

UDK 621.882.2:531.01

Primljeno 11. 6. 2007.

# Matematički modeli za proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija

Irina Stipanović Oslaković, Dubravka Bjegović, Dunja Mikulić

## Ključne riječi

armirani beton,  
kloridi,  
korozija armature,  
matematički model,  
fizikalni model,  
uporabni vijek

## Key words

reinforced concrete,  
chlorides,  
reinforcement corrosion,  
mathematical model,  
physical model,  
life span

## Mots clés

béton armé,  
chlorides,  
corrosion de ferrailage,  
modèle mathématique,  
modèle physique,  
durée de vie

## Ключевые слова

железобетон,  
хлориды,  
коррозия арматуры,  
математическая  
модель,  
физическая модель,  
долговечность

## Schlüsselworte

Stahlbeton,  
Chloride,  
Korrosion der Bewehrung,  
mathematisches Modell,  
physikalisches Modell,  
Gebrauchszeit

I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović, D. Mikulić

Izvorni znanstveni rad

## Matematički modeli za proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija

Prikazani su postojeći matematički modeli: deterministički Life-365, Chlodif i probabilistički DuraCrete za proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida, a osnovani na fizikalnom modelu prijenosa klorida u betonu. U eksperimentalnom dijelu rada prikazana je provedena analiza sadržaja klorida na Krčkom mostu. Uspoređeni su rezultati dobiveni determinističkim i probabilističkim pristupom te su predloženi koraci za daljnji razvoj modela.

I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović, D. Mikulić

Original scientific paper

## Mathematical models for determining life span of reinforced concrete structures

The use of existing mathematical models - deterministic: Life-365, Chlodif, and probabilistic: DuraCrete - in the analysis of life span of reinforced-concrete structures exposed to the action of chlorides, as based on physical model of chloride transport in concrete, are presented. The analysis of chloride content, conducted at the Krk Bridge, is presented in the experimental part of the paper. Results obtained by deterministic and probabilistic approaches are compared, and steps for further development of modelling procedures are proposed.

I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović, D. Mikulić

Ouvrage scientifique original

## Modèles mathématiques visant à déterminer la durée de vie des structures en béton armé

L'emploi des modèles mathématiques existants, tant déterministes (Life-365, Chlodif) que probabilistes (DuraCrete), dans l'analyse de la durée de vie des structures en béton armé exposées à l'action de chlorides, se basant sur le modèle physique de transport de chlorides à travers le béton, est présenté. L'analyse de teneur en chlorides, effectuée sur le pont de Krk, est présentée dans la partie expérimentale de l'ouvrage. Les résultats obtenus par les approches déterministes et probabilistes sont comparés, et les actions à prendre pour le développement futur des procédures de modelage sont proposées.

И. Стипанович Ослаковић, Д. Бегович, Д. Микулич

Оригинална научна работа

## Математические модели по расчёту долговечности железобетонных конструкций

В работе показаны существующие математические модели: детерминистическая Life-365, Chlodif и пробалистическая DuraCrete по расчёту долговечности железобетонных конструкций, подвергаемых воздействию хлоридов, а основаны на физической модели транспорта хлоридов в бетоне. В экспериментальной части работы показан проведённый анализ содержания хлоридов на Крчком мосту. Сравнены результаты, полученные детерминистическим и пробалистическим подходом, а также предложены шаги по дальнейшему развитию модели.

I. Stipanović Oslaković, D. Bjegović, D. Mikulić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Mathematische Modelle für die Berechnung der Gebrauchszeit von Stahlbetonkonstruktionen

SDargestellt sind bestehende mathematische Modelle: deterministisches Life-365 und probabilistisches Dura Crete für die Berechnung der Gebrauchszeit von Stahlbetonkonstruktionen die dem Einfluss von Chloriden ausgesetzt sind, begründet am physikalischen Modell des Chlorid-Transports im Beton. Im experimentalen Teil des Artikels ist die durchgeführte Analyse des Inhalts von Chloriden an der Krk - Brücke dargestellt. Die auf Grund des deterministischen und probabilistischen Zutritts erhaltenen Ergebnisse sind verglichen und Schritte für die weitere Entwicklung der Modelle vorgeschlagen.

Autori: Mr. sc. **Irina Stipanović Oslaković**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Dunja Mikulić**, dipl. ing. fizike, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

## 1 Uvod

Pojam trajnosti armiranobetonskih konstrukcija počeo se razvijati u posljednjih 25 godina pošto je postalo očito da armirani beton nije trajan kada je izložen djelovanju agresivnog okoliša. Pristup projektiranju armiranobetonskih konstrukcija, uz uzimanje u obzir problema trajnosti, u nas je još uvijek potpuno empirijski. Prihvaćanjem novoga tehničkoga propisa, koji se oslanja na normu HRN EN 206-1, učinjen je korak naprijed, no još se uvijek projektiranje uporabnog vijeka konstrukcija zasniva na pretpostavci da će se ispunjavanjem kriterija ostvariti zahtijevani uporabni vijek. Normom HRN EN 206-1 daju se preporuke o vrsti i količini cementa, vodocementnom omjeru i najmanjoj debljini zaštitnog sloja, čime se ostvaruje pretpostavka o uporabnom vijeku od 50 godina. No u današnjoj se praksi sve češće susrećemo sa zahtjevom od 70, 100 i više godina na uporabni vijek konstrukcija, čime se sve više nameće potreba za primjenom matematičkih modela za proračun uporabnog vijeka u fazi projektiranja [1].

## 2 Pregled istraživanja

U ovome su radu pri teorijskom modeliranju primijenjeni deterministički i probabilistički pristup proračunu uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija. Deterministički je pristup uključio primjenu postojećih modela *Life-365* i *Chlodif*, a probabilistički je pristup primijenjen u modelu *DuraCrete*, osnovanom na ponašanju konstrukcija u izvedenom stanju. U modelu je primijenjena potpuna probabilistička metoda za proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida, slijedeći metodologiju za proračun nosivosti konstrukcija, odnosno filozofiju graničnih stanja [2] - [4]. Sva su tri modela osnovana na fizikalnom zakonu difuzije klorida u betonu.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je analiza sadržaja klorida u betonu na Krčkome mostu koji je više od 25 godina izložen djelovanju klorida iz mora sjevernog priobalja Jadranskog mora.

Na temelju prikupljenih podataka s postojeće konstrukcije i provedenih proračuna, cilj je bio utvrditi ovisnost trajnosti konstrukcije o vanjskom trajnosnom opterećenju i parametrima gradiva konstrukcije. U radu je provedena analiza postojećih modela te je uspoređen deterministički i probabilistički pristup pri projektiranju uporabnog vijeka konstrukcija. Predloženi su također koraci za daljnji razvoj modela, radi što bržeg usvajanja u praksi takvih proračunskih postupaka za određivanje uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju klorida.

## 3 Eksperimentalni rad

### 3.1 Općenito

Provedeno je eksperimentalno utvrđivanje sadržaja klorida na Krčkome mostu koji je izložen djelovanju morskog okoliša više od 25 godina. Krčki most spaja kopno s otokom Krkom preko otočića Sv. Marko, preko dva morskog kanala s dva luka, pri čemu je veliki luk raspona 390 m najdulji klasično armirani luk na svijetu (slika 1.). Ukupna je duljina mosta 1310 m, što uključuje i 96 m ceste u zasjeku na otočiću Sv. Marko. Građen je u razdoblju od srpnja 1976. do srpnja 1980. godine. Na slici 2. vidi se postupak popravka malog luka Krčkog mosta.



Slika 1. Krčki most, pogled s otoka Krka



Slika 2. Sanacija maloga luka Krčkoga mosta

Za izradu betona ugrađenog u Krčki most upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- otprilike 450 kg cementa (PC 20z 45 Dalmacijacement) po m<sup>3</sup> ugrađenog betona
- aluvijalni kopani karbonatni šljunak iz Grobničkog polja najvećeg zrna 31,5 mm, frakcioniran u frakcije 0-4, 4-8, 8-16 i 16-31,5 mm

- dodaci betonu: 0,15 % aeranta i 0,2 % superplastifikatora
- v/c omjer 0,36 kod  $D_{max} = 32$  mm i v/c omjer 0,37 kod  $D_{max} = 16$  mm.



Slika 3. Dio velikog luka, strana kopno-Rijeka, 10 mn.m

Srednje tlačne čvrstoće kontrolnih uzoraka betona tijekom izgradnje konstrukcije bile su od 48,8 N/mm<sup>2</sup> do 55,6 N/mm<sup>2</sup>. Ispitano je ukupno oko 4400 kontrolnih uzoraka, uz standardne devijacije od 3,9 do 5,4 N/mm<sup>2</sup>.

Laboratorijski je beton imao kapilarno upijanje 0,65 %, vlačnu čvrstoću savijanjem 9,3 N/mm<sup>2</sup> i statički modul elastičnosti 41,3 kN/mm<sup>2</sup>.



