

Proračun prodora klorida u armiranobetonski stup

Neira Torić, Gojko Balabanić, Ivica Kožar

Ključne riječi

prodor klorida,
armiranobetonski stup,
proračun,
Krčki most,
model 1D,
model 2D

Key words

chloride penetration,
reinforced-concrete pier,
analysis,
Krk Bridge,
1D model,
2D model

Mots clés

pénétration de chlorure,
pile en béton armé,
analyse,
pont de Krk,
modèle 1D,
modèle 2D

Ключевые слова

проникновение хлоридов,
железобетонная
колонна,
расчет,
Кркский мост,
модель 1D,
модель 2D

Schlüsselworte

Eindringen von
Chloriden,
Stahlbetonpfeiler,
Berechnung,
Krk - Brücke,
Modell 1D,
Modell 2D

N. Torić, G. Balabanić, I. Kožar

Prethodno priopćenje

Proračun prodora klorida u armiranobetonski stup

U radu je prikazan 1D i 2D proračun prodora klorida u ab stup proveden na domeni poprečnog presjeka stupa Krčkog mosta primjenom MKR, te je određeno vrijeme koje je potrebno da koncentracija klorida neposredno uz armaturu dosegne kritičnu vrijednost. Usporedbom dobivenih rezultata, može se zaključiti da prodor klorida iz dva smjera uzrokuje veću koncentraciju klorida uz armaturu u kutnoj zoni konstrukcijskog elementa, od koncentracije predviđene modelom 1D, za isto razdoblje.

N. Torić, G. Balabanić, I. Kožar

Preliminary note

Analysis of chloride penetration into the reinforced-concrete pier

1D and 2D analysis of chloride penetration into the reinforced-concrete pier, conducted in the cross-section of a Krk Bridge pier, and based on the finite-difference method, is presented in the paper. The time the chloride concentration next to reinforcement requires to reach the critical value is defined. It can be concluded, by comparison of results obtained in the analysis, that chloride penetration from two directions causes greater concentration of chloride next to reinforcement in the corner zone of structural elements, when compared to concentration anticipated by the 1D model, for the same period of analysis.

N. Torić, G. Balabanić, I. Kožar

Note préliminaire

Analyse de taux de pénétration de chlorure dans la pile en béton armé

L'analyse 1D et 2D de taux de pénétration de chlorure dans une pile en béton armé, conduite dans la coupe transversale d'une pile du pont de Krk, et basée sur la méthode des différences finies, est présentée dans l'ouvrage. Le temps nécessaire pour que la concentration de chlorure près d'armature atteigne la valeur critique est défini. Il peut être conclu après la comparaison des résultats de l'analyse que la pénétration de chlorure de deux directions cause une concentration plus grande de chlorures près d'armature dans l'angle d'élément structurel, si comparé avec la concentration anticipée pour le modèle 1D, pour la même période d'analyse.

Н. Торич, Г. Балабанич, И. Кошар

Предварительное сообщение

Расчет проникновения хлоридов в железобетонную колонну

В работе приведены 1D и 2D расчеты проникновения хлоридов в железобетонную колонну на участке поперечного сечения колонны Кркского моста с применением МКР и определено время, необходимое для достижения предельного значения концентрации хлоридов непосредственно при арматуре. Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод, что проникновение хлоридов из двух направлений вызывает большую концентрацию при арматуре в угловой зоне конструкционного элемента, чем предполагаемая моделью 1D за тот же период.

N. Torić, G. Balabanić, I. Kožar

Vorherige Mitteilung

Berechnung des Eindringens von Chloriden in Stahlbetonpfeiler

Im Artikel zeigt man eine 1D und 2D Berechnung des Eindringens von Chloriden in St.b. - Pfeiler, durchgeführt im Bereich des Querschnitts eines Pfeilers der Krk - Brücke unter Anwendung der Methode der endlichen Elemente. Bestimmt ist die notwendige Zeit in der die Konzentration der Chloride unmittelbar um die Bewehrung den kritischen Wert erreicht. Durch Vergleich der erhaltenen Ergebnisse kann man schliessen dass das Eindringen der Chloride aus zwei Richtungen eine grössere Konzentration der Chloride um die Bewehrung im Eckbereich des Konstruktionselements erreicht als die Konzentration die nach dem 1D - Modell in gleicher Zeit vorhergesehen ist.

Autori: **Neira Torić**, dipl. in. građ.; prof. dr. sc. **Gojko Balabanić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Ivica Kožar**, dipl. ing. građ.; Zavod za računalno modeliranje materijala i konstrukcija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

1 Uvod

Korozija armature inicirana prisutnošću klorida jedan je od glavnih uzroka oštećenja armiranobetonskih konstrukcija u morskome okolišu. Zbog bubrenja korozijskih produkata nakupljenih oko armature, oštećenja se pojavljuju u obliku pukotina ili odvajanja zaštitnog sloja betona, što pogoduje prodoru agresivnih tvari u konstrukciju i rezultira njezinim progresivnim oštećenjem. Zbog smanjenja površine poprečnog presjeka armature i slabljenja veze između betona i armature smanjuje se nosivost konstrukcije.

