaju hlorida u morskoj vodi $C_{0,M}$.

$$C_{eqv} = C_{0,M} \quad (23)$$

gde je:

C_{eqv} – potencijal hlorida [g/l],

$C_{0,M}$ – prirodni sadržaj hlorida u morskoj vodi [g/l].

Za razliku od koncentracije hlorida u morskoj vodi $C_{0,M}$, varijacije koncentracije hlorida u vodi usled prisustva soli protiv smrzavanja $C_{0,R}$, su mnogo veće. Za konstrukcije koje u interakciju sa hloridnim jonima dolaze putem soli za posipanje puteva, odgovarajuća kvantifikacija C_{eqv} vrši se pomoću izraza:

$$C_{eqv} = C_{0,R} = \frac{n \cdot C_{R,i}}{h_{S,i}} \quad (24)$$

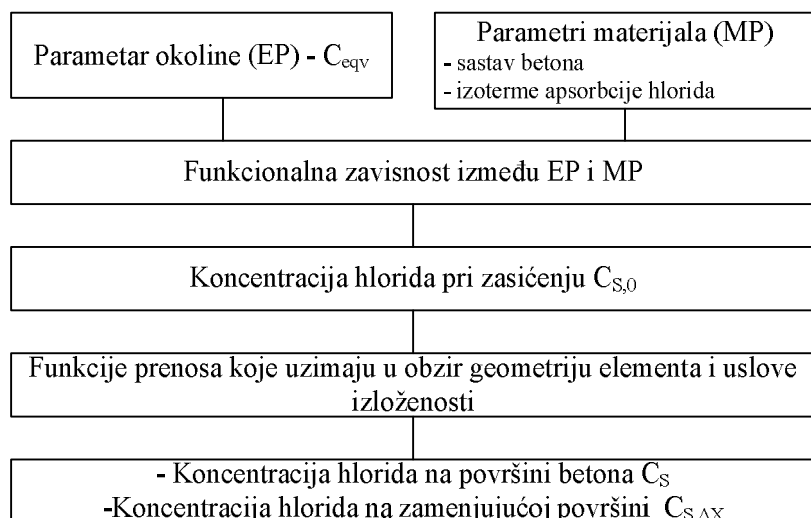
gde je:

$C_{0,R}$ – prosečan sadržaj hlorida u hloridno kontaminiranoj vodi [g/l],

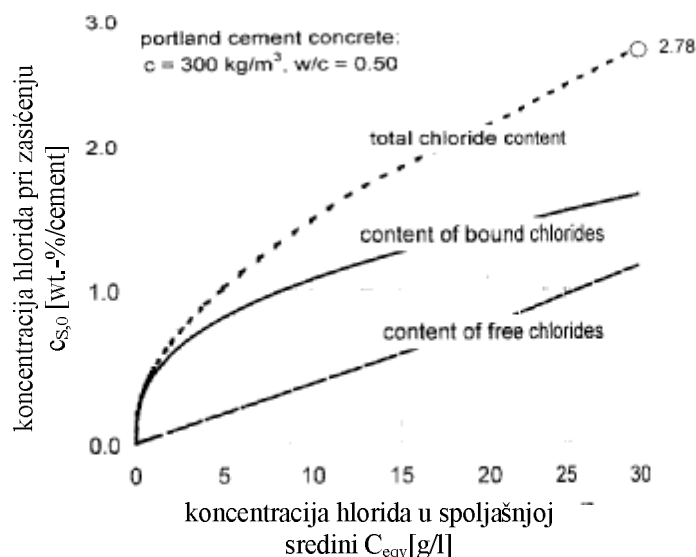
n – prosečan broj posipanja soli tokom godine,

$C_{R,i}$ – prosečna količina rasutih hlorida tokom jednog posipanja soli [g/m²],

$h_{S,i}$ – količina vode od kiše i otopljenog snega tokom jedne zimske sezone (dok traje posipanje soli) [l/m²].