Slika 4. Oštećenja na stupu S21

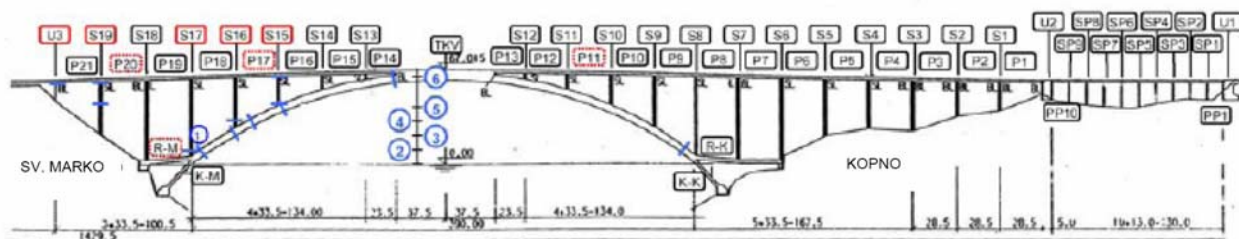
Glavna agresivna djelovanja iz okoliša na armiranobetonsku konstrukciju Krčkog mosta su sljedeća:

- vrlo jaki i česti vjetrovi (bura i jugo) koji dižu morsku prašinu i kloridne ione i nanose ih na konstrukcijske dijelove iznad područja plime i oseke i zone zapluskivanja valovima
- visoki salinitet mora (3,5 %)
- relativno visoka srednja godišnja temperatura i relativno velika vlažnost zraka tijekom cijele godine, što ubrzava prodor klorida i kloridnu koroziju armature
- povremeni zimski padovi temperature ispod 0 °C i smrzavanje, što slabi površinski sloj betona također ubrzavaju prodor klorida u beton [5] - [8].

Okolina Krčkog mosta je, dakle, vrlo agresivna, što je uzrokovalo napredovanje koroziju armature i znatna oštećenja konstrukcije (slike 3. i 4.).

### 3.2 Analiza sadržaja klorida u betonu

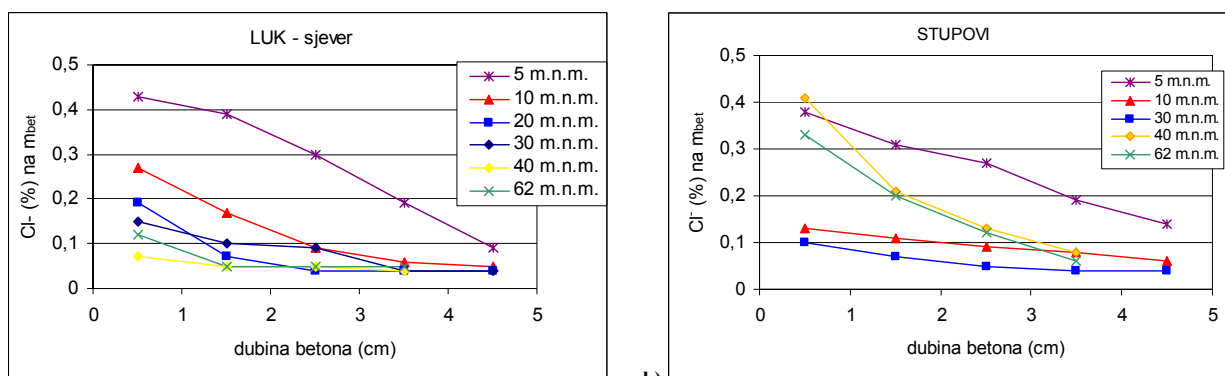
Ukupna količina klorida u betonu sastoji se od vezanih i slobodnih kloridnih iona. U procesu korozije sudjeluju samo slobodni ioni klorida otopljeni u porenoj vodi. Uobičajeno se normiranim metodama mjeri ukupna količina klorida u betonu [9], [10]. Eksperimentalno utvrđivanje ukupnog sadržaja klorida u betonskim uzorcima uzetim iz velikog luka Krčkog mosta provedeno je normiranim laboratorijskim metodama prema normama HRN B.B8.020 i HRN EN 14629 [5], [11], [12]. Uzorci betonskog praha uzimali su se na terenu, ukupno s 284 lokacije, pri čemu se betonski prah za svaku poziciju uzimao iz naj-



Slika 5. Pozicije uzimanja uzoraka betona na Krčkom mostu za određivanje sadržaja klorida

Tablica 1. Broj i pozicije uzimanja uzoraka na Krčkom mostu za ispitivanje sadržaja klorida

| Pozicija | m.n.m. | Upornjak U3 | Broj uzoraka po konstruktivnim elementima i pozicijama |     |      |        |           |      |      | ukupno |    |    |     |
|----------|--------|-------------|--|-----|------|--------|-----------|------|------|--------|----|----|-----|
|          |        |             | Stupovi  |     |      |        | Luk       |      |      |        |    |    |     |
|          |        |             | S15  | S16 | S17  | S19    | Sv. Marko |      | Land |        |    |    |     |
|          |        |             |  |     | vani | unutra | spojnice  | vani |      |        |    |    |     |
| 1        | 0-10   |             |  |     | 10   |        |           |      | 10   |        |    |    | 20  |
| 2        | 10     |             |  |     | 20   |        |           |      | 20   | 20     |    |    | 80  |
| 3        | 20     |             |  |     |      |        |           |      | 20   |        | 20 |    | 40  |
| 4        | 30     |             |  |     |      |        |           |      | 20   |        |    |    | 40  |
| 5        | 40     |             |  |     |      |        |           |      | 16   |        |    |    | 16  |
| 6        | 62     | 8           |  |     |      |        |           |      | 16   |        |    |    | 16  |
| ukupno   |        | 8           |  |     |      |        |           |      | 32   | 20     | 30 | 32 | 92  |
|          |        |             |  |     |      |        |           |      |      |        |    |    | 20  |
|          |        |             |  |     |      |        |           |      |      |        |    |    | 20  |
|          |        |             |  |     |      |        |           |      |      |        |    |    | 20  |
|          |        |             |  |     |      |        |           |      |      |        |    |    | 284 |

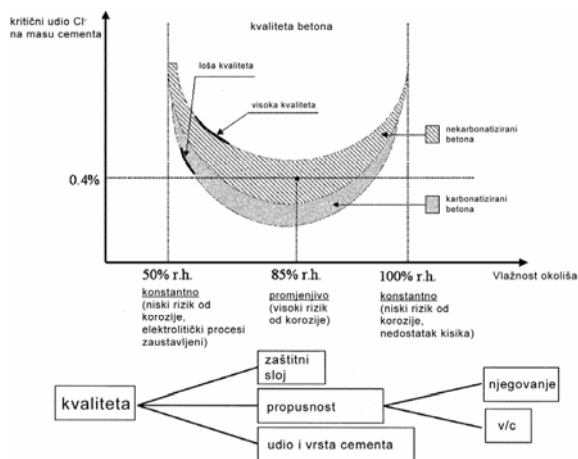


a) b) Slika 6. Tipični profili koncentracije klorida a) za luk i b) za stupove u ovisnosti o visini od mora

manje tri rupe. Ukupni sadržaj klorida u betonu analiziran je na više od 1200 uzoraka. U tablici 1. te na slici 5. prikazana su mjesta uzimanja uzoraka za određivanje sadržaja klorida u betonu. Na slikama 6.a) i 6.b) prikazani su tipični profili koncentracije klorida (sadržaj klorida po dubini) za luk i stupove ovisno o visini nad morem.

### 3.3 Kritična koncentracija klorida

Kritična je koncentracija klorida važan parametar za procjenu uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija



Slika 7. Utjecaj kvalitete betona i okoliša na kritičnu koncentraciju klorida [13]

izloženih morskom okolišu. Zbog razlike u sposobnosti vezanja klorida dopuštena će koncentracija klorida ovisiti o postupku miješanja betona, o propusnosti zaštitnog sloja betona, o dubini karbonatizacije, o opskrbi kisikom i vlažnosti betona i dr. Ovi će parametri utjecati na koncentraciju slobodnih klorida, potencijal armature i električni otpor betonskoga zaštitnog sloja. Prema ovim razmatranjima prihvatljiva koncentracija klorida, odnosno kritična koncentracija klorida, u većini će slučajeva biti od 0 do otprilike 1 % klorida na masu cementa, a ovisnost o ostalim faktorima prikazana je na slici 7.

