Utjecaj oštećenja betona od korozije armature na otpornost čupanja: usporedba prirodne i ubrzane korozije

Brajković, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:976096

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Ante Brajković

Split, 2018.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Ante Brajković

Utjecaj oštećenja betona od korozije armature na otpornost čupanja: usporedba prirodne i ubrzane korozije

Diplomski rad

Split, 2018.

Utjecaj oštećenja betona od korozije armature na otpornost čupanja: usporedba prirodne i ubrzane korozije

Sažetak:

Tema diplomskog rada bila je istražiti utjecaj oštećenja izazvanih od prirodne ili ubrzane korozije na kapacitet pokusa izvlačenja armature iz uzorka. Armiranobetonska greda se prvo izlaže utjecaju korozije te je nakon toga na njoj izvršen pull-out test. U radu je korišten nedavno razvijeni trodimenzionalni kemo-higro-termo-mehanički model za beton. Model uzima u obzir interakciju između nemehaničkih procesa i mehaničkih svojstava betona. Napravljeno je više modela armiranobetonske grede te su prikazani proračuni i rezultati za različito vremensko trajanje korozije. U radu su prikazane usporedbe prirodne i ubrzane korozije s naglaskom na oštećenja armiranobetonske grede i pad kapaciteta pull-out testa.

Ključne riječi:

armiranobetonska greda, oštećenje betona, pukotine, korozija, korozija armature, konačni elementi

The influence of the corrosion induced damage on the pull-out capacity of reinforcement: natural vs. accelerated corrosion

Abstract:

The assignment of this master thesis was to investigate the influence of the corrosion induced damage on the pull-out capacity of reinforcement. Reinforced concrete beam has been exposed to corrosion and after that to pull-out test. In the present paper, a recently developed coupled three-dimensional chemo-hygro-thermo-mechanical model for concrete is discussed. The model takes into account interaction between non-mechanical processes and mechanical properties of concrete. A certain number of different models of reinforced concrete beams were made. Calculations and results for different corrosion durations are presented and compared for natural and accelerated corrosion with emphasis on damage of reinforced concrete beam and degradation of pull-out capacity.

Keywords:

reinforced concrete beam, damage of concrete, cracks, corrosion, reinforcement corrosion, finite elements

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ:	**DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	ANTE BRAJKOVIĆ
BROJ INDEKSA:	640
KATEDRA:	Katedra za betonske konstrukcije i mostove
PREDMET:	Betonske konstrukcije II

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Utjecaj oštećenja betona od korozije armature na otpornost čupanja: usporedba prirodne i ubrzane korozije.

Opis zadatka: Potrebno je izvršiti analizu armiranobetonske grede izložene djelovanju prirodne i ubrzane korozije, te nakon djelovanja korozije provest pull-out test na svim modelima.

U Splitu, 21.09.2018.

Mentor:

Doc.dr.sc. Nikola Grgić

Komentor:

Prof.dr.sc. Joško Ožbolt

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Prof.dr.sc. Veljko Srzić

Zahvala

Zahvaljujem komentoru prof.dr.sc. Jošku Ožboltu i osoblju instituta IWB (Institut für Werkstoffe im Bauwesen) u Stuttgartu koji su omogućili boravak i rad na institutu kao i na strpljenju, stručnoj pomoći i izuzetnoj suradnji tijekom izrade ovog diplomskog rada te mentoru u Splitu doc.dr.sc. Nikoli Grgiću.
Hvala svim kolegama i prijateljima te djevojci koja mi je bila veliki oslonac onda kad je bilo najpotrebnije.

Posveta

Ovaj diplomski rad posvećujem svojim roditeljima i sestri koji su mi omogućili studiranje te svojim razumijevanjem i bezuvjetnom podrškom bili uz mene sve ove godine.

Sadržaj

1. UVOD 8
1.1. Općenito o računalnim programima MASA i Femap® 9

2. KOROZIJA 10
2.1. Oštećenja armirano betonskih konstrukcija uzrokovanih korozijom 10
2.2. Proces korozije 12
2.3. Modeli korozije armature u betonu 16

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI-KRATAK PREGLED 20
3.1. Uvod 20
3.2. Eksperimentalna istraživanja 20

3.2.1. Ubrzana korozija 21

3.2.2. Rezultati 22

4. MODELIRANJE NOSAČA I GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE .. 25
4.1. Model A1 26

4.1.1. Geometrijske karakteristike i izrada geometrije modela A1 26

4.1.2. Prikaz izrade mreže konačnih elemenata modela A1 28

4.1.3. Položaj anode i katode na modelu A1 34
4.2. Model A2 36
4.3. Model B1 38
4.4 Model B2 41
4.5 Pregled korištenih materijala i pripadajućih karakteristika 44

5. ZADAVANJE OPTEREĆENJA NA MODEL 47
5.1. Prva faza – simuliranje korozije 48
5.2. Pull-out test (pokus izvlačenja armature iz armiranobetonske grede) 53

6. ZADAVANJE RUBNIH UVJETA I PRIDRŽANJA 56

7. PRIKAZ I USPOREDBE REZULTATA 58
7.1. Pull-out test za nekorodiranu armirano betonsku gredu 59
7.2. Prirodna korozija 62

7.2.1. Prikaz oštećenja armiranobetonske uslijed simuliranja prirodne korozije 63

7.2.2. Pull out test na modela prethodno izloženih prirodnoj koroziji..... 70

7.2.3. Distribucija kisika električnog potencijala i korozijske gustoće za prirodnu koroziju 79

7.3 Ubrzana korozija 85

7.3.1. Prikaz oštećenja armiranobetonske uslijed simuliranja ubrzane korozije 86

7.3.2. Pull-out test na modele B1 i B2 nakon izlaganja uzoraka ubrzanoj koroziji 94

7.3.3. Distribucija kisika električnog potencijala i korozijske gustoće za prirodnu koroziju 104

7.4. Usporedba prirodne i ubrzane korozije 110

OŠTEĆENJA IZAZVANA DJELOVANJEM KOROZIJE :..... 111

RASPODJELA UKUPNE KOROZIJE:..... 112

RASPODJELA PRITISAKA KOROZIONIH PRODUKATA..... 117

7.5. Usporedba ubrzane korozije i eksperimentalnih rezultata 118

Modeli za usporedbu..... 119

Usporedba veličine pukotina eksperimentalnih istraživanja i ubrzane korozije: 121

8. ZAKLJUČAK..... 124

9. LITERATURA 126

1. UVOD

Dugoročno proučavajući armirano betonske konstrukcije i oštećenja koja se javljaju kroz duži period godina, a da nisu uzrokovana izvanrednim okolnostima kao što su eksplozija i požar, korozija armature nameće se kao jedan od glavnih uzroka oštećenja i prijevremenog propadanja armirano betonske konstrukcije. Korozija armature uzrokovana kloridima izravno utječe na trajnost, a samim time i na nosivost armirano betonskih konstrukcija. Pojedine konstrukcije koje su izložene agresivnoj okolini kao što su građevine koje se nalaze u blizini mora, ali i vijadukti, mostovi ili garaže izložene djelovanju soli za odmrzavanje, upravo su najviše oštećene zbog djelovanja korozije. Kao posljedica oštećenja izazvanih korozijom armature javlja se pucanje ili odvajanje zaštitnog sloja betona uzrokovano povećavanjem volumena korozijskih produkata. Sanacija ili rekonstrukcija ovako oštećenih armirano betonskih konstrukcija stvara relativno velike direktne i indirektne troškove. Upravo je iz ovog razloga jako bitno dobro istražiti i ispitati utjecaj korozije prije same gradnje takvih vrsta građevina, pronaći kritične točke gdje bi se mogli pojaviti problemi te ih prijevremeno ispraviti i modelirati na ispravan način te tako produljiti vijek trajanja građevine i uštedjeti novac. Najčešći uzrok korozije armature je neodgovarajući (premali) zaštitni sloj betona ili samo oštećenje zaštitnog sloja betona oko armature. Do oštećenja zaštitnog sloja betona dolazi uslijed prekoračenja vlačne čvrstoće betona ili vlačnih naprezanja uzrokovanih stvaranjem korozijskih produkata. Kada ta naprezanja premaše vrijednosti vlačne čvrstoće betona, dolazi do njegovog pucanja. Uslijed pucanja betona otvara se put prodoru agresivnih tvari u konstrukciju što dovodi do ubrzanja procesa korodiranja armature. U radu se koristi trodimenzionalni higro-termo-mehanički model (nedavno) razvijen na IWB institutu. Model će uzimati u obzir vezu između kemo-higro-termo-mehaničkih svojstava. Dakle, proces korozije utječe na mehanička svojstva betona, promjena mehaničkih svojstava ima povratni utjecaj na transport vlažnosti, kisika, klorida, te raspodjelu temperature [1,10].

U nastavku će biti prikazani rezultati numeričke analize ponašanja armiranobetonskog nosača pri djelovanju korozije za različita vremenska razdoblja nakon čega je nosač podvrgnut pokusu izvlačenja armature iz uzorka (pull-out test). Model predstavlja armiranobetonska greda modelirana kao kemo-higro-termo-mehanički model kojeg čine trodimenzionalni (3D) konačni elementi.

Modeliranje svih modela armiranobetonske grede prikazanih u ovom radu, odnosno unošenje geometrijskih karakteristika samih modela i zadavanje svojstava pojedinih materijala te na kraju proračuni i analize istih, izvršeni su pomoću računalnih programa FEMAP® i MASA (**MA**croscopic **S**pace **A**nalysis). Za izradu modela, zadavanje geometrijskih karakteristika te grafički prikaz rezultata korišten je računalni programa FEMAP®, a pomoću računalnog programa MASA su izvršeni potrebni proračuni, kao i obrada podataka i svojstava materijala u svrhu dobivanja rezultata.

1.1. Općenito o računalnim programima MASA i Femap®

Računalni program konačnih elemenata MASA (**MA**croscopic **S**pace **A**nalysis) se koristi za nelinearne proračune i analizu trodimenzionalnih (3D) konačnih elemenata konstrukcije izrađene od kvazi-krkih materijala kao što su beton, kamen, keramika i slični materijali. Iako program omogućuje analizu različitih vrsta materijala, prvenstveno je namijenjen za nelinearnu analizu betona i armiranog betona (ab) u okviru teorije mehanike kontinuuma s naglaskom na oštećenja materijala, npr. pucanje betona, odnosno tečenje armature. Beton je modeliran korištenjem tzv. mikroravninskog modela *(Ožbolt et al., 2001.)* dok je armatura modelirana korištenjem teorije plastičnosti uz Von Mises-ov kriterij tečenja. Da bi se osigurala neovisnost rezultata od veličine konačnih elemenata korištena je tzv. „crack band“ metoda regularizacije *(Bažant et al, 1982.)* Program služi za analizu i rješavanje različitih problema, posebice mehaničkih problema, a u građevinarstvu za statičku i dinamičku analizu nosive konstrukcije. Također, program se koristi za rješavanje i ne-mehaničkih problema, kao što su analize transportnih procesa u poroznom mediju, analiza djelovanja korozije na betonsku i armiranobetonsku konstrukciju ili pak za analize betona (čelika) pri djelovanju požara i izloženosti visokim temperaturama. Za pripremu ulaznih podataka, kao i za analizu rezultata konačnih elemenata poslije proračuna, koristi se računalni program FEMAP®. Program omogućuje upotrebu metode konačnih elemenata, pomoću njega se generiraju i povezuju čvorovi kako bi se stvorila mreža konačnih elemenata. Kod modeliranja uzorka mogu se zadati rubni uvjeti modela, razni načini opterećivanja te različiti materijali i njihovi opisi [2-4].

Opterećenja kao što su pomak ili sila zadaju se u određenom broju koraka ovisno o veličini pomaka ili sile. Femap i MASA povezuju se preko ulaznog sučelja gdje se u Femap-u zadaju različite materijale i njihova mreža konačnih elemenata (numeriranje svih elemenata i čvorova), u MASA-i se tim materijalima pridaju njihove karakteristike. Program MASA vrši proračun i izbacuje NEU-datoteke koje Femap prepoznaje te omogućuje vizualizaciju dobivenih rezultata i proračuna. Računalni programi kao što su Femap i MASA omogućuju simuliranje različitih pojava opterećenja koja mogu zadesiti neku nosivu konstrukciju. Na ovakav način se može

obraditi mnogo različitih situacija i pretpostaviti ponašanje nosive konstrukcije što omogućuje pravovremeno reagiranje. Izrada numeričkih modela isplativija je od eksperimentalnih istraživanja, a daje dosta dobre rezultate koji pomažu u donošenju boljih rješenja.

2. KOROZIJA

2.1. Oštećenja armirano betonskih konstrukcija uzrokovanih korozijom

Jedan od glavnih uzroka propadanja armiranobetonskih konstrukcija je korozija čelične armature u betonu. Ovom fenomenu su pogotovo izložene građevine koje se nalaze u agresivnom morskom okolišu i područjima gdje se koristi sol za odmrzavanje. Uslijed korozije dolazi do niza procesa koji štetno utječu na trajnost i nosivost armiranobetonskih konstrukcija. Kod procesa korozije direktno dolazi do smanjenja poprečnog presjeka čelične šipke što izravno utječe na smanjenje vlačne čvrstoće, duktilnost same konstrukcije te čvrstoće konstrukcije na zamor. Korozijski produkti imaju višestruko veći volumen od pasivne armature što uzrokuje stvaranjem naprezanja unutar konstrukcije i ako su ta naprezanja veća od vlačne čvrstoće betona dolazi do nastanka pukotina u armiranobetonskoj konstrukciji. Nakon što nastanu prve pukotine u konstrukciji one pogoduju prodoru agresivnih tvari u konstrukciju što nam dodatno ubrzava proces korozije te dolazi do odlamanja zaštitnog sloja betona [5].

U cijelom svijetu postoje mnogobrojni primjeri oštećenja konstrukcije izazvanih djelovanjem korozijom, naročito potaknute kloridima iz mora ili solima za odleđivanje. Jedan od primjera na kojem je uočljivo djelovanje korozije je Krčki most (slika 2.1.) koji je smješten u jako agresivnoj morskoj okolini što je rezultiralo oštećenjima dijelova mosta (slika 2.2.) [5].

Slika 2.1. Krčki most

Slika 2.2. Oštećenja stupova na krčkom mostu uslijed korozije [2]

Sanacije ovakvih mostova su iznimno skupe i tehnološki jako zahtjevni projekti. Općenito, konstrukcije zahvaćene korozijom iziskuju velike direktne i indirektne troškove zbog čega je jako bitno razviti modele koji će realno opisivati korozijske postupke i time predvidjeti trajnost konstrukcija. Pouzdan numerički model koji realistično simulira utjecaje korozije armature u armiranobetonskim konstrukcijama omogućuje predviđanje nosivosti i uporabljivosti te konstrukcije. Korištenjem takvog modela može se ispitati niz inženjerskih rješenja za određeni problem te odabrati najpovoljniji, a time povećati trajnost konstrukcije i smanjiti troškove njenog održavanja [5].

2.2. Proces korozije

Unutar betona, čelik je obavijen betonom koji mu služi kao svojevrsna pasivna zaštita od korozije. Navedeno stanje je takvo sve dok beton ima pH>12. Kada se uslijed vanjskih utjecaja naruši taj uvjet, dolazi do nastanka korozije koja za produkt ima hrđu koja zauzima višestruko veći volumen (Tablica 1.) nego čelik te uslijed toga dolazi do pucanja betona, a u krajnjim slučajevima i gubitka nosivosti konstrukcije. Koroziju armature teško je izbjeći i kontrolirati u već formiranim konstrukcijama te je to jedan od najvećih problema današnjice sa stajališta trajnosti armiranobetonskih konstrukcija [11].

Tablica 1. Korozijski produkti i njihovo volumensko povećanje u odnosu na čelik

Korozijski produkt	Kemijska formula	Relativno volumensko povećanje u odnosu na čelik
Željezov oksid	FeO	1.70
Hematit	1/2 Fe_20_3	2.00
Magnetit	1/3 Fe_20_3	2.10
Getit	α-FeOOH	2.91
Lepidokrokit	γ-FeOOH	3.03
Akaganeit	β-FeOOH	3.48
Željezov(II) hidroksid	$Fe(OH)_2$	3.60
Željezov(III) hidroksid	$Fe(OH)_3$	4.00
Hidrirani željezov hidroksid	$Fe(OH)_3$, $3H_2O$	6.15

Početkom elektrokemijskog procesa korozije, na krajevima različitih potencijala inducira se model galvanskog članka koji na jednom kraju šipke predstavlja anodu (negativna elektroda), a na drugom katodu (pozitivna elektroda). U predjelu anode ioni željeza otapaju se u okolnu otopinu (voda u porama betona) u obliku iona željeza Fe2+ . Željezni ioni otopljeni u vodi reagiraju sa ionima hidroksida (OH-) i molekulama kisika te tvore produkte hrđe, koja zbog svog znatno većeg volumena inducira naprezanja unutar betona i pojavu pukotina u zaštitnom sloju betona [11].

Slika 2.3. Primjeri oštećenja konstrukcije izazvanog korozijom armature

Kemijski gledano, korozija je zapravo tipičan primjer jednostavnog galvanskog članka. Radi se, naime, o dvije odvojene, ali povezane kemijske reakcije na anodi i katodi koje zahtijevaju da se proces vrši u zatvorenom krugu uz prisustvo elektrolita (porne vode u betonu) te dovoljne količine kisika. Izrazi 1, 2 i 3 opisuju navedene reakcije [11,12].

Anodna reakcija :

$$2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e^{-} \quad (1)$$

Katodna reakcija:

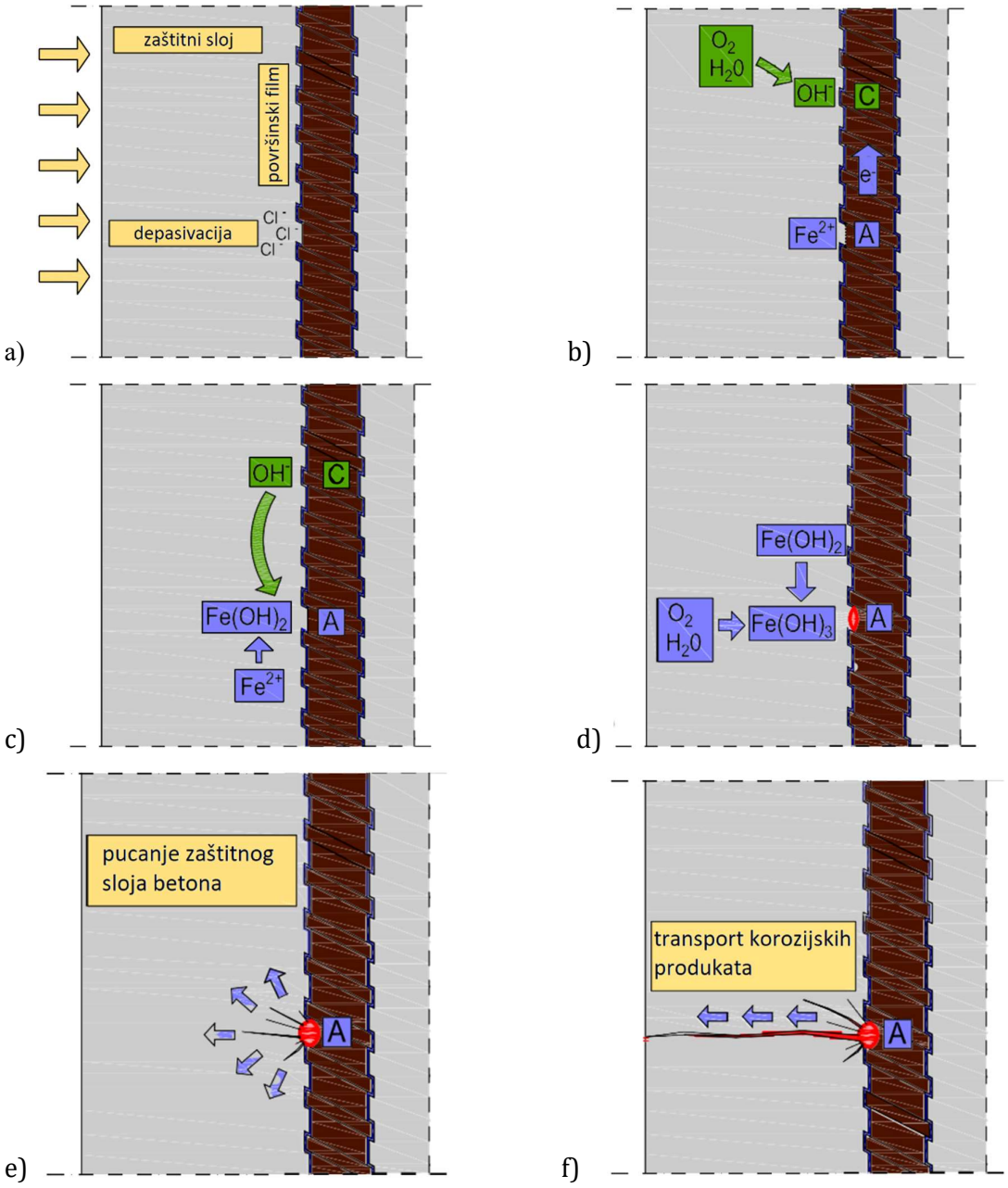
$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-} \quad (2)$$

Konačni produkt korozije :

$$2Fe^{2+} + 4OH^{-} \rightarrow 2Fe(OH)_2 \quad (3)$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \quad (4)$$

Daljnje reakcije i produkti korozijskog procesa ovise o okolišu u kojem se konstrukcija nalazi. Jedna od mogućnosti je ta da novonastali produkti hrđe $2Fe(OH)_2(3)$ uz prisustvo vode i kisika rezultiraju stvaranjem $4Fe(OH)_3(4)$. Povećanje volumena hrđe u odnosu na čelik može varirati od 2 do 6 puta u ovisnosti koji se produkti formiraju. Za slučaj ovog rada uzima se ekspanzivni faktor 4 za prirodnu koroziju, a za ubrzanu koroziju ekspanzivni faktor iznosi 1,9 [13].



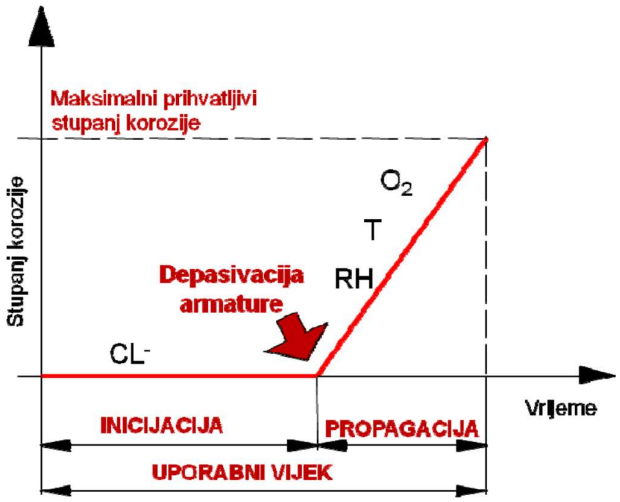
Slika 2.4. Ilustracija procesa korozije u armiranom betonu: (a) ulazak kisika, vode, topline i klorida u zaštitni sloj i depasivizacija zaštitnog površinskog filma; (b) oksidacija željeza (anoda) i formiranje hidroksilnih iona (katoda); (c) formiranje željeznog (II)hidroksida (anoda); (d) proizvodnja željeznog (III) - hidroksida ili crvene hrđe (anoda); (e) pucanje zaštitnog sloja betona; (f) transport korozijskih produkata u formiranim pukotinama [13]

Za uspješno održavanje uvjeta potrebnih za proces korozije neizbježno je postojanje korozijske struje koja se sastoji od kretnje elektrona s anode prema katodi te protu-struji ionskog toka u otopini u porama betona (Slika 2.4.). Prekidom struje zaustavlja se korozija, a isto se događa ukoliko nema dovoljna količina kisika za reakciju na katodi. Kisik u beton ulazi difuzijom pa se njegov prodor djelomično može kontrolirati slabom propusnošću zaštitnog sloja betona [11].

2.3. Modeli korozije armature u betonu

U ovom poglavlju sažeto će se prikazati na koji način se rade modeli armature u betonu koji opisuju proces korozije. Za opisivanje ove pojave koristi se literatura koju su objavili ***Marija Kušter, Joško Ožbolt i Gojko Balabanić: "Modeliranje korozije u armiranobetonskim konstrukcijama izloženih mehaničkim oštećenjima I kloridima" ; Kormat 2012 [5].***

Model korozije armature u betonu se sastoji od dvije faze, prva faza je razdoblje koje započinje prodorom klorida u zaštitni sloj betona te traje do oštećenja pasivnog filma na šipkama armature odnosno depasivacije armature. Oštećenja pasivnog filma uzrokovala je kritična koncentracija klorida. Nakon prve faze dolazi do faze propagacije u kojem započinju elektrokemijska razaranja čelika i nastanak korozijskih produkata (Slika 2.5.)[6].



Slika 2.5 Model korozije s fazom inicijacije i fazom propagacije [5]

1979. godine Bažant je napravio prvi matematički model korozije armature u betonu koji uključuje faze inicijacije i propagacije [7]. Određivanje stupnja korozije zahtjeva modeliranje niza fizičkih, elektrokemijskih i mehaničkih procesa, a to su [7-9]:

- transport kisika, vode, klorida i temperature kroz zaštitni sloj betona
- fizikalno i kemijsko vezanje klorida za cementnu pastu
- katodnu i anodnu polarizaciju
- transport hidroksidnih iona u pornoj otopini betona
- proračun električnog potencijala i gustoće struje na kontaktu armature i betona
- transport korozijskih produkata u pore i pukotine betona
- pukotine i oštećenja u betonu izazvane mehaničkim i ne-mehaničkim djelovanjem odnosno kao posljedica nastanka produkata korozije.

Trodimenzionalan numerički model korozije

Kako bi se omogućilo realistično predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonske konstrukcije izložene kloridima i mehaničkim oštećenjima razvijen je jedinstven trodimenzionalan kemo-higro-termo mehanički model koji realno simulira i fazu inicijacije i fazu propagacije ovisno o mehaničkim oštećenjima te omogućuje vremenski promjenjivu analizu degradacijskih (korozijskih i mehaničkih) procesa [5].

Modeliranje procesa nakon depasivacije armature

Aktivna korozija čelika počinje kada je njegov površinski sloj željeznog oksida oštećen ili depasiviran uslijed dostizanja kritične koncentracije slobodnih klorida u betonu koji je u neposrednom kontaktu s armaturom. Nakon depasivacije armature formira se anoda i katoda te započinje elektrokemijski proces korozije koji se može opisati slijedećim reakcijama:

- otapanjem željeza u pornoj vodi na anodnim mjestima (anodni polu-članak):

$$2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e^{-} \tag{5}$$

- reakcijom otopljenog kisika u vodi sa viškom elektrona na katodnim mjestima (katodni polučlanak):

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4\left(OH\right)^{-} \tag{6}$$

- transportom hidroksidnih iona k anodnim mjestima gdje nastaju korozijski produkti:

$$Fe^{2+} + 2\left(OH\right)^{-} \rightarrow Fe\left(OH\right)_2 \tag{7a}$$

$$4Fe\left(OH\right)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe\left(OH\right)_3 . \tag{7b}$$

Ne-mehanički procesi mjerodavni za fazu propagacije su:

- potrošnja kisika na površini čelične armature tijekom katodne i anodne reakcije,
- tok električne struje kroz pornu otopinu u betonu
- raspodjela električnog potencijala na katodi i anodi.

Potrošnja kisika na katodnoj i anodnoj površini može se izračunati prema [9]:

$$D_o(S_w, p_{con})\left.\frac{\partial C_o}{\partial n}\right|_{cathode} = -k_c i_c \qquad k_c = 8.29\times10^{-8}\,\frac{\text{kg}}{\text{C}}$$

$$D_o(S_w, p_{con})\left.\frac{\partial C_o}{\partial n}\right|_{anode} = -k_a i_a \qquad k_a = 4.14\times10^{-8}\,\frac{\text{kg}}{\text{C}}$$

gdje je n vanjska normala na površinu čelične armature, a i_c i i_a su gustoće struje (A/m^2) na katodi odnosno anodi.