Armatura je u „zdravom“ PC betonu (pH 12,5 – 13) zaštićena filmom oksidiranog željeza. Taj se zaštitni sloj počinje mijenjati ako alkalitet porne otopine postane manji $pH \approx 11,5$. Jedan od razloga depasiviziranja čelika jest prisutnost dovoljne količine klorida otopljenih u pornoj tekućini u blizini armature. Postoje razni kriteriji [3][8][11] za kritičnu koncentraciju klorida, međutim ona se najčešće definira njihovom ukupnom količinom.

Općenito, prodor klorida kroz očvrstnuli beton, prije depasiviziranja čelika, pojavljuje se kao posljedica konvekcije i difuzije. Međutim, ako pretpostavimo da je beton potpuno zasićen vodom, tada se prodor klorida može opisati jednadžbom difuzije. Postoji velik broj radova u kojima se prodor klorida u beton opisuje 1D matematičkim modelom. Zbog prodiranja klorida iz više pravaca, 1D model nije prikladan za predviđanje prodora klorida do armature u kutu konstrukcijskog elementa, pa je stoga u ovome radu primijenjen 2D matematički model difuzije za predviđanje prodora klorida u armiranobetonski stup. Uspoređeni su i rezultati 1D i 2D analize.

Cilj ovog rada jest za zadane rubne uvjete, 1D i 2D numeričkim modelom, predvidjeti prodor klorida u betonsku konstrukciju i usporediti vrijeme dostizanja kritične koncentracije klorida uz armaturu za oba modela.

2 Matematički model prodora klorida kroz beton

Poradi pretpostavke da je beton potpuno zasićen vodom, [6], [12] doprinos gibanju klorida zbog gibanja porne tekućine uzrokovanog gradijentom vlažnosti izuzet je iz proračuna, pa se prodor klorida u beton može opisati sljedećom parcijalnom diferencijalnom jednadžbom [1], [7]:

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C_c}{\partial x^2} \right) \tag{1}$$

u modelu 1D, odnosno:

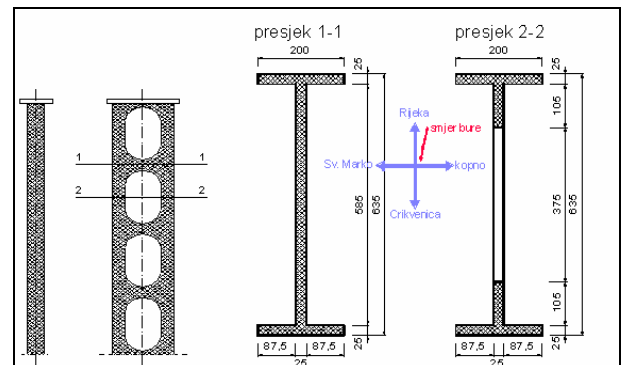
$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_c}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

u modelu 2D.

C_c je koncentracija klorida, a D_c je koeficijent difuzije klorida kroz beton. Prostorna je domena promatranja poprečni presjek stupa Krčkog mosta (I – presjek s otvorima na hrptu), slike 1. i 2. Zbog simetrije poprečnog presjeka stupa, analizirana je svaka polovica stupa posebno s istim geometrijskim karakteristikama. S obzirom da rubni uvjeti nisu simetrični (stvarni rubni uvjeti) analiza je provedena dva puta, za svaku polovicu stupa u obliku T – presjeka posebno. Mreža čvorova prikazana je na slici 3.



Slika 1. Fotografija Krčkoga mosta

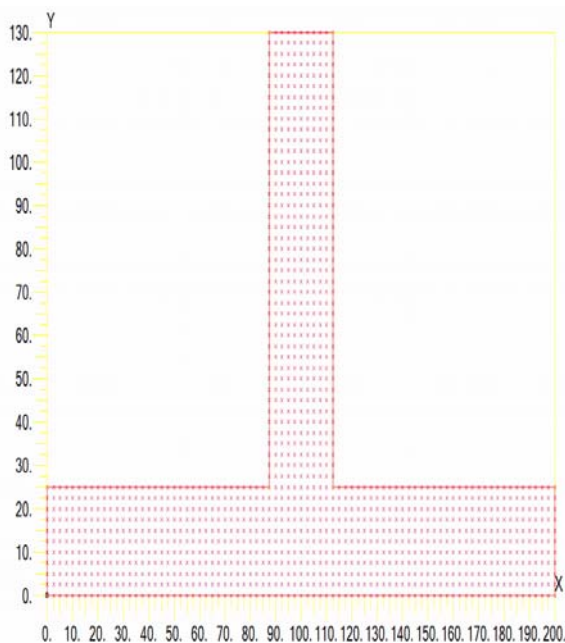


Slika 2. Prikaz pogleda i poprečnog presjeka stupa Krčkoga mosta

Prostornu diskretizaciju čini ekvidistantna mreža čvorova tako da je $\Delta x = \Delta y$. U svakom je čvoru formulirana jednadžba (2) prema metodi konačnih razlika. Time je diferencijalna jednadžba koja opisuje prodor klorida razložena na sustav linearnih jednadžbi. Za kutno područje presjeka u kojem se nalazi armatura (zaštitni sloj betona), radi bolje točnosti načinjena je posebna diskretizacija s gušćom mrežom čvorova.