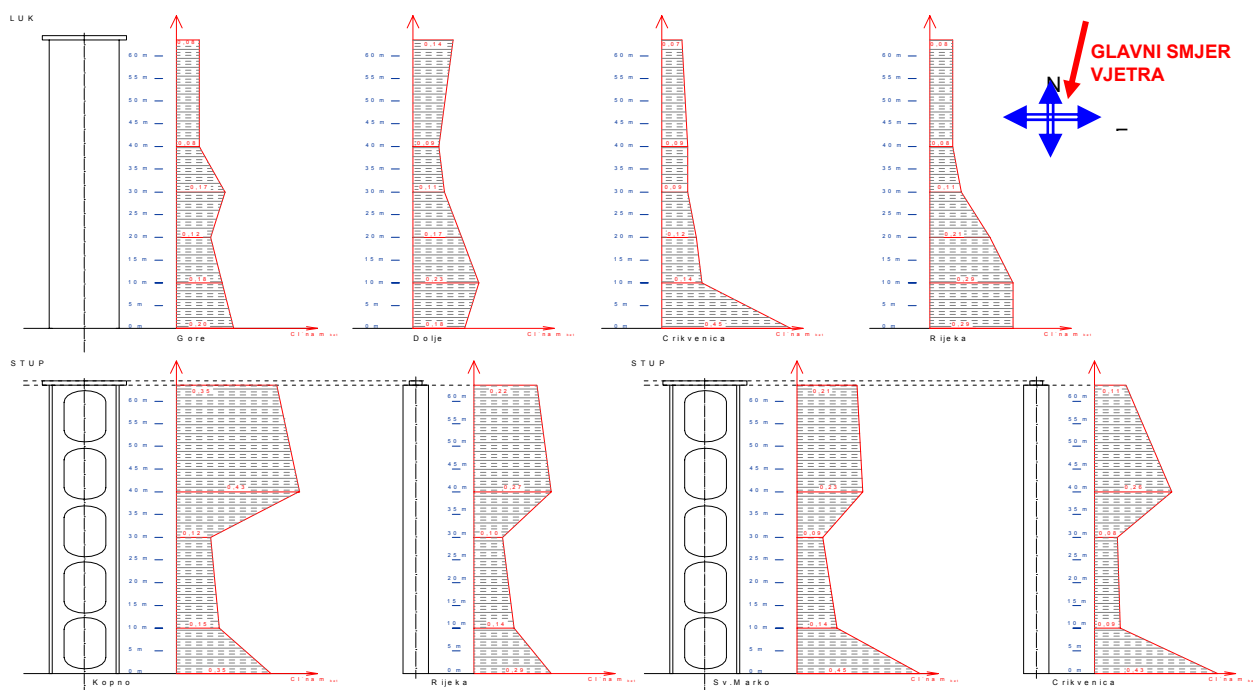
U ovome je radu za slučaj Krčkog mosta prihvaćena kritična koncentracija ukupne količine klorida od 0,60 % na masu cementa, odnosno 0,11 % na masu betona na razini armature. Ova relativno velika vrijednost odgovara dosadašnjim opažanjima s Krčkog mosta [14].

### 3.4 Analiza površinske koncentracije klorida

Nakon eksperimentalnog određivanja profila klorida po područjima stupova i luka, provedena je analiza rezultata i statistička obrada podataka. U tablici 2. prikazani su rezultati analize sadržaja klorida u površinskom sloju betona, tzv. površinska koncentracija klorida za stupove i za luk. Na slici 8. prikazane su površinske koncentracije klorida u ovisnosti o udaljenosti od mora. Iz dijagrama je vidljivo da se površinska koncentracija klorida mijenja ovisno o udaljenosti od mora, ali očito i o orijentaciji elementa na koju utječe smjer vjetra.

Tablica 2. Rezultati statističke analize površinske koncentracije klorida za stupove

| Pozicija | Visina (mn.m.) | Konstrukcijski element |                        |                       |                        |                        |                       |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
|          |                | Stup                   |                        |                       | Luk                    |                        |                       |
|          |                | $C_{S,sr}$ (% na mбет) | $\sigma_s$ (% na mбет) | $C_{S,d}$ (% na mбет) | $C_{S,sr}$ (% na mбет) | $\sigma_s$ (% na mбет) | $C_{S,d}$ (% na mбет) |
| 1        | 0              | 0,38                   | 0,07                   | 0,47                  | 0,31                   | 0,14                   | 0,49                  |
| 2        | 10             | 0,13                   | 0,04                   | 0,18                  | 0,21                   | 0,06                   | 0,29                  |
| 3        | 20             | -                      | -                      | -                     | 0,16                   | 0,04                   | 0,21                  |
| 4        | 30             | 0,10                   | 0,02                   | 0,13                  | 0,12                   | 0,03                   | 0,16                  |
| 5        | 40             | 0,30                   | 0,09                   | 0,42                  | 0,09                   | 0,01                   | 0,10                  |
| 6        | 62             | 0,22                   | 0,10                   | 0,35                  | 0,09                   | 0,03                   | 0,13                  |



Slika 8. Prikaz površinske koncentracije klorida u ovisnosti o udaljenosti od mora i orijentaciji elementa - luka

Izmjereni su profili analizirani radi određivanja površinske koncentracije klorida  $C_s$  i ti analizirani podaci iskorišteni su kao osnova za daljnju analizu. Statističkom obradom podataka određene su srednje vrijednosti površinske koncentracije klorida  $C_{S,SR}$  i pripadajuće standardne devijacije po područjima.

Proračunska vrijednost površinske koncentracije klorida  $C_{sd}$  definirana je kao:

$$C_{sd} = C_{S,SR} + 1,3 \sigma_s \quad (1)$$

Primijenjen je koeficijent pouzdanosti 1,3 prema izvoru [15]. Neprihvatljiv događaj kao uzrok dotrajavanja konstrukcije smatra se inicijacija procesa korozije koja je definirana kao granično stanje uporabljivosti, te je stoga

prihvaćena vjerojatnost otkazivanja od  $10^{-1}$ , što odgovara indeksu pouzdanosti  $\beta$  od  $1,28 \approx 1,3$ .

### 3.5 Koeficijent difuzije klorida

Pošto su određene koncentracije klorida po dubini do razine armature, proveden je proračun za određivanje koeficijenta difuzije klorida. Metoda proračuna koeficijenta difuzije osniva se na Fickovu drugom općem zakonu, a do rješenja se dolazi primjenom inverzne funkcije pogreške  $erfc^{-1}$ .

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot erfc \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D_{sr}}} \quad (2)$$

Tablica 3. Koeficijenti difuzije za Krčki most po područjima

| Zona | Nadmorska visina (m) | Element                       |  |                               |  |
|------|----------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|--|
|      |                      | Stup                          |  | Luk                           |  |
|      |                      | Opterećenje kloridima         | Parametar materijala                                   | Opterećenje kloridima         | Parametar materijala                                   |
|      |                      | $C_{sd}$<br>(% na $m_{bet}$ ) | $D_{sr}$<br>( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) | $C_{sd}$<br>(% na $m_{bet}$ ) | $D_{sr}$<br>( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) |
| 1    | 0                    | 0,48                          | 1,45   | 0,48                          | 0,52   |
| 2    | 10                   | 0,17                          | 0,76   | 0,29                          | 0,55   |
| 3    | 20                   | 0,13                          | 0,75   | 0,21                          | 0,51   |
| 4    | 30                   | 0,12                          | 0,97   | 0,17                          | 0,78   |
| 5    | 40                   | 0,41                          | 0,52   | 0,09                          | 2,23   |
| 6    | 62                   | 0,35                          | 0,56   | 0,13                          | 0,56   |
|      |                      | sr. vrijednost                | 0,84   | sr. vrijednost                | 0,86   |
|      |                      | st. devijacija                | 0,34   | st. devijacija                | 0,68   |

gdje je:

$C(x,t)$  - koncentracija kloridnih iona na dubini  $x$  poslije vremena  $t$

$C_s$  - proračunata koncentracija kloridnih iona na površini

$C_i$  - inicijalna (početna) koncentracija kloridnih iona u betonu

$D_{sr}$  - efektivni (srednji) koeficijent difuzije kloridnih iona

$x$  - udaljenost od kloridima izložene površine

$t$  - proteklo vrijeme

$erfc$  - komplementarna funkcija pogreške.

U programu *Mathematica*® za izmjerene profile metodom usklađivanja ili "fitovanja", odnosno primjenom metode najmanjih kvadrata uz pomoć inverzne funkcije pogreške, tj. jednadžbe (2), određen je koeficijent difuzije za pojedine pozicije.

U tablici 3. prikazani su rezultati proračuna efektivnog koeficijenta difuzije.

Rezultati proračuna koeficijenta difuzije:

- srednja vrijednost za sva područja iznosi:

$$D_{sr} = 0,85 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

- uz pripadajuću standardnu devijaciju:

$$\sigma_D = 0,51 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Rezultati proračuna stvarnog (efektivnog) koeficijenta difuzije izuzetno se dobro poklapaju s predviđanjima (teorijskim vrijednostima) s obzirom na to da se radi o betonu visoke kvalitete s 20 % zgure i malim vodocementnim omjerom (0,36 - 0,37) te mjerenjima nakon 25 godina uporabe mosta.

#### 4 Primjena matematičkih modela

Kada je korozija uzrokovana prodorom klorida, projektirani uporabni vijek često se smatra jednakim vremenu inicijacije korozije ( $t_l = t_i$ ). Vrijeme razvoja procesa korozije, koje može biti vrlo kratko, uglavnom se ne uzima u obzir zbog nesigurnosti procjene trajanja tog perioda i zbog mogućih ozbiljnih posljedica lokalne korozije [16].