Slika 6. Podaci potrebni za određivanje promenljivih C_S i $C_{S,\Delta x}$ [7]



Slika 7. Sadržaj hlorida na površini betona u zavisnosti od potencijala hlorida za beton od Portland cementa [7]

Da bi se sračunala vrednost koncentracije hlorida pri zasićenju, $C_{S,0}$, moraju biti određene karakteristike materijala kao što su izoterme apsorpcije hlorida, za cement koji se koristi i sastav betonske mešavine (slika 7). Ove karakteristike imaju izražen uticaj kako na fizički tako i na hemijski vezivni kapacitet materijala i zapreminu pora koje treba da se zasite do mere da je koncentracija hlorida u porama balansirana sa koncentracijom u sredini u kojoj se nalazi element konstrukcije.

Kada se odrede izoterme apsorpcije hlorida, sastav betona i potencijal hlorida (C_{eqv}), može se odrediti i koncentracija hlorida pri zasićenju, $C_{S,0}$. Slika 7 pokazuje korelaciju između $C_{S,0}$ i C_{eqv} za beton spravljen sa Portland cementom ($c = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0,5$).

Pod stalnim uticajem hlorida konstantne koncentracije, koncentracija zasićenosti hloridima $C_{S,0}$ na površini betona se često dostiže u relativno kratkom vremenskom periodu u poređenju sa projektovanim upotrebnim vekom ($C_{S,0} = C_S$). Uzimajući u obzir ovo, kao i rezultate istraživanja, može se izvršiti pojednostavljenje i smatrati da je sadržaj hlorida na površini betona C_S konstantan od početka, npr. za beton koji je stalno izložen uticajima morske vode. Ovo uprošćenje je na strani sigurnosti.

5.1.6 Funkcija prenosa Δx

Ako je element konstrukcije povremeno izložen dejstvu rastvora konstantne ili promenljive koncentracije hlorida, mora da se formuliše funkcija prenosa. Kod elemenata konstrukcije koji su povremeno izloženi dejstvu hloridom kontaminiranog rastvora, a u međuvremenu je omogućeno isparavanje vode iz betona blizu površine, svako naredno vlaženje uzrokuje proces kapilarnog upijanja. U poređenju sa difuzionim procesom, kapilarno upijanje dovodi do brzog prenosa hlorida kroz beton do dubine Δx , gde se hloridi mogu akumulirati tokom vremena dok se ne dostigne koncentracija zasićenja $C_{S,\Delta x} = C_{S,0}$.

Za betonske elemente koji se nalaze u "zoni zapljuskivanja", prosečna dubina do koje hloridi mogu brzo prodreti može biti ograničena sa: $6,0 \text{ mm} \leq \Delta x \leq 11,0 \text{ mm}$. Parametar Δx određuje se pomoću Beta raspodele (sa srednjom vrednošću od $\sigma = 5,6$, standardnim odstupanjem od $\mu = 8,9$, donjom granicom $a = 0,0$ i gornjom granicom od $b = 50,0$) za betonske elemente koji se nalaze u "zoni zapljuskivanja" bilo da se radi o priobalnim konstrukcijama, bilo da se radi o konstrukciji u blizini puta koji se posipa solju.

Ukoliko je rastojanje od površine puta koji se posipa solju do elementa čija se trajnost razmatra veća od 1,5m ("zona prskanja"), ne može se uočiti formiranje konvekcione zone, tj. $\Delta x = 0$.

Za delove konstrukcije koji su konstantno potopljeni ("potopljena zona"), površinska koncentracija C_S je jednaka koncentraciji zasićenja hloridima, koja se spontano razvija. Zbog toga, za ovaj specijalni slučaj, nikakva funkcija prenosa ili parametar prenosa nije potreban, odnosno $\Delta x = 0$.

Ako je konstrukcija izložena u "plimskoj zoni", treba da bude određena dubina do koje postoji odstupanje od difuzionog procesa saglasnog sa Fick-ovim rešenjem. Parametar Δx određuje se pomoću Beta raspodele, pri čemu treba odrediti parametre μ, σ i a i b .

5.1.7 Površinski sadržaj hlorida C_S i sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}$

Kontaminacija hloridima elementa konstrukcije u "zoni zapljuskivanja" ili "zoni prskanja" raste sa smanjenjem rastojanja od izvora hlorida. Ovo je potvrđeno i za horizontalna i za vertikalna rastojanja [7]. Iako je sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}(t)$ teorijski promenljiva veličina koja zavisi od vremena, u cilju pojednostavljenja, smatra se vremenski nezavisnom veličinom.