Cilj rada jest prognozirati vrijeme koje je potrebno da kloridi, koji s vanjskih ploha stupa prolaze kroz beton do armaturnog čelika, dostignu koncentraciju jednaku kritičnoj uz armaturni čelik. Tada dolazi do inicijacije procesa korozije na čeliku, a nakon nekog vremena i do

pucanja betona, odnosno zaštitnog sloja. Čelik ostaje nezaštićen, pri čemu je izložen progresivnom propadanju i gubitku svoje funkcije.



[c]

Slika 3. Prikaz diskretizirane domene

Koristeći se formulacijom metode konačnih razlika preko središnje točke, jednačba (1) transformira se u sustav linearnih jednačbi za 1D proces :

$$D_c \left[\frac{C_{c_{i+1,j}} - 2C_{c_{i,j}} + C_{c_{i-1,j}}}{\Delta x^2} \right] = \frac{\partial C_c}{\partial t} \quad (3)$$

a jednačba (2) u sustav jednačbi za 2D proces :

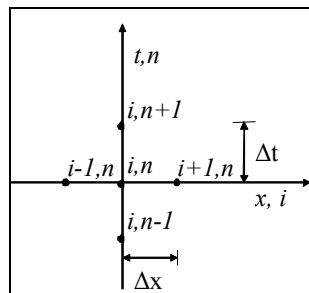
$$D_c \left[\frac{C_{c_{i+1,j}} - 2C_{c_{i,j}} + C_{c_{i-1,j}}}{\Delta x^2} + \frac{C_{c_{i,j+1}} - 2C_{c_{i,j}} + C_{c_{i,j-1}}}{\Delta y^2} \right] = \frac{\partial C_c}{\partial t} \quad (4)$$

Uz uvjet da je $\Delta x = \Delta y$, dio jednačbe (4) koji opisuje prostorne promjene jest :

$$\frac{D_c}{\Delta x^2} [C_{c_{i+1,j}} - 2C_{c_{i,j}} + C_{c_{i-1,j}} + C_{c_{i,j+1}} - 2C_{c_{i,j}} + C_{c_{i,j-1}}] \quad (5)$$

Metoda konačnih razlika (MKR) može se primijeniti i na vremenski ovisne procese tako da je diskretizacija u vremenu predstavljena nizom od 'n' vremenskih koraka $t^0 = 0, \Delta t, 2 \cdot \Delta t \dots t^n = n \cdot \Delta t = t$, gdje je t^0 početni, t^n posljednji vremenski korak, a t je ukupno razdoblje promatranja. U svrhu jednostavnosti modela pretpostavljaju

se konstantni vremenski i prostorni intervali (slika 4.). Diskretno rješenje u točki označava se kao $C_i^n \approx C(x_i, y_i, t^n)$.



Slika 4. Numerička shema MKR u prostornoj i vremenskoj domeni

Desna strana jednačbe (4) koja opisuje vremenske promjene aproksimira se konačnim razlikama preko prethodne točke u vremenu [9]:

$$C_t(x, y, t^n) \approx \frac{C(x, y, t^n) - C(x, y, t^{n-1})}{\Delta t} \quad (6)$$

Za vremensku diskretizaciju usvojen je vremenski inkrement uvjetovan prirodom samog procesa odnosno koeficijentom difuzije i gustoćom mreže. Kako je proces korozije izrazito spor proces, prednost je uzeti veliki vremenski korak pri provođenju iterativnog postupka rješavanja. Primijenjena je implicitna metoda poznata i kao Eulerova metoda prema natrag (Backward Euler) za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi u vremenskoj domeni. Implicitna je metoda bezuvjetno stabilna, no radi veće točnosti rješenja vodilo se računa da je zadovoljen uvjet [4] :

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{2D_C} \quad \text{kod 1D analize i}$$

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{4D_C} \quad \text{kod 2D analize.} \quad (7)$$

Takvim smanjivanjem vremenskog koraka osigurava se smanjenje greške u odnosu prema točnom rješenju [2].