Matematički modeli prikazani u ovome radu osnivaju se na pretpostavci da je dominantan mehanizam prijenosa klorida u betonu proces difuzije, a matematički se temelje na drugom Fickovu zakonu difuzije. S pomoću matematičkih modela *Life-365* i *CHLODIF* proračunava se razdoblje inicijacije korozije  $t_i$ , te profili koncentracije klorida nakon određenog broja godina. Za proračun je potrebno unijeti ulazne parametre vezane za konstrukciju, materijal i okoliš gdje se konstrukcija nalazi. Modeli su deterministički i rezultat proračuna je jedinstveni rezultat. [17 - 19]

*DuraCrete* model, koji se osniva na probabilističkom pristupu, proračunava vjerojatnost otkazivanja odabranih performansi konstrukcije u funkciji vremena. Prihvatljiva vjerojatnost zakazivanja ovisi o posljedicama koje nastaju zbog degradacije materijala. Modeli degradacije za opisivanje perioda inicijacije korozije uključuju karbonatizaciju i/ili prodor klorida kao funkcije vremena i varijable ovisne o sastavu betona, vanjskim uvjetima itd. [2 - 4, 20].

#### 4.1 Proračun uporabnog vijeka s pomoću modela *Life - 365*

Matematički model *Life-365* osnovan je na drugom Fickovu zakonu, pretpostavljajući da je difuzija dominantan mehanizam prijenosa klorida. Diferencijalna se jednadžba rješava metodom konačnih elemenata i razlika s 1-D i 2-D mrežom. Teorijska vrijednost koeficijenta difuzije za 28 dana stari beton,  $D_{28}$ , ovisi o vodocementnom omjeru i opisana je izrazom [19]:

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12,06 + 2,40 \text{ v/c})} \text{ m}^2/\text{s} \quad (3)$$

Odnos između  $D_{28}$  i v/c omjera je empirijski, na osnovi istraživanja provedenih na Sveučilištu u Torontu i ostalih istraživača: Sandberg, Tang, 1994.; Frederiksen i dr., 1997.; Tang, Sorensen, 1998.; Stanish, 2000.; Steen, 1995.; Sandberg i dr., 1996. [20, 21]

Koeficijent difuzije opisan je kao funkcija vremena i temperature:

$$D(t, T) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \cdot \exp \left[ \frac{U}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

gdje je :

$D(t, T)$  - koeficijent difuzije u trenutku  $t$  i na temperaturi  $T$

$D_{ref}$  - koeficijent difuzije u nekom referentnom trenutku  $t_{ref}$  (= 28 dana)

$m$  - difuzijska vremenska konstanta (ovisna o recepturi betona).

$m$  -  $0,2 + 0,4 (\%FA/50 + \%SG/70)$

$FA$  - leteći pepeo

$SG$  - zgura

$U$  - aktivacijska energija procesa difuzije (35000 J/mol)

$R$  - plinska konstanta

$T$  - apsolutna temperatura

$t_{ref}$  - 28 dana

$T_{ref}$  - 293K (20 °C).

Na osnovi analize površinske koncentracije klorida (slika 8.) odabrana su 2 tipična područja za Krčki most, - područje prskanja i atmosferska područja za oba konstrukcijska elementa, stup i luk. Velika površinska koncen-

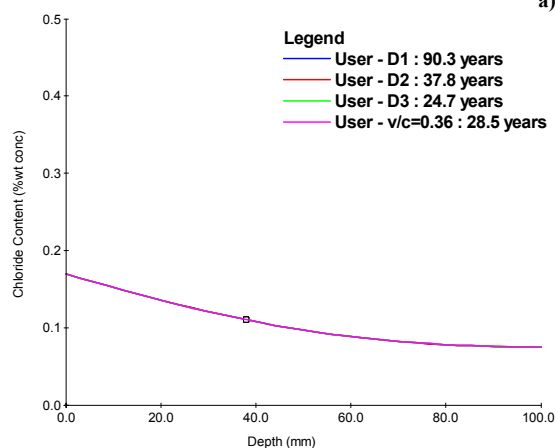
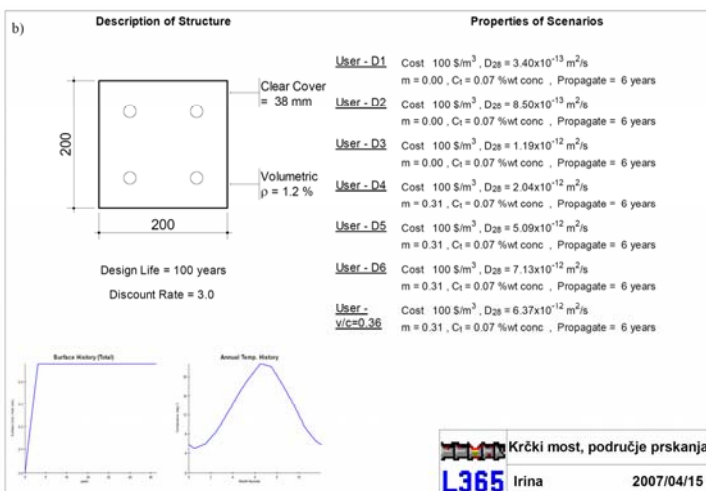
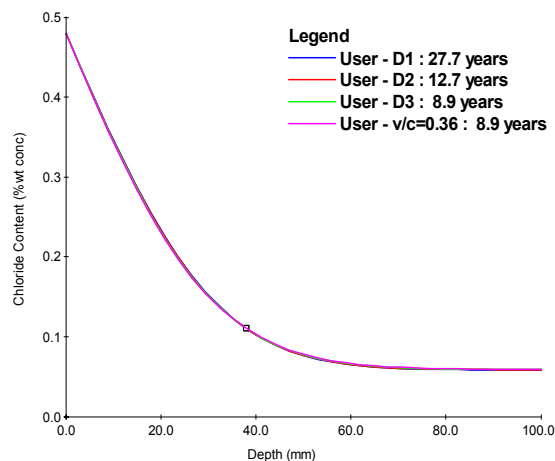
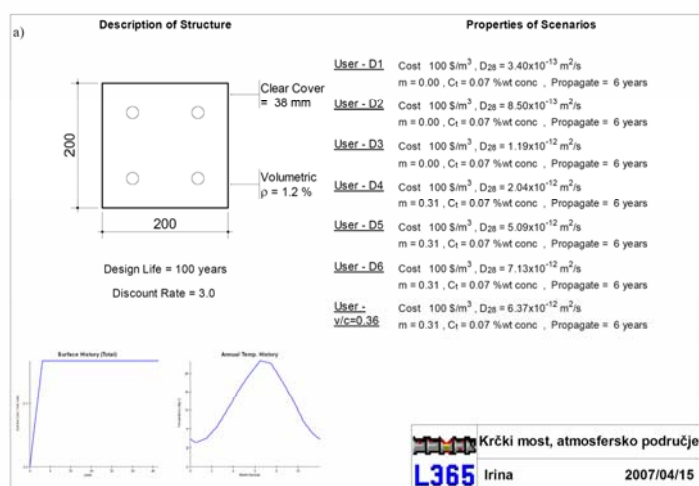
Tablica 4. Ulazni parametri za *Life-365*

| Ulazni parametar                         |   | Vrijednost           |
|--|---|----------------------|
| površinska koncentracija klorida         | $C_s$ (% na $m_{bet}$ )                         | atmosfersko područje |
|  |   | područje prskanja    |
| kritična koncentracija klorida           | $C_{crit}$ (% na $m_{bet}$ )                    | 0,11                 |
| debljina zaštitnog sloja                 | $x_d$ (mm)                                      | 38                   |
| vodocementni omjer                       | $v/c$ (-)                                       | 0,36                 |
| efektivni (srednji) koeficijent difuzije | $D_{sr}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s) | 0,85 $\pm$ 0,51      |
| vremenska konstanta                      | $m$ (-)   | 0                    |
| teorijski koeficijent difuzije           | $D_t$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)    | 6,37 (za 28 dana)    |
| vremenska konstanta                      | $m$ (-)   | 0,31                 |

tracija klorida na visini od 40 do 60 metara nad morem objašnjava se vrlo jakim vjetrom, burom koja puše sa sjevera, s izmjerenim brzinama čak i do 300 km/h i prosječnom dnevnom brzinom od 100 km/h. Kao kritičan slučaj odabran je 2-D model prodora klorida za područje prskanja i atmosfersko područje. Ulazni parametri za

proračun uporabnog vijeka s pomoću modela *Life-365* prikazani su u tablici 4., i kao prikaz iz modela na slici 9.a) i 9.b).

Na slikama 10. i 11. prikazani su rezultati proračuna (sučelja iz programa *Life-365*) za oba područja izloženosti za Krčki most.