Za konstrukcije u "zoni zapljuskivanja", parametar $C_{S,\Delta x}$ se definiše kao maksimalni sadržaj hlorida C_{max} u okviru hloridnog profila.

Kako je iz testova proizašlo da za beton na rastojanju većem od 1,5 m od puta koji se posipa solju ("zona prskanja") nema razvoja konvekcione zone, to je sadržaj hlorida na površini betona C_s jednak maksimalnom sadržaju hlorida C_{max} .

Za potopljene konstrukcije sadržaj hlorida na površini betona C_s jednak je koncentraciji hlorida pri zasićenju $C_{s,0}$.

5.1.8 Kritični sadržaj hlorida C_{crit}

Kritični sadržaj hlorida, C_{crit} se definiše kao ukupni sadržaj hlorida koji vodi do depasivizacije površine armature i početnog rastvaranja gvozdene obloge armature (feroksida), [7]. Kako je donja granica promenljive C_{crit} definisana kao $C_{crit,min} = 0,20$ tež.-%/cement, čini se pogodnim koristiti Beta raspodelu sa donjom granicom za opis rezultata testa kojim se utvrđuje kritični sadržaj hlorida koji uzrokuje koroziju.. Parametri Beta raspodele su:

- srednja vrednost - $\mu = 0,60$ tež.-%/cement,
- standardno odstupanje - $\sigma = 0,15$,
- donja granica - $a = 0,2$ tež.-%/cement,
- gornja granica - $b = 2$ tež.-%/cement.

6 PRIMER PRORAČUNA POTREBNE DEBLJINE ZAŠTITNOG SLOJA BETONA IZLOŽENOG DEJSTVU HLORIDA

U primeru se razmatra pitanje trajnosti armiranobetonskih stubova mosta preko vodene prepreke (mora). Potrebno je odrediti neophodnu debljinu zaštitnog sloja, kao i vrednost debljine zaštitnog sloja u funkciji vremena izloženosti dejstvu hlorida, za zahtevani upotrebni vek od 100 godina i zahtevanu pouzdanost $\beta = 2,3$. Proračun se sprovodi poluprobabilističkom metodom, tj. metodom parcijalnih koeficijenata sigurnosti.

Dakle, zahtevana vrednost indeksa pouzdanosti u ovom primeru je $\beta = 2,3$. Parametri koji su od najvećeg uticaja na koncentraciju hlorida u betonu su površinska koncentracija hlorida i koeficijent difuzije hlorida. Za te dve promenljive su prema zahtevanom indeksu pouzdanosti kalibrisani koeficijenti sigurnosti i prikazani u tabeli 5 ($\gamma_{Cs} = 1,35$ i $\gamma_D = 2,2$), [2]. Površinska koncentracija hlorida i koeficijent difuzije su veličine koje definišu dejstvo hlorida na presek i po analogiji sa uticajem opterećenja kod proračuna nosivosti, množe se odgovarajućim koeficijentom sigurnosti. S druge strane, kritični sadržaj hlorida je pojam koji se može uporediti sa otpornošću preseka na dejstvo sila pri proračunu nosivosti, pa se ta veličina deli odgovarajućim koeficijentom sigurnosti. U ovom primeru, za zadati indeks pouzdanosti, koeficijent sigurnosti iznosi $\gamma_{Ccrit} = 1,05$ [2].

Polazi se od jednačine graničnog stanja (18). Potrebno je uporediti proračunsku vrednost kritične koncentracije hlorida u betonu sa sadržajem hlorida u zaštitnom sloju betona nakon difuzije sa spoljašnje površine betona. Radi pojednostavljenja proračuna usvojeno je da je vrednost inicijalne količine hlorida u betonu $C_0 = 0$, tj. sastav betonske mešavine je takav da u njemu ne postoje hloridi. S obzirom da su cilj ispitivanja

stubovi koji se tokom čitavog upotrebno veka nalaze u vodi (jednim delom u vodi, a jednim u neposrednoj blizini), kao zona uticaja hlorida za čitav stub može se usvojiti ili "potopljena zona" ili "zona prskanja". U tako definisanim zonama ne postoji konvekciona zona u kojoj ne važe zakoni difuzije, tj. $\Delta x = 0$, (poglavlje 5.1.6).