3 Prikaz sustava jednačbi u matričnom obliku

Jednačbe nastale aproksimacijom diferencijalne jednačbe konačnim razlikama, kao i postupak rješavanja tako dobivenih jednačbi mogu se poopćiti matričnim zapisom. Ako kažemo da matrica [A] sadrži koeficijente prema metodi konačnih razlika i

$$D_c[A] = [K] \quad (8)$$

gdje su

[A] - matrična forma konačnih razlika

[K] - matrica difuzivnosti [5]

tada diferencijalne jednadžbe (1) i (2) postaju :

$$[\mathbf{K}] \cdot \{C_c\} = \{\mathbf{H}\} + \frac{\partial \{C_c\}}{\partial t} \quad (9)$$

gdje su

$\{C_c\}$ - vektor rješenja – vrijednosti koncentracije klorida u prostoru i vremenu

$\{\mathbf{H}\}$ - rubni uvjeti – zbroj vektora rubnih i početnih vrijednosti koncentracije klorida.

Zamijenimo li izraz za promjenu koncentracije klorida po vremenu aproksimacijom konačnim razlikama prema natrag u vremenu t^n , dobit ćemo matricnu jednadžbu za n-tu iteraciju u vremenu:

$$[\mathbf{K}] \cdot \{C_c\}_n = \{\mathbf{H}\}_n + \frac{\{C_c\}_n - \{C_c\}_{n-1}}{\Delta t} \quad (10)$$

Ako uvedemo izraz za trenutačnu matricu difuzivnosti :

$$[\mathbf{K}] - \frac{1}{\Delta t} [\mathbf{I}] = [\mathbf{K}_t] \quad (11)$$

gdje je

$[\mathbf{I}]$ - jedinična matrica

i izraz za vektor početnih i rubnih uvjeta :

$$\{\mathbf{B}\} = \{\mathbf{H}\} - \frac{1}{\Delta t} [\mathbf{I}] \cdot \{C_c\}_n, \quad (12)$$

dobivamo rješenje nestacionarnog problema koncentracije klorida u obliku :

$$\{C_c\} = [\mathbf{K}_t]^{-1} \cdot \{\mathbf{B}\}. \quad (13)$$

Rubni su uvjeti sadržani u vektoru $\{\mathbf{H}\}$, a početni se uvjeti moraju uzeti u obzir u prvoj iteraciji koja glasi :

$$\{C_c\} = [\mathbf{K}_t]^{-1} \cdot \{\mathbf{B}_0\} \quad (14)$$

gdje je

$$\{\mathbf{B}_0\} = \{\mathbf{H}\} - \frac{1}{\Delta t} [\mathbf{I}] \cdot \{\mathbf{H}_0\} \quad (15)$$

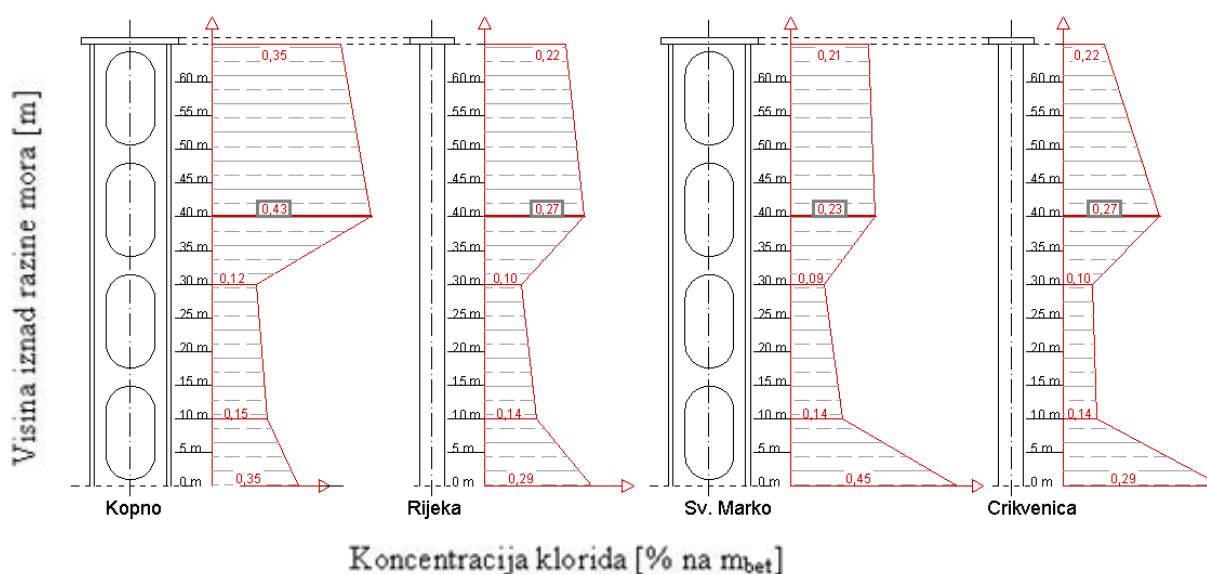
pri čemu je

$\{\mathbf{H}_0\}$ - vektor početnih vrijednosti koncentracije klorida.