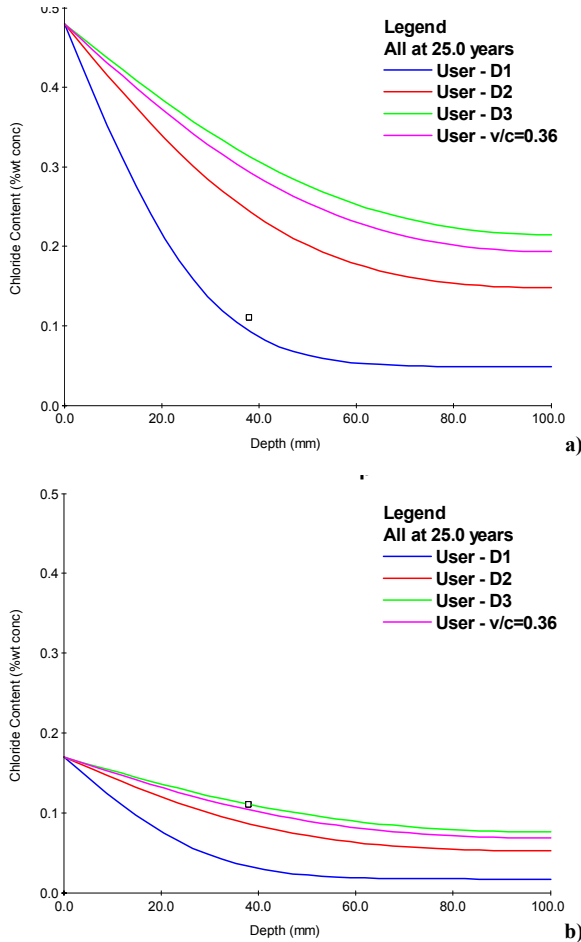


Slika 9. Ulazni parametri za a) atmosfersko područje i b) za područje prskanja

Slika 10. Vrijeme inicijacije korozije u ovisnosti o parametrima materijala, a) za područje prskanja i b) za atmosfersko područje

Srednje vrijednosti za inicijacije korozije proračunate s pomoću modela *Life-365* jesu sljedeće:

- za područje prskanja  $t_i = 16,4$  godina i
- za atmosfersko područje  $t_i = 50,9$  godina.



Slika 11. Profili koncentracije klorida nakon 25 godina izloženosti u ovisnosti o ulaznim parametrima, a) za područje prskanja i b) za atmosfersko područje

#### 4.2 Proračun uporabnog vijeka s pomoću modela CHLODIF

Kontinuirani proces difuzije klorida za slučaj vremenski promjenljivih i koeficijenta difuzije i početne koncentracije iona klorida, prema [17] opisuje se sljedećim eksperimentalnim izrazom:

$$C(x,t) = [C_0 + k(t-1)] \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\tau}} \right) + k \left[ \left( 1 + \frac{x^2}{2\tau_1} \right) \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\tau_1}} \right) - \frac{x}{\sqrt{\pi\tau_1}} e^{-\frac{x^2}{4\tau_1}} \right], \quad (5)$$

za  $0 \leq C_0 < C_{max}$  dok nakon dosezanja najviše početne koncentracije  $C_0 = C_{max}$  vrijedi rješenje:

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\tau}} \right), \quad C_0 = C_{max} \quad (6)$$

gdje je:

$C_0$  - početna koncentracija iona klorida

$C_{max}$  - najveća koncentracija iona klorida

$\tau$  - supstitucija kojom se u obzir uzima promjenljivost  $D_{Cl^-}$  u vremenu [18]

$$d\tau = D(t) dt$$

$$\text{odnosno } \tau = \int_0^t D(s) ds \quad (7)$$

$$\tau_1 = t(t = 1),$$

$k$  - koeficijent linearnog povećanja početne koncentracije [17, 22].

$$D_{Cl^-} = D_{v/c} \times D_0 \times t^{-0.1} \quad (8)$$

gdje je:

$D_{v/c}$  - koeficijent difuzije ovisan o v/c omjeru ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$D_0$  - koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj vrste cementa [17]

$t$  - starost konstrukcije (godine).

Pod početnom koncentracijom iona klorida ( $C_0$ ) smatra se koncentracija klorida u površinskom sloju betona debljine do 5 mm. Veličina iznosa početne koncentracije mijenja se u funkciji vremena. Uz pretpostavku da ioni klorida nisu uneseni u beton tijekom njegova pripremanja, pri novoizvedenim konstrukcijama na početku vijeka njihova trajanja ( $t = 0$ ), početna koncentracija jednaka je nuli ( $C_0 = 0$ ). Promjena količine klorida u površinskom sloju betona tijekom vremena posljedica je procesa njegova vlaženja, isušivanja i taloženja kristala soli u kapilarnim porama. Ako se pretpostavi da je taloženje moguće samo u kapilarnim porama koje se mogu potpuno zapuniti, može se definirati najveća moguća koncentracija iona klorida ( $C_{max}$ ) koja se osniva na Powersovu modelu, prema izrazu (9) [17], [18]:

$$C_{max} = \frac{V_c}{C} q \quad (9)$$

gdje je:

$C_{max}$  - najveća moguća koncentracija iona klorida u površinskom sloju betona (%)

$V_c$  - volumen kapilarnih pora;

$$V_c = (v/c - 0,382 \times h) \times C$$

$C$  - količina cementa u betonu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v/c$  - vodocementni omjer;  $v/c > 0,382$  (iz uvjeta veličine volumena kapilarnih pora)

$h$  - stupanj hidratacije

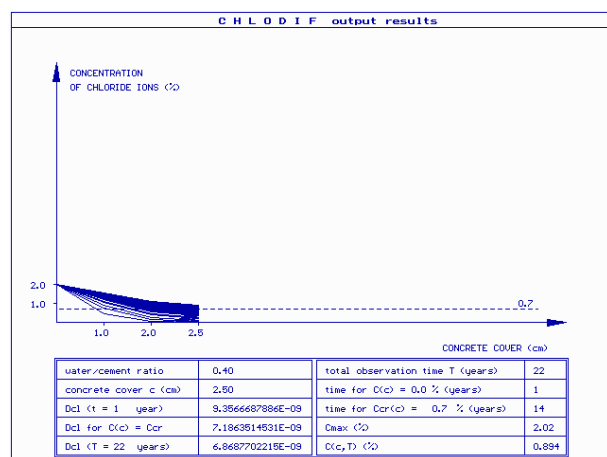
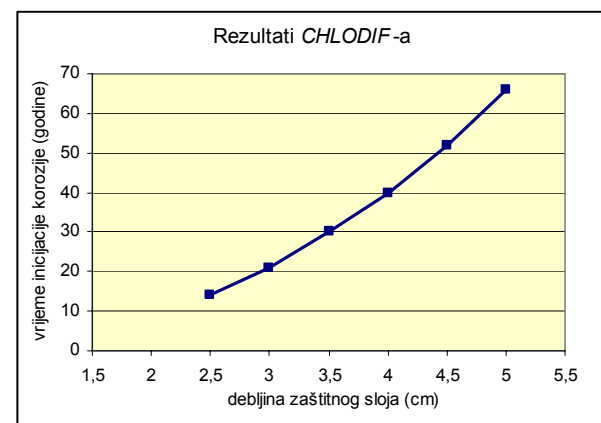
$q = 112,33$  - konstanta dobivena iz količine NaCl,  $\text{MgCl}_2$  i  $\text{CaCl}_2$  u morskoj vodi i količine iona klorida u navedenim solima. Ova se vrijednost može rabiti samo pri dimenzioniranju konstrukcija koje su izložene djelovanju morske vode.



Tablica 5. Ulazni parametri za *CHLODIF*

| Ulazni parametar                 |   | Vrijednost         |
|----------------------------------|---|--------------------|
| površinska koncentracija klorida | $C_s$ (% na $m_{bet}$ )                         | 0,38               |
| kritična koncentracija klorida   | $C_{crit}$ (% na $m_{bet}$ )                    | 0,11               |
| debljina zaštitnog sloja         | $x_d$ (mm)                                      | 25 - 50            |
| vodocementni omjer               | $v/c$ (-)                                       | 0,40               |
| efektivni koeficijent difuzije   | $D_{sr}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s) | 0,85 $\pm$ 0,51    |
| vremenska konstanta              | $m$ (-)   | 0                  |
| teoretski koeficijent difuzije   | $D_t$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)    | 0,94 (za 365 dana) |
| vremenska konstanta              | $m$ (-)   | 0,10               |

Ulazni parametri za proračun uporabnog vijeka modelom *CHLODIF* prikazani su u tablici 5., a rezultati proračuna profila klorida za debljinu zaštitnog sloja od 2,5 cm na slici 12.

Slika 12. Profili koncentracije klorida proračunani *CHLODIF-om*

Slika 13. Ovisnost vremena inicijacije korozije o debljini zaštitnog sloja za Krčki most

Rezultati proračuna vremena inicijacije u ovisnosti o debljini zaštitnog sloja prikazani su na slici 13. Izmjerenе vrijednosti debljine zaštitnog sloja betona bile su od 2,5 do 5 centimetara pa je iz toga razloga variran ovaj

parametar u tom rasponu. No srednja je vrijednost iznosila 3,8 cm, uz standardnu devijaciju od 1 centimetra. Znači, prema *CHLODIF-u* najrelevantniji broj za vrijeme pobude procesa korozije bio bi 37 godina, očitano iz slike 13. To se djelomično poklapa sa stvarnom situacijom, jer je stanje velikog luka Krčkog mosta uglavnom dobro i nema vidljive korozije, ali ipak je prema mjerenjima stvarnih

profila koncentracije klorida jasno da je na nekim dijelovima dosegnuta kritična koncentracija klorida i da će aktivni proces korozije započeti i prije od ovog perioda proračunanog *CHLODIF-om*.

#### 4.3 Probabilistički pristup projektiranju uporabnog vijeka modelom *DURACRETE*

Pri proračunu uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju klorida, prodor klorida smatra se opterećenjem iz okoliša ( $S(t)$ ), a svojstva materijala i konstrukcije da se odupru tom prodoru otpornost ( $R(t)$ ). Dosezanje graničnog stanja u ovom će slučaju biti definirano kao kraj razdoblja pobude procesa korozije, što znači da će otkazivanje nastati kada dubina kritične koncentracije klorida bude jednaka najmanjoj debljini zaštitnog sloja betona. Vjerojatnost sloma,  $P_f$ , definirana je izrazom (11).