Kinetika elektrokemijskog procesa opisana je Butler-Volmer jednadžbom [9]:

$$i_c = i_{0c}\frac{C_o}{C_{ob}}e^{2.3(\Phi_{0c}-\Phi)/\beta_c} \qquad i_a = i_{0a}e^{2.3(\Phi-\Phi_{0a})/\beta_a} \tag{8}$$

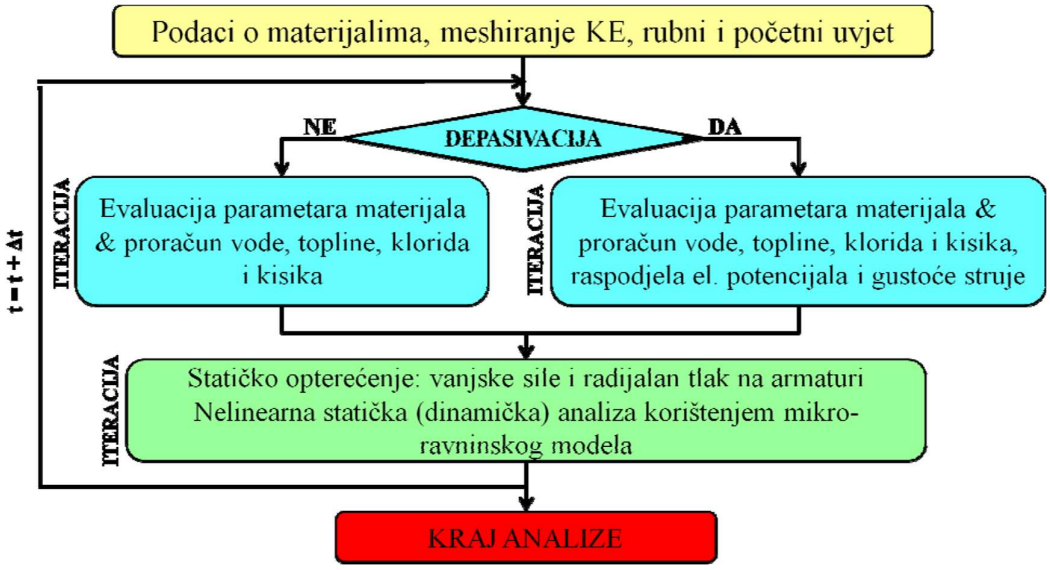
gdje je C_{ob} koncentracija kisika (kg/m^3) na površini betonskog elementa izloženoj kloridima, Φ je električni potencijal u pornoj otopini u blizini površine armature (V), i_{0c} i i_{0a} su promjene gustoće struje pri katodnoj odnosno anodnoj reakciji (A/m^2), Φ_{0c} i Φ_{0a} su početni katodni i anodni potencijal (V), β_c i β_a su Tafelovi koeficijenti za katodnu i anodnu reakciju (V/dec). Električni je tok kroz elektrolit posljedica gibanja naboja te, ako se pretpostavi električna neutralnost sustava i ravnomjerna koncentracija iona, može se zapisati [9]:

$$\mathbf{i} = -\sigma(S_w, p_{con})\nabla\Phi \tag{10}$$

gdje je σ električna vodljivost betona.
Ako se pretpostavi električna neutralnost sustava i konstantna električna vodljivost betona, jednadžba očuvanja električnog naboja može se zapisati kao [9]:

$$\nabla^2\Phi = 0 \tag{11}$$

Za rješavanje sustava parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koristeći za domenu konačne elemente, stroga forma ovih jednadžbi (8-11) prepisana je u slabu formu koristeći Galerkinovu metodu težinskih reziduala [5,9].



Slika 2.6. Alogoritam modela [5]

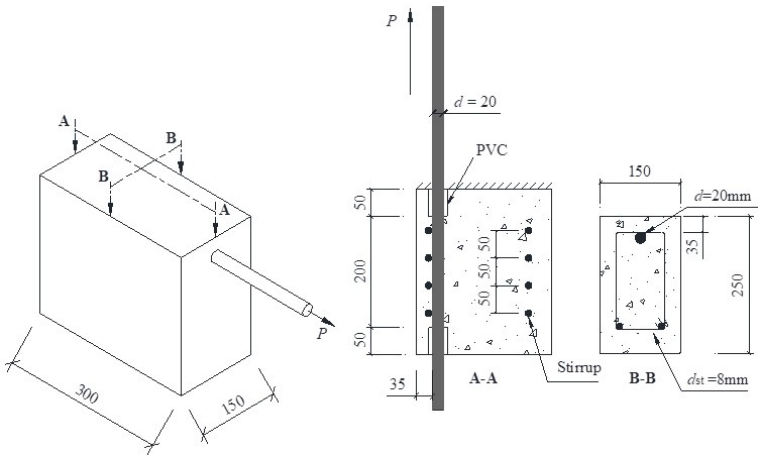
3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI-KRATAK PREGLED

3.1. Uvod

U ovom poglavlju sažeto će biti opisana eksperimentalna istraživanja koja su se provela Kini. Cilj ovih istraživanja bio je istražiti kako se ponaša armiranobetonska greda pod utjecajem korozije - kako korozija utječe na glavnu uzdužnu armaturu te kakav utjecaj ima zaštitni sloj betona u ovom procesu. Također je ispitano koliko se smanjuje nosivost grede nakon izlaganju korozije, odnosno proveden je pull-out test (pokus izvlačenja armature iz uzorka).

3.2. Eksperimentalna istraživanja

Za potrebe ovog eksperimentalnog istraživanja ispitana su 32 armirano betonska uzorka na pullout test. Uzorci se mogu podijeliti u dvije grupe: grupa LA ima zaštitni sloj betona do glavne uzdužne armature 25mm od vrha uzorka i 65mm sa dvije paralelne strane, dok grupa LB ima zaštitni sloj betona do glavne uzdužne armature iznosi 35mm od vrha i 65mm sa dviju paralelnih strana. Obe grupe uzoraka imaju dvije serije uzoraka ovisno o razmaku između vilica: serija LAS2 i LBS2 imaju dvije vilice na razmaku od 100mm dok uzorci serija LAS4 i LBS4 imaju četiri vilice na razmaku od 50mm. Svaka serija uzoraka raspolaže sa 3 nekorodirana uzorka i 5 korodiranih uzoraka. Promjer glavne uzdužne armaturne šipke iznosi 20mm, s dužinom sidrenja od 200mm u betonski uzorak, a promjer poprečne armature (vilica) iznosi 8mm. Geometrija presjeka i detalji armiranja su prikazani na slici 3.1.. Za konkretni slučaj ovog rada razmatra se serija uzoraka LAS2 te se po njemu radi numerički model i uspoređuju rezultati eksperimentalnih i numeričkih istraživanja [14].

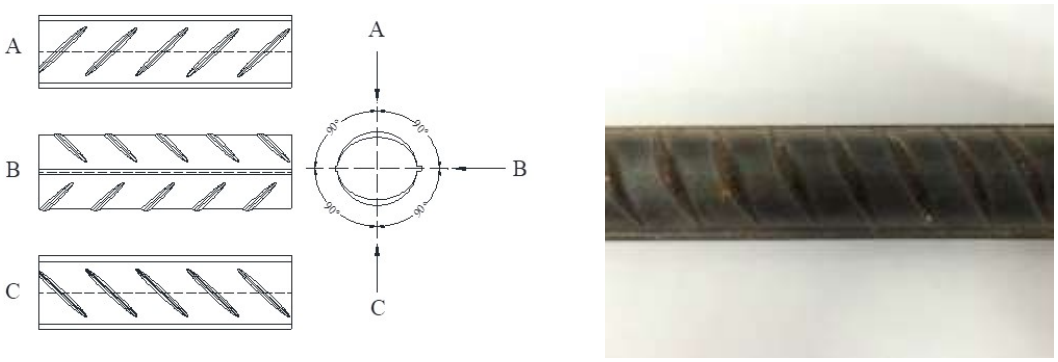


Slika 3.1. Geometrija ispitnog uzorka (sve je izraženo u mm) [14]

Beton koji je korišten u uzorcima je Portland cement sadržaja 296 kg/m^3, vodocementni faktor iznosi 0.35, a maksimalno zrno agregata je veličine 25 mm. Detaljniji sadržaj betona je dan u Tablici 2. Prosječna tlačna čvrstoća betona koja je ispitana na kockama dimenzija 159mmx150mmx150mm iznosi 50 MPa. Čvrstoća čelika za uzdužnu armaturu iznosi 450 MPa, a granica razvlačenja 632 MPa. Za poprečnu armaturu čvrstoća čelika iznosi 378 Mpa. Izgled armature je prikazan na slici 3.2. [14].

Tablica 2. Mješavina betona (kg/m^3)

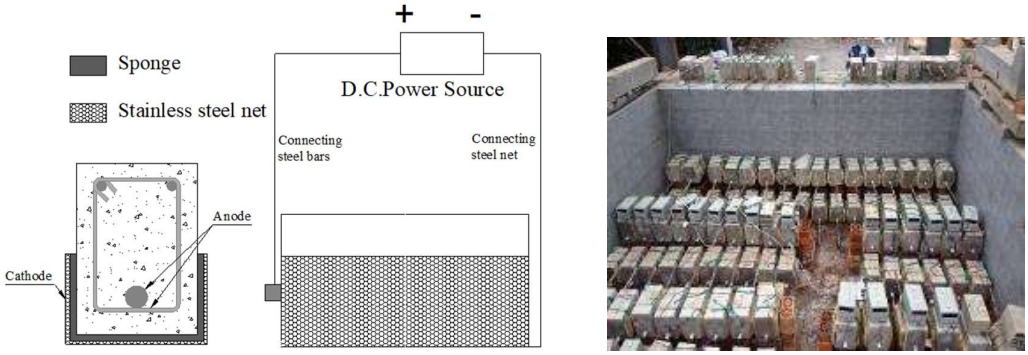
Water	Cement	Fly ash	slag powder	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water reducing agent
103	296	45	52	623	1173	7.3



Slika 3.2. Prikaz armaturnih šipki korištenih u eksperimentu [14]

3.2.1. Ubrzana korozija

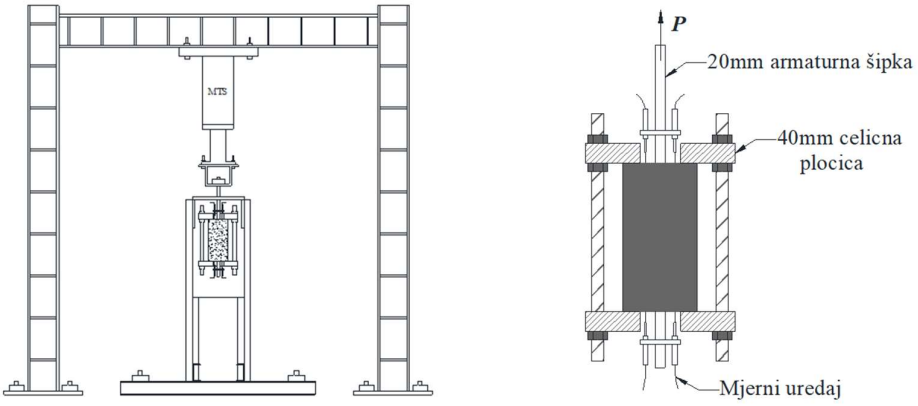
Uzorci su bili prvo izloženi vlaženju mjesec dana, nakon čega su ostavljeni na zraku mjesec dana da se suše te su potom bili podvrgnuti procesu ubrzane korozije. Ubrzana korozija je ostvarena upotrebom struje na koju je svaki uzorak bio spojen. Vilice su se dodirivale pa su zajedno s glavnom uzdužnom šipkom predstavljale anodu. Katoda je bila fiksirana na površini betona kao što je prikazano na slici 34 [14].



(a) (b)

Slika 3.3.Ubrzana korozija: (a) šematski prikaz ubrzane korozije; (b) uzorci uslijed ubrzane korozije [14]

Kroz cijeli postupak nanošena je struja jačine 0.1A, a površine su bile prskane 5% kloridnom otopinom svaki dan. Nakon procesa simuliranja ubrzane korozije svi uzorci su bili obilježeni i dokumentirani. Onda su uzorci bili testirani na pull-out (pokus izvlačenja armature iz uzorka). Brzina nanošenja pomaka je iznosila 0.5mm/min, a rezultati pokazuju da su svi uzorci nakon 10-12 mm dosegli svoju kritičnu nosivost [14].



Slika 3.4. Prikaz uređaja prilikom izvođenja pull-out testa [14]

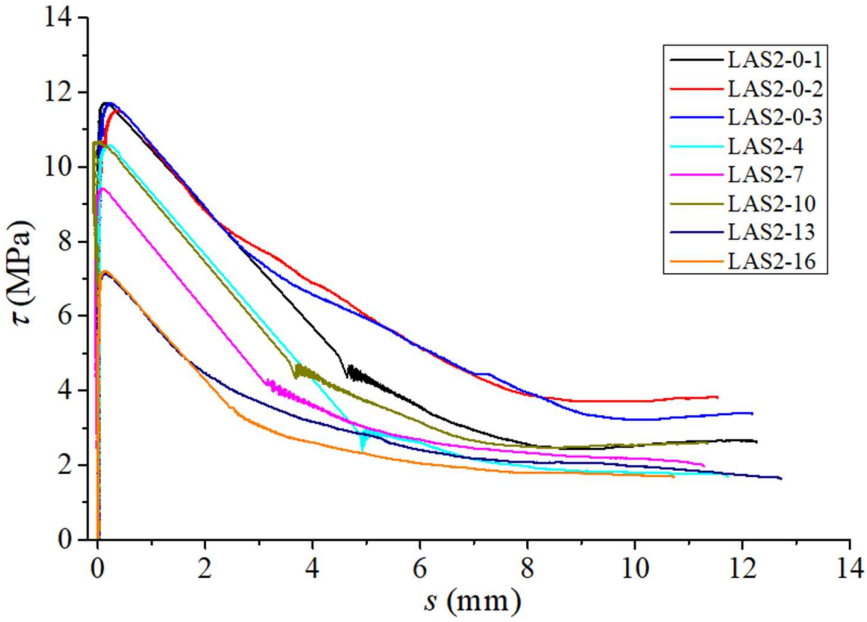
3.2.2. Rezultati

U ovome odlomku biti će prikazani dobiveni eksperimentalni rezultati za nosivost armirano betonske grede te veličina pukotina uslijed izlaganja korozije. Tablica 3. prikazuje eksperimentalne rezultate za seriju uzoraka LAS2. U Tablici 3. prva tri uzorka nisu bila izložena djelovanju korozije te je na njima bio preveden samo pull-out test. Sljedećih pet uzoraka je bilo korodirano i može se zaključiti: što je uzorak bio više korodiran, to mu je nosivost više pala. P_u predstavlja kritičnu silu izvlačenja a, τ_u predstavlja kritično posmično naprezanje po opsegu [14].

$$\tau = \frac{P}{\pi dl} \quad (12)$$

Tablica 3. Rezultati pull-out testa na seriji uzoraka LAS2 [14]

Uzorak	P_u **(kN)**	τ_u **(MPa)**
LAS2-0-1	147.04	11.71
LAS2-0-2	144.43	11.50
LAS2-0-3	147.03	11.71
LAS2-4	132.87	10.58
LAS2-7	118.28	9.42
LAS2-10	134.15	10.68
LAS2-13	89.58	7.13
LAS2-16	90.42	7.20

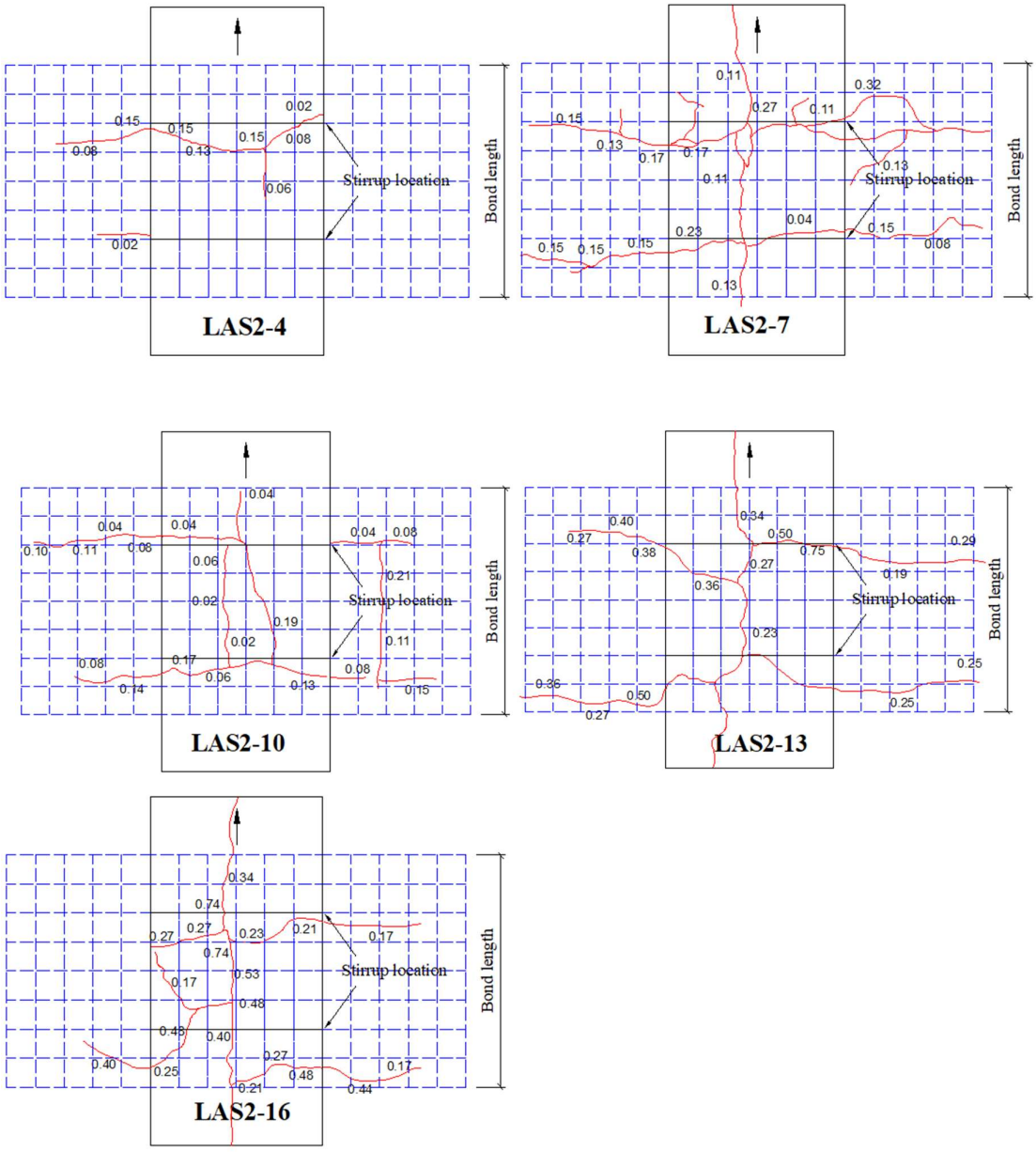


Slika 3.5. Graf naprezanje-pomak za seriju uzoraka lAS2 [14]

Na sljedećim slikama bit će prikazana oštećenja uslijed korozije za pojedine uzorke iz serije LAS2. Oštećenja, odnosno pukotine na površini armirano betonskog uzorka dane su u mm (slika 3.6., 3.7.). Na slikama je uočljivo da se pukotine pojavljuju približno u razinama poprečne i uzdužne armature. Većinom se pojavljuje jedna uzdužna pukotina koja se pruža iznad glavne armature i dvije poprečne pukotine iznad vilica. To je se donekle moglo i očekivati jer se hrđa stvara oko armature koja dalje prodire u beton te dolazi do pucanja betona na tim mjestima [14].

(a) (b) (c)

Slika 3.6. Prikaz uzdužne pukotine na betonskoj površini: (a)nekorodirani uzorak (b) korodirani uzorak (c) uzdužna pukotina sa strane [14]



Slika 3.7. Veličine pukotina na eksperimentalnim uzorcima serije LAS2 [14]

U ovome eksperimentu je pokazano da je uzdužna armatura znatno manje korodirala od poprečne armature. Izračunato je da su vilice izgubile i do 3.5 puta mase nego glavna armaturna šipka iako su bili izloženе istim uvjetima. Ovo se može obrazložiti time da su vilice štitile glavnu armaturu od korodiranja. Pojavljivanje uzdužnih pukotina posljedica je korodiranja uzdužne armature. Iz ovog eksperimenta zaključeno je da uzorci kod kojih je poprečna armatura više korodirala rezultiraju s većim pukotinama na površini betona [14].

4. MODELIRANJE NOSAČA I GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE

U sljedećem odlomku bit će prikazan postupak izrade modela uz unošenje geometrijskih karakteristika, način diskretizacije mreže konačnih elemenata te zadavanje rubnih uvjeta. Za potrebe istraživanja diplomskog rada modelirano je više oblika modela - jednakih geometrijskih karakteristika, ali različitih pozicija anode i katode na armaturi. Pozicija anode i katode utječe na mjesta skupljanja korozijskih produkata što se direktno reflektira na oštećenja u betonu, odnosno pukotine. Za proračune prirodne i ubrzane korozije smo koriste se po dva različita modela, te se sveukupno razlikuju četiri vrste modela (A1,A2,B1,B2).

Vrste modela:

Modeli za prirodnu koroziju:

-model A1(pozicija anode i katode se nalazi naizmjenično oko cijelog poprečnog presjeka na glavnoj armaturi i vilicama)

-model A2 (pozicija anode i katode se nalazi naizmjenično na glavnoj armaturi i vilicama, anoda zauzima pola poprečnog presjeka)

Modeli za ubrzanu koroziju:

-model B1(pozicija anode je cijela je cijela glavna armatura i vilice, a katoda se zadaje na površini betonskog uzorka)

-model B2 (pozicija anode je cijela glavna armatura, a katoda se zadaje na površini betonskog uzorka)

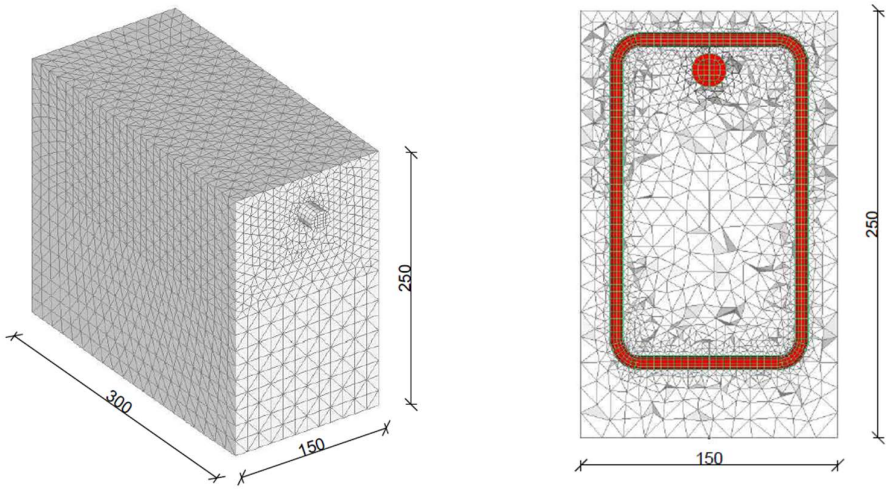
Napomena: Za svaki model je odrađen pripadajući proračun armiranobetonske grede, a budući da se radi o istom postupku koji se primjenjuje za svaki model, detaljna izrada će se opisati samo za jedan model *(model A1- pozicija anode i katode se nalazi naizmjenično oko cijelog poprečnog presjeka na glavnoj armaturi i vilicama). Za ostale modele bit će prikazane samo razlike u odnosu na osnovni model, tj. razlike u načinu pozicioniranja anode i katode na armaturi.*

4.1. Model A1

Ovaj model predstavlja osnovni model simuliranja armiranobetonske grede koja se može smatrati dijelom nosive konstrukcije, a model je rađen po presliku uzoraka iz eksperimentalnih istraživanja sa uzdužnom glavnom armaturom u donjoj zoni i poprečnom armaturom koje čine dvije vilice na zadanom razmaku.

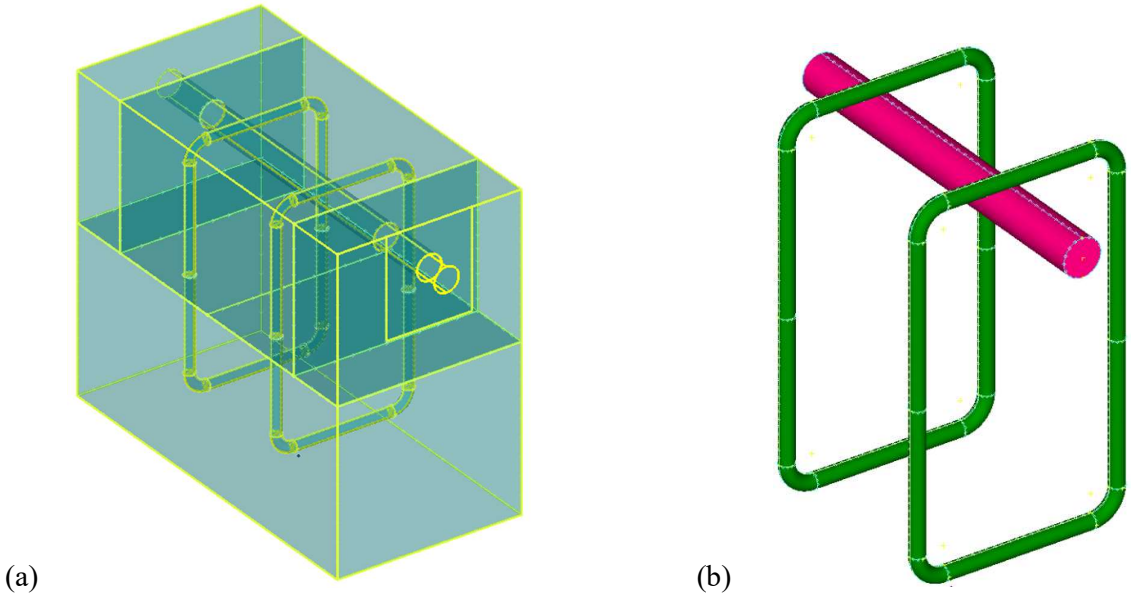
4.1.1. Geometrijske karakteristike i izrada geometrije modela A1

Riječ je o izradi geometrije modela armiranobetonske grede pravokutnog poprečnog presjeka po uzoru na model LAS2 iz eksperimentalnih istraživanja. Dimenzije armirano betonskog modela su b/h = 150/250mm i ukupne duljine 300mm. Za armiranje donje zone korištena je jedna šipka za armiranje promjera Ø 20mm, te su korištene spone Ø 8/100mm, dok je zaštitni sloj betona do glavne armature 25mm s gornje strane, a 65mm na donjoj strani betonskog uzorka, kao što je i prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1 Prikaz geometrije dijela armiranobetonske grede

Kod izrade samog modela u računalnom programu Femap® zbog jednostavnosti i simetrije modela prvo se modelira jedna četvrtina grede. Nakon izrade jedne četvrtine grede pomoću opcija zrcaljenja i kopiranja se dobije kompletni model. Kod modeliranja se mora voditi računa da ne dolazi do preklapanja volumena tijela te da se plohe dodirivanja tijela betona i čelika nalaze na identičnom mjestu. To je vrlo bitno kod crtanja modela konačnih elemenata da kasnije ne bi došlo do pogrešaka. Na sljedećoj slici 4.2. prikazana je zadana geometrija betona i čelika (armature). Osnovni element predstavlja betonski element u kojem su prethodno ostavljeni cilindrični otvori koji služe za modeliranje i postavljanje uzdužne i poprečne armature zajedno s kontakt elementima.



(a) (b)

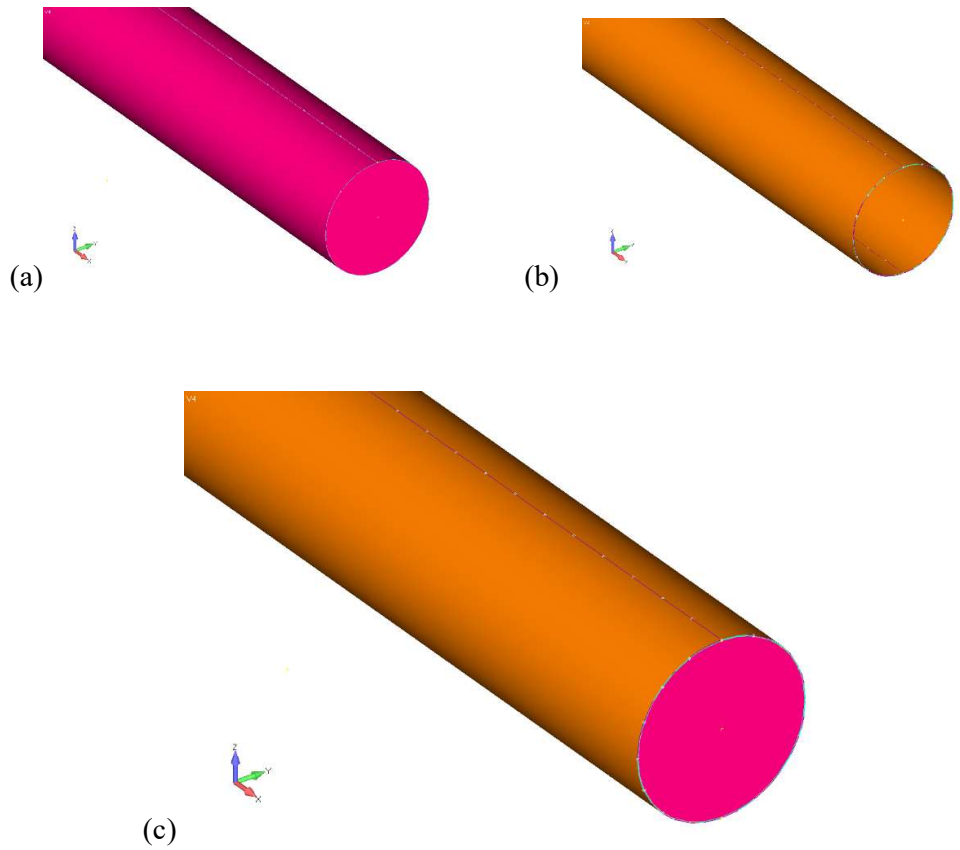
Slika 4.2. (a)Prikaz geometrije modela betona; (b)modela uzdužne i poprečne armature

Nakon što je gotova cijela geometrija modela i napravljen željeni oblik, može se započeti s izradom mreže konačnih elemenata, opisivanjem istih i zadavanjem odgovarajućih svojstava materijala.