4 Početni i rubni uvjeti

Kao početni uvjet za proračun pretpostavljeno je da je koncentracija klorida u betonu jednaka nuli. Rubni uvjet je Dirichletov rubni uvjet zadan u obliku konstantne vrijednosti koncentracije klorida na rubnim čvorovima. Vrijednosti koncentracije iona klorida na rubnim čvorovima izmjerene su na različitim stranama stupova Krčkoga mosta i preuzete su iz [10]. Izmjerene su vrijednosti koncentracija klorida izražene u postotku na masu betona [% na m_{bet}]. Mi smo te vrijednosti pretvorili u masu klorida po jediničnom volumenu betona [kg/m^3]. Ovisno o smjeru puhanja vjetrova, zabilježene su različite vrijednosti koncentracije klorida na različitim stranama stupa i na različitoj nadmorskoj visini. Kao ulazni podaci za ovu analizu usvojene su najnepovoljnije izmjerene vrijednosti, na 40 m n.v. na različitim stranama stupa.

Vanjske plohe stupa označene su prema orijentaciji kao strana Rijeka, strana Crikvenica, strana Sv. Marko i strana kopno (otok Krk). Visine mjernih mjesta na različitim stranama stupa i izmjerene koncentracije prikazane su na slici 5.



Slika 5. Prikaz izmjerenih vrijednosti koncentracije klorida na stupovima Krčkoga mosta [10] (uz dopuštenje autora)

Ulazni parametri potrebni za proračun

Prostorni inkrement: $\Delta x = \Delta y = 0,01$ m

Vremenski inkrement: $\Delta t = 10$ dana

Razdoblje promatranja: $T = 2500$ dana

Volumenska masa betona: $\rho_{bet} = 2500$ kg/m³

Masa cementa / m³ betona: $m_{cem} = 450$ kg/m³

Koeficijent difuzije klorida: $D_C = 0,864 \cdot 10^{-7}$ m²/dan

Izmjerene vrijednosti koncentracija klorida na površini prema [10]:

Strana prema Rijeci:

$$C_{C0}^{Rijeka} = 0,0027 \rho_{bet} = 0,0027 \cdot 2500 = 6,75 \text{ kg/m}^3$$

Strana prema Crikvenici:

$$C_{C0}^{Crikvenica} = 0,0026 \rho_{bet} = 0,0026 \cdot 2500 = 6,5 \text{ kg/m}^3$$

Strana prema Sv. Marku:

$$C_{C0}^{Sv.Marko} = 0,0023 \rho_{bet} = 0,0023 \cdot 2500 = 5,75 \text{ kg/m}^3$$

Strana prema kopnu:

$$C_{C0}^{Kopno} = 0,0043 \rho_{bet} = 0,0043 \cdot 2500 = 10,75 \text{ kg/m}^3$$

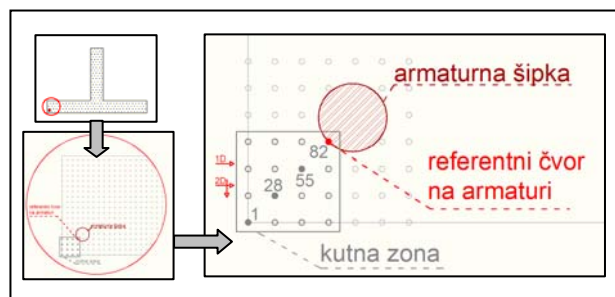
Kriterij kritične koncentracije klorida dobiven empirijski prema [8]:

Kritična koncentracija:

$$C_{C_{krit}} = 0,004 m_{cem} = 0,004 \cdot 450 = 1,8 \text{ kg/m}^3$$

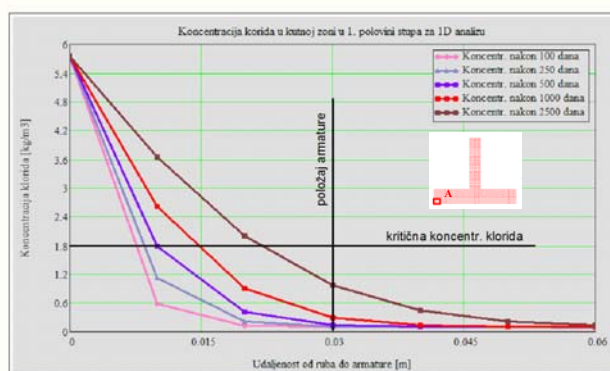
Rezultati proračuna

Na slici 6. prikazan je položaj čvorova koje promatramo u kutnom području u odnosu prema položaju armature. Odabrani su čvorovi 1, 28, 55 i 82 jer su jednako udaljeni od dva okomita ruba presjeka.