Smatra se da proces korozije počinje kada koncentracija klorida oko armaturnog čelika prijeđe kritičnu graničnu vrijednost, što se definira kao granično stanje uporabljivosti (GSU). Pod pretpostavkom da je početna koncentracija klorida jednaka nuli, proračunska jednadžba  $g$  za ovo GSU dana je u obliku [2]:

$$g = c_{cr}^d - c^d(x, t) = c_{cr}^d - c_{s,cl}^d \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x^d}{2 \sqrt{R_{cl}^d(t)}} \right) \right] \quad (10)$$

gdje je:

$c_{cr}^d$  - proračunska vrijednost za kritičnu koncentraciju klorida (% Cl<sup>-</sup> / masu veziva)

$c^d(x, t)$  - proračunska vrijednost koncentracije klorida na dubini  $x$  i u vremenu  $t$  (% Cl<sup>-</sup>/masu veziva)

$c_{s,cl}^d$  - proračunska vrijednost površinske koncentracije klorida (%Cl<sup>-</sup> / masu veziva)

$x^d$  - proračunska vrijednost debljine zaštitnog sloja

$R_{cl}^d$  - proračunska vrijednost otpornosti na prodiranje klorida (god./mm<sup>2</sup>)  
 $t$  - vrijeme  
 erf - funkcija pogreške.

Vjerojatnost otkazivanja unutar vremena  $[0; T]$  jest:

$$P_f(T) = 1 - P\{g(x, t) > 0; \quad t \in [0; T]\} \quad (11).$$

Kriterij prihvaćanja određen je indeksom pouzdanosti,  $\beta$ , definiranog kao:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (12)$$

gdje je  $P_f$  vjerojatnost pojavljivanja određenog događaja unutar predviđenoga razdoblja (uporabni vijek).

Kod korozije armature u betonu kao uzroka dotrajavanja konstrukcije, neprihvatljivim događajem smatra se inicijacija procesa korozije. Kao što je već prije navedeno za pojavu korozije, kao graničnoga stanja uporabljivosti, nije veliki rizik od posljedica, pa je prihvaćena vjerojatnost otkazivanja od  $10^{-1}$ , što odgovara indeksu pouzdanosti  $\beta$  od 1,28  $\cong$  1,30 [15].

Za proračun uporabnog vijeka *DuraCrete* modelom, probabilističkim pristupom na osnovi ponašanja materijala, uporabljene su dvije grupe ulaznih parametara: (i) teorijska vrijednost koeficijenta difuzije s vremenskim faktorom različitim od nule, a s vrijednostima predloženim u uputama za primjenu *DuraCrete* modela [2] i (ii) stvarni (efektivni) koeficijent difuzije na osnovi eksperimentalnih istraživanja, s vremenskim faktorom jednakim nuli. Teorijska vrijednost koeficijenta difuzije proračunata je s obzirom na sastav betona i na osnovi triju

empirijskih modela te u skladu s dostupnom bazom podataka iz literature [18], [20-23]. Ulazni parametri za *DuraCrete* model dani su u tablici 6.

gdje je:

$SD$  - standardna devijacija

$ND$  - normalna (Gaussova) distribucija

$LN$  - lognormalna distribucija

$D_{Cl-teor.}$  - teorijska vrijednost koeficijenta difuzije, s vremenskim faktorom  $\neq 0$

$D_{Cl-exp.}$  - eksperimentalna vrijednost koeficijenta difuzije, s vremenskim faktorom = 0

$k_{c,cl}$  - faktor njege

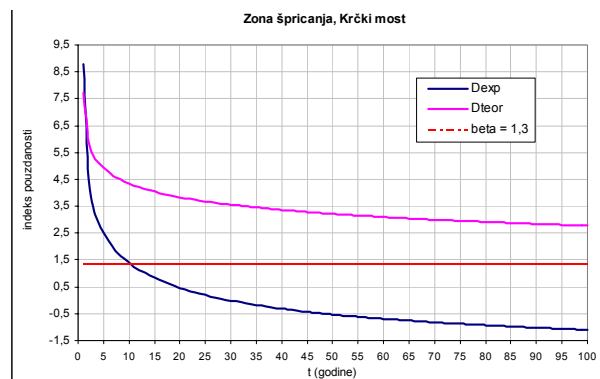
$k_{e,cl}$  - faktor okoliša.

Jednadžba graničnog stanja (10) osnovana na Fickovu drugom zakonu izmodelirana je u programu COMREL, koji je potprogram STRUREL-a. Skraćeni prikaz rezultata proračuna je na slici 14. [14].

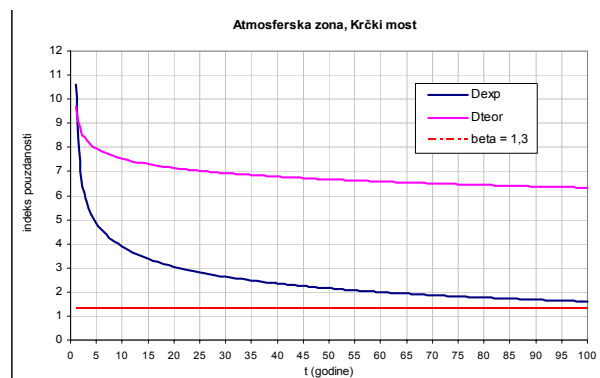
Kod Krčkog su mosta u analizi razmatrane dva tipična područja uočene na stupovima i na luku – područje prskanja i atmosfersko područje. Radi se o kvalitetnom betonu, čvrstoća većih od 60 MPa, uz cement s 20 % dodatka zgure i dobrih svojstava propusnosti, no male debljine zaštitnog sloja. Iz ovih se rezultata vidi da kvaliteta betona i debljina zaštitnog sloja zadovoljavaju u atmosferskom području, no u području prskanja već nakon 10 godina vrijednost indeksa pouzdanosti iznosi 1,3, što odgovara 10 %-tnoj vjerojatnosti pojave korozije, a što se može protumačiti kao da će se dogoditi korozija na 10 % konstrukcije.

Tablica 6. Ulazni parametri za *DuraCrete* proračun

| Ulazni parametar          | Jedinica                               | Funkcija distribucije | Područje prskanja  |      | Atmosfersko područje |      |
|---------------------------|--|-----------------------|--------------------|------|----------------------|------|
|                           |  |                       | Srednja vrijednost | SD   | Srednja vrijednost   | SD   |
| $C_s$                     | % na $m_{bet}$                         | ND                    | 2,55               | 0,85 | 0,65                 | 0,15 |
| $C_{cr}$                  | % na $m_{bet}$                         | LN                    | 0,65               | 0,15 | 0,65                 | 0,15 |
| $x_c$                     | mm                                     | LN                    | 38                 | 10   | 38                   | 10   |
| $k_{c,cl}$                | -                                      | -                     | 1                  | -    | 1                    | -    |
| $k_{e,cl}$                | -                                      | Gamma                 | 0,78               | 0,10 | 0,78                 | 0,10 |
| $D_{Cl-teor.}$            | $\times 10^{-12}$<br>m <sup>2</sup> /s | ND                    | 2,84               | 0,35 | 2,84                 | 0,35 |
| vremenski faktor $n_{Cl}$ | -                                      | LN                    | 0,65               | 0,10 | 0,85                 | 0,10 |
| $D_{Cl-exp.}$             | $\times 10^{-12}$<br>m <sup>2</sup> /s | ND                    | 0,85               | 0,51 | 0,85                 | 0,51 |
| vremenski faktor $n_{Cl}$ | -                                      | -                     | 0                  | -    | 0                    | -    |



a)



b)

Slika 14. Promjena indeksa pouzdanosti  $\beta$  kroz vrijeme a) za područje prskanja, b) za atmosfersko područje

Iz ove se analize također vidi da su ulazni parametri osnovani na eksperimentalnim podacima dali puno realnije rezultate od teorijskih vrijednosti koeficijenta difuzije klorida. Takav je rezultat posljedica predviđanja velikog umanjenja koeficijenta difuzije tijekom vremena, koje se očito ne podudara sa stvarnim stanjem. Opažanja potvrđuju da su vrijednosti vremenskog faktora u području 0,20 - 0,30 za tip cementa i mješavinu betona kao što su ovdje primijenjeni realnije od originalno predloženih 0,65 - 0,85. [14], [25]

## 5 Analiza rezultata eksperimentalnog i numeričkog rada

Pri proračunu uporabnog vijeka prikazanim matematičkim modelima primijenjeni su ulazni parametri na osnovi eksperimentalnih i teorijskih analiza. Eksperimentalno određeni profili klorida za različite uvjete okoliša uspoređeni su s numeričkim rezultatima.