Uzimajući prethodno u obzir i primenjujući metodologiju proračuna sa parcijalnim koeficijentima sigurnosti, jednačina graničnog stanja se može napisati kao:

$$g = C_{crit}^d - C^d(x, t) \quad (25)$$

odnosno, trenutak depasivizacije armature i stvaranja uslova za koroziju je:

$$g = 0 \rightarrow C_{crit}^d = C^d(x, t) \quad (26)$$

gde je:

C_{crit}^d – proračunska kritična vrednost koncentracije hlorida

$C^d(x, t)$ – proračunska vrednost koncentracije hlorida na rastojanju x od spoljašnje površine betona nakon vremena t izloženosti dejstvu hlorida

Prethodna jednačina, uz $x=a$, se može napisati kao:

$$C_{crit}^d = C_s^d \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a^d}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C}^d(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (27)$$

gde je:

C_s^d – proračunska vrednost koncentracije hlorida na površini betona

erf – funkcija greške - $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt$

a^d – proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja

$D_{app,C}^d$ – proračunska vrednost koeficijenta difuzije hlorida

t – vreme izloženosti betona dejstvu hlorida

Zamenjujući vrednost za $D_{app,C}$ prema izrazu (19), dobija se:

$$C_{crit}^d = C_s^d \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a_{nom} - \Delta a}{2 \cdot \sqrt{k_e \cdot D_{RCM,0}^d \cdot k_t \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \cdot t}} \right) \right] \quad (28)$$

odnosno, uvodeći parcijalne koeficijente sigurnosti za ključne parametre:

$$\frac{C_{crit}^c}{g_{Ccrit}} = (C_s^c \cdot g_{Cs}) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a_{nom} - \Delta a}{2 \cdot \sqrt{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \cdot g_D \cdot t}} \right) \right] \quad (29)$$

gde gornji indeks c označava karakterističnu vrednost pojedinih parametara.

Traženu veličinu, tj. nominalnu debljinu zaštitnog sloja, na kraju dobijamo kao:

$$a_{nom} = erf^{-1} \left(1 - \frac{C_{crit}^c}{g_{C_{crit}}} \cdot \frac{1}{C_S^c \cdot g_{C_S}} \right) \cdot 2 \cdot \sqrt{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot g_D \cdot t + Da} \quad (30)$$

gde je erf^{-1} inverzna funkcija funkcije greške.

$$t = \left[\frac{2}{a_{nom} - \Delta a} \cdot erf^{-1} \left(1 - \frac{C_{crit}^c}{g_{C_{crit}}} \cdot \frac{1}{C_S^c \cdot g_{C_S}} \right) \right]^2 \cdot \frac{1}{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot g_D} \quad (31)$$

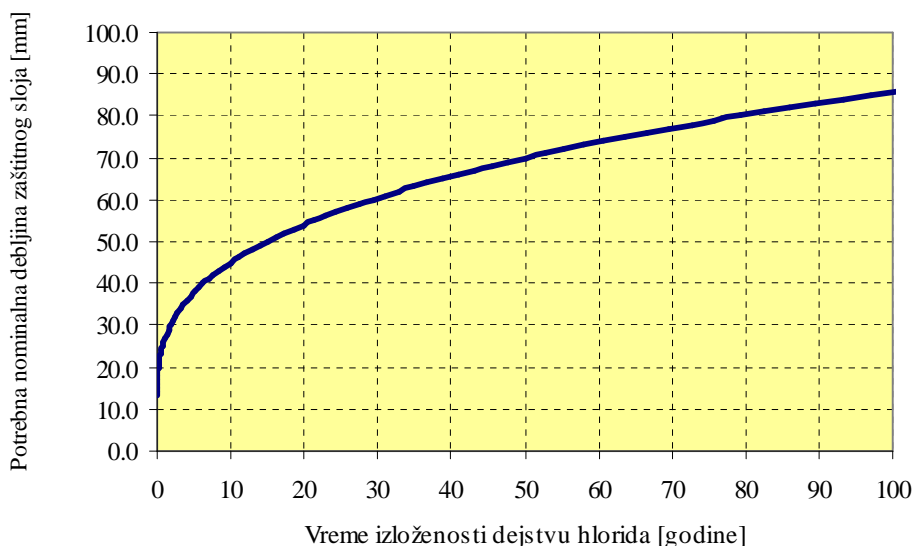
U tabeli 5 prikazane su vrednosti parametara i koeficijena sigurnosti koji su korišćeni u brojnom primeru. Zamenjujući vrednosti iz tabele 5 u prethodni izraz, dobija se potrebna nominalna debljina zaštitnog sloja betona od 86 mm, za stub izložen dejstvu hlorida, čiji je zahtevani upotrebnii vek 100 god.