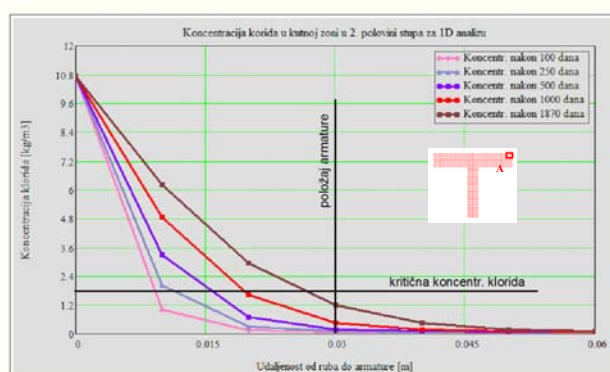


Slika 6. Prikaz presjeka i čvorova u kutno području za usporedbu 1D i 2D procesa

Na slikama 7. i 8. prikazani su dijagrami raspodjele koncentracije klorida u zaštitnom sloju betona debljine 3 cm, za dvije polovice simetričnoga poprečnog presjeka



Slika 7. Prikaz promjene koncentracije klorida u prvoj polovini poprečnog presjeka stupa u kutnom području nakon 1D analize

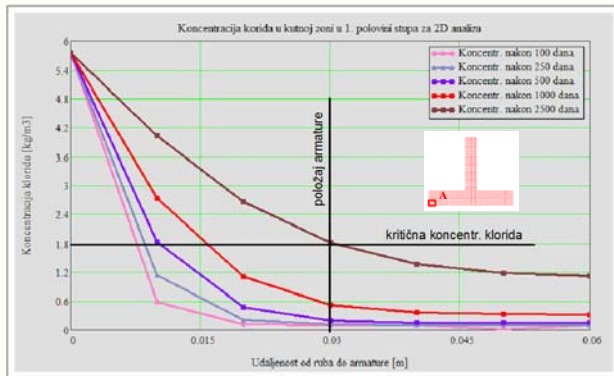


Slika 8. Prikaz promjene koncentracije klorida u drugoj polovini poprečnog presjeka stupa u kutnom području nakon 1D analize

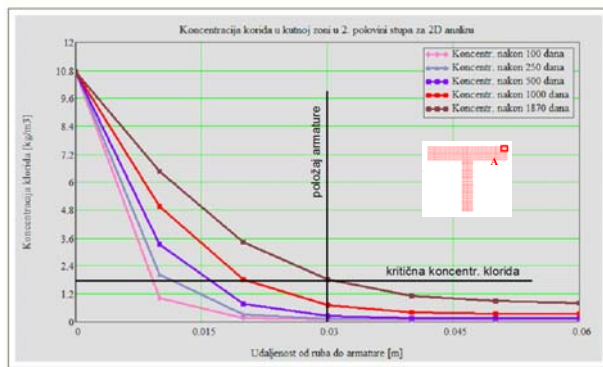
stupa s različitim rubnim uvjetima, i to za jednodimenzijski transport klorida i za različita vremenska razdoblja. Dijagrami pokazuju koncentraciju klorida u čvorovima 1, 28, 55 i 82 koji se slijedom nalaze na udaljenosti od 0, 1, 2 i 3 cm od ruba presjeka. Položaj armature odgovara položaju čvora 82. Ukupno razdoblje promatranja jest vrijeme potrebno da koncentracija klorida na armaturi (čvor 82) dostigne kritičnu vrijednost od 1,8 kilograma na 1 m³ betona [8] pri dvodimenzijском transportnom procesu. To razdoblje iznosi 2500 dana za prvu polovicu presjeka i 1870 dana za drugu polovicu presjeka stupa.

Na slikama 9. i 10. prikazani su dijagrami raspodjele koncentracije klorida u zaštitnom sloju betona debljine 3 cm, za dvije polovice simetričnoga poprečnog presjeka stupa s različitim rubnim uvjetima, i to za jednodimenzijski transport klorida i za različita vremenska razdoblja. Dijagrami pokazuju koncentraciju klorida u čvorovima 1, 28, 55 i 82, a ukupno je razdoblje promatranja u ovom slučaju vrijeme potrebno da koncentracija klorida na armaturi (čvor 82) dostigne kritičnu vrijednost pri jednodimenzijском transportnom procesu. Kod 1D analize razdoblje dostizanja kritične koncentracije klorida na

armaturi jest znatno dulje i iznosi 5000 dana za prvu i 2500 dana za drugu polovicu presjeka stupa.