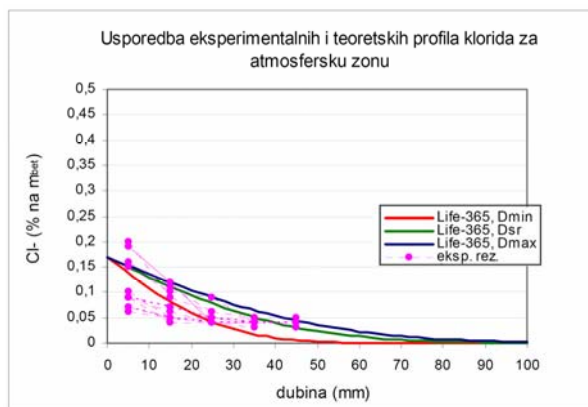
Deterministički matematički modeli *Life-365* i *CHLODIF* osnivaju se na 2. Fickovu zakonu, kao što je objašnjeno u poglavlju 4.1 i 4.2. Pri proračunu prodora klorida jedan od ključnih parametara materijala jest koeficijent difuzije koji opisuje kojom će brzinom kloridi prodirati u dubinu betona. Koeficijent difuzije je funkcija mnogih parametara, no kao ključni polazni parametar za prora-

čun teorijske vrijednosti koeficijenta difuzije jest vodocementni omjer i vrsta cementa u betonu.

Kada su proračuni u determinističkom modelu *Life-365* provedeni s efektivnim (stvarnim) koeficijentom difuzije, definiranim s najmanjom, srednjom i najvećom vrijednošću, dobiveni se rezultati mogu prikazati kao granične krivulje za profile klorida nakon određenog vremena izloženosti, kao što je prikazano na slici 15. Takvim načinom definiranja ulaznih parametara dobro je riješeno rasipanje rezultata unutar betona, no površinsku koncentraciju klorida trebalo bi bolje opisati s obzirom na rasipanje stvarnih rezultata.

Teorijski ulazni parametri dali su veće vrijednosti koncentracije klorida po dubini betona, odnosno kraći period inicijacije korozije u usporedbi s eksperimentalnim ulaznim podacima, kao što se može vidjeti na slikama 10. i 11. To pokazuje preveliku vrijednost koeficijenta difuzije, odnosno nedovoljno veliki vremenski faktor s kojim se uzima u obzir smanjenje koeficijenta difuzije tijekom vremena.

Ulazni parametri osnovani na eksperimentalnim podacima dali su puno realnije rezultate u odnosu na rezultate dobivene iz teorijskih vrijednosti ulaznih parametara vezanih za svojstva materijala i konstrukcije [14].

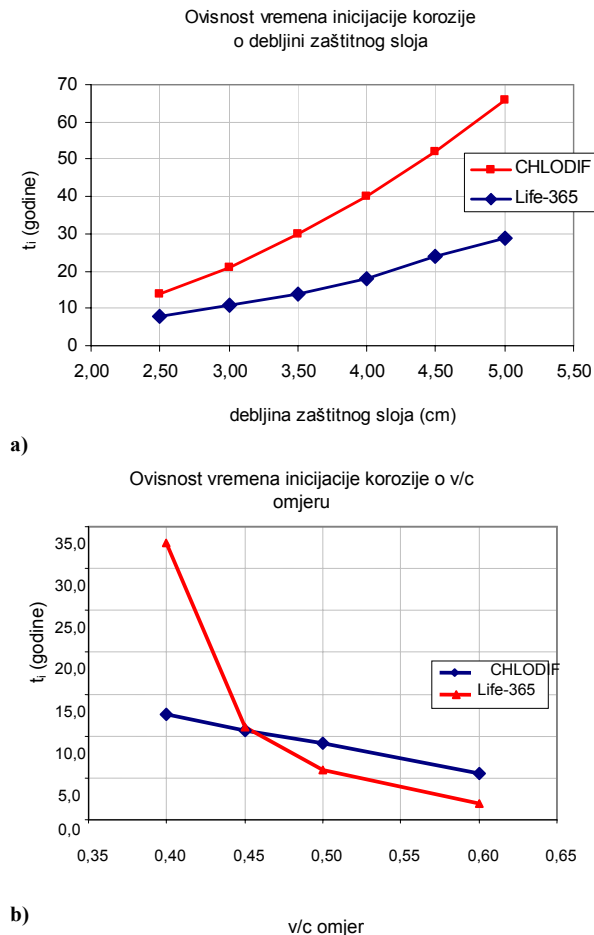


Slika 15. Usporedba eksperimentalnih i teorijskih rezultata za atmosfersko područje

Kod betona koji je primijenjen na Krčkome mostu ( $v/c = 0,36$  uz 20 % zgure), rezultati proračuna vremena inicijacije procesa korozije za manje se debljine zaštitnog sloja vrlo dobro poklapaju, dok kod veće debljine ( $> 4$  cm) dolazi do znatnije razlike pri čemu *Life-365* daje manje vrijednosti za trajanje perioda pobude procesa korozije. Usporedba rezultata proračuna s pomoću *Life-365* i *CHLODIF*-a, ovisno o debljini zaštitnog sloja betona, prikazani su na slici 16.a).

Na slici 16.b) je usporedba rezultata proračuna vremena inicijacije procesa korozije u ovisnosti o vodocementnom omjeru kao ulaznom parametru. Očito je da je *CHLODIF*

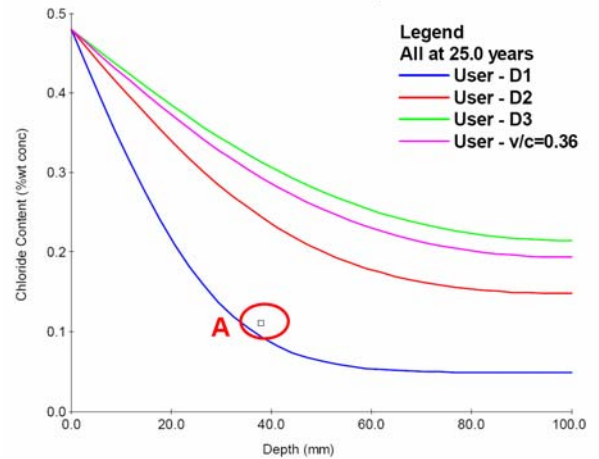
osjetljiviji model s obzirom na kvalitetu betona odnosno na debljinu zaštitnog sloja. Kod modela *CHLODIF* rezultati proračuna su puno bliži stvarnim vrijednostima za manje vrijednosti vodocementnog omjera, odnosno za betone bolje kvalitete.



Slika 16. Usporedba rezultata proračuna modelima Life-365 i CHLODIF, a) ovisnost o debljini zaštitnog sloja i b) ovisnost o v/c omjeru

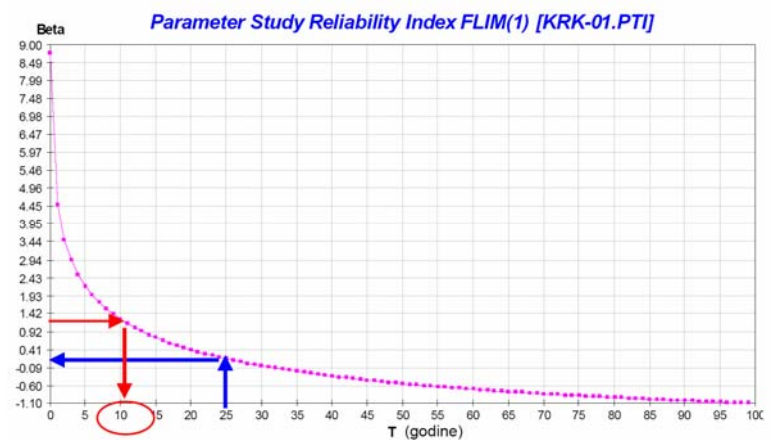
Kod proračuna numeričkim modelom *CHLODIF* uočeno je da su proračunske vrijednosti najveće površinske koncentracije klorida nerealno velike, odnosno da su izmjerene koncentracije klorida u površinskom sloju betona znatno manje. Na tu se vrijednost može utjecati smanjivanjem koeficijenta  $k$  i to tako da se  $k$  uzme znatno manji od 1 pa da se u promatranom vremenu ne postigne tako velika koncentracija klorida. Definiranje koeficijenta  $k$  nije u tom slučaju u skladu s prijedlogom autorice modela, opisanom u [17]. Drugi način približavanja rezultata realnom stanju jest samostalno definiranje koeficijenta difuzije, i to tako da se unese koeficijent umanjenja osnovan na eksperimentalnim istraživanjima određene vrste betona.

Na slikama 17. i 18. navedeni su rezultati proračuna uporabnog vijeka determinističkim i probabilističkim pristupom (sučelja iz modela). Proračun uporabnog vijeka (vremena inicijacije korozije) determinističkim pristupom prikazan je na slici 10. i može se vidjeti da je rezultat za područje prskanja u rasponu od 8,9 do 27,7 godina i 24,7 do 90,3 godine za atmosfersko područje, ovisno o ulaznim parametrima. Vrijednost 8,9 godina dobivena je za teorijske ulazne parametre, a 16,4 godine srednja vrijednost za eksperimentalne ulazne parametre.