Ukoliko je poznata nominalna debljina zaštitnog sloja i ostali podaci iz tabele, iz izraza se može sračunati dužina trajanja upotrebnog veka konstrukcije i uporediti sa postavljenim zahtevom:

Tabela 5. Ulazni podaci za sračunavanje potrebne debljine zaštitnog sloja betona u uslovima hloridno agresivne sredine

Parametar		Jedinica	Ulazni podatak
C_{crit}^d	C_{cr}	[tež.%/beton]	0.9
	$\gamma_{C_{crit}}$	[-]	1.05
C_S^d	C_S	[tež.%/beton]	2.33
	γ_{C_S}	[-]	1.35
$k_{e,d}$	T_{ref}	[K]	293
	T_{real}	[K]	298
	b_e	[-]	4800
$k_{t,d}$		[-]	0.85
A(t)	t_0	[god]	0.0767
	a	[-]	0.3
γ_D		[-]	2.2
$D_{RCM,0}$		[m ² /s]	79
a_d	a_{nom}	[mm]	?
	Δa	[mm]	12

Funkcionalna zavisnost između dužine izloženosti dejstvu hlorida i potrebne nominalne debljine zaštitnog sloja betona, može se prikazati dijagramom na slici 8.



Slika 8. Debljina zaštitnog sloja betona u funkciji vremena izloženosti uticajima hloridno agresivne sredine

7 ZAKLJUČAK

U ovom delu rada posvećenom projektovanju betonskih konstrukcija s obzirom na upotrebnost, glavni akcenat je stavljen na kvantifikovanje parametara koji opisuju dva najznačajnija deteroraciona mehanizma. – korozija armature usled karbonizacije betona i korozija armature usled penetracije hlorida. Za ove procese napravljeni su i numerički primeri čiji rezultati mogu poslužiti za komparativnu analizu uticaja svakog od deteroracionih procesa i za sagledavanje vremenske komponente svakog od njih. Pri poređenju dobijenih rezultata treba imati na umu da je u slučaju korozije armature usled karbonizacije usvojen niži indeks pouzdanosti ($\beta = 1,3$) nego u slučaju korozije armature usled prodora hlorida ($\beta = 2,3$). Takođe, potrebne debljine zaštitnih slojeva prikazane na dijagramima, ne mogu se usvojiti kao “preporučene” za sve betonske konstrukcije, već važe samo za konstrukcije u okruženjima definisanim na početku oba primera i za usvojeni nivo pouzdanosti.

U svakom slučaju, rezultati ukazuju na izuzetno veliku opasnost koja pretili konstrukcijama koje su izložene dejstvu hlorida, bilo da su u blizini mora, bilo da hloridi potiču iz soli koja se u zimskim uslovima koristi za odmrzavanje leda na kolovozima. Potencijalno, najviše su ugrožene javne otvorene garaže čiji se broj, u našim uslovima, neprestano povećava, kao i kolovozne ploče mostovskih konstrukcija. Aktuelno stanje beogradskih mostova govori u prilog tezi da su preporučene debljine zaštitnih slojeva iz aktuelnih propisa neadekvatne za obezbeđivanje zahtevanog upotrebnog veka od 100 godina uz odgovarajući stepen pouzdanosti. Naravno, treba imati na umu da su velike potrebne debljine zaštitnih slojeva prikazane na slici 8 dobijene primenjujući relativno visoke koeficijente sigurnosti, kako bi bio zadovoljen proračunski uslov koji se tiče indeksa pouzdanosti. Ukoliko bi se depasivizacija armature posmatrala kao granično stanje upotrebljivosti, indeks pouzdanosti bi se mogao usvojiti kao $\beta = 1,3$ [8], pa bi odgovarajući parcijalni koeficijenti sigurnosti bili niži, što bi rezultovalo manjim potrebnim debljinama zaštitnih slojeva, ali još uvek većim od onih koje preporučuju naši propisi [1].