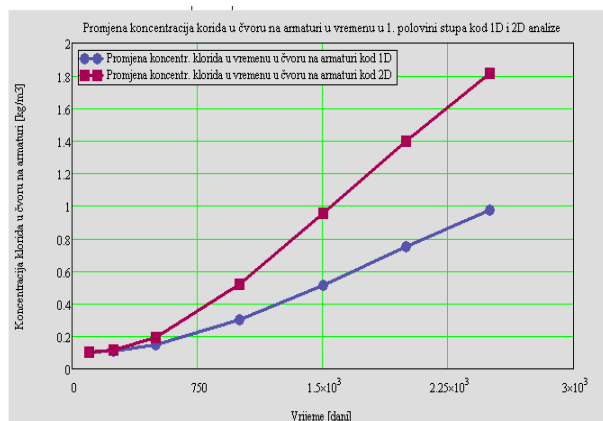


Slika 9. Prikaz promjene koncentracije klorida u prvom polovini poprečnog presjeka stupa u kutnom području nakon 2D analize

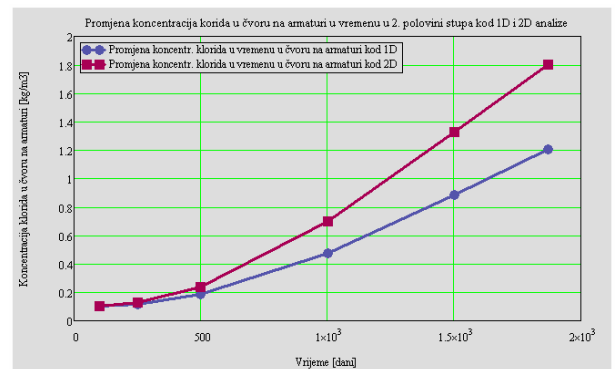


Slika 10. Prikaz promjene koncentracije klorida u drugom polovini poprečnog presjeka stupa u kutnom području nakon 1D analize

Iz dijagrama se može uočiti da je kod 1D analize, za isto vremensko razdoblje kao kod 2D analize, koncentracija klorida znatno manja. To se jasnije vidi na slikama 11. i 12. na kojima su dani dijagrami promjene koncentracije



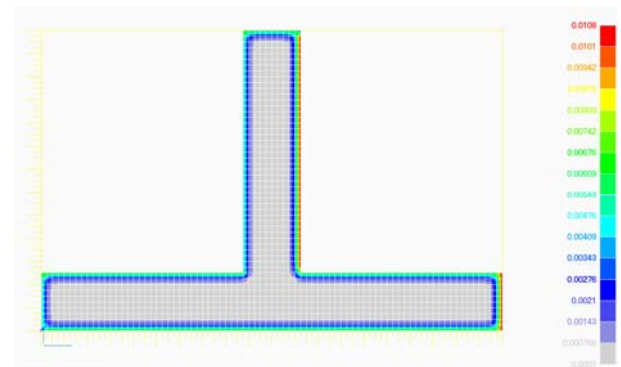
Slika 11. Prikaz promjene koncentracije klorida u prvom polovini poprečnog presjeka stupa u čvoru na armaturi (čvor 82) u vremenu



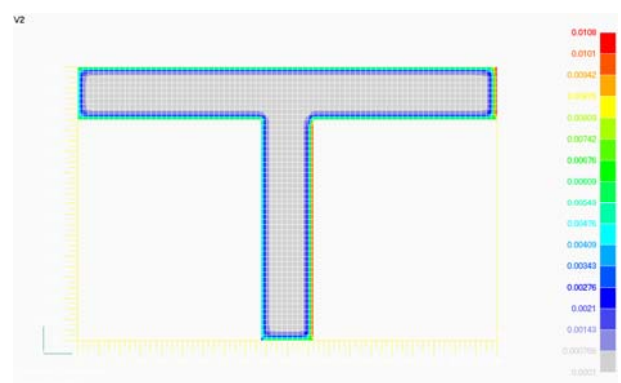
Slika 12. Prikaz promjene koncentracije klorida u drugom polovini poprečnog presjeka stupa u čvoru na armaturi (čvor 82) u vremenu

klorida u čvoru na armaturi (čvor 82) u vremenu, i to za ukupno razdoblje od 2500 dana za prvu polovinu i 1870 dana za drugu polovinu poprečnog presjeka stupa.

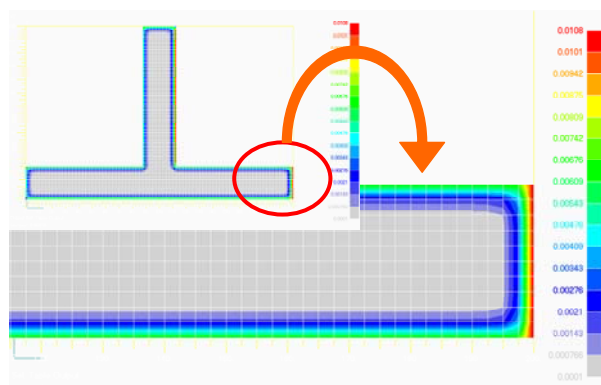
Na slikama 13. do 15. grafički je prikazana raspodjela klorida u betonskim presjecima stupa izolijnjama, za razdoblja potrebna za dostizanje kritične koncentracije klorida u prvom i drugom polovini poprečnog presjeka stupa kod 2D analize.