Slika 17. Rezultati proračuna profila koncentracije klorida determinističkim pristupom

Na slici 17. prikazani su rezultati proračuna koncentracija klorida po dubini determinističkim modelom nakon 25 godina eksploatacije. Točka A označava poziciju armature i kritičnu koncentraciju klorida. Vidi se da je u većini slučajeva ulaznih parametara ta vrijednost na razini armature premašena, no nemoguće je definirati koliki je stvarni rizik od korozije. Kod proračuna uporabnog vijeka determinističkim modelima kao što su *Life-365* i *CHLODIF*, rezultat proračuna jedinstvena je vri-



Slika 18. Rezultat proračuna uporabnog vijeka nakon 25 godina probabilističkim pristupom

jednost za trajanje toga perioda. Rješenje ovog problema jest povećavanje broja ulaznih parametara, definiraњem najmanje, srednje i najveće vrijednosti, te dobivanje rezultata u obliku vremenskog raspona koje je u tom slučaju ipak puno bliže stvarnoj situaciji od jedinstvenog broja.

Na slici 18. može se vidjeti da se granična vrijednost indeksa pouzdanosti  $\beta$ , od 1,30, dobiva za 10 godina (crvene strelice), što je u dobroj korelaciji s rezultatima proračuna determinističkim modelom.

Iz probabilističkog proračuna za period uporabe od 25 godina, očitava se indeks pouzdanosti  $\beta = 0,23$  (plave strelice na slici 18.), što odgovara 40 postotnoj vjerojatnosti pojave korozije. Iz ovih se analiza također može vidjeti opravdanost primjene probabilističkog pristupa projektiranju trajnosti, odnosno proračuna uporabnog vijeka, jer daje realniju sliku stanja konstrukcije izložene djelovanju klorida. [14]

## 6 Zaključak

U ovome su radu primijenjeni postojeći deterministički modeli za proračun uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju klorida, *Life - 365* i *CHLODIF*, te nedavno razvijen probabilistički model *DuraCrete* za projektiranje trajnosti osnovan na izvedenim svojstvima materijala i konstrukcije.

Eksperimentalni je dio rada proveden na velikom luku Krčkog mosta, pri čemu se provelo opširno utvrđivanje sadržaja klorida u betonu. Nakon eksperimentalnog dijela provedeni su proračuni u postojećim matematičkim modelima te su uspoređeni rezultati. Kao ulazni parametri za matematičke modele primijenjeni su eksperimentalni podaci i teorijske pretpostavljene vrijednosti ulaznih parametara, kao što su koeficijent difuzije i vodocementni omjer.

Veliki je luk Krčkog mosta prema prodoru klorida u prilično dobrom stanju po cijeloj duljini, izuzev ne

kih dijelova u petama luka i kolničke konstrukcije upoljima iznad kopna Sv.Marka. Projektirani sastav betona (vodocementni omjer 0,36 i upotreba cementa s 20 % zgure) pokazao se dosta dobrim s obzirom na uvjete okoliša u kojima se konstrukcija nalazi. Rezultati matematičkog modeliranja determinističkim i probabilističkim pristupom dobro se podudaraju sa stvarnim stanjem kada su upotrijebljeni eksperimentalni podaci kao ulazni parametri.

Rezultati proračuna matematičkim modelima pokazali su puno bolje podudaranje sa stvarnim stanjem nakon 25 godina uporabe za sva područja okoliša, uporabom eksperimentalnih ulaznih parametara. Deterministički modeli daju prestroge rezultate prilikom proračuna uporabom teorijskih vrijednosti za ulazne parametre, što je uobičajen slučaj pri proračunu novih konstrukcija.

Kod teorijskih vrijednosti ulaznih parametara uočeno je veće odstupanje u modelu *DuraCrete* za betone bolje kvalitete, odnosno predviđanje veće pouzdanosti konstrukcije od one u stvarnosti. Takav je rezultat posljedica predviđanja velikog umanjenja koeficijenta difuzije tijekom vremena koje se očito ne podudara sa stvarnim stanjem. Opažanja potvrđuju da su vrijednosti vremenskog faktora u području 0,2 - 0,3 za tip cementa i mješavinu betona kao što su ovdje primijenjeni realnije od originalno predloženih 0,65 - 0,85 [14]. Predlaže se daljnje istraživanje ovog parametra i usporedba sa stvarnim stanjem konstrukcija u uporabi nakon duljeg niza godina [25, 26].

Na osnovi obrađenih primjera može se zaključiti da je probabilistički pristup projektiranju trajnosti konstrukcija opravdan i realnije pokazuje stvarno stanje konstrukcija ugroženih zbog korozije armature. Potrebno je uzeti u obzir još više parametara koji će bolje opisivati stvarno stanje te kalibrirati model na temelju empirijskih podataka. U ovom je primjeru uočeno da bi za proračun koeficijenta difuzije, kao parametra gradiva, trebalo definirati ne samo njegovu vremensku ovisnost nego i niz drugih utjecaja.

## ZAHVALE

Zahvaljujemo se Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa RH na potpori znanstvenim projektima br. 0082209, br. 082-0822161-2159 i br. 082-0822161-2990, u sklopu kojih je proveden ovaj istraživački rad. Zahvaljujemo se i kolegama iz Instituta građevinarstva Hrvatske na suradnji i ustupanju eksperimentalnih podataka vezanih za Krčki most.

## LITERATURA

- [1] AFGC Scientific and technical documents: Concrete design for a given structure service life. Durability management with regard to reinforcement corrosion and alkali-silica reaction, State of the art and Guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability indicators, April 2007.
- [2] EU – Brite EuRam III: *DuraCrete Final Technical Report*, Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, Document BE95-1347/R17 May 2000.
- [3] Rostam, S.: CEB Design Guide and the *DuraCrete* Design manual, DuraNet/CEN TC 104 Workshop, Berlin, 1999.

- [4] Edvardsen, L. Mohr: *DuraCrete – A Guideline for Durability-Based Design of Concrete Structures, Modelling of Concrete Structures*, Session 3, FIB 1999., Prague, str. 425. - 432.
- [5] IGH, Zavod za betonske i zidane konstrukcije: Izvještaj, *Istraživanje i ocjena stanja građiva armiranobetonske konstrukcije mosta kopno-Sv. Marko (veliki luk Krčkog mosta)*, Knjiga 3, Zagreb, ožujak 2003.
- [6] Halavanja, I.: *Projektiranje optimalnih sastava betona za most kopno – otok Krk*, Građevinar 33 (1981.) 2, 109. - 110.
- [7] Mužević, J.: *Kontrola ispitivanja materijala za most kopno – otok Krk*, Građevinar 33 (1981.) 2, 111. - 112.
- [8] Beslač, J.: *Pojačano održavanje Krčkog mosta*, Izvještaj, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb 2003.
- [9] CEB Design Guide for Durable Concrete Structure, Thomas Telford Services Ltd., 1992, reprinted 1997.
- [10] Helland, S.: *Basis of design, Structural and service life design, a common approach, DuraNet, 3rd Workshop*, Tromsø, 2001., str. 15. - 23.
- [11] HRN B.B8.042 *Kameni agregat: Kemijsko ispitivanje agregata za beton i maltere*
- [12] HRN EN 14629:2007 *Proizvodi i sustavi za zaštitu i popravak betonskih konstrukcija – Ispitne metode – Određivanje sadržaja klorida u očvrslom betonu*
- [13] Mehta, P. K.: *Concrete: Structure: Structure, Properties and Materials*, Prentice-Hall, 1986.
- [14] Stipanović, I.: *Proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida*, magistarski rad. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005.
- [15] Fluge, F.: *Marine chlorides - A probabilistic approach to derive provisions for EN 206-1, DuraNet, Third Workshop, "Service Life Design of Concrete Structures – From Theory to Standardisation"*, Tromsø, 2001.
- [16] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R.: *Corrosion of steel in concrete - Prevention, Diagnosis, Repair*, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [17] Krstić, V.: *Numerički model proračuna trajnosti armiranobetonskih konstrukcija*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [18] Bjegović D., Krstić V., Mikulić D., Ukrainczyk V.: *C-D-c-t Diagrams for Practical Design of Concrete Durability Parameters*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 1, 1995., str. 187. - 196.
- [19] Thomas, M.D.A., Bentz, E.C.: *LIFE-365, Service Life Prediction Model, Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, University of Toronto, December 2001.
- [20] Bijen, J.: *Durability of engineering structures, Design repair and maintenance*, Woodhead Publishing, 2003.
- [21] ACI Committee 365: *Service Life Prediction – State-of-the-Art Report*, 2001, Manual of Concrete Practice, ACI 365.1R-00-44.
- [22] Takewaka, K., Mastumoto, S.: *Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments*, ACI-SP 109-117, Concrete in Marine Environment, str. 381. – 400., Detroit (SA), 1988.
- [23] Poulsen, E.: *On a model of chloride ingress into concrete having time-dependent diffusion coefficient; Nordic Miniseminar, Chloride Ingress in Concrete*, Chalmers University, Sweden, Gothenburg, 1993., str. 1. - 12.
- [24] <http://ciks.cbt.nist.gov/cgi-bin/poulsensi>,
- [25] Luping, T., Gulikers, J.: *On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete*, Cement and Concrete Research 37 (2007.), 589. – 595.
- [26] Odriozola, M.A.B., Gutiérrez, P.A.: *Comparative study of different test methods for reinforced concrete durability assessment in marine environment*, Materials and Structures, Published online June 2007, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)