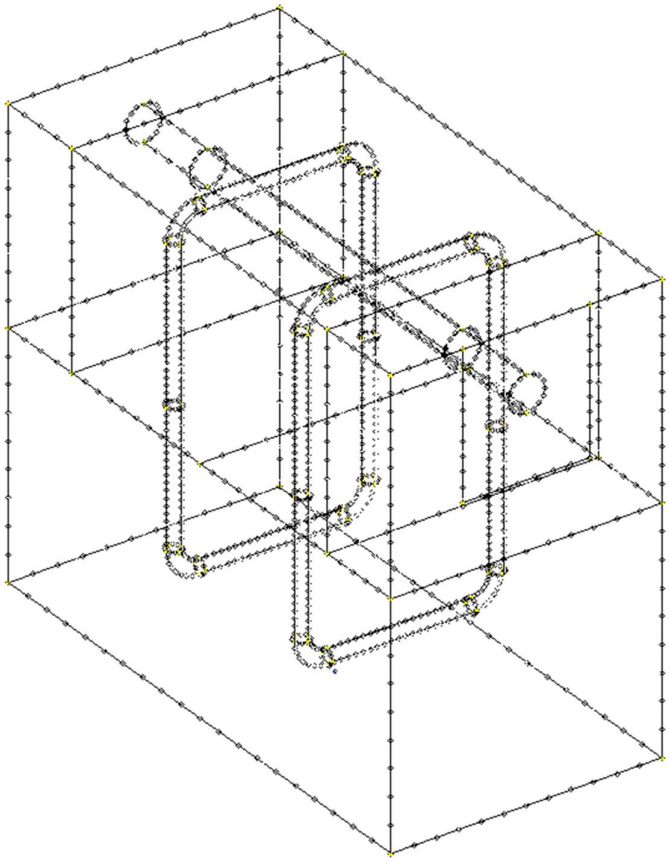
4.1.2. Prikaz izrade mreže konačnih elemenata modela A1

U ovom poglavlju bit će obrađen način izrade mreže konačnih elemenata za sve materijale, odnosno za beton (greda) i čelik (za kontakt elemente i elemente glavne armature). S obzirom da je ovaj dio modeliranja vrlo složen, treba mu pristupiti s pažnjom kako se kasnije ne bi pojavili problemi s testiranjem modela. Mrežu konačnih treba pažljivo napraviti kako bi konačni rezultati bili vjerni.

Prvi korak u izradi mreže konačnih elemenata je definiranje i stvaranje svih materijala i zadavanja svojstava armiranobetonske grede. Potom se, koristeći geometriju modela, definira broj konačnih elemenata (mesh size), to jest greda se podijeli na željeni broj elemenata kojima se postiže zadovoljavajuća mreža konačnih elemenata.



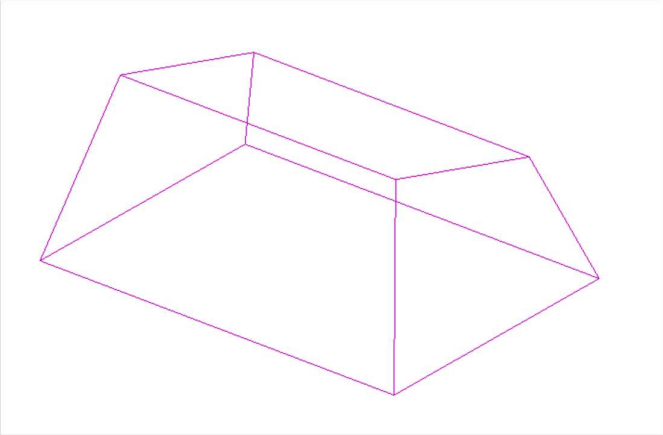
Slika 4.3. Prikaz podjele tijela armature i kontakt elemenata:(a)tijelo glavne armaturne šipke; (b) tijelo kontakt elementa oko glavne armaturne šipke (c) tijelo glavne armaturne šipke i kontakt elementa oko nje



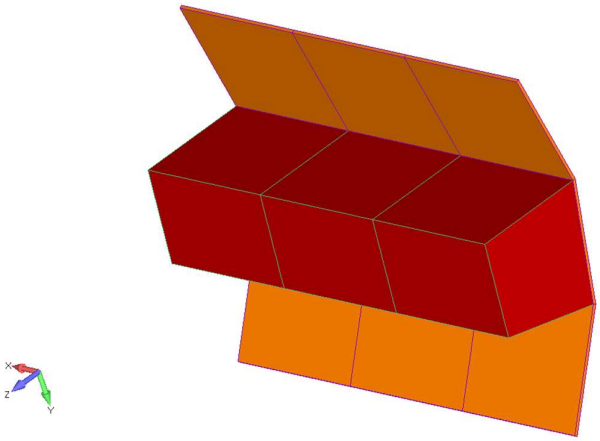
Slika 4.4 Prikaz podjele (mesh size) cijelog betonskog dijela modela

Nakon podjele i zadavanja broja elemenata svakoj liniji geometrije modela može se napraviti mreža trodimenzionalnih (3D) konačnih elemenata.

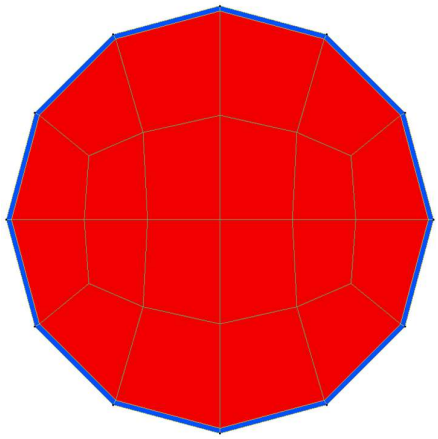
Glavna uzdužna i poprečna armatura su modelirane kao čvrsta tijela (solid) kojeg čine trodimenzionalni (3D) konačni elementi. Oko glavne uzdužne i poprečne armature modeliran je jedan sloj elemenata debljine 0.1mm koje nazivamo kontakt elementima. Kontakt elementi nam služe samo za modeliranje površinske zone između betona i čelične armature, odnosno za simuliranje veze na dodiru navedena dva materijala te mogu prenijeti samo posmična i tlačna naprezanja. Za prostornu diskretizaciju čelika (armature, kontakt elemenata) upotrijebljeni su trodimenzijski elementi s 8 čvorova i 8 integracijskih točaka (heksaedarski trodimenzionalni (3D) konačni elementi-HexMesh solids).



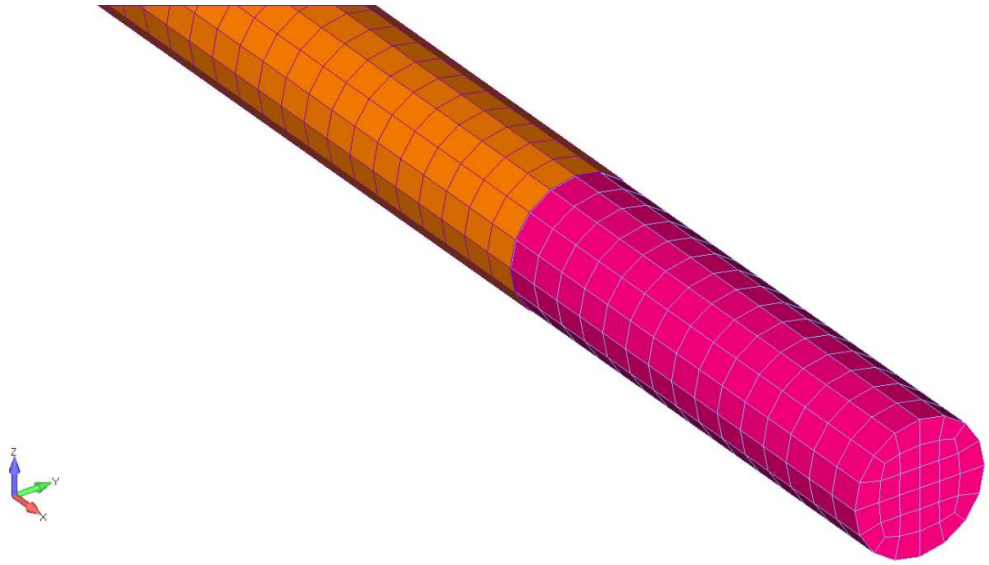
Slika 4.5. Prikaz heksaedarskog konačnog elementa armature (kao i za kontakt elemente)



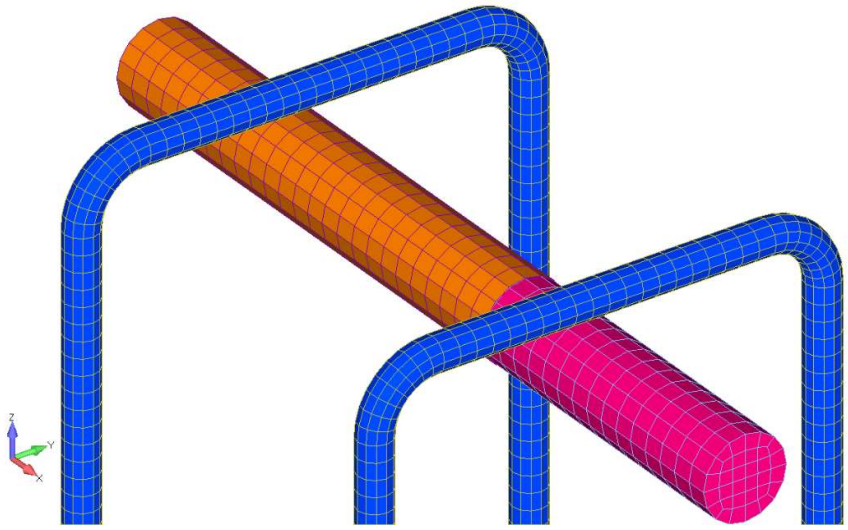
Slika 4.6. Prikaz detalja konačnih elemenata uzdužne armature i kontakt elemenata



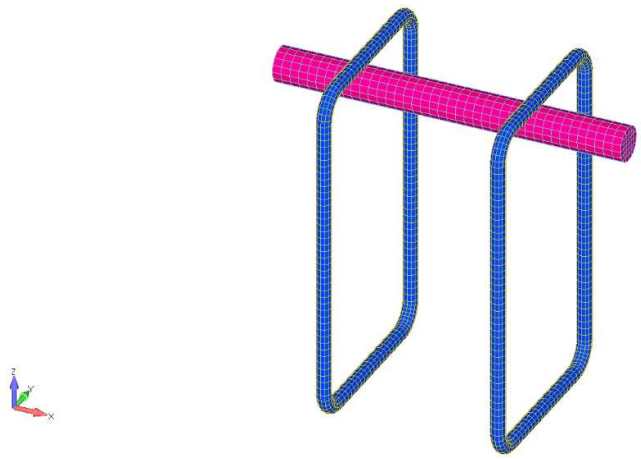
Slika 4.7. Poprečni presjek armature vilice promjera 8Ø mm zajedno s kontakt elementima debljine 0.1mm (zajednički promjer Ø 8.2mm)



Slika 4.8. Prikaz načina modeliranja glavne uzdužne armature i kontakt elemenata za simuliranje veze beton-armatura (čelik)

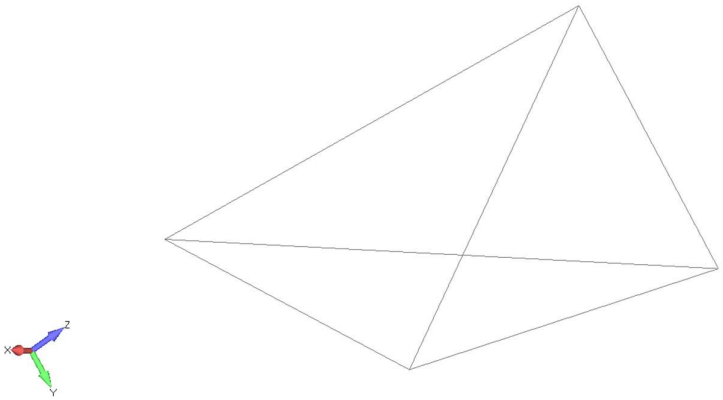


Slika 4.9. Prikaz detalja uzdužne i poprečne armature grede



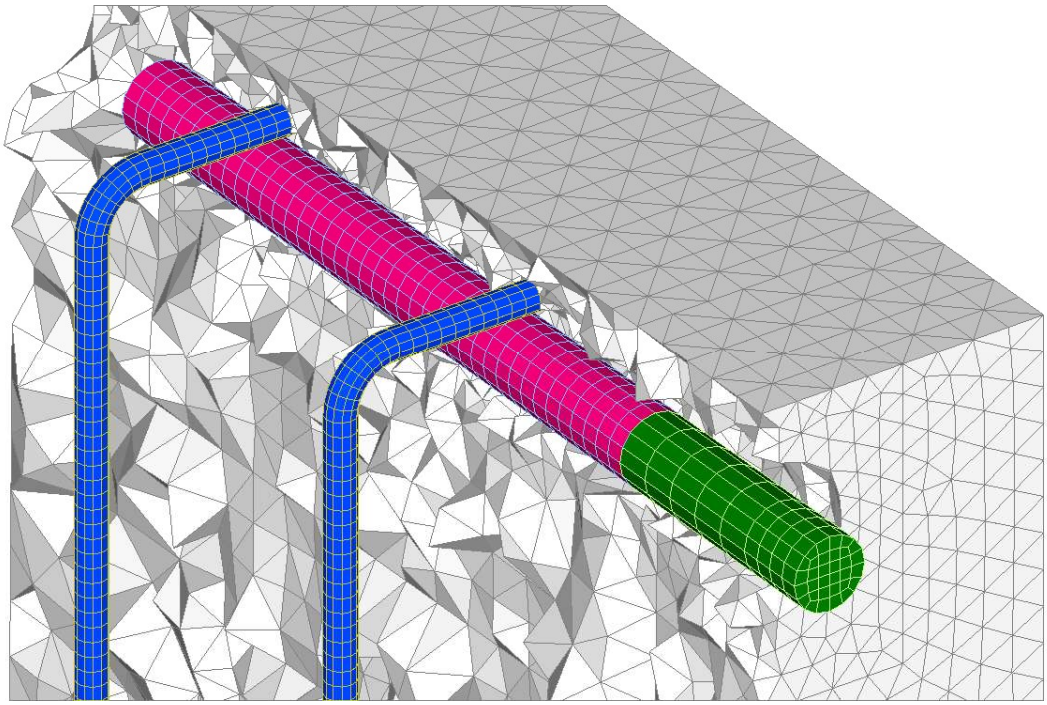
Slika 4.10. Raspored uzdužne i poprečne armature uzduž cijele grede

Nakon modeliranja mreže konačnih elemenata za armaturu i kontakt elemente, slijedi isto napraviti za betonski dio grede kako bi se dobila cijela mreža konačnih elemenata AB grede. Prostornu diskretizaciju (mrežu) konačnih elemenata betona čine tetraedarski trodimenzionalni (3D) konačni elementi s 4 čvora i 4 integracijske točke, kao što je prikazano na slici 4.11.



Slika 4.11. Prikaz jednog tetraedarskog konačnog elementa betona (četveročvorni element)

Prilikom zadavanja broja elemenata po svakoj liniji geometrije modela, odnosno pri modeliranju mreže konačnih elemenata betona, definiran je najveći tetraedarski element betona veličine 10mm. Vrlo važno je posvetiti dovoljno vremena modeliranju ovakve mreže tetraedarskih i heksaedarskih trodimenzionalnih konačnih elemenata, kako bi se izbjegle moguće greške i dobili što vjerniji rezultati. Da bi mreža konačnih elemenata bila uspješno napravljena potrebno je kontrolirati da se svi konačni elementi (i tetraedarski i heksaedarski) međusobno spajaju (nastavljaju) isključivo u svojim čvorovima.

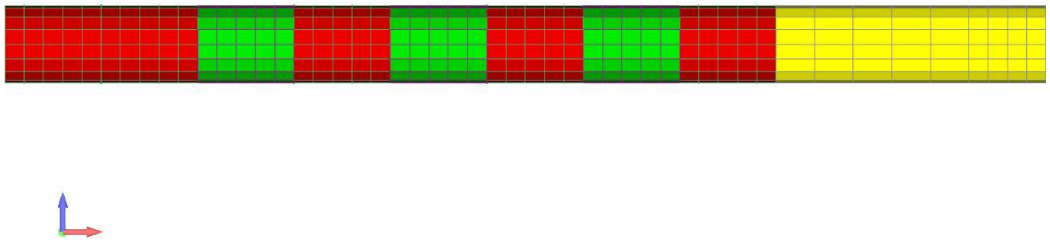


Slika 4.12. Prikaz gotove mreže konačnih elemenata kroz presjek ab grede

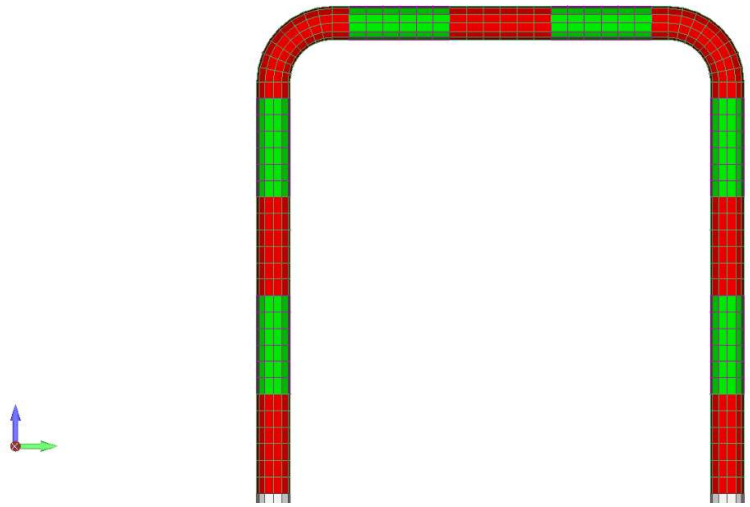
Ovakav model s mrežom konačnih elemenata predstavlja gotov model armiranobetonske grede s odgovarajućom uzdužnom i poprečnom armaturom. Za potrebe testiranja modela i istraživanja potrebno je još samo zadavanje opterećenja na model te zadavanje rubnih uvjeta i pridržanja nosača, što će biti opisano u poglavljima 5. odnosno 6.

4.1.3. Položaj anode i katode na modelu A1

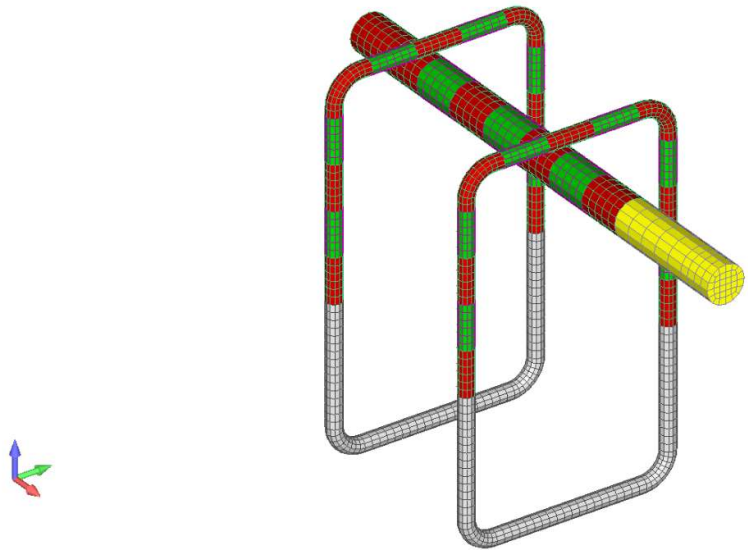
Kod analize i proračuna korozije jako je bitno odrediti položaje anode katode na armaturi. U slučaju prirodne korozije u proces je uključena uzdužna i poprečna armatura, odnosno glavna armaturna šipka i jedan par vilica. Za model A1 položaj anode i katode ide naizmjenično kroz cijeli poprečni presjek što će biti jasnije prikazano na sljedećim slikama 4.13, 4.14. Zelena boja predstavlja područje anode, dok crvena predstavlja područje katode a plastična cijev je označena žutom bojom.



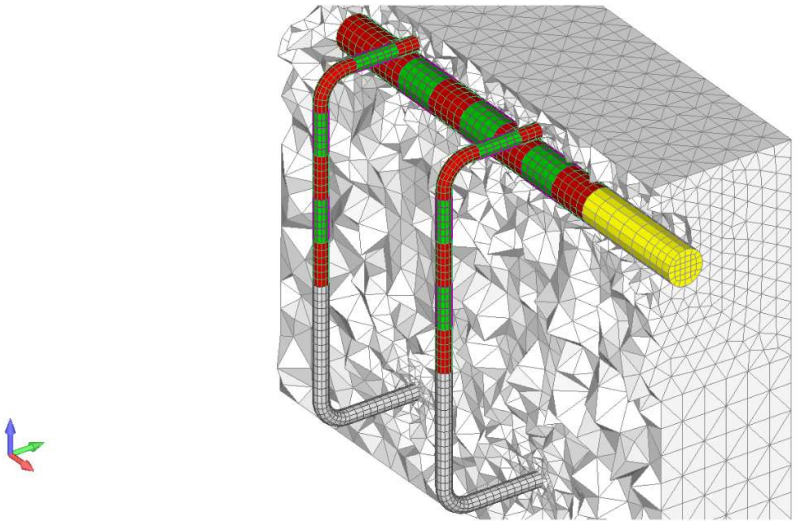
Slika 4.13. Prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci modela A1



Slika 4.14. Prikaz položaja anode i katode na vilicama modela A1



Slika 4.15. Prostorni prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama modela A1

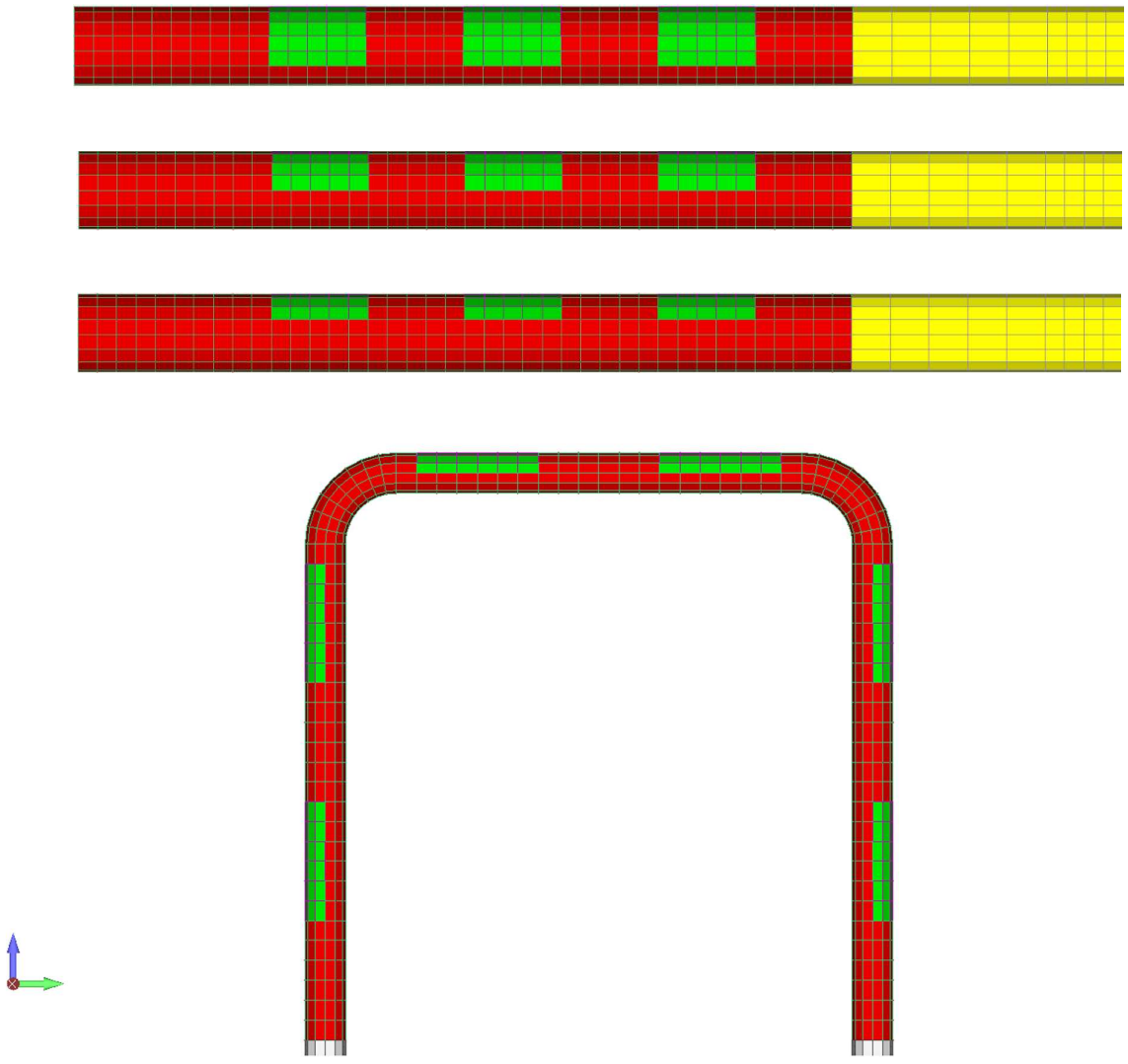


Slika 4.16. Prostorni prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama zajedno s diskretizacijom konačnih elemenata betona modela A1

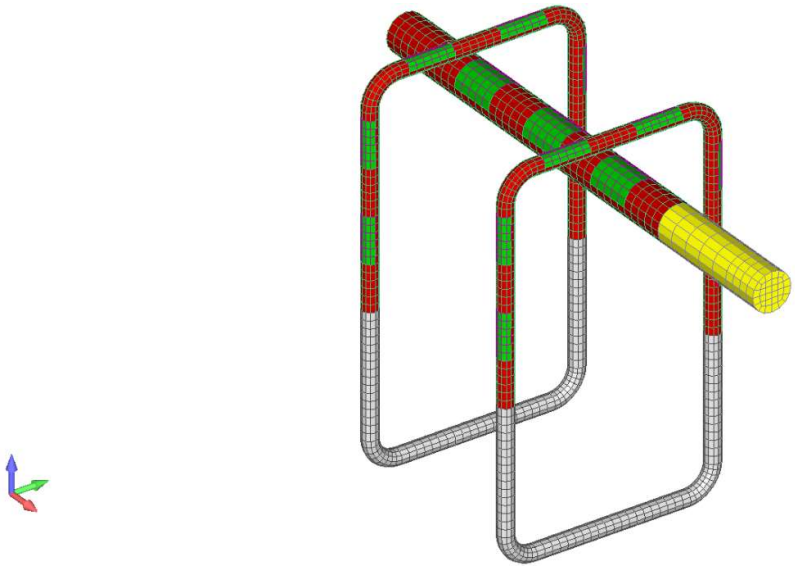
4.2. Model A2

S obzirom da su svi promatrani modeli jednaki u pogledu geometrijskih karakteristika i da imaju istu mrežu konačnih elemenata, u poglavljima 3.2. , 3.3. i 3.4. biti će navedene i grafički prikazane samo razlike u pozicioniranju anode i katode na modelima.

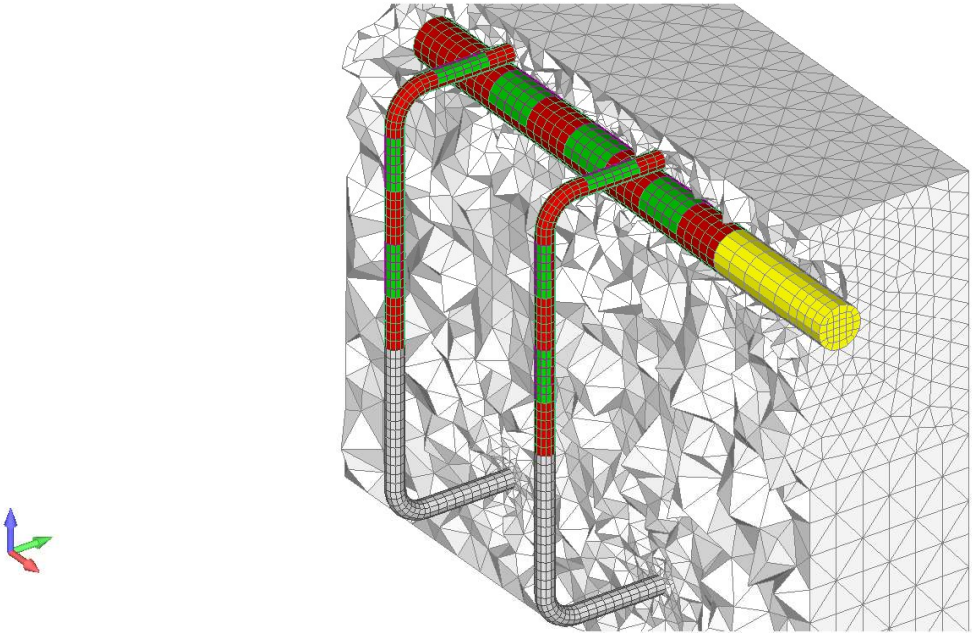
Glavna razlika ovog modela u usporedbi s modelom A1 (pozicija anode i katode se nalazi naizmjenično oko cijelog poprečnog presjeka na glavnoj armaturi i vilicama) je u tome što na položajima gdje se nalazi anoda, anoda ne uzima cijeli poprečni presjek nego samo do pola. Položaj anode u ovom modelu je orijentiran prema vani, odnosno anoda je orijentirana prema površini armirano betonskog uzorka (slika 4.17.).



Slika 4.17. Prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama modela A2



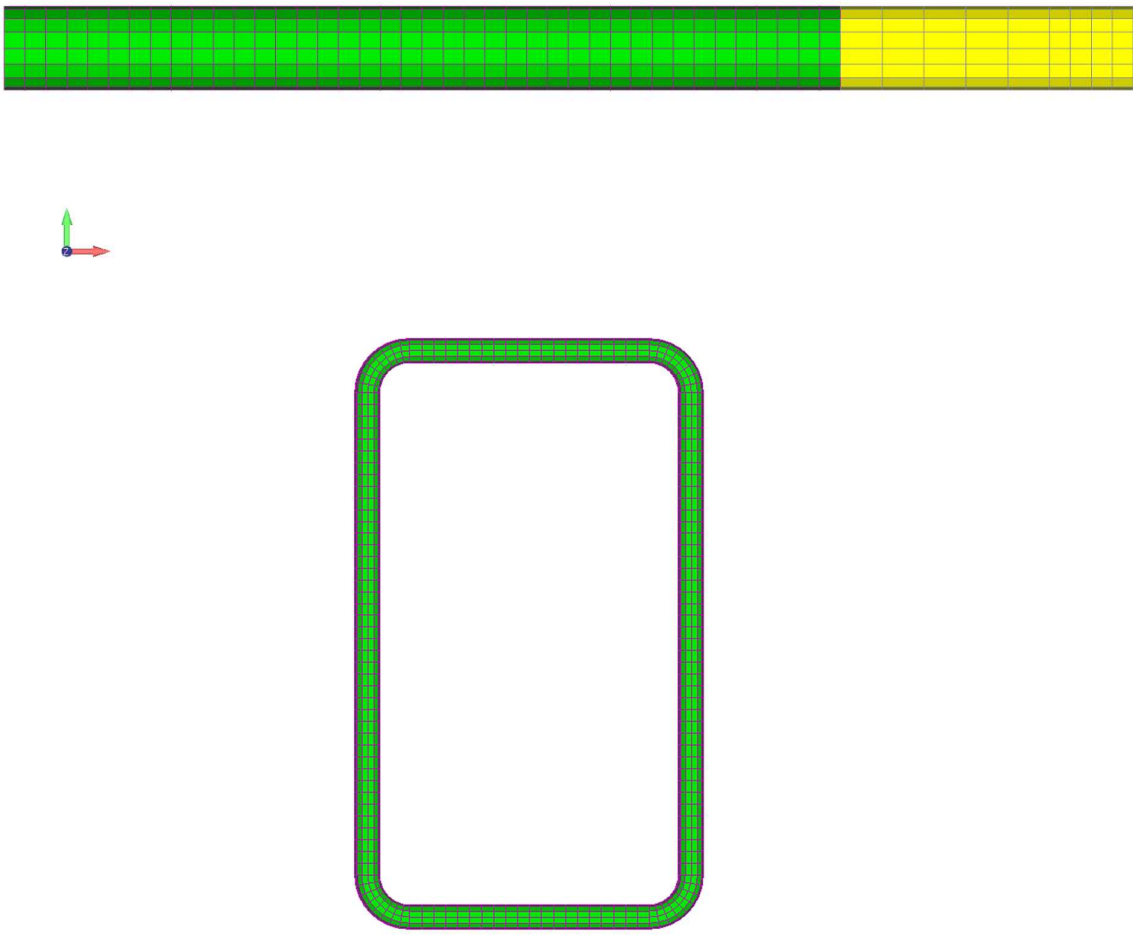
Slika 4.18. Prostorni Prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama modela A2



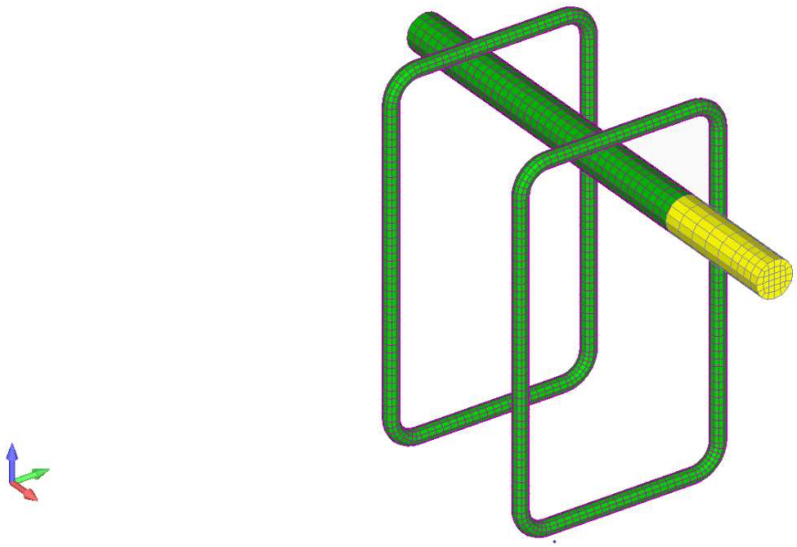
Slika 4.19. Prostorni prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama zajedno s diskretizacijom konačnih elemenata betona modela A2

4.3. Model B1

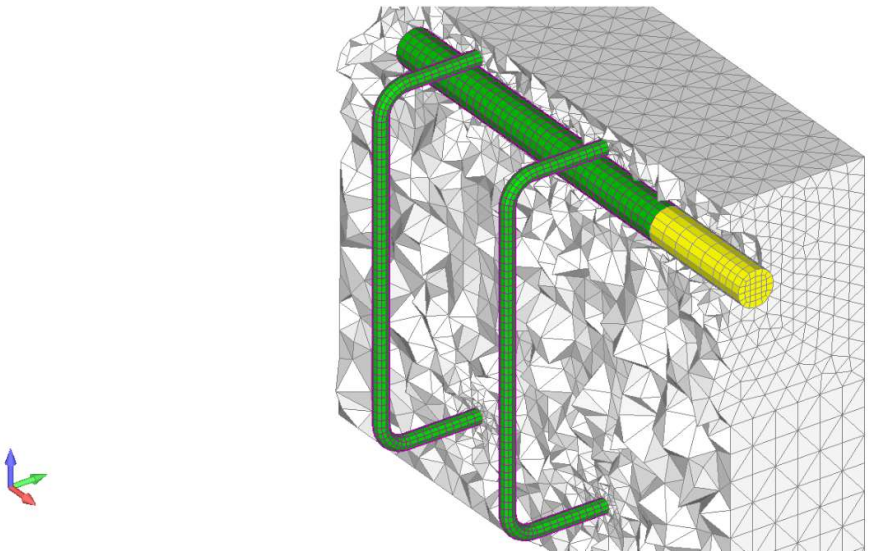
Model B1 je prvi od dva modela kojeg koristimo kod proračuna ubrzane korozije. Za razliku od modela za prirodnu koroziju (A1, A2) pozicija katode se ne nalazi na armaturi nego je zadana rubnim uvjetima na površini armirano betonskog elementa te se na taj način simulira elektrokemijska reakcija koja za produkt daje korozijske produkte. U ovom modelu uzdužna i poprečna armatura nam simuliraju anodu dok gornja polovica površine armirano betonskog elementa predstavlja katodu što možemo vidjeti na sljedećim slikama 4.20. i 4.21.



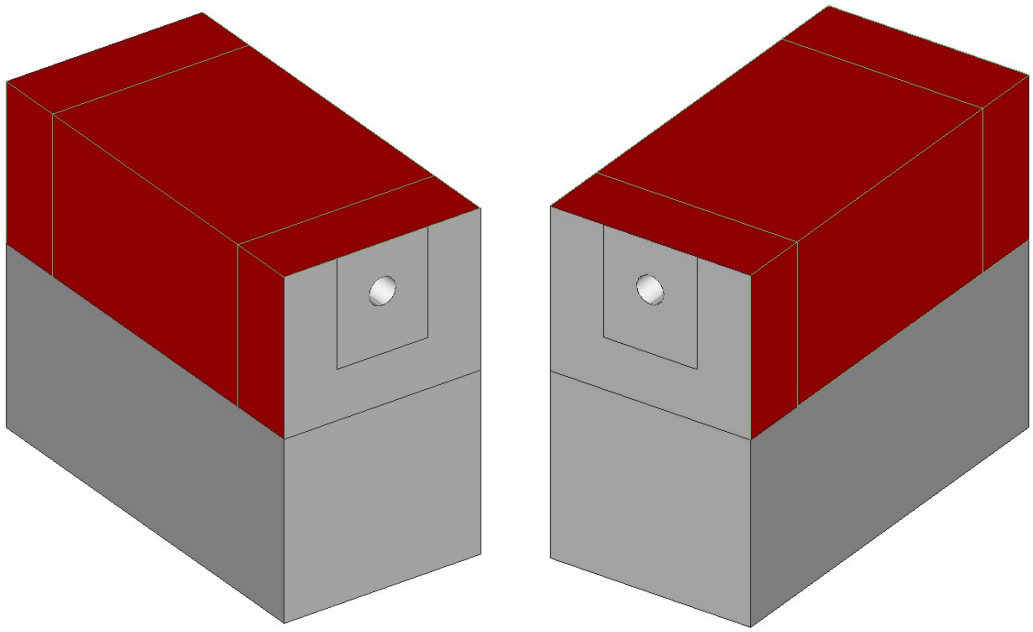
Slika 4.20. Prikaz položaja anode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama modela B1



Slika 4.21. Prostorni prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama betona modela B1



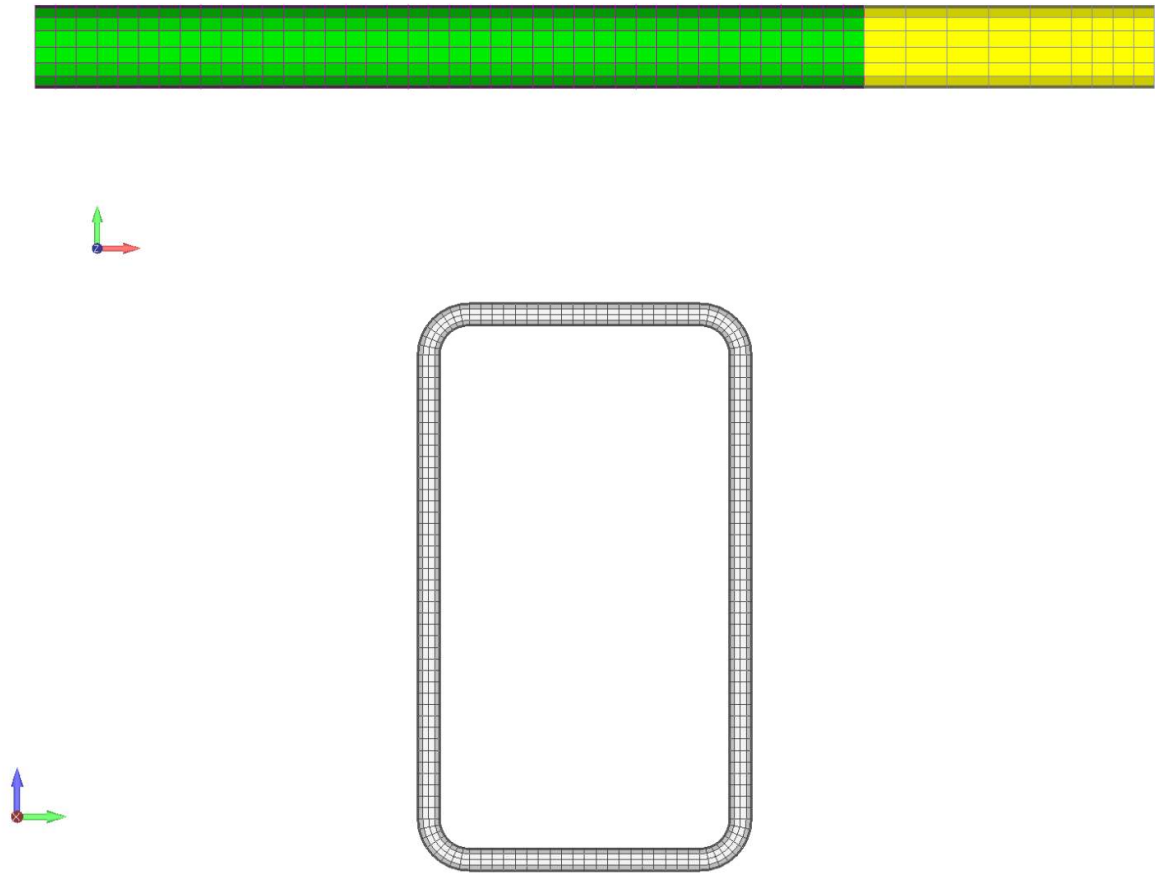
Slika 4.22. Prostorni prikaz položaja anode i katode na glavnoj armaturnoj šipci i vilicama zajedno s diskretizacijom konačnih elemenata betona modela B1



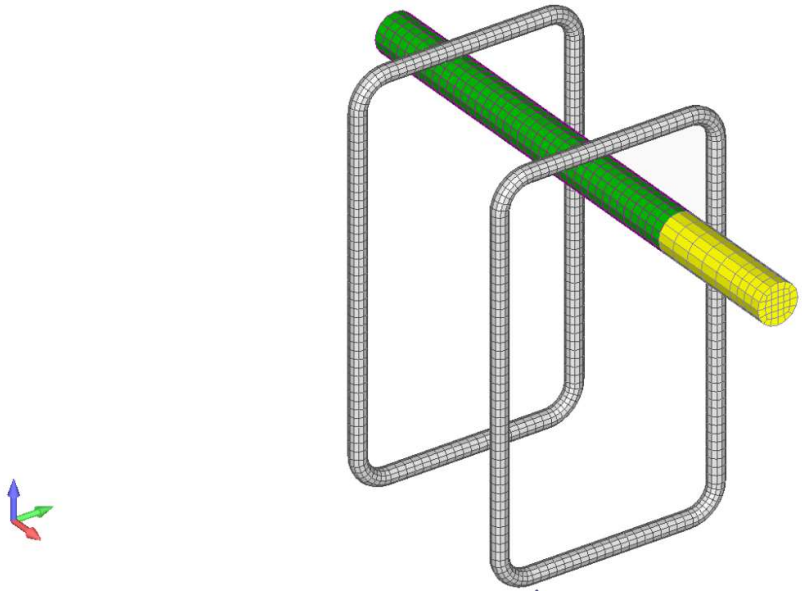
Slika 4.23 Prostorni prikaz položaja katode na površini armiranobetonskog uzorka za model B1

4.4 Model B2

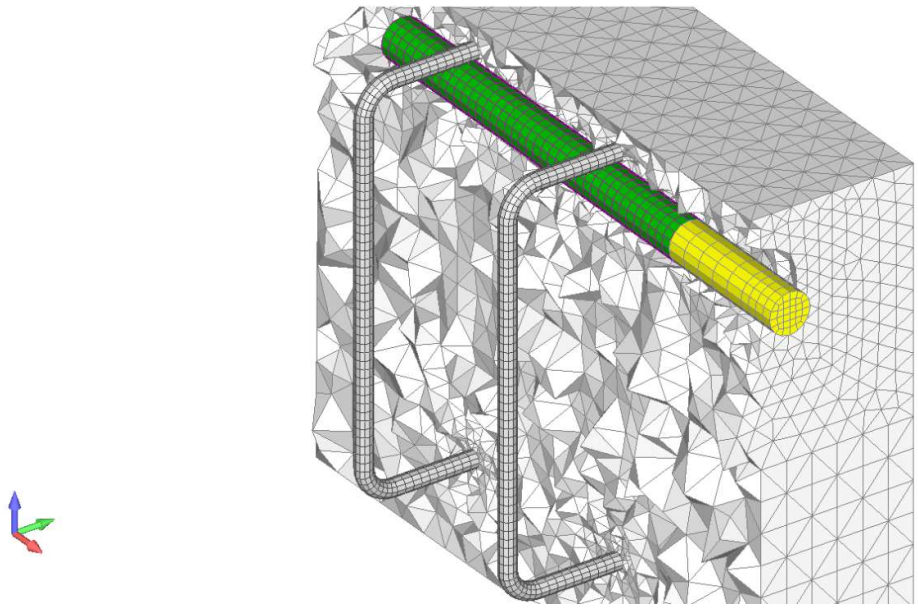
Model B2 po uzoru na model B1 simulira proces ubrzane korozije. Kod ovog modela anodu predstavlja samo uzdužna armatura, a katoda je zadana na betonskoj površini. Vilice u ovom modelu nisu uključene u elektrokemijski proces te na njima neće doći do nastajanja korozijskih produkata kao u prethodno opisanom B1 modelu (slika 4.27., 4.28., 4.29.).



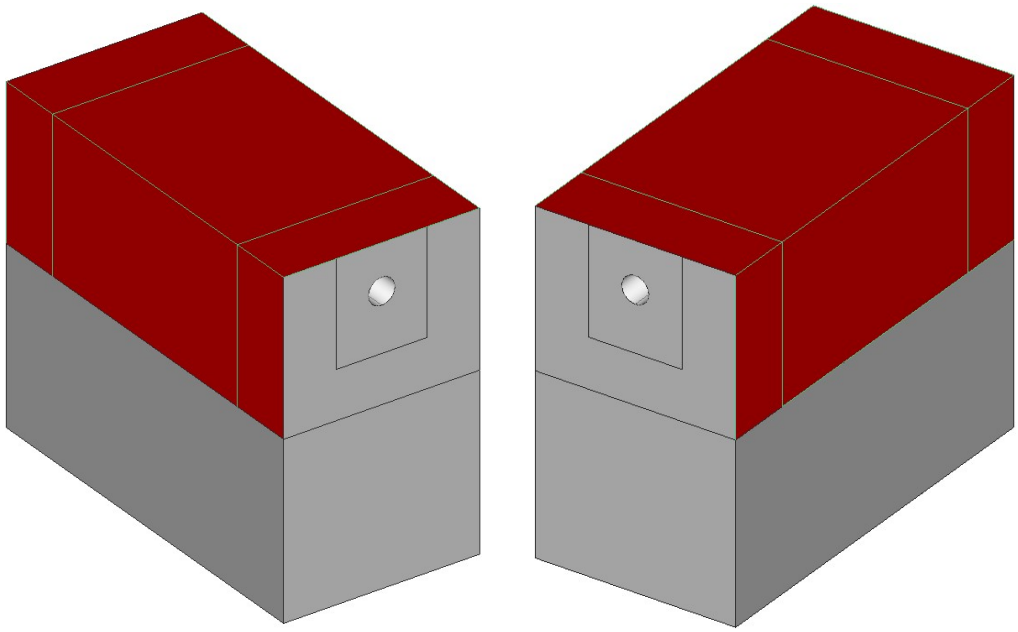
Slika 4.24. Prikaz položaja anode na uzdužnoj armaturi i prikaz ne aktivirane vilice na modelu B2



Slika 4.25. Prostorni prikaz anode na uzdužnoj armaturi modela B2



Slika 4.26. Prostorni prikaz anode na uzdužnoj armaturi i diskretizcija konačnih elemenata betona modela B2



Slika 4.27. Prostorni prikaz položaja katode na površini armiranobetonskog uzorka za model B1

4.5. Pregled korištenih materijala i pripadajućih karakteristika

U ovom poglavlju slijedi prikaz materijala korištenih za izradu modela armiranobetonske grede i u proračunima zajedno sa svojstvima i ostalim karakteristikama pojedinog materijala. Za sve modele koriste se su isti materijali s jednakim svojstvima. Dva glavna i osnovna materijala koja se koriste za modeliranje nosača su beton i čelik, ali zbog načina modeliranja nosača te zbog posebnosti računalnog programa, korišteno je 8 svojstava za opisivanje istih.

Prikaz korištenih materijala i svojstava:

Napomena: *Zbog lakšeg razumijevanja svojstava materijala uz svaki od njih slijedi kratko objašnjenje*

Concrete –predstavlja beton ab grede

Contact elements - Main bar – predstavljaju kontakt elemente na dodiru betona i glavne šipke

Contact elements-Stirrup – predstavljaju kontakt elemente na dodiru betona i čelika vilica

Main bar – predstavlja uzdužnu glavnu armaturu

Stirrup – predstavlja poprečnu armaturu (vilice)

Bar elements – predstavljaju vezu betona i čelika (bond elementi)

Linear elements – elementi betona pri ležaju koji simuliraju sidrenje armature

Anode – predstavlja vezu betona i čelika koja se aktivira kod simuliranja korozije

Cathode – predstavlja vezu betona i čelika koja se aktivira kod simuliranja korozije

```
# Concrete
Material Nr.:                                        1
Number of properties to be read:                     5
Type of material parameters (1=microplane)           0
Young modulus:                                 30000.0
Poisson's ratio:                                  0.18
Weight density:                                    0.0
Creep factor:                                      0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):          0.0
#
Tensile strength:                                 3.85
Compressive strength:                            45.65
Fracture energy:                                  0.15
#
# Main bar
Material Nr.:                                        2
```

```
Number of properties to be read:                          5
Type of material parameters (1=microplane)                0
Young modulus:                                       210000.0
Poisson's ratio:                                         0.33
Weight density:                                           0.0
Creep factor:                                             0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):                 0.0
#
Tensile strength:                                        0.00
Compressive strength:                                    0.00
Fracture energy:                                         0.00
#
# Stirrup
Material Nr.:                                             3
Number of properties to be read:                          5
Type of material parameters (1=microplane)                0
Young modulus:                                       210000.0
Poisson's ratio:                                         0.33
Weight density:                                           0.0
Creep factor:                                             0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):                 0.0
#
Tensile strength:                                        0.00
Compressive strength:                                    0.00
Fracture energy:                                         0.00
#
# Contact layer - Main bar
Material Nr.:                                             4
Number of properties to be read:                          5
Type of material parameters (1=microplane)                0
Young modulus:                                        1.0D-30
Poisson's ratio:                                         0.33
Weight density:                                           0.0
Creep factor:                                             0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):                 0.0
#
Tensile strength:                                        0.00
Compressive strength:                                    0.00
Fracture energy:                                         0.00
#
# Contact layer - Stirrup
Material Nr.:                                             5
Number of properties to be read:                          5
Type of material parameters (1=microplane)                0
Young modulus:                                        1.0D-30
Poisson's ratio:                                         0.33
Weight density:                                           0.0
Creep factor:                                             0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):                 0.0
#
Tensile strength:                                        0.00
Compressive strength:                                    0.00
Fracture energy:                                         0.00
#
# Anode
Material Nr.:                                             6
Number of properties to be read:                          4
Type of material parameters (1=microplane)                0
Young modulus:                                         100.0
Friction:                                                0.00
Bar area:                                                 1.0
Contact Gap:                                              0.0
```

```
#
Tensile strength:                                   0.00
Compressive strength:                               0.00
Fracture energy:                                    0.00
#
# Cathode
Material Nr.:                                          7
Number of properties to be read:                       4
Type of material parameters (1=microplane)             0
Young modulus:                                     100.0
Friction:                                           0.00
Bar area:                                            1.0
Contact Gap:                                         0.0
#
Tensile strength:                                   0.00
Compressive strength:                               0.00
Fracture energy:                                    0.00
#
# Bar-axis
Material Nr.:                                          8
Number of properties to be read:                       5
Type of material parameters (1=microplane)             0
Young modulus:                                      10.0
Poisson's ratio:                                    0.33
Weight density:                                      0.0
Reinforcement area:                                  0.0
Reinforcement yield stress:                          0.0
#
Tensile strength:                                   0.00
Compressive strength:                               0.00
Fracture energy:                                    0.00
#
# Concrete block
Material Nr.:                                          9
Number of properties to be read:                       5
Type of material parameters (1=microplane)             0
Young modulus:                                   30000.0
Poisson's ratio:                                    0.18
Weight density:                                      0.0
Creep factor:                                        0.0
Shrinkage (+ =contraction, - =expansion):            0.0
#
Tensile strength:                                   3.85
Compressive strength:                              45.65
Fracture energy:                                    0.15
#
# Bar ele-without corrosion
Material Nr.:                                         10
Number of properties to be read:                       4
Type of material parameters (1=microplane)             0
Young modulus:                                     100.0
Friction:                                           0.00
Bar area:                                            1.0
Contact Gap:                                         0.0
#
Tensile strength:                                   0.00
Compressive strength:                               0.00
Fracture energy:                                    0.00
```

Kao što je vidljivo iz prikazanih svojstava materijala, za izradu modela i testiranja armiranobetonske grede korišten je beton vlačne čvrstoće 3.85N/mm^2, pripadne tlačne čvrstoće 45.65 N/mm^2, korišten je Young-ov modul elastičnosti u iznosu od 30 000.00 N/mm^2 i Poissonov koeficijent 0.18. Za izradu uzdužne i poprečne armaturure, kao i čeličnih pločica korišten je čelik s Young-ovim modulom elastičnosti u iznosu od 210 000.00 N/mm^2 i Poissonovim koeficijentom 0.33, dok granicu tečenja predstavlja vrijednost 450 N/mm^2 te 632 N/mm^2 maksimalno naprezanje (vlačna čvrstoća).

5. ZADAVANJE OPTEREĆENJA NA MODEL

Za potrebe istraživanja i testiranja navedenih modela korištene su dvije faze opterećivanja armiranobetonske grede:

- 1.faza – simuliranje korozije
- 2.faza – pokus izvlačenja armature iz armirano betonskog uzorka (pull-out test)

Svi predstavljeni modeli (A1, A2, A3, A4) su opterećivani na način da su prvo bili izloženi utjecaju korozije u određenom vremenskom razdoblju - 1.faza ispitivanja. Nakon završetka 1.faze ispitivanja modeli su bili testirani na pokus izvlačenja armature iz ab grede. Kod 1.faze vremenski koraci za prirodnu koroziju kod modela A1 i A2 su iznosili redom 1, 3, 7 godina, dok su kod ubrzane korozije za modele B1 i B2 vremenski koraci iznosili redom 4, 8, 12, 16 dana. U 2.fazi ispitivanja pokus izvlačenja armature iz ab uzorka je napravljen na način da su zadani mali pomaci u zadanom broju koraka. Da bi bili u mogućnosti ispitati koliko je nosivost ab grede umanjena nakon ispitivanja 1.faze režima korozije, napravljen je test na modelu bez utjecaja korozije, odnosno model je bio ispitan samo za 2.fazu izvlačenja armature te su rezultati toga ispitivanja uspoređivani s modelima koji su opterećeni u dvije faze. Budući da su svi modeli opterećeni na isti način, zadavanje opterećenja će se detaljno pokazati na samo jednom modelu. Svi rezultati odrađenih testiranja i proračuna te usporedbe istih bit će iskazane u poglavlju 7. (*Prikaz i usporedbe rezultata*).

5.1. Prva faza – simuliranje korozije

U prvoj fazi ispitivanja ispitni uzorci su izloženi agresivnim uvjetima okoliša odnosno utjecaju korozije. Numeričko simuliranje procesa korozije te oštećenja i produkata koje ta korozija izaziva je jako zahtjevan i izazovan zadatak danas u istraživačkom svijetu. Numerički proračun je fokusiran na ispitivanje oštećenja izazvanih od korozije. Stoga procesi prije depasivacije armature nisu računati, odnosno numerička analiza počinje od trenutka kada je proces depasivacije armature već započeo (oštećenje pasivnog filma na šipki armature). Za pojednostavljivanje ovog problema pretpostavljena područja katode i anode se ne mijenjaju tokom ovog proračuna. Područje anode predstavlja mjesta na armaturi gdje je depasivacija već započela. U ovom proračunu računamo transport kisika, transport vode, proračun električnog potencijala, gustoću korozijske struje na kontaktu armature i betona, pukotine i oštećenja u betonu izazvane mehaničkim i ne-mehaničkim djelovanjem, odnosno nastankom produkata korozije. Za analizu koristimo dobro kvalitetan beton (vodocementni faktor w/c=0.4) a saturacija betona iznosa 55% za prirodnu koroziju. Kod ubrzane korozije saturacija betona se mijenja kroz vrijeme, na površini armiranobetonskog uzorka (rubni uvjet) je postavljena saturacija od 85%, a u unutrašnjosti saturacija iznosi 50 %. Nadalje, pretpostavljeno je da početna koncentracija kisika u betonu iznosi 0.0085 kg otopljenog kisika po kubnom metru porne otopine u betonu, što je također rubni uvjet na slobodnim površinama grede. Geometrija uzorka i parametri potrebni za izračunavanje procesa nakon depasivacije čelika su rađeni prema 3D kemo-higro-termo modelu koji računa vrijednost korozijske gustoće kao funkciju zasićenja betona . U sljedećim tablicama 4.,5. i 6. bit će dani mehanički parametri betona i čelika te parametri korišteni za numeričku analizu procesa nakon depasivacije armature.

Tablica 4. Parametri materijala

Parametri	Vrijednost
Modul elastičnosti betona, E_c (N/mm^2)	25000.0
Poissonov koeficijent betona, ν_c	0.18
Vlačna čvrstoća betona, f_t (N/mm^2)	2.00
Tlačna čvrstoća betona, f_c (N/mm^2)	25.0
Energija sloma, G_f (J/m)	80.0
Modul elastičnosti čelika, E_s (N/mm^2)	200000.0
Poissonpv koeficijent čelika, ν_s	0.33
Modul elastičnosti hrđe, E_r (N/mm^2)	100.0
Ekspanzivni faktor hrđe(prirodna korozija), $\alpha_r = \rho_s / \rho_r$	4.0
Ekspanzivni faktor hrđe(prirodna korozija), $\alpha_r = \rho_s / \rho_r$	1.9

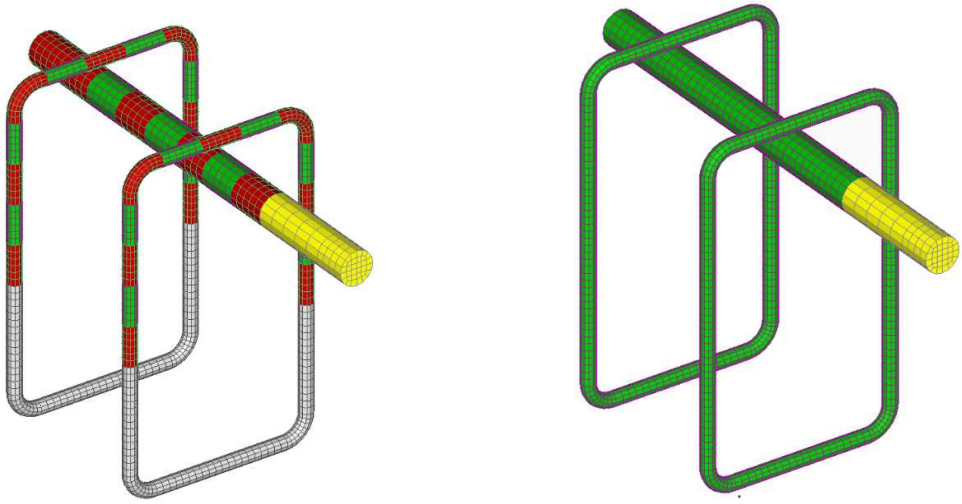
Tablica 5. Difuzivitet kisika, D_o, i električna provodljivost, σ, betona dobre kvalitete (v/c=0.4) za različite stupnjeve saturacije S [5]

Saturacija(%)	*v*/*c* = 0.4	
	$D_o(10^{-8}m^2/s)$	$\sigma(10^{-3}\Omega^{-1}m^{-1})$
35	3.36	0.01
40	2.75	0.03
45	2.15	0.07
50	1.55	0.20
55	1.30	0.25
60	1.20	0.53
65	1.00	0.75
70	0.75	1.00
75	0.45	2.0
80	0.30	6.0
85	0.20	10.0
90	0.13	11.2
95	0.07	12.5

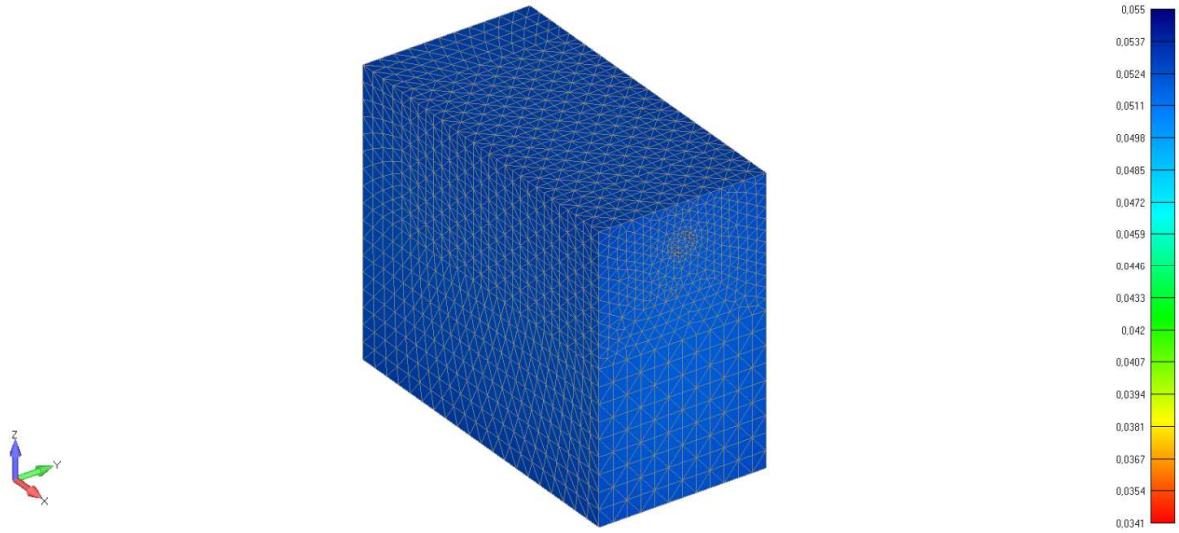
Tablica 6. Parametri korišteni za numeričku analizu procesa nakon depasivacije armature [5]

Parametri	Vrijednost
Faradayeva konstanta, *F* (C/mol)	96486.7
Promjena gustoće struje pri anodnoj reakciji, i_{0a} (A/m^2)	1.875×10^{-4}
Promjena gustoće struje pri katodnoj reakciji, i_{0c} (A/m^2)	6.25×10^{-6}
Početni anodni potencijal, Φ_{0a} (V vs. SCE)	-0.780
Početni katodni potencijal, Φ_{0c} (V vs. SCE)	0.160
Tafelov koeficijent za anodnu reakciju, β_a (V/dec)	0.06
Tafelov koeficijent za katodnu reakciju, β_c (V/dec)	0.160

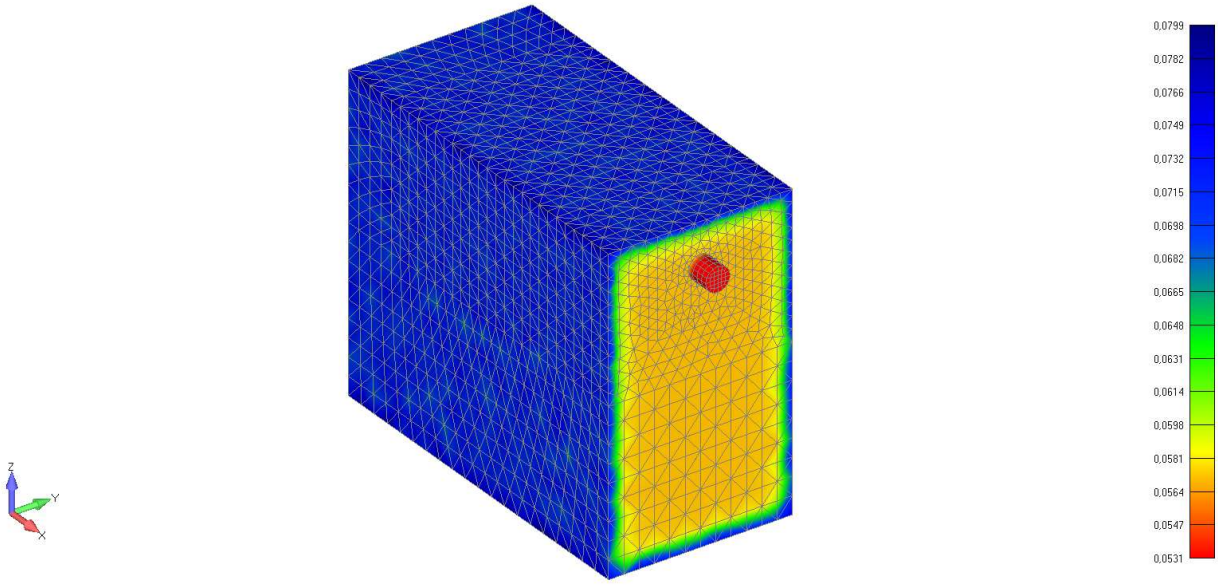
Na sljedećim slici 5.1. dani su prikazi različitog položaja anode i katode na armaturi što bitno utječe na rezultate uslijed analize korozije. Također će biti prikazano početno stanje saturacije i početne koncentracije kisika u betonu (slika 5.2., 5.3., 5.4.).



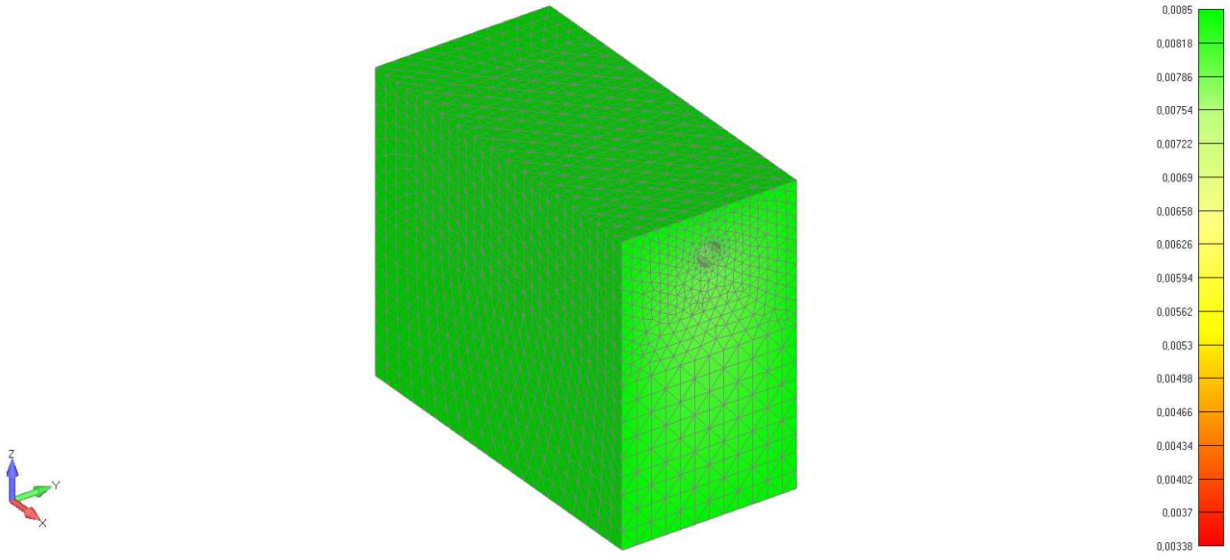
Slika 5.1. Primjeri različitih položaja anode(zelena) i katode(crvena) na armaturi



Slika 5.2. Prikaz zadavanja saturacije betona kod prirodne korozije

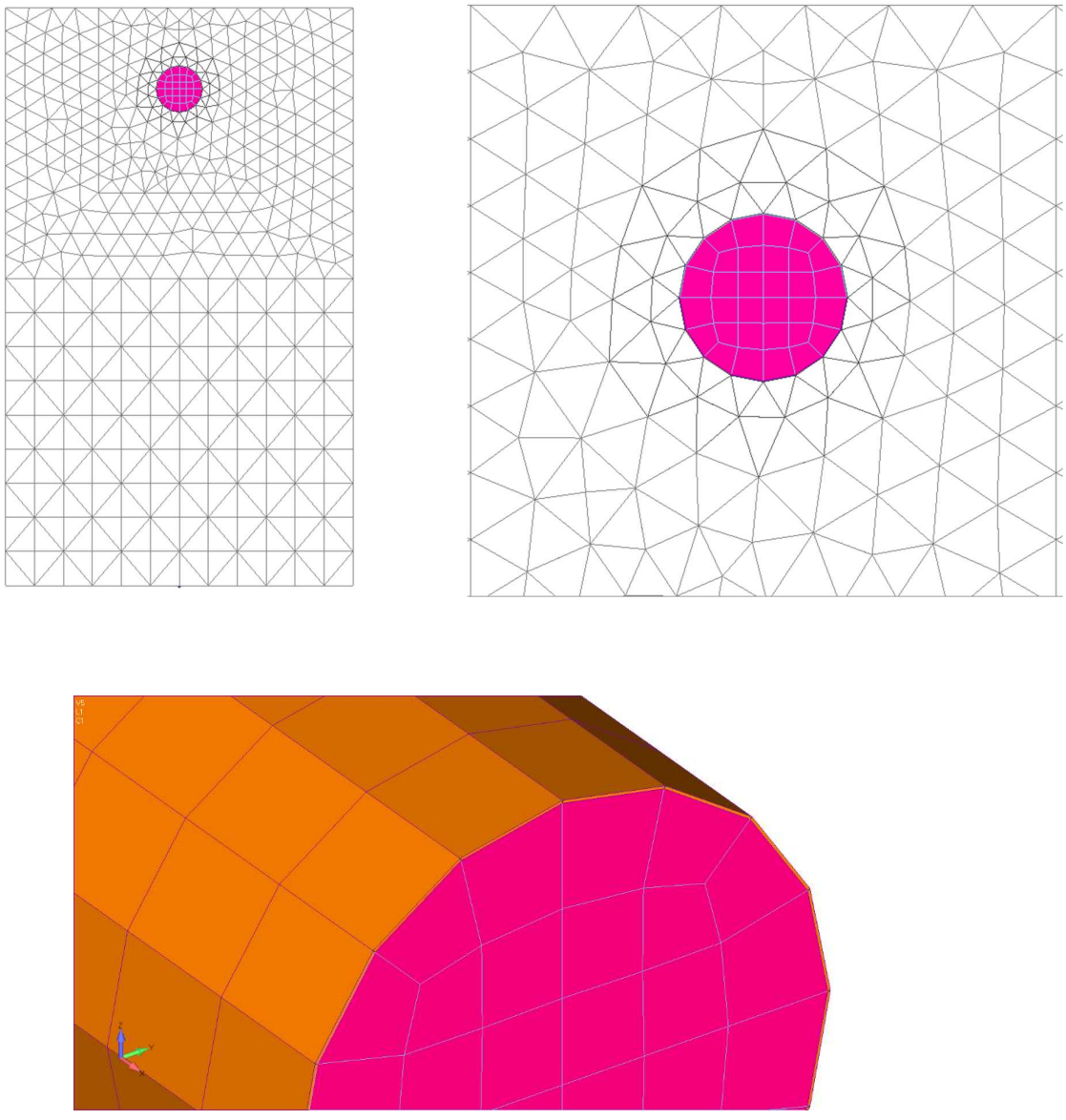


Slika 5.3. Prikaz zadavanja saturacije betona kod ubrzane korozije



Slika 5.4. Prikaz zadavanja početne koncentracije kisika u betonu

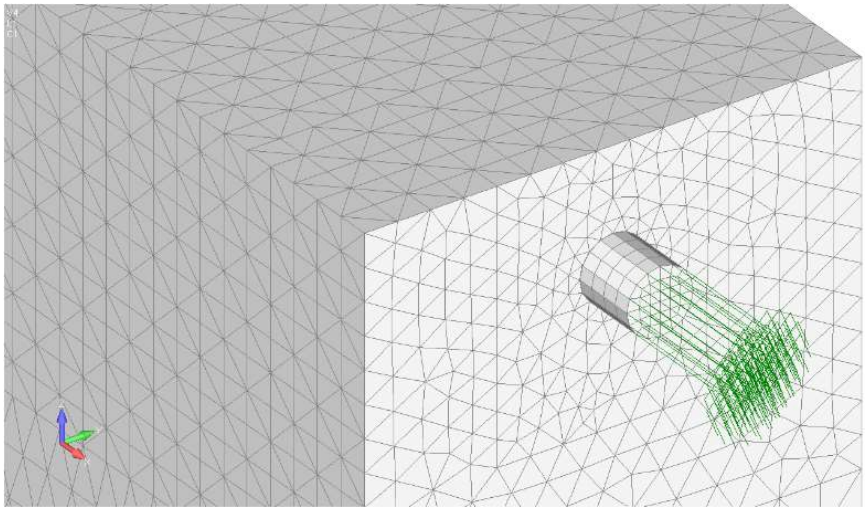
Za simuliranje stvaranja hrđe, odnosno produkata koji zauzimaju višestruko veći volumen od čelika kod modeliranja armature koriste se 1D elemente (bar elements) koji su radijalno postavljeni u kontakt elemente oko šipke. Ukupno ih ima 16 oko svakog presjeka te su debljine 0.1mm. Ovi elementi mogu prihvatiti samo tlačne sile u smjeru okomitom na armaturne šipke i posmične sile u smjeru paralelnim s armaturnim šipkama. Na sljedećim slici 5.5. ćemo prikazani su detalji gdje se vide 1D elementi koji su se smjestili u kontakt elementu između čelika i betona. Ekspanzivni faktor hrđe u odnosu na čelik iznosi 4 za prirodnu koroziju i 1,9 za ubrzanu koroziju.



Slika 5.5. prikaz diskretizacije konačnih elemenata za beton, čelik , kontakt elemente i 1D bar elemente

5.2. Pull-out test (pokus izvlačenja armature iz armiranobetonske grede)

Svi testirani modeli su opterećivani na način da su se nanosili jedinični pomaci,tj. opterećenje je zadano pomakom (load displacement). Ovakva vrsta analize predstavlja jedan inkrementalni postupak te stoga i samo opterećenje mora biti podijeljeno na određeni broj koraka (bilo da opterećenje nanosimo silom ili pomakom), a svaki korak koristi zadani broj iteracija. Opterećenje grede se kontrolira pomacima krajnjih točaka reduciranog modela koje se nalaze s prednje strane na glavnoj čeličnoj šipci. Konkretno se u prikazanim modelima prilikom svakog koraka nanosi pomak u vrijednosti 1,0 mm i to u pozitivnom smjeru globalne X osi (šipku izvlačimo iz modela), kao što je i prikazano na sljedećoj slici 5.6..



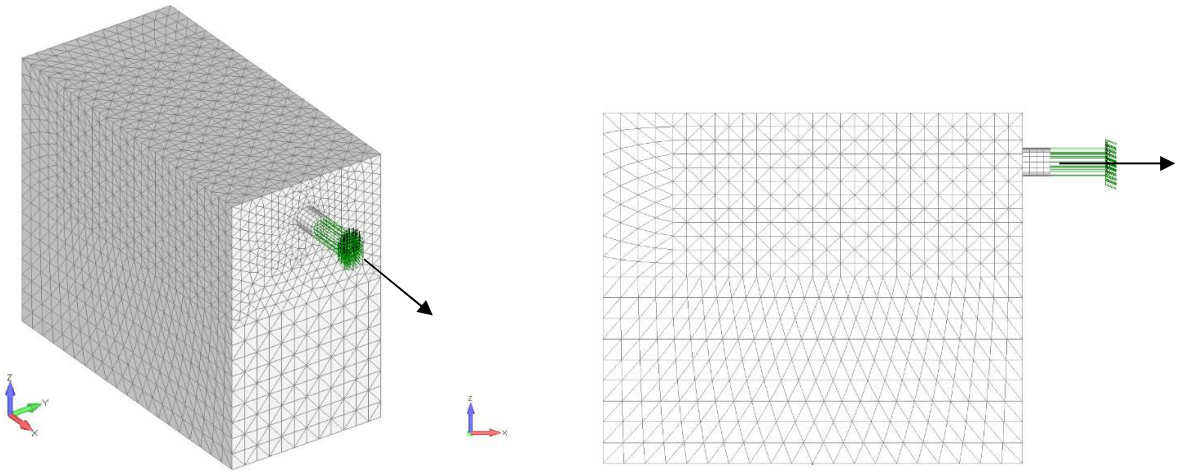
Slika 5.6. Prikaz detalja točaka u kojima se nanosi opterećenje pomakom

Primjer postavki jednog modela za unos opterećenja u računalni program:

```
Number of load increments:                                50(broj koraka)
Tollerance:                                              1.0
Max. number of iterations:                                49(broj iteracija po koraku)
Output after 1st iter. (0=no,1=D,2=D+R,3=D+R+S):           0
Converged output (0=no,1=D,2=D+R):                         2
Stress output (0=no, 1=yes):                               1
Strain output (0=no, 1=yes):                               1
Load index (0=no AL,1=1st LG,2=2nd LG):                    0
Load factor for 1st load group (LG):                     0.0
Load factor for 2nd load group (LG):                     0.0
Displacement index (displ. applied 0=no, 1=yes):           1
Displacement factor:                                   0.004(vrijednost pomaka)
Time Step:                                               0.0
```

```
Load step option: (=1 new job, >1 restart)                1
Number of load step increments:                          50 (broj koraka)
Number of nodes:                                      36372 (ukupan broj čvorova)
Total number of elements:                            153732 (ukupan broj elemenata)
Number of solid elements (8th node elements) :       149032
Number of bar (reinforcement) elements:                4700
Number of independant bar elements:                       0
Number of restrained nodes:                             593
Number of different materials:                            9
Order of integration formula (1, 2 or 3):                 2
Type of the algorithm (1= CSM, 2= TSM or 3= SSM):         3
Type of fracture analysis (0= local, 1=nonlocal)          0
Min. bandwidth size:                                    130
Buffer size:                                             -9
Maximum number of elem. for nonlocal interaction:       100
Creep analysis (1= yes, 0= no):                           0
Shrinkage of concrete (1= yes, 0= no):                    0
Initial time (days):                                   28.0
Cyclic analysis (1= yes, 0= no):                          0
Rate sensitivity (1= yes, 0= no):                         0
Dynamic analysis (1= yes, 0= no):                         0
Geometric nonlinearity (1= yes, 0= no):                   0
Output step:                                              1
Binary output (0=ASCII,1=short,2=binary):                 2
Performance (0=normal,1=speed,2=mem):                     1
Solver (0=serial,1=parallel):                             1
Memory Usage (0=less,1=full):                             1
Umgebungsanalyse (0=no, 1=fire, 2=corrosion):             2
Node for monitoring of nodal displacement:            23540
Direction of monitoring (1,2 or 3):                      1
Load monitoring nodes (total number):                    41
#
# In the following nodes the load is monitored: (čvorovi u kojima zadajemo pomak)
 23540 23810 23860 24564 24565 24764 24902 24903 25044 25094
 25505 25555 25879 25980 25981 26081 26082 26626 26880 26881
 26882 26883 26884 26986 27669 27670 27772 27773 27828 27991
 28041 28566 28616 28873 28874 29009 29313 29314 29922 29972
 30341
#
# Definition of the screen plot plane (7=XY, 8=YZ, 9=XZ):
    7        .0       1.0        .0       1.0        .0        1.
```

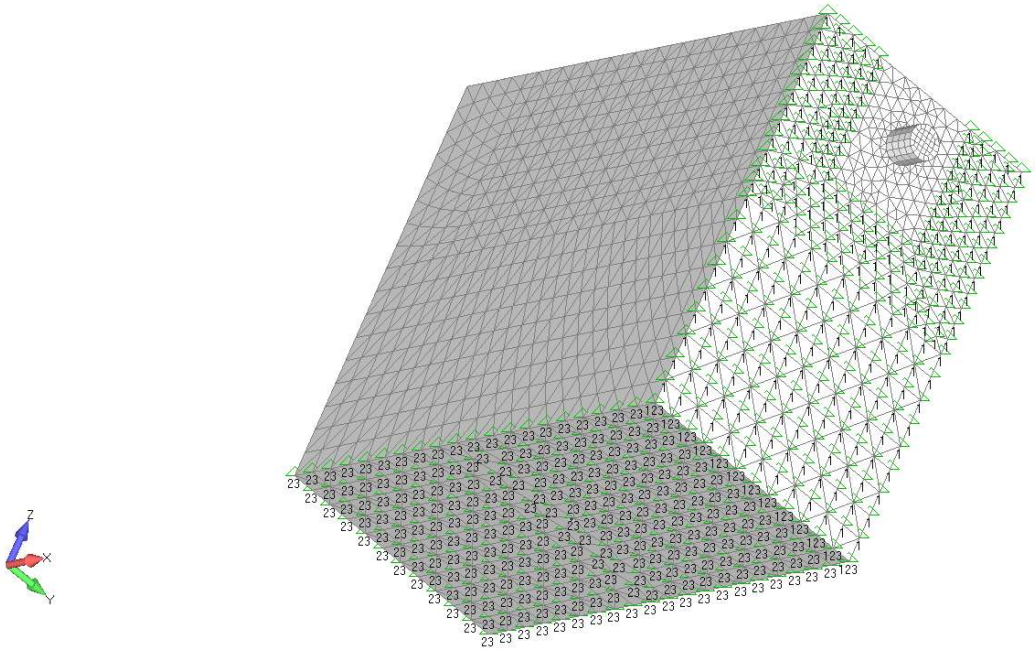
Iz navedenih postavki vidljiv je broj koraka nanošenja opterećenja, iznos pojedinog koraka, ukupan broj elemenata modela, pojedini broj čvora u kojeg se nanosi opterećenje te mnogi drugi parametri.



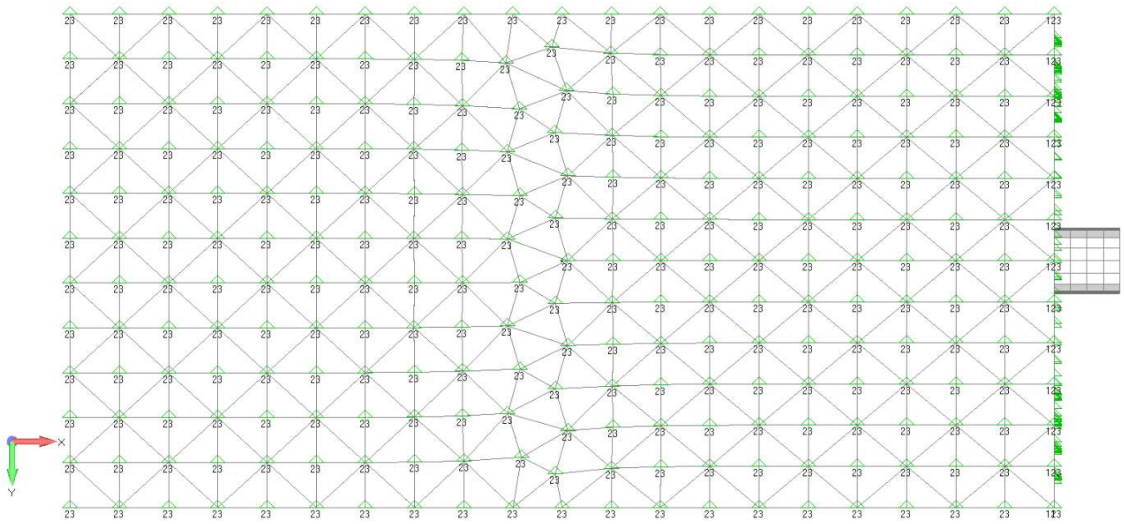
Slika 5.7. Prikaz modela s zadanim smjerom izvlačenja armature iz uzorka

6. ZADAVANJE RUBNIH UVJETA I PRIDRŽANJA

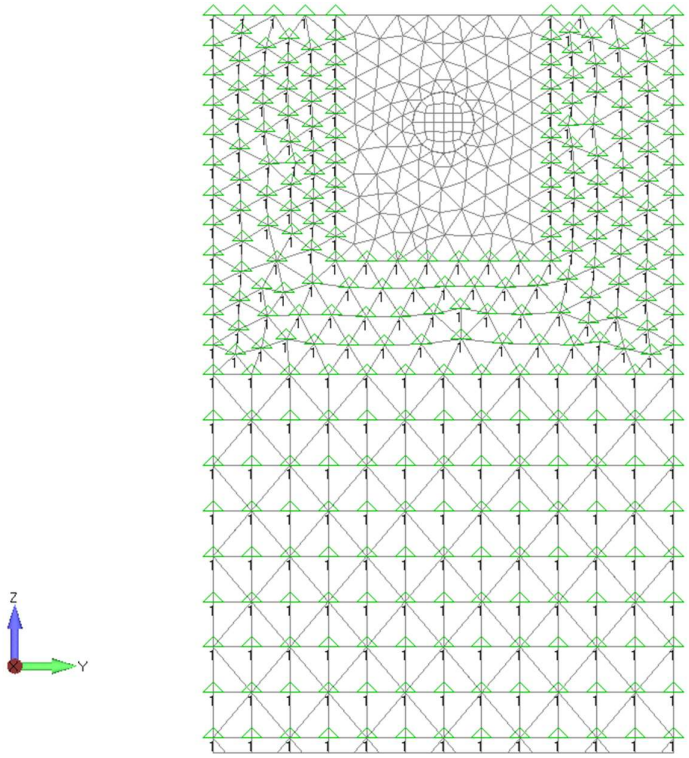
U ovom poglavlju objašnjen je način zadavanja rubnih uvjeta modela armiranobetonske grede. Statički gledano nosač predstavlja običnu prostu gredu, slobodno oslonjenu, koju ispitujemo na utjecaj korozije i pull-out test. Rubni uvjeti pridržanja su kao i sva opterećenja, jednako zadani na svim modelima te će se prikazati pridržanja na samo jednom modelu. Model predstavlja statički određen sustav slobodno oslonjene grede s pridržanjima u smjeru glavnih osi X, Y, Z. Svako pridržanje predstavlja jedan stupanj ograničenja, odnosno spriječeni su pomaci u jednom smjeru u pojedinom čvoru. Program Femap® vizualizira pridržanja na način da u točki u kojoj zadajemo pridržanje nacrta se mali trokut s oznakom broja 1, 2, 3 ovisno u kojem su smjeru spriječeni pomaci (oznaka 1-spriječen pomak u X smjeru, 2-spriječen pomak u Y smjeru, 3-spriječen pomak u Z smjeru glavnih osi). Na donjoj strani armiranobetonske grede su stavljena pridržanja koja sprečavaju pomake u smjeru Y i Z, dok su s prednje strane onemogućeni pomaci u smjeru X zbog provođenja pokusa izvlačenja armature iz uzorka (pull-out test). Na sljedećim slikama 6.1, 6.2, 6.3 dani su prikazi zadanih pridržanja.



Slika 6.1. Prikaza spriječenih pomaka u čvorovima modela armiranobetonske grede u smjerovima glavnih osi X(oznakabr.1), Y(oznaka br.2), Z(oznaka br.3)



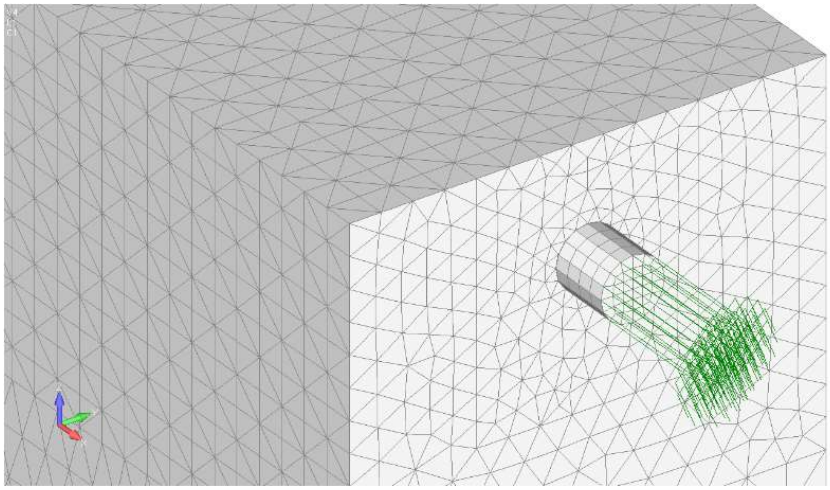
Slika 6.2. Prikaza spriječenih pomaka u čvorovima modela armiranobetonske grede u smjerovima glavnih osi Y(oznaka br.2), Z(oznaka br.3)



Slika 6.3 Prikaza spriječenih pomaka u čvorovima modela armiranobetonske grede u smjeru glavne osi X(oznakabr.1)

7. PRIKAZ I USPOREDBE REZULTATA

U ovom poglavlju bit će prikazani svi rezultati numeričke analize napravljeni za armirano betonsku gredu. Sve analize su odrađene u dvije faze: u prvoj fazi je armirano betonska greda bila izložena agresivnim uvjetima te je nakon toga dana na ispitivanje izvlačenja armature iz uzorka (pull-out test). Kod simuliranja korozije razlikuju se prirodna i ubrzana korozija te se za svaku razvijaju po dva modela koji se razlikuju u položajima anode i katode na armaturi. Prirodnu koroziju smo računali za 1, 3 i 7 godina a ubrzanu za 4, 8, 12, 16 dana. Rezultati od prirodne i ubrzane korozije su prikazani kroz oštećenja armiranobetonske grede, odnosno kroz veličinu pukotina te su na taj način uspoređivani. Također su računati i drugi parametri koji su bitni i zanimljivi za proces korozije kao što su: gustoća struje, potencijal, radijalna naprezanja, kisik te će oni također biti iskazani. Rezultati od pull-out testa su prikazani pomoću sila-pomak dijagrama te je zabilježena kritična (maksimalna) sila prilikom izvlačenja armature iz uzorka. Na posljetku slijedi usporedba rezultata prirodne i ubrzane korozije te usporedbe s eksperimentalnim rezultatima.

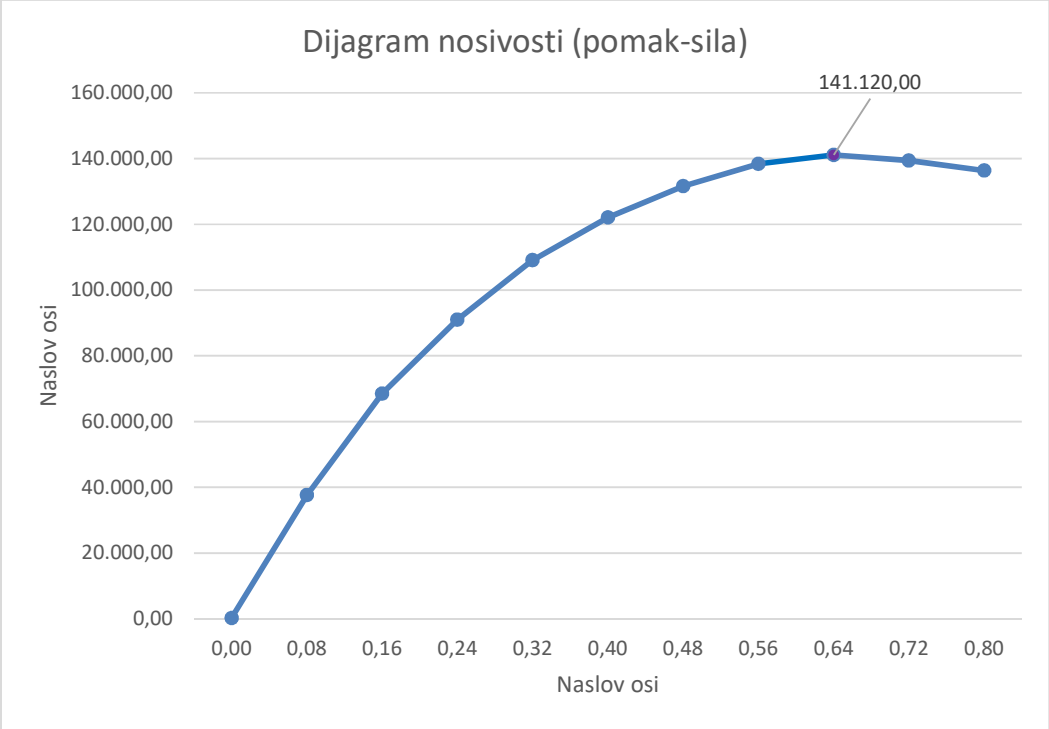


Slika 7.1. Prikaz čvorova konačnih elemenata u kojima je zadavan jedinični pomak te mjerenja sila izvlačenja armature iz uzorka

Rezultati proračuna i testiranja armiranobetonske grede bit će detaljno prikazani zasebno za svaki pojedini model i vrstu opterećenja.

7.1. Pull-out test za nekorodiranu armirano betonsku gredu

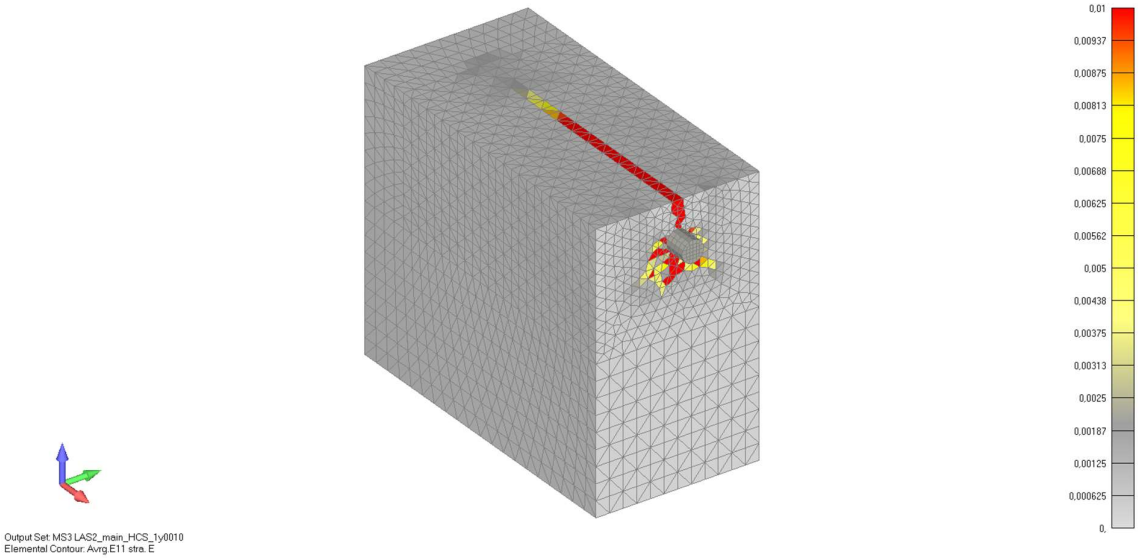
U ovom poglavlju slijedi ispitivanje promatrane ab gredu isključivo na pull out test, odnosno izvlačenje armature iz uzorka koji prethodno nije bio izložen koroziji. Vrijednost kritične sile uzima se kao referentna te se uspoređuje s uzorcima koji su prethodno bili izloženi agresivnim uvjetima. Način opterećivanja pomakom omogućuje promatranje sila u čvorovima u kojima se isti i nanosi, stoga će biti prikazan dijagram nosivosti za promatranu točku na sredini cijelog raspona nosača, odnosno dijagram pomak-sila.



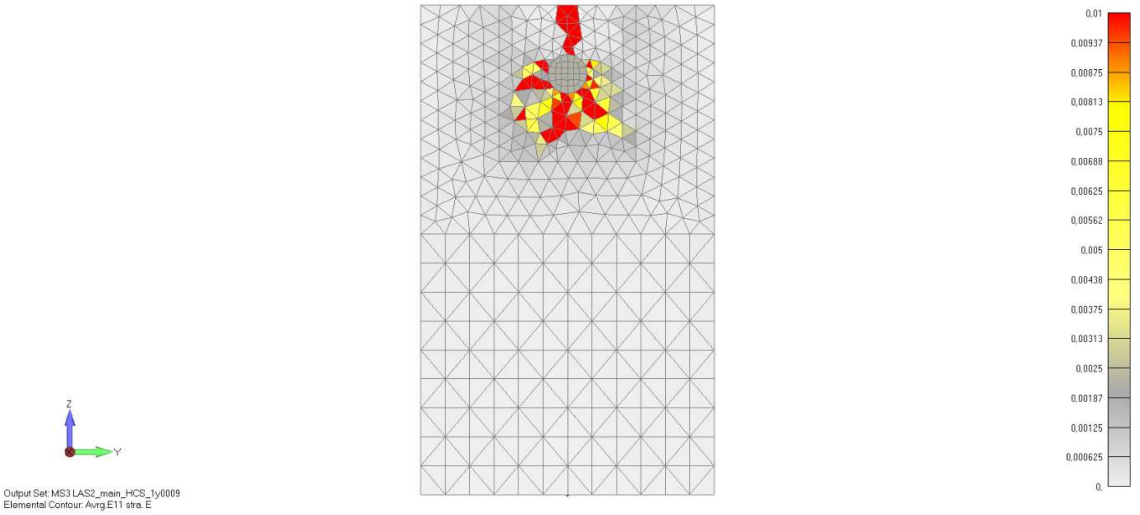
Slika 7.2. Prikaz dijagrama pomak (mm) - sila (N) za model koji nije izložen utjecaju korozije

Prikazani dijagram opisuje prirast sile u ovisnosti veličine pomaka grede sve do loma i samog otkaza numeričkog modela armiranobetonske grede u konstrukciji. Dijagram vrijedi za modelirani nosač kakav je korišten u računalnom programu i na kojem su provedena testiranja i proračuni. Iz prikazanog dijagrama može se očitati kritična sila nakon koje dolazi do numeričkog otkaza modela, nakon čega sila opada. Očitana sila iznosi 141 120 N odnosno 141,12 kN. Ova vrijednost sile uzima se kao referenta, odnosno polaznu. Očekuje se da će uslijed djelovanja korozije na armirano betonskom presjeku doći do smanjenja presjeka čeličnih šipki te pojavljivanja pukotina u betonu što će rezultirati opadanjem kritične sile uslijed izvlačenja armature iz uzorka.

Na sljedećim slikama vidljivo je stanje armirano betonskog uzorka poslije pokusa na izvlačenje armature. Na svakoj slici se s desne strane nalazi legenda s koje se mogu očitati veličine pukotina - žarko crvena boja predstavlja pukotine veće ili jednake od 0,1mm. Kao što je vidljivo na slikama, može se zaključiti da je došlo do raspucavanja betonskog elementa sprijeda, a od gore se pojavila pukotina iznad glavne armature.



Slika 7.3. Prikaz oštećenja betona i pukotina nakon pull-out testa (pogled-aksonometrija)



Slika 7.4. Prikaz oštećenja betona i pukotina nakon pull-out testa (pogled-sprijeda)

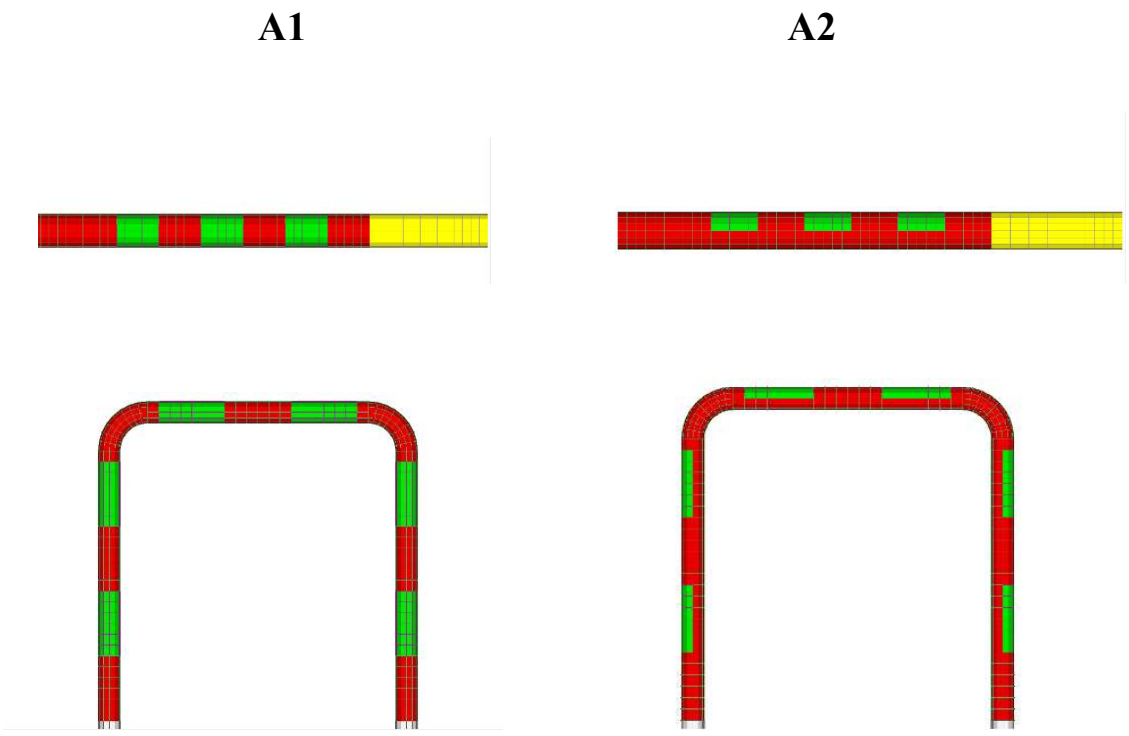
U eksperimentalnim istraživanjima armirano betonske grede je ispitana tri puta na pull-out test za nekorodirano stanje i aritmetička sredina kritične sile iznosi 146,17 kN. U numeričkoj analizi kritična sila iznosi 141.12 kN što dosta dobro opisuje realno stanje. U sljedećoj tablici iskazane su sve vrijednosti pull-out testa na ispitanim uzorcima, prva tri uzorka nisu bila izložena agresivnim uvjetima.

Tablica 7. Vrijednosti sile izvlačenja armature iz uzorka [14]

Uzorak	P_u **(kN)**	τ_u **(MPa)**
LAS2-0-1	147.04	11.71
LAS2-0-2	144.43	11.50
LAS2-0-3	147.03	11.71
LAS2-4	132.87	10.58
LAS2-7	118.28	9.42
LAS2-10	134.15	10.68
LAS2-13	89.58	7.13
LAS2-16	90.42	7.20

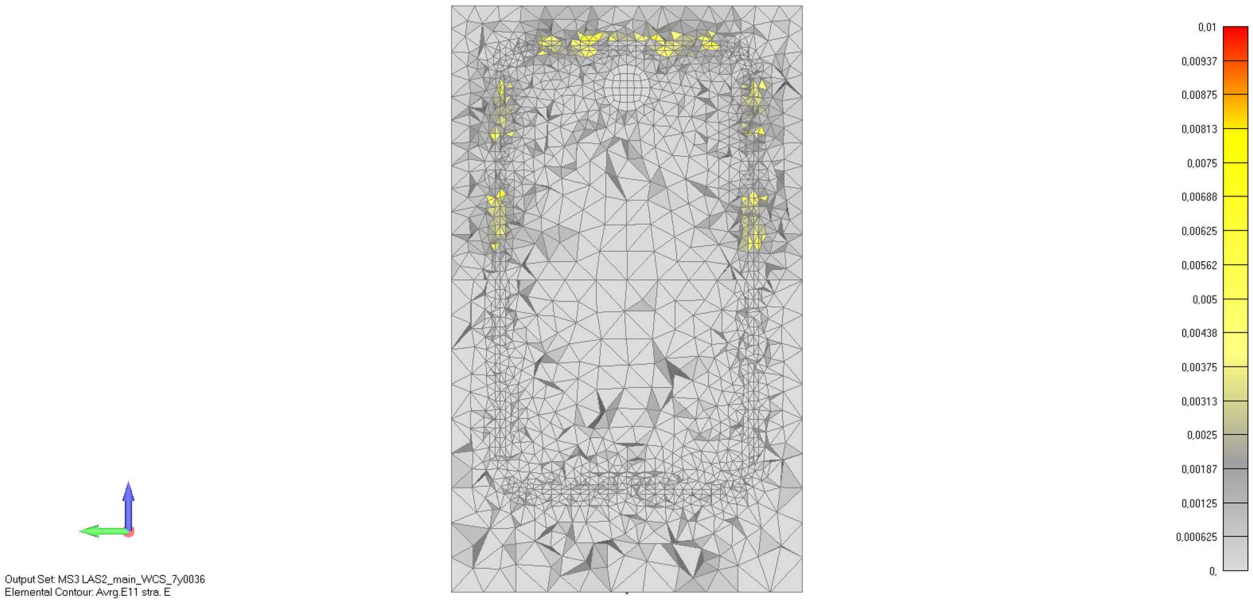
7.2. Prirodna korozija

U ovome poglavlju su prikazana oštećenja i drugi parametri koji su mjereni prilikom numeričke analize za prirodnu koroziju. Razlikuju se dva modela A1 i A2 na slici 7.5. kod kojih je analiziran utjecaj korozije nakon 1, 3, 7 godina. Pozicije anode i katode kod modela A1 i A2 su na istim mjestima, samo što kod modela A1 anoda zauzima cijeli poprečni presjek u odnosu na model A2. Zajedno će se prikazivati rezultati za oba modela radi usporedbe različitih pozicija anode i katode.

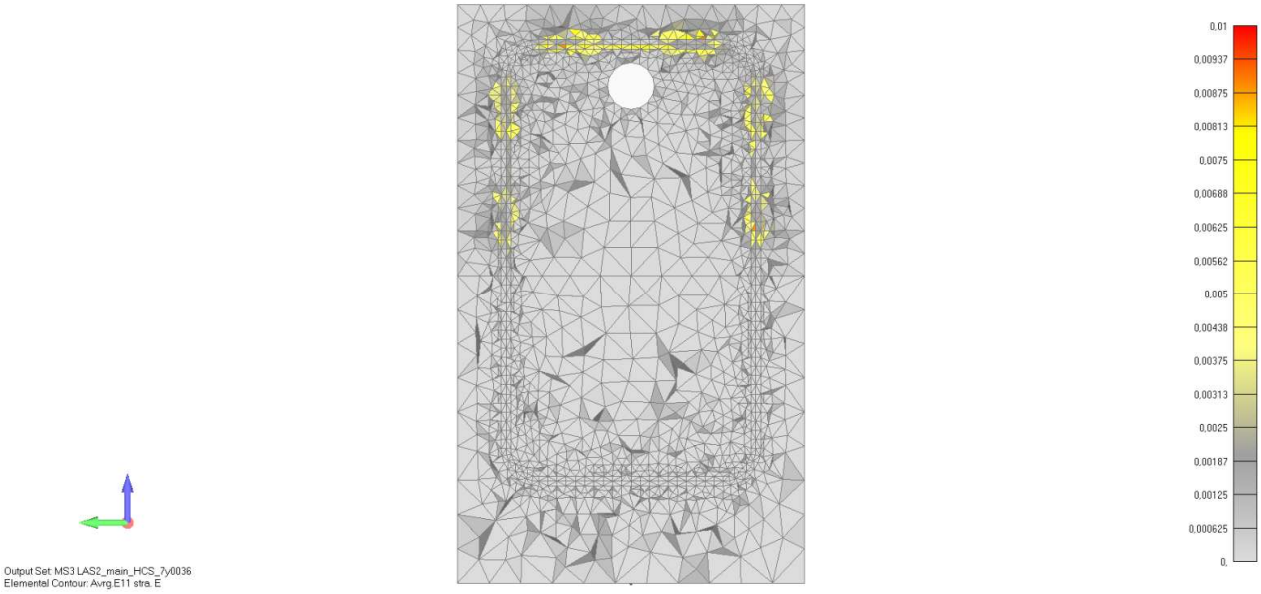


Slika 7.5. Prikaz modela A1 (lijevo) i modela A2 (desno), zelena boja nam predstavlja anodu, crvena katodu a žuta plastičnu cijev

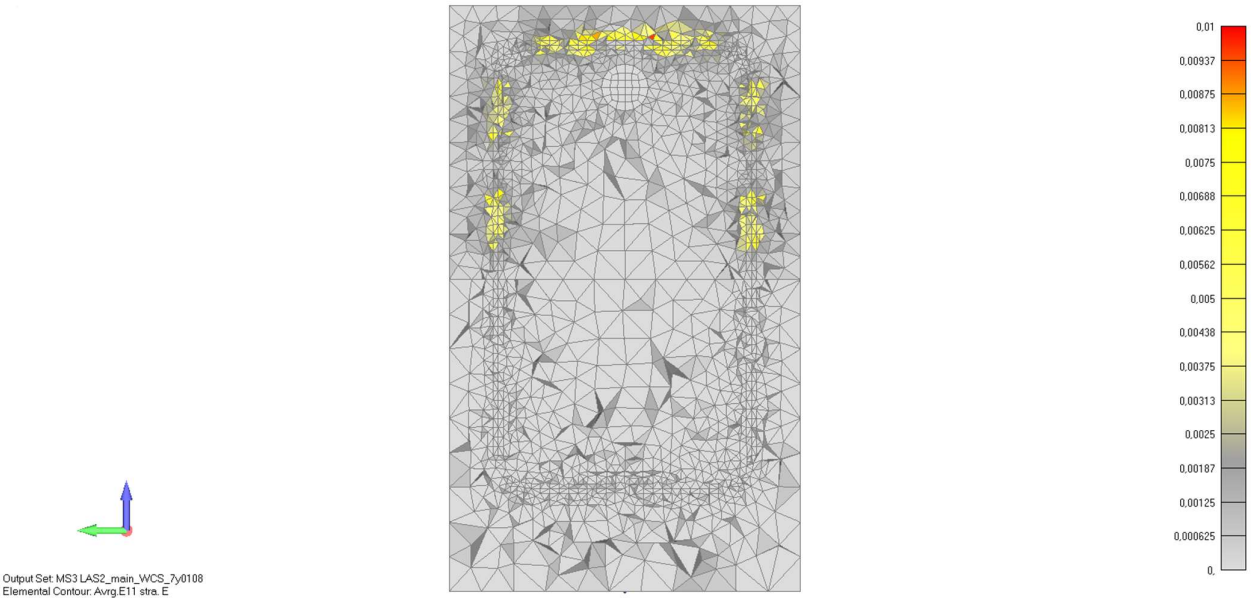
7.2.1. Prikaz oštećenja armiranobetonske uslijed simuliranja prirodne korozije



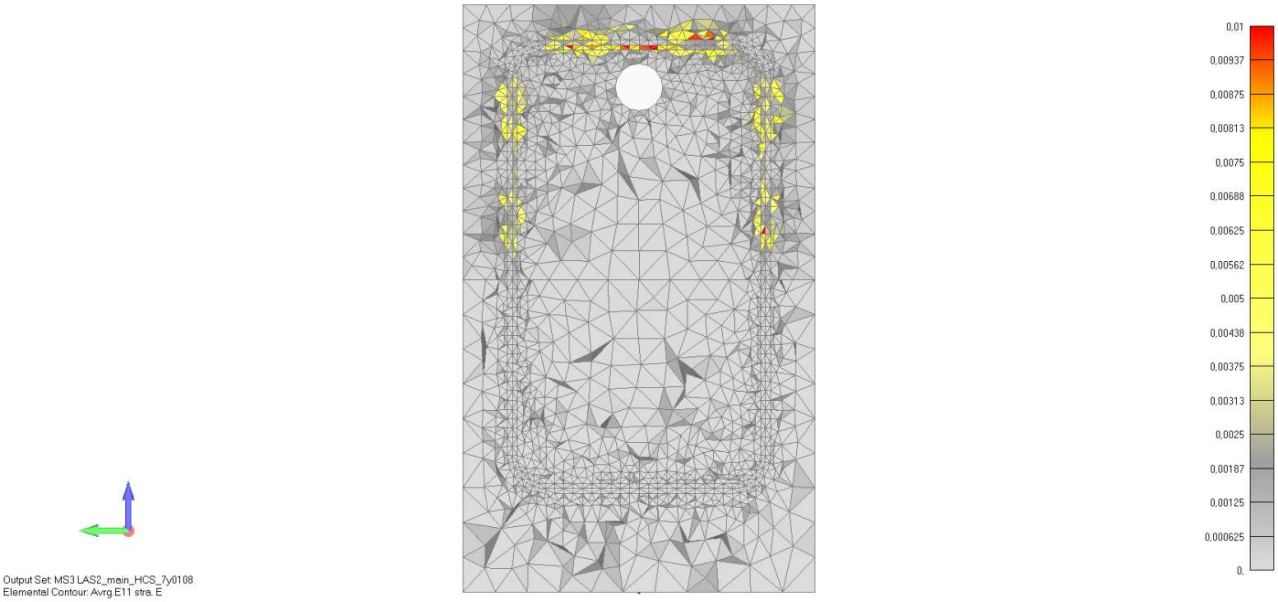
Slika 7.6. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 1 godine za model A1 (poprečni presjek kroz vilice)



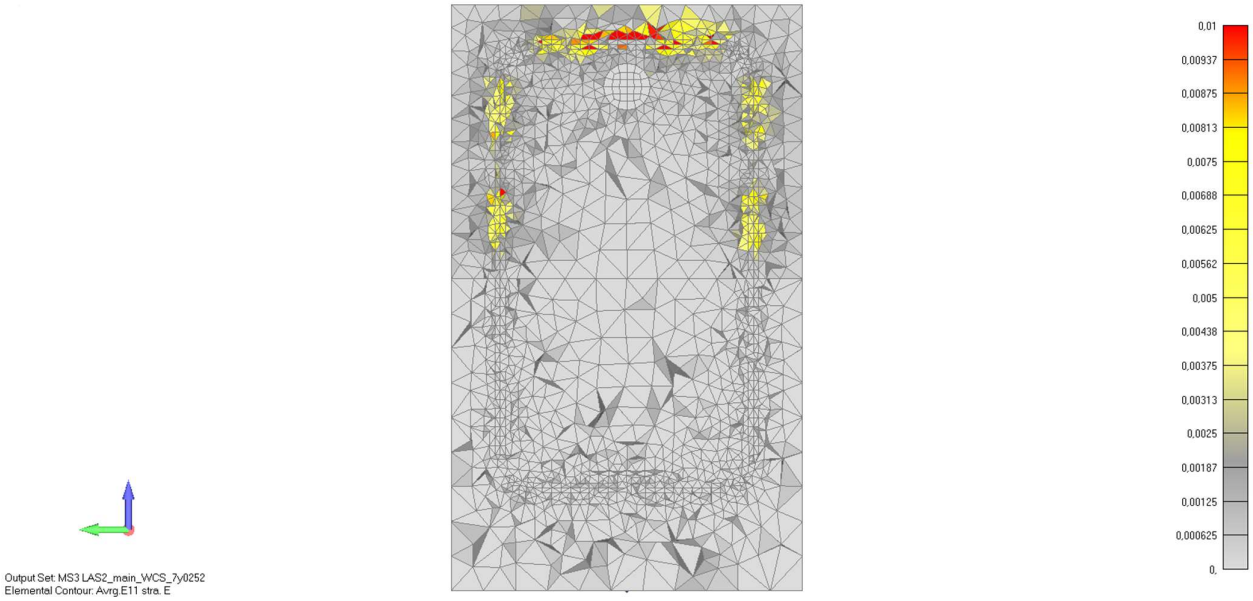
Slika 7.7 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 1 godine za model A2 (poprečni presjek kroz vilice)



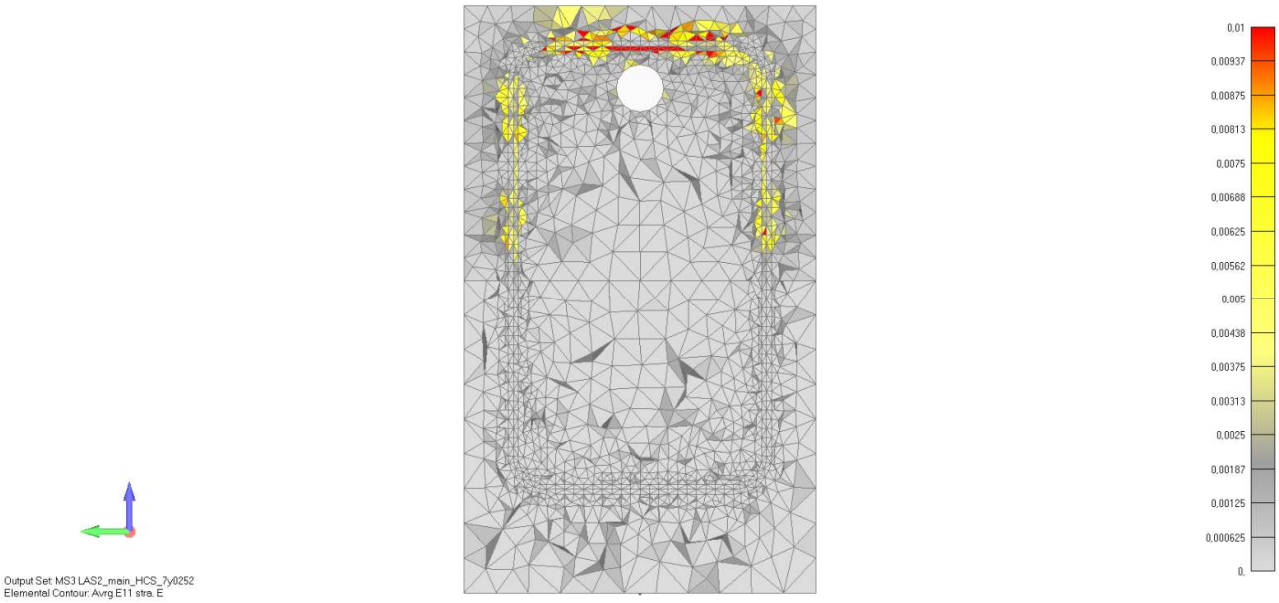
Slika 7.8. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 3 godine za model A1 (poprečni presjek kroz vilice)



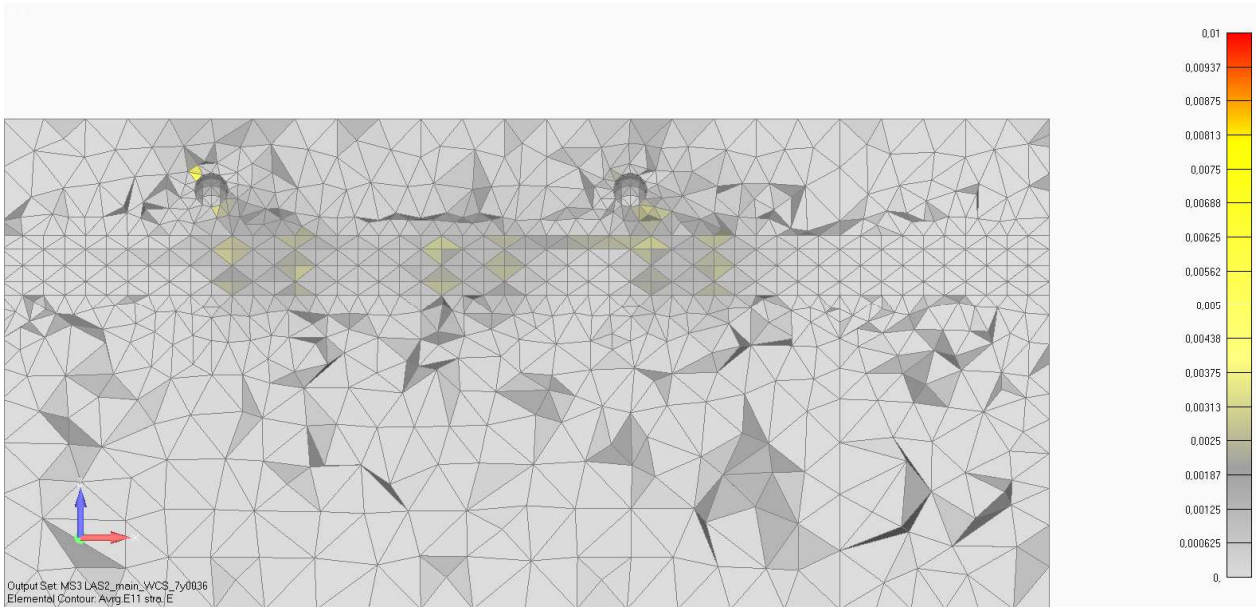
Slika 7.9 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 3 godine za model A2 (poprečni presjek kroz vilice)



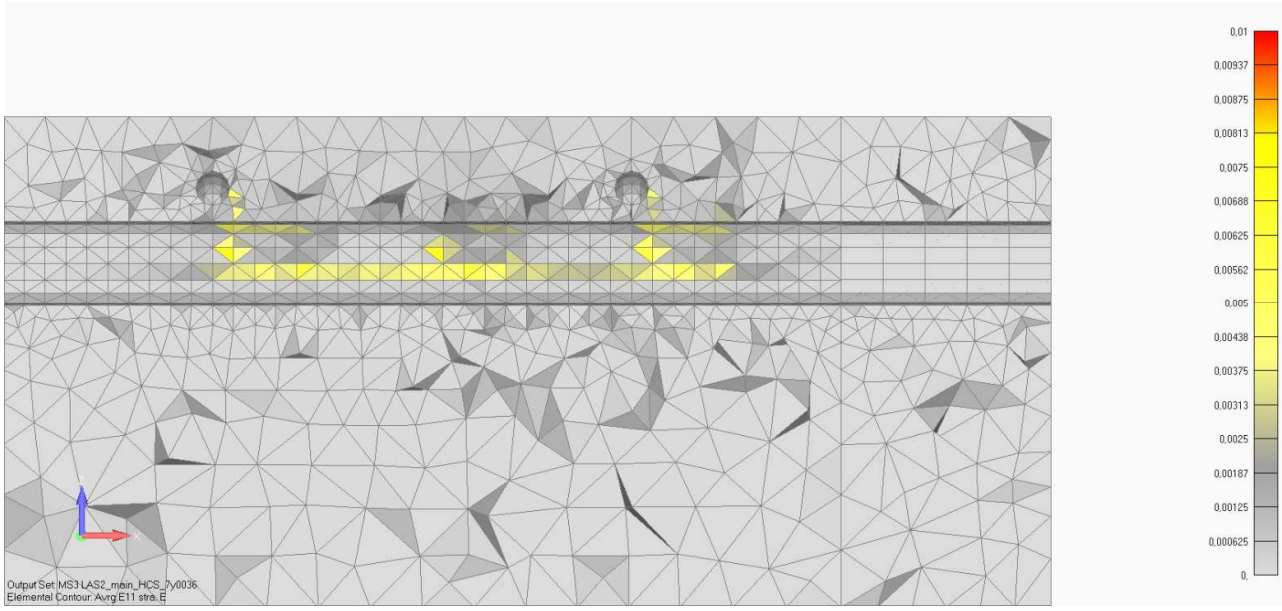
Slika 7.10. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 7 godina za model A1 (poprečni presjek kroz vilice)



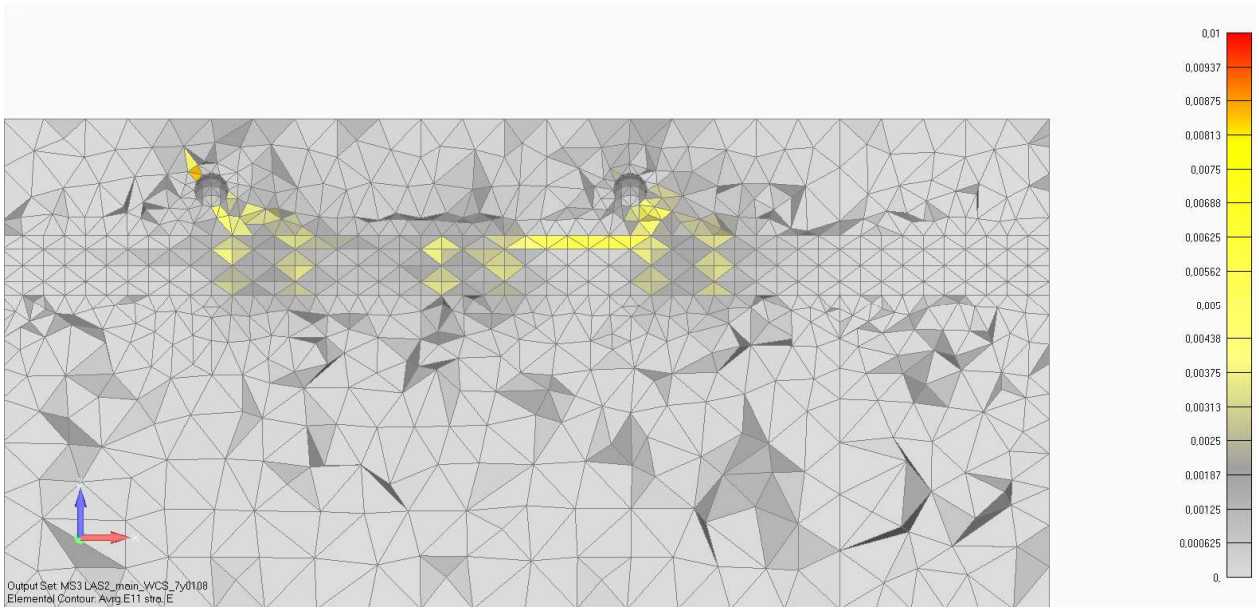
Slika 7.11 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 7 godina za model A2 (poprečni presjek kroz vilice)



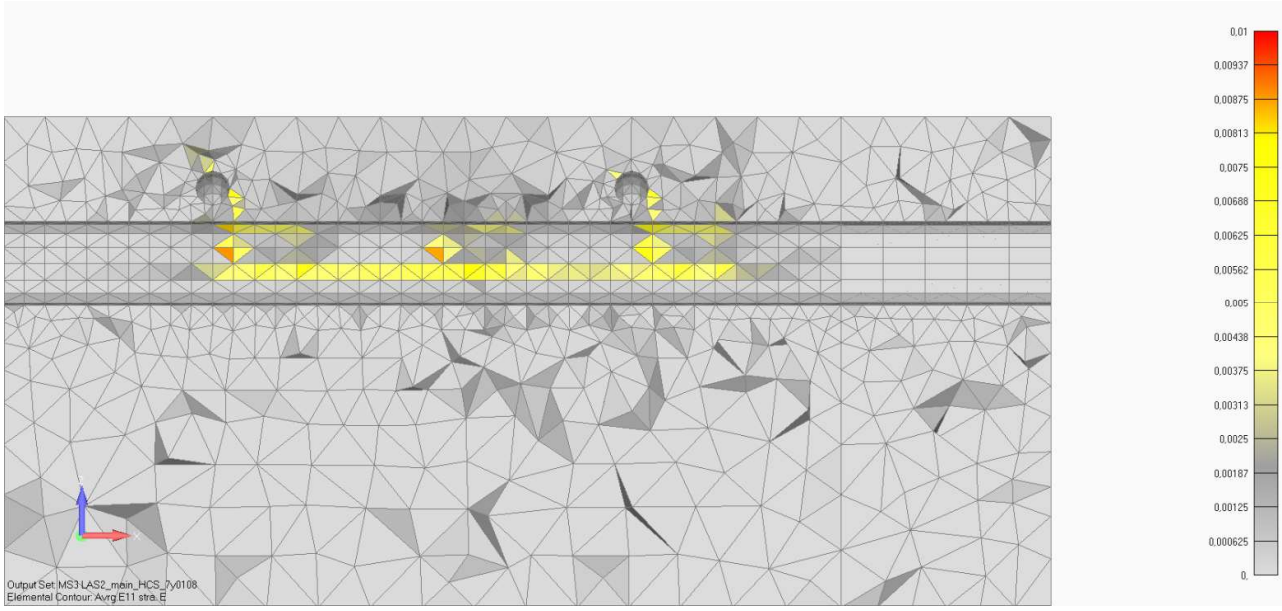
Slika 7.12. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 1 godine za model A1 (uzdužni presjek kroz glavnu armaturnu šipku)



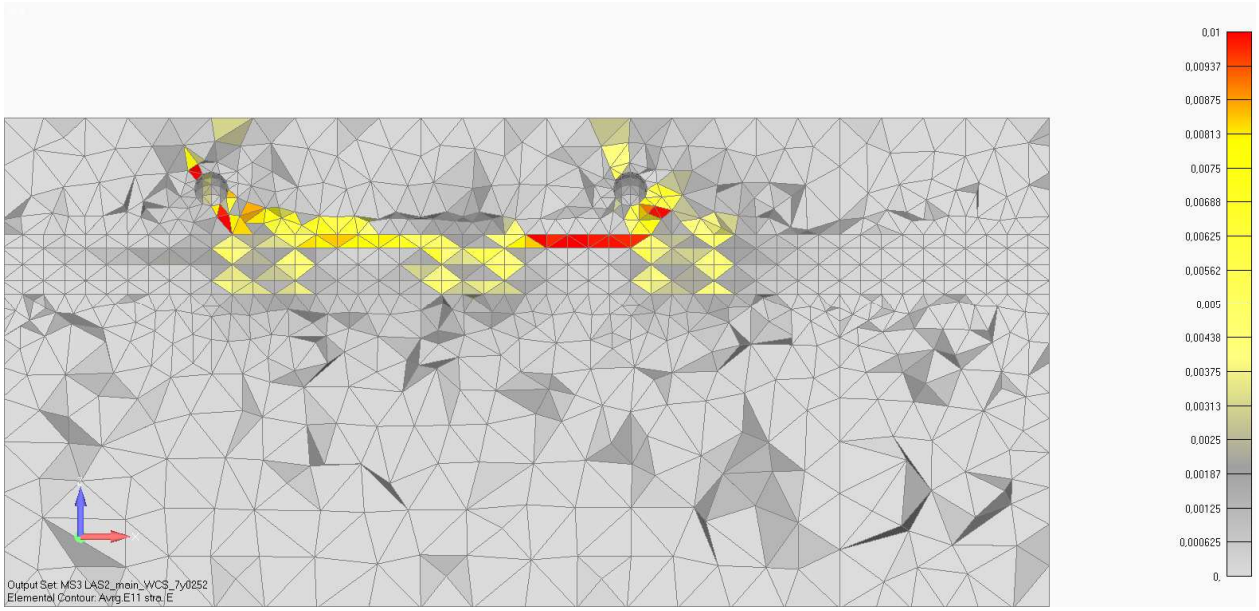
Slika 7.13 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 1 godine za model A2 (uzdužni presjek kroz glavnu armaturnu šipku)



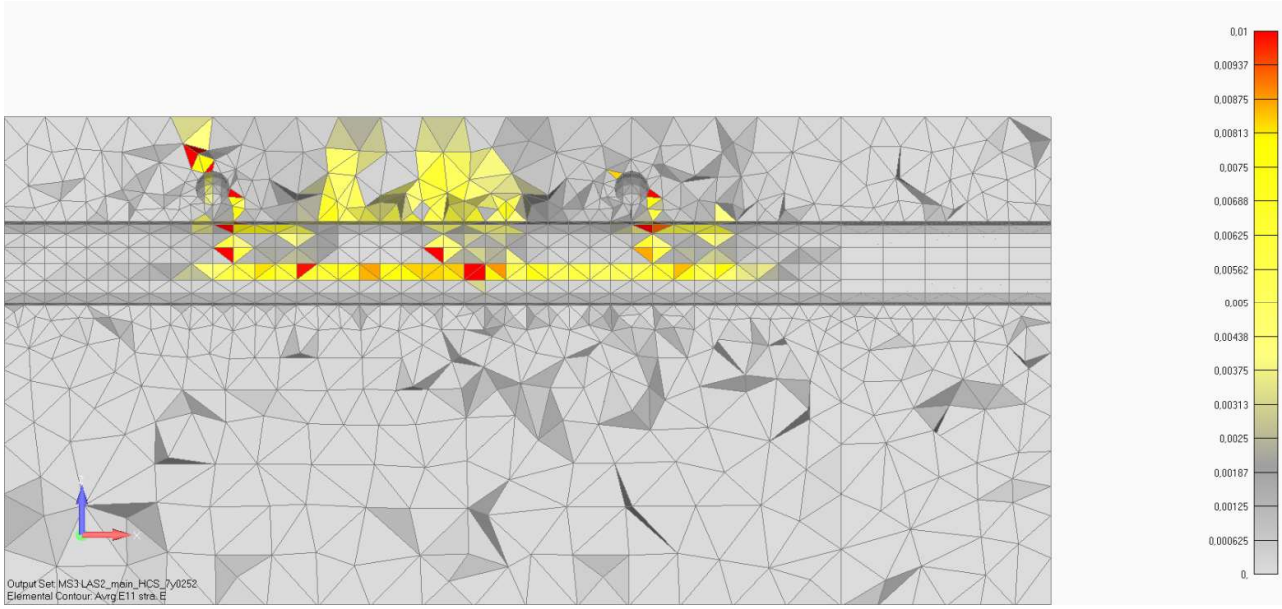
Slika 7.14. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 3 godine za model A1 (uzdužni presjek kroz glavnu armaturnu šipku)



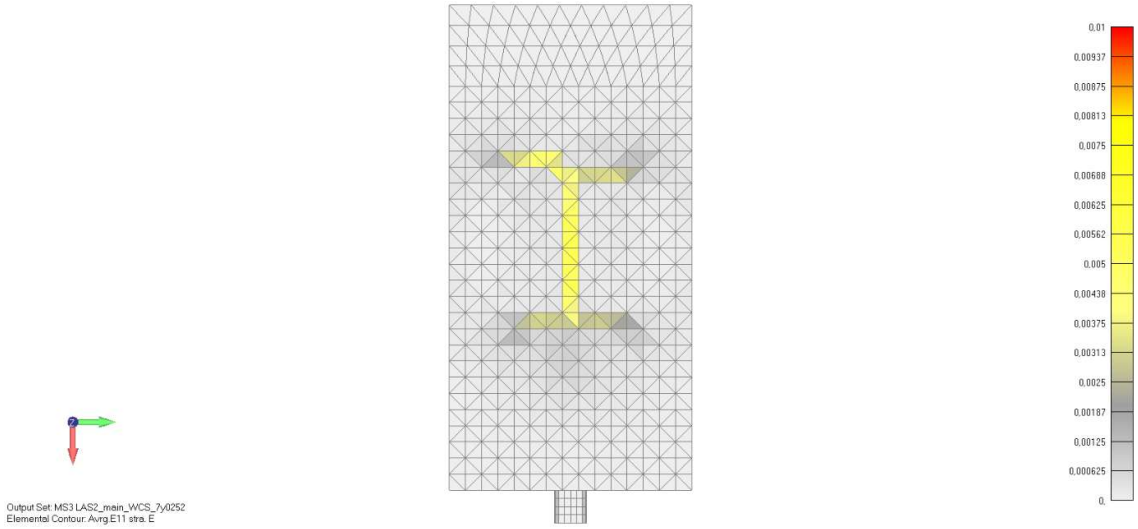
Slika 7.15 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 3 godine za model A2 (uzdužni presjek kroz glavnu armaturnu šipku)



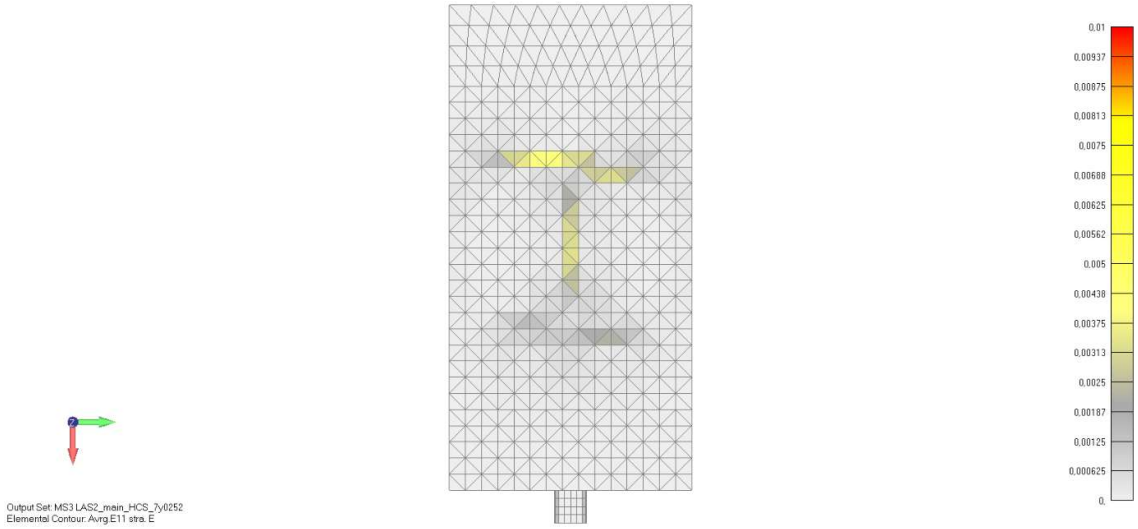
Slika 7.16. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 7 godina za model A1 (uzdužni presjek kroz glavnu armaturnu šipku)



Slika 7.17 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 7 godina za model A2 (uzdužni presjek kroz glavnu armaturnu šipku)



Slika 7.18. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 7 godina za model A1 (pogled od gore)



Slika 7.19. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja prirodne korozije nakon 7 godina za model A2 (pogled od gore)

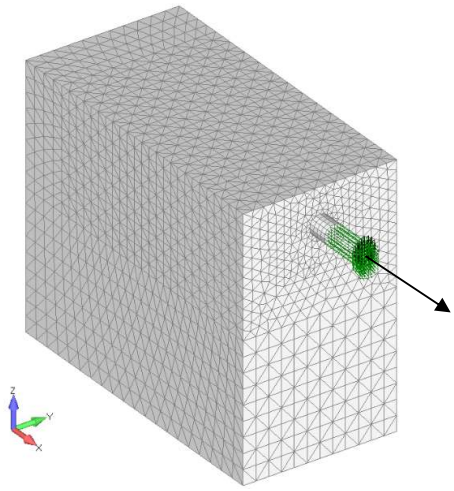
Na prethodnim slikama su prikazana oštećenja uslijed prirodne korozije nakon 1, 3, 7 godina za model A1 i A2. Uočljivo je da su se pukotine pozicionirale na mjestima dodira anode i katode, a razlog tomu je što je na tim mjestima najveća koncentracija gustoće korozijske struje što će kasnije biti prikazano na grafovima u poglavlju 6.3.3.. Na mjestima najveće koncentracije korozijske gustoće javlja se najviše hrđe. Hrđa zauzima veći volumen od čelika te dolazi do stvaranja pukotina na tim mjestima. Na površini armirano betonske konstrukcije značajnije pukotine su zabilježene nakon 7 godina za oba modela A1 i A2.

7.2.2. Pull out test na modela prethodno izloženih prirodnoj koroziji

Na sljedećim grafovima će biti prikazani rezultati ispitivanja uzoraka pull-out testom nakon što su uzorci prethodno bili analizirani na utjecaje prirodne korozije u različitim vremenskim razdobljima. Iz grafa će se očitati najveća, odnosno kritična sila koja je dosegnuta za svaki pojedinačni slučaj te će se usporediti s modelom koji je bio testiran samo na pull-out test. Iz grafa se može vidjeti da sila polagano opada kako raste broj godina tijekom kojih je uzorak bio podvrgnut prirodnoj koroziji. Razlog opadanja sile je što su se pojavile pukotine koje su raspucale beton te je smanjen profil armature. U sljedećoj tablici 8. su dane kritične sile izvlačenja armature iz uzorka za modele A1 i A2 nakon 1, 3, 7 godina korozije armature.

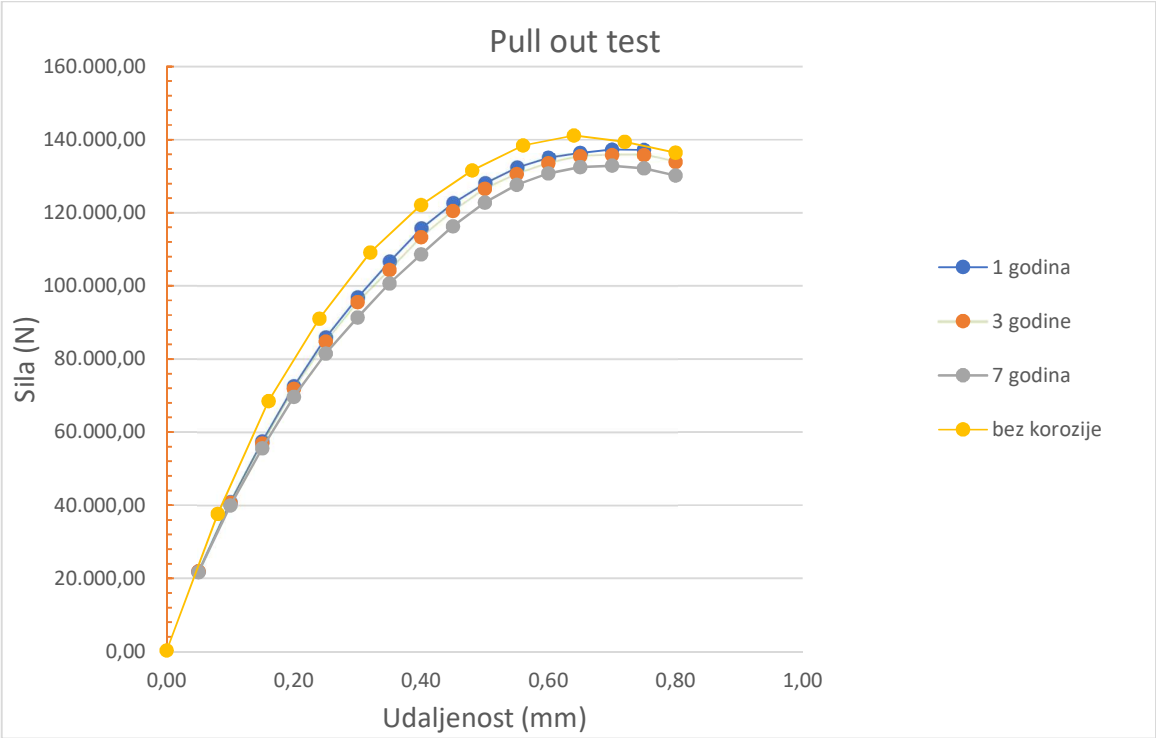
Tablica 8. Vrijednosti sile izvlačenja pull-out testa za prirodnu koroziju

REZULTATI ISPITIVANJA-PRIRODNA KOROZIJA				
Kritična sila izvlačenja na modelu bez utjecaja korozije iznosi: 141,12 kN				
Trajanje korozije	**Model A1**		**Model A2**	
	sila (kN)	pad sile (%)	sila (kN)	pad sile (%)
1 godina	137,29	2,83	132,68	5,98
3 godine	135,78	3,78	132,09	6,40
7 godina	132,86	5,86	130,05	7,84

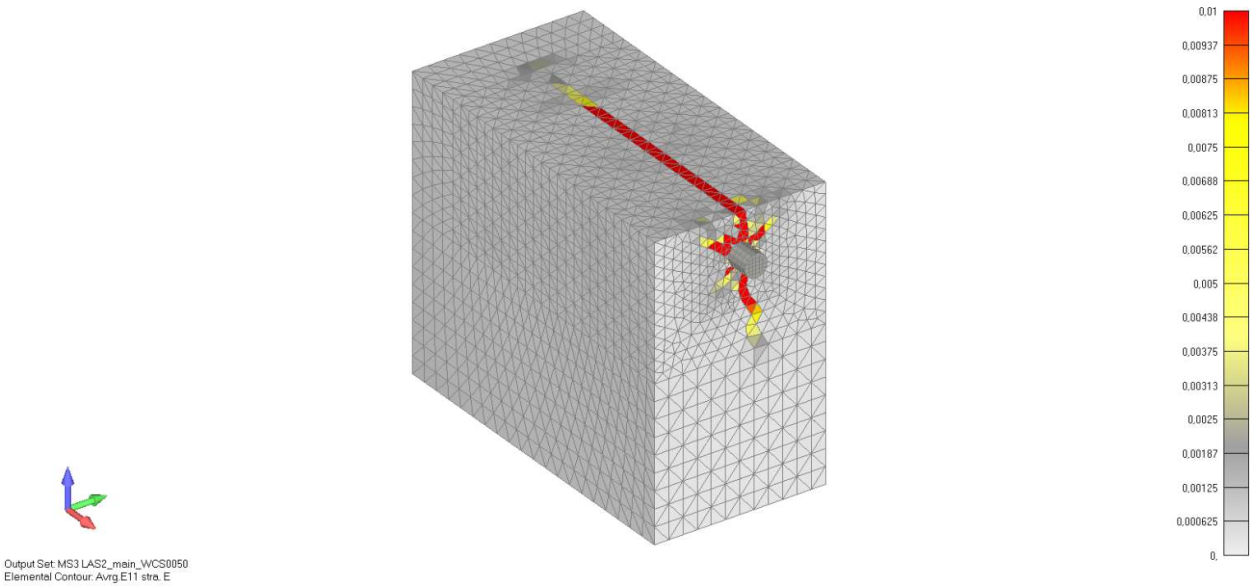


Slika 7.20. Prikaz modela te smjer izvlačenja armature iz uzorka

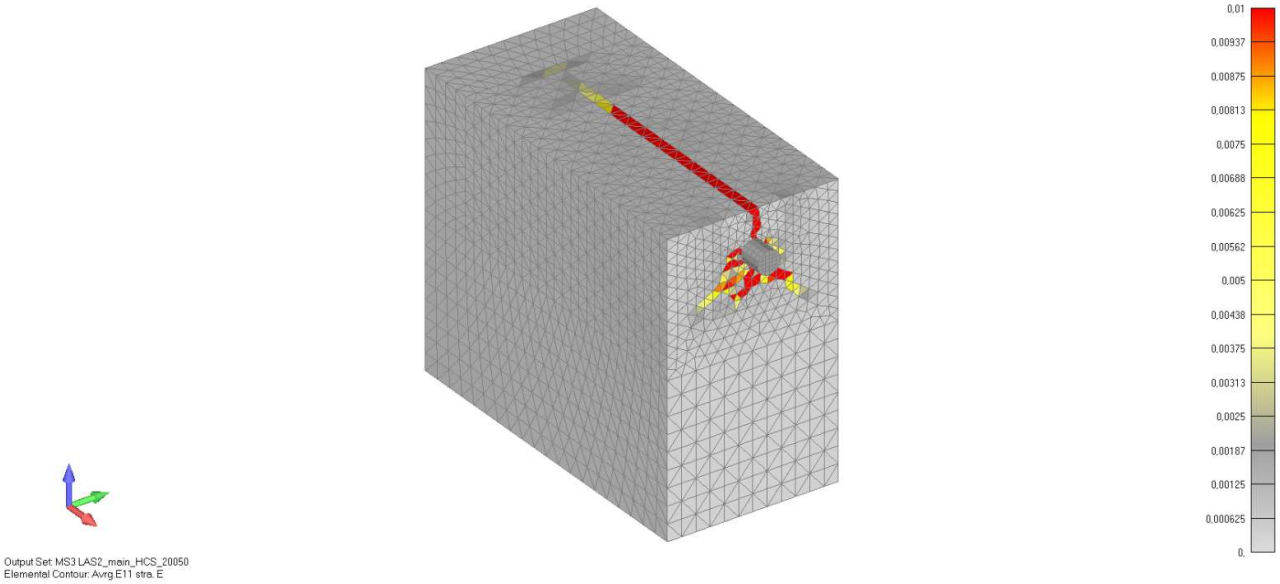
Slika 7.21. Graf pomak-sila za pull-out test na modelu A1



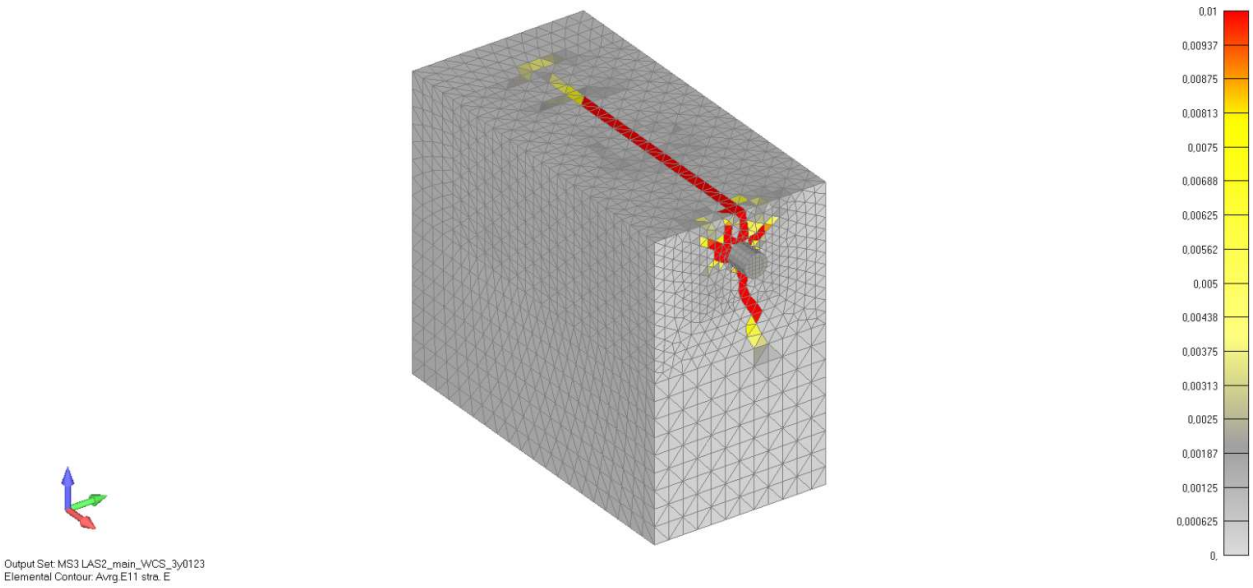
Slika 7.22. Graf pomak-sila za pull-out test na modelu A2



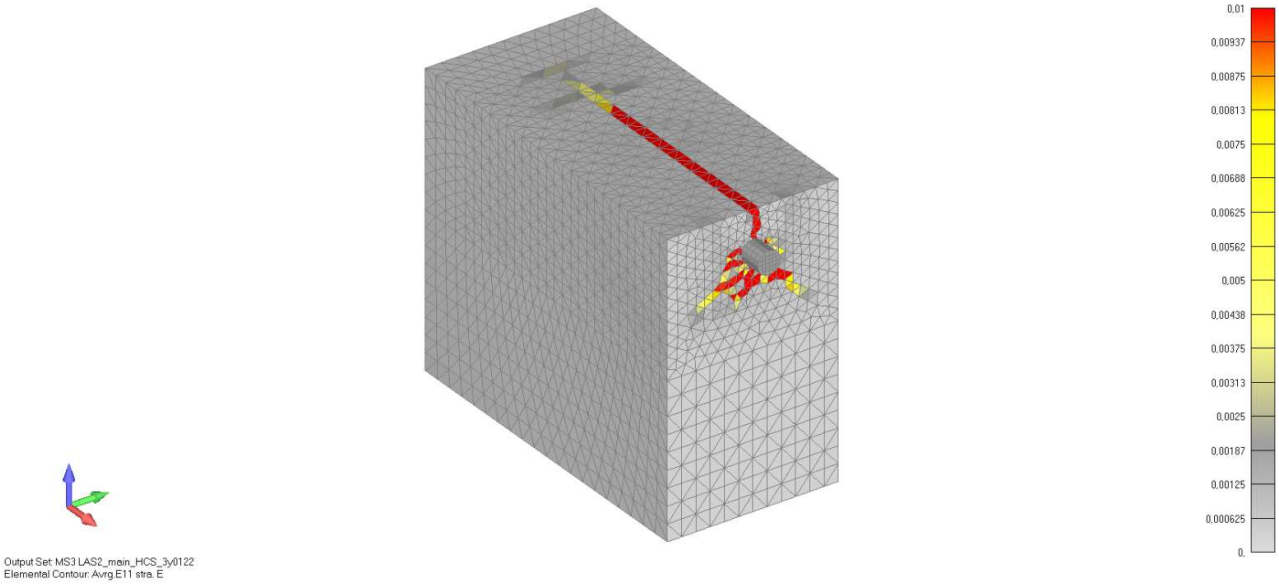
Slika 7.23. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A1 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 1 godinu dana (pogled-aksonometrija)



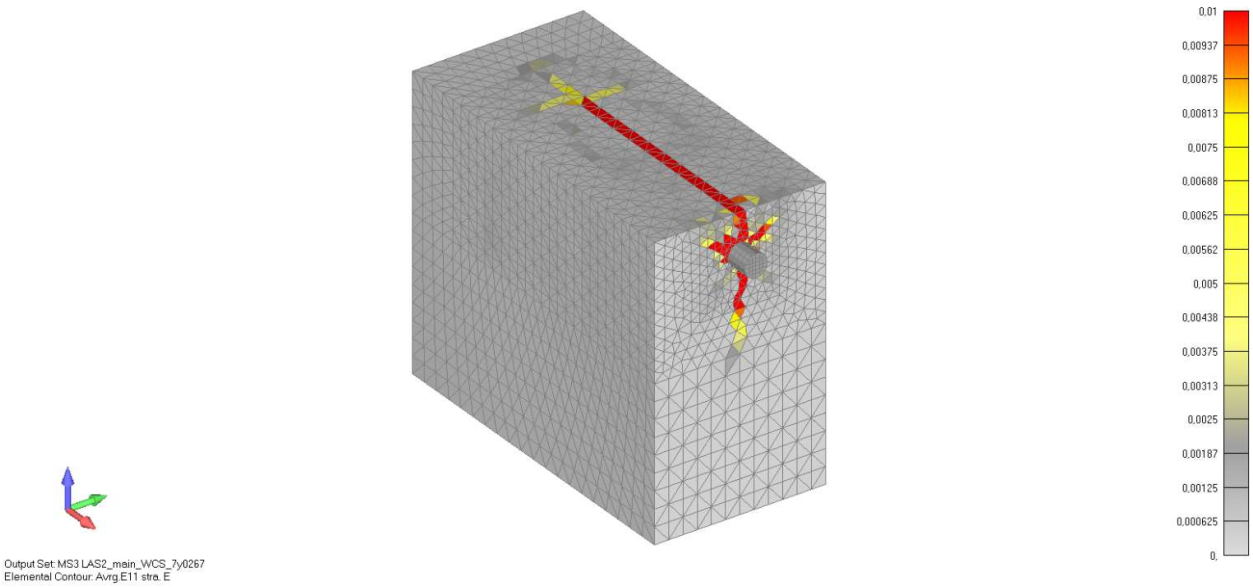
Slika 7.24 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A2 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 1 godinu dana (pogled-aksonometrija)



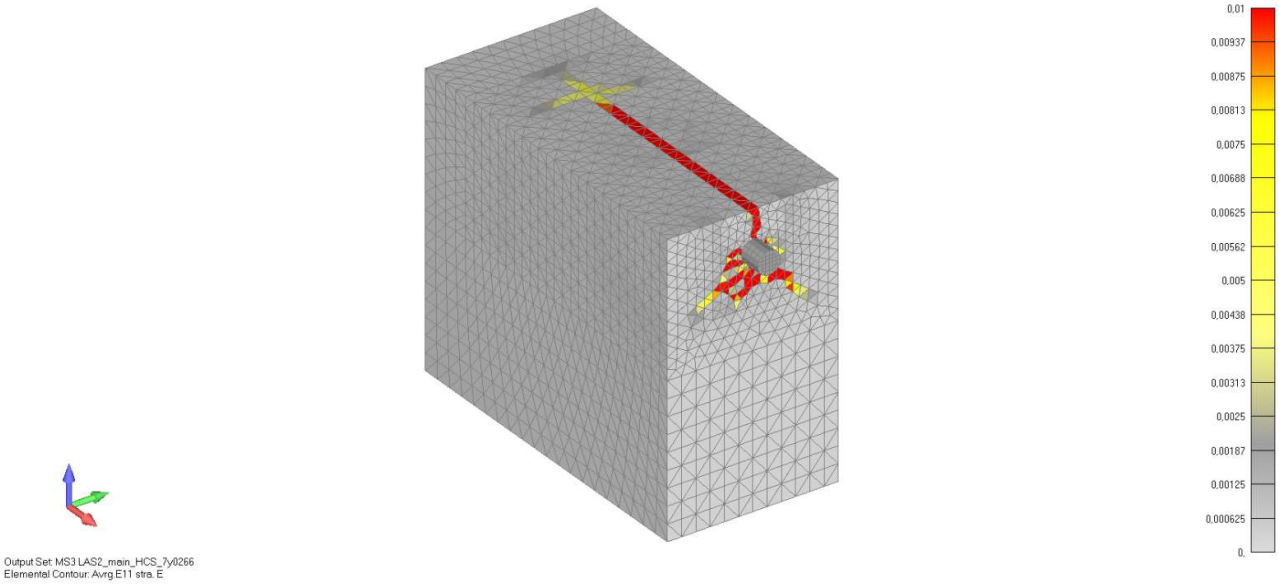
Slika 7.25. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A1 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 3 godinu dana (pogled-aksonometrija)



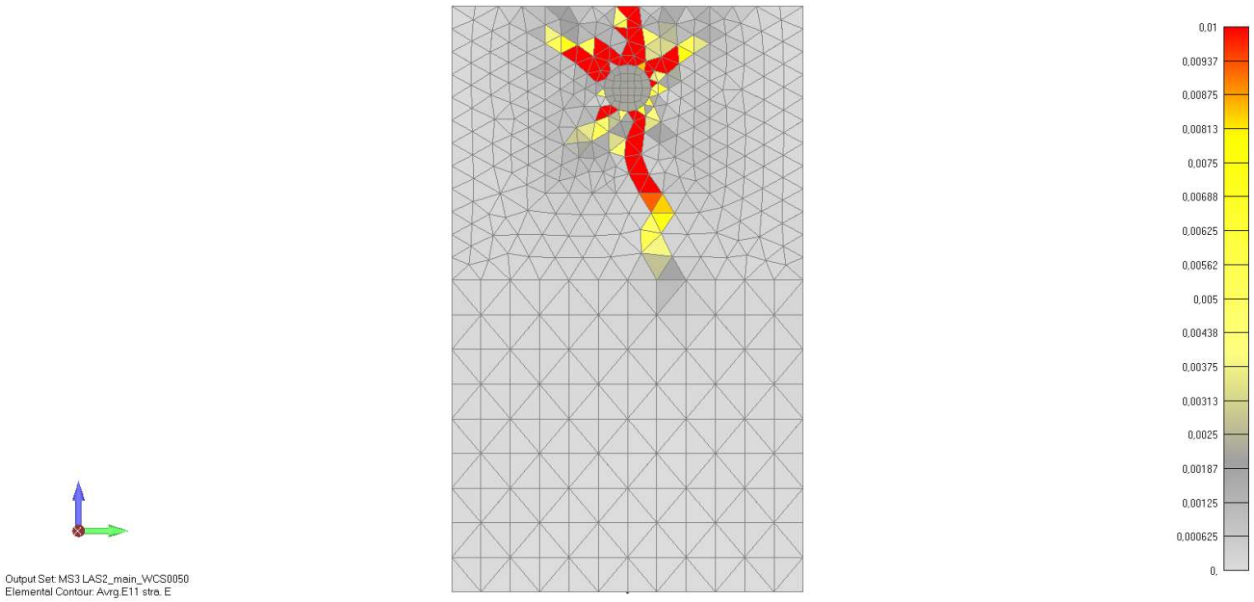
Slika 7.26 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A2 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 3 godine dana (pogled-aksonometrija)



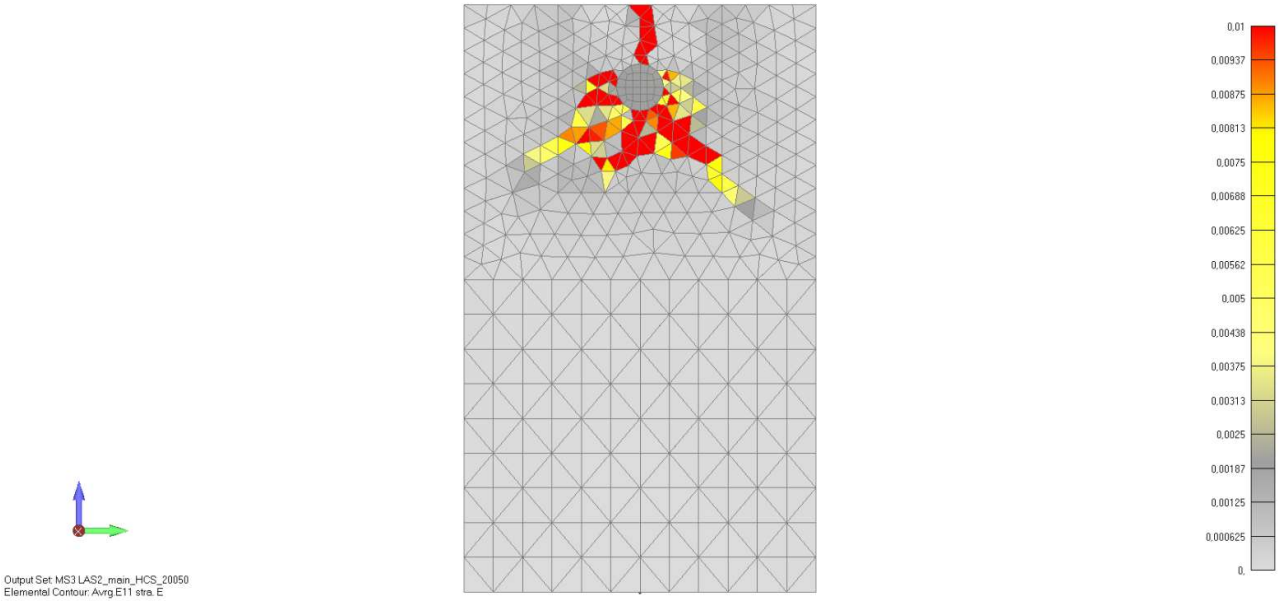
Slika 7.27. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A1 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 7 godina dana (pogled-aksonometrija)



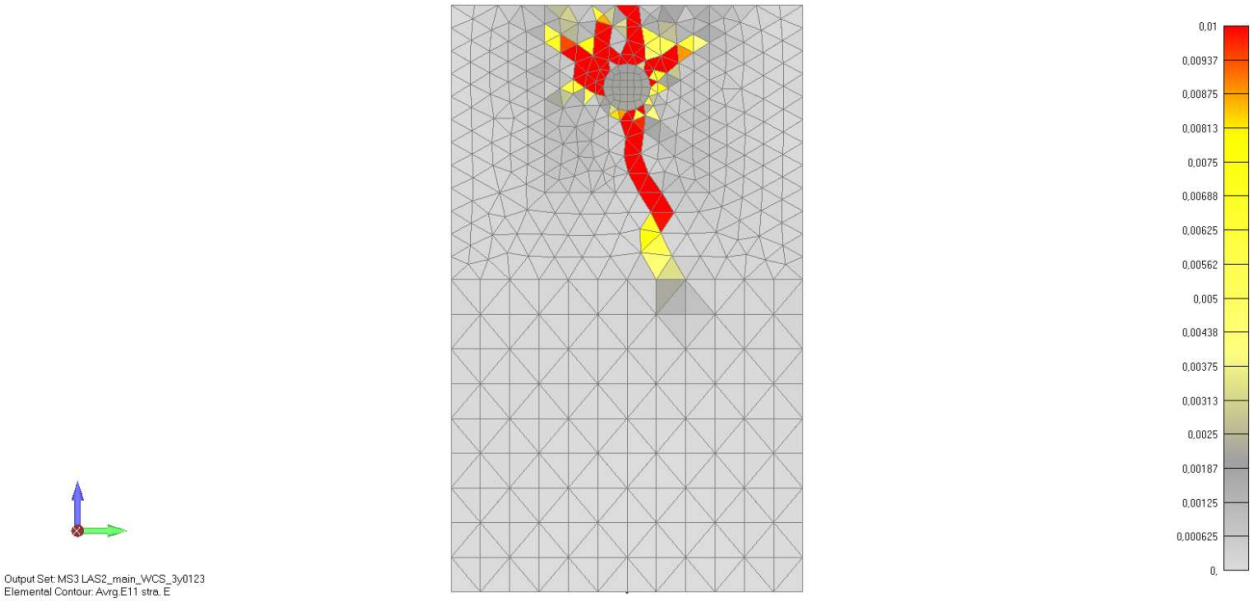
Slika 7.28 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A2 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 7 godina dana (pogled-aksonometrija)



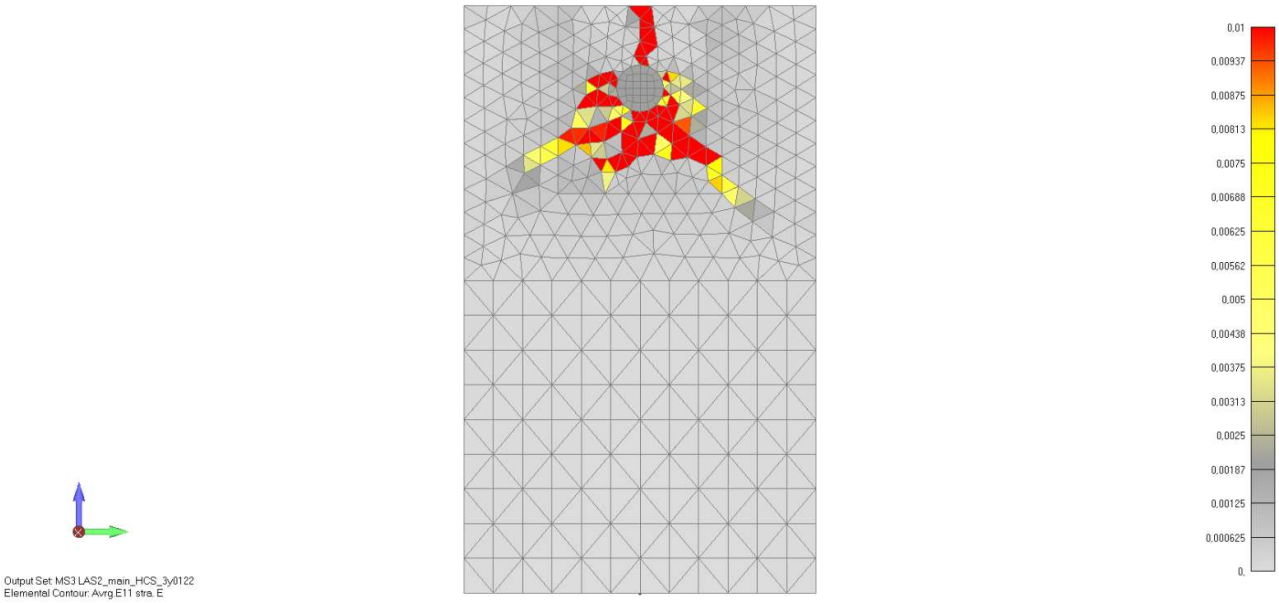
Slika 7.29. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A1 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 1 godinu dana (pogled-sprijeda)



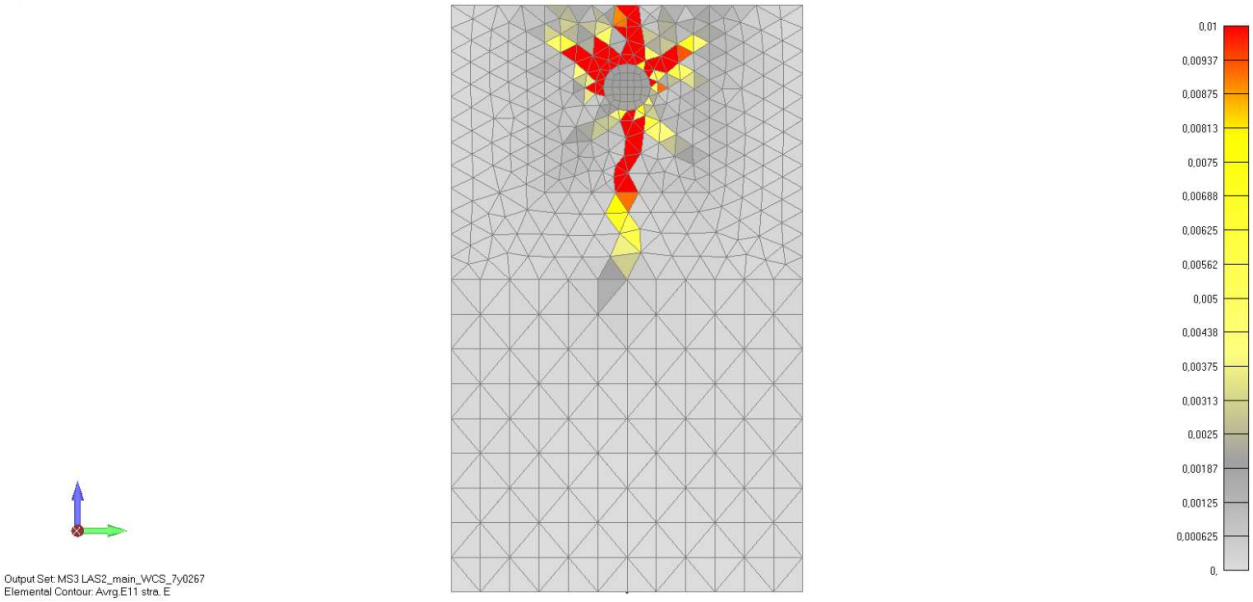
Slika 7.30 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A2 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 1 godinu dana (pogled- sprijeda)



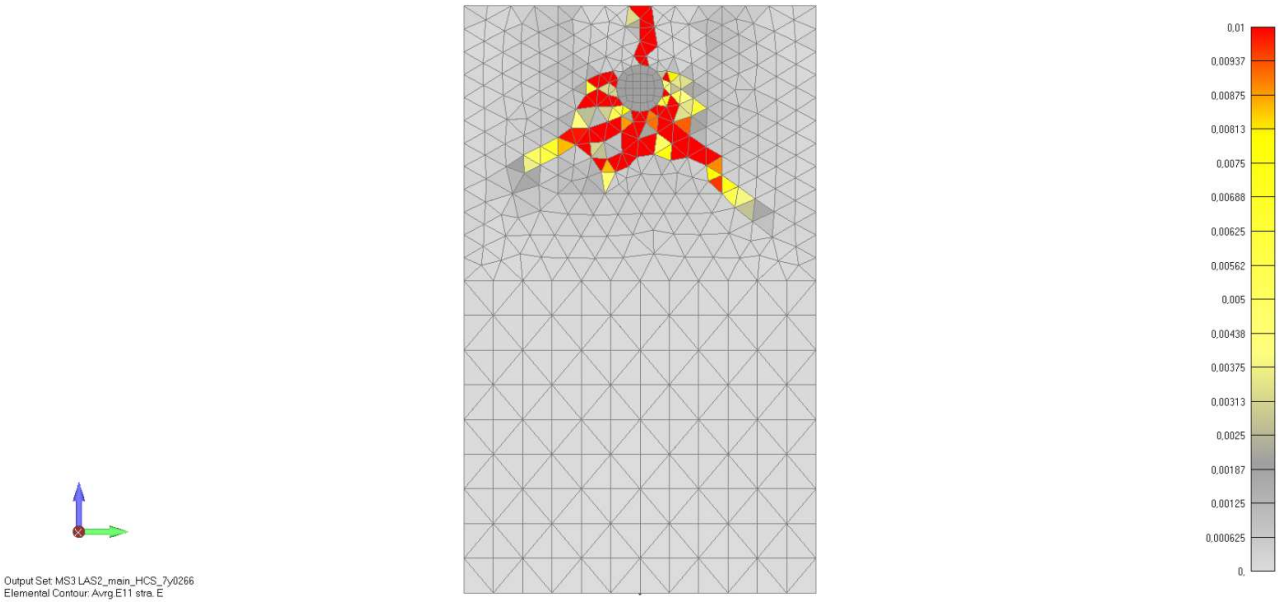
Slika 7.31. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A1 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 3 godine dana (pogled- sprijeda)



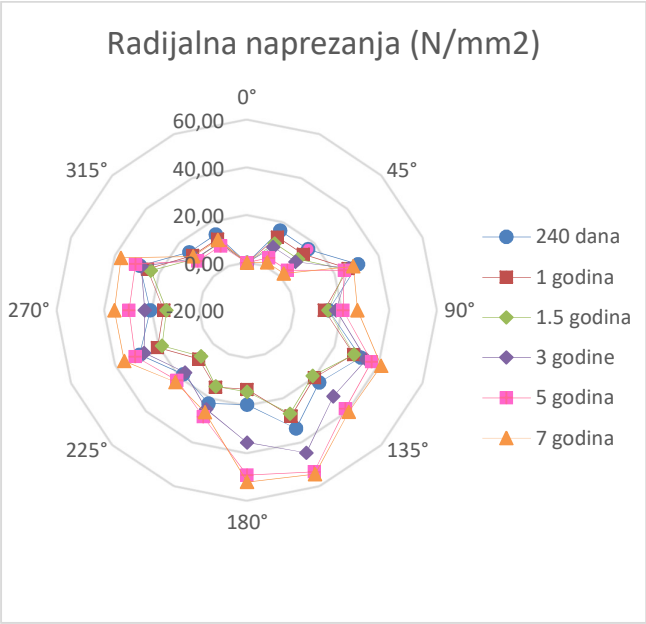
Slika 7.32 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A2 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 3 godine dana (pogled- sprijeda)

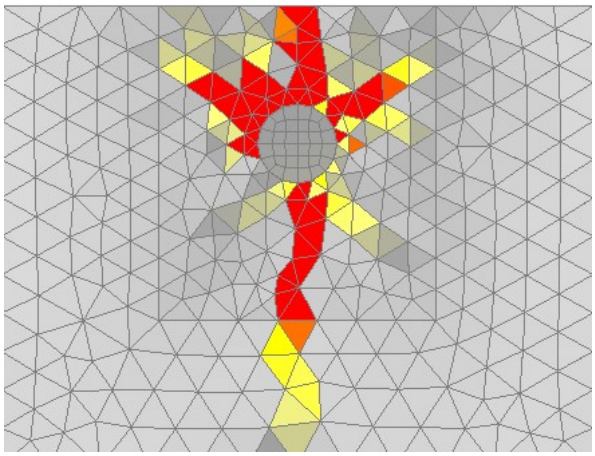


Slika 7.33. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A1 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 7 godina dana (pogled- sprijeda)