Slika 13. Grafički prikaz raspodjele klorida u prvom polovini poprečnog presjeka stupa nakon $t = 2500$ dana kod 2D analize



Slika 14. Grafički prikaz raspodjele klorida u drugom polovini poprečnog presjeka stupa nakon $t = 1870$ dana kod 2D analize



Slika 15. Uvećani prikaz raspodjele klorida u kutnom području prve polovine poprečnog presjeka stupa nakon 2500 dana kod 2D analize

5 Zaključak

Djelovanje korozije na betonske konstrukcije može se promatrati u dvije faze :

vrijeme do početka procesa korozije i vrijeme u kojem proces kontinuirano teče većom ili manjom brzinom, ovisno o vanjskim uvjetima. Prvo razdoblje traje znatno dulje od drugog i ima ključnu ulogu u zaštiti konstrukcija jer se preventivnim mjerama može produljiti njegovo trajanje i time odgoditi početak korozije. Stoga je upravo razdoblje do početka korozije zanimljivo za proučavanje i modeliranje.

U ovom je radu na primjeru stupova Krčkoga mosta kao najviše izloženih konstrukcijskih elemenata mosta, prognozirano razdoblje do inicijacije procesa korozije, s obzirom na stvarno djelovanje klorida u području prskanja iznad razine mora. Uspoređene su 1D i 2D analize

prodora klorida kroz zaštitni sloj betona. S obzirom da se radi o simetričnom poprečnom presjeku stupa (I presjek s otvorom na sredini), provedena je analiza za svaku polovinu poprečnog presjeka (T presjek) posebno, uzevši u obzir rubne uvjete koji odgovaraju svakom od ova dva dijela poprečnog presjeka stupa.

Kao rezultat provedenih analiza dobiveno je razdoblje koje je potrebno da bi koncentracija klorida na armaturi poprečnog presjeka stupa Krčkoga mosta koji je najviše izložen djelovanju klorida dostigla kritičnu vrijednost od 1,8 kilograma na 1 m³ betona[8], što predstavlja usvojeni kriterij [8] dobiven empirijskim putem.

To razdoblje, s obzirom na trenutačno stanje i uvjete u kojima se stupovi mosta nalaze, prema ovim bi proračunima iznosio 1870 dana (~ 5 godina) u izloženijoj polovini poprečnog presjeka stupa odnosno 2500 dana (~ 7 godina) u manje izloženoj polovini poprečnog presjeka, i to kod dvodimenzijskog transporta klorida (slike 9. i 10.) Kod jednodimenzijske analize razdoblje dostizanja kritične koncentracije klorida na armaturi znatno je dulje i iznosi 5000 dana za manje izloženu i 2500 dana za drugu, izloženiju polovinu poprečnog presjeka stupa. Ono što možemo zaključiti iz rezultata ove analize jest da je promatranje prodora klorida kroz beton kao jednodimenzionalni transport, što se u literaturi često susreće, vrlo nepouzdan i nerealno. Takva analiza daje duže vrijeme potrebno za dostizanje kritične koncentracije klorida uz armaturu, što su rezultati koji nisu na strani sigurnosti i ne bi ih se trebalo uzimati kao podatak za prognozu oštećenja i kriterij za održavanje obalnih konstrukcija. 2D analiza daje uvid u razdoblje nakon kojeg može doći do ozbiljnih oštećenja na konstrukciji zbog pojave korozije armature.

LITERATURA

- [1] Balabanić, G.: *Numeričko modeliranje procesa korozije čelika armiranobetonskih konstrukcija u moru*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1993.
- [2] Bathe, K. J.: *Finite element procedures*, Prentice Hall, New Jersey 1996.
- [3] Browne, R.: *Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chlorine environments*, Durability of building materials, 1(2), 113-125.
- [4] Kreyszig, E.: *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [5] Lozzi-Kožar, D.: *Nelinearni proračun betonskih konstrukcija uslijed toplinskog opterećenja*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2006.
- [6] Meijers, S. J. H.; Schlagen, E.: *2D-analysis of chloride ingress in the tidal zone of marine concrete structures*, Microlab, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands
- [7] Ožbolt, J.; Kožar, I.; Eligehausen, R.; Periškić, G.: *Instationäres 3D Thermo-mechanisches Modell für Beton*, Beton und Stahlbetonbau, vol. 100, no. 1, p. 2005, 39-51.
- [8] Perez, B.M.: *Service life modelling of RC highway structures exposed to chlorides*, University of Toronto, National Library of Canada, 1999.
- [9] Piero, J.; Sherwin, S.: *Handbook of Materials and Modeling*, Volume I : Methods and Models, 1-32., Department of Aeronautics, Imperial College, London, UK, Springer, Printed in Netherlands, 2005.
- [10] Stipanović, I.: *Proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [11] Val D.V.; Trapper P. A.: *Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion*, Israel Institute of Technology, Elsevier, 2007.
- [12] Wang, Y.; Long-yuan, L.; Page, C. L.: *Modelling of chloride ingress into concrete from saline environment*, University of Leeds, Elsevier, 2005.