8 LITERATURA

- [1] BAB 87, Knjiga 2 Prilozi, Građevinska Knjiga, 1991, str.3-111.
- [2] [Edwardsen C., Mohr L.: DuraCrete – A guideline for durability-based design of concrete structures, Brite-EuRam Programme (Report No. BE95-1347, 2000), str. 10
- [3] EN 1990: 2002, Evrokod 0: Osnove proračuna konstrukcija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2002, str. 87
- [4] EN 1992: 2004, Evrokod 2: Proračun betonskih konstrukcija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2006, str. 237
- [5] *fib* bulletin 3: Structural Concrete, Volume 3, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland, 1999, str.269.
- [6] *fib* bulletin 17: Management, maintenance and strenghtening of concrete structures, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland, 2002, str.174.
- [7] *fib* Task Group 5.6: Model Code for Service Life Design, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland, 2006, str. 116
- [8] [Ignjatović I., Marinković S.: Projektovanje betonskih konstrukcija prema upotrebnom veku: deo 1 – Osnovni pojmovi trajnosti i pouzdanosti, Materijali i konstrukcije 4, 2007, str. 3-15
- [9] [Implementation of Eurocodes- Handbook 2: Reliability backgrounds, Leonardo da Vinci Pilot Project , 2005, str. 254
- [10] Koji T., Yamaguchi T., Maeda S.: Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures due to chloride Attack, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 1, No. 2, July 2003, str. 139-146
- [11] Marinković S., Ignjatović I.: Savremeni koncept projektovanja i građenja betonskih konstrukcija, Građevinski kalendar 2008, str. 181-233
- [12] NordTest Build 492: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordisk Innovations Center, 1999, str. 8
- [13] [Schiessl P., Gehlen C., Kapteina G.: Assessment and service life updating of existing tunnels, First International Symposium: "Safe & Reliable Tunnels? Innovative European Achievements", Prague 2004, str.189-198.

REZIME

PROJEKTOVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA PREMA UPOTREBNOM VEKU: DEO 2 – PRORAČUNSKI DOKAZI ZA RAZLIČITE DETERIORACIONE MEHANIZME

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

Primena koncepta projektovanja betonskih konstrukcija s obzirom na njihov upotrební vek, kao preduslov ima dobro poznavanje deterioracionih procesa. Na osnovu toga, uspostavljeni su fizički ili hemijski modeli za simulaciju tih procesa i izvršena je kvantifikacija parametara koji u tim modelima učestvuju, za dva najznačajnija deterioraciona mehanizma: koroziju armature usled karbonizacije i koroziju armature usled prodora hlorida. Kvantifikacija podrazumeva statističku obradu podataka dobijenih laboratorijskim ispitivanjima i posmatranjima in situ i njihovo prikazivanje u vidu neke od funkcija raspodele. Prikazane su i objašnjene jednačine graničnog stanja depasivizacije armature usled karbonizacije i usled dejstva hlorida, prema punoj probabilističkoj metodi i metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti. Osnovni zaključci o efektima pomenutih deterioracionih procesa izvedeni su na osnovu rezultata dva brojna primera.

Ključne reči: betonske konstrukcije, upotrební vek, deterioracioni proces, korozija usled karbonizacije, korozija usled hlorida, kvantifikacija parametara, depasivizacija, jednačina graničnog stanja.

SUMMARY

SERVICE LIFE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES: PART 2 – VERIFICATIONS FOR DIFFERENT DETERIORATION MECHANISMS

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

The service life design is based on quantifying of the deterioration mechanisms of concrete structures. This paper presents the physical or chemical models for two most important deterioration mechanisms: carbonation induced corrosion and chloride induced corrosion. The basic parameters are quantified on the basis of statistical evaluation of experimental data and field observations. The verification by full probabilistic method and by the partial factor method for limit state: reinforcement depassivation in the case of carbonation induced corrosion and chloride induced corrosion, is presented. The main conclusion about the effects of considered deterioration mechanisms are based on the results of two examples.

Key words: concrete structures, service life, deterioration mechanism, carbonation induced corrosion, chloride induced corrosion, quantifying of variables, depassivation, limit state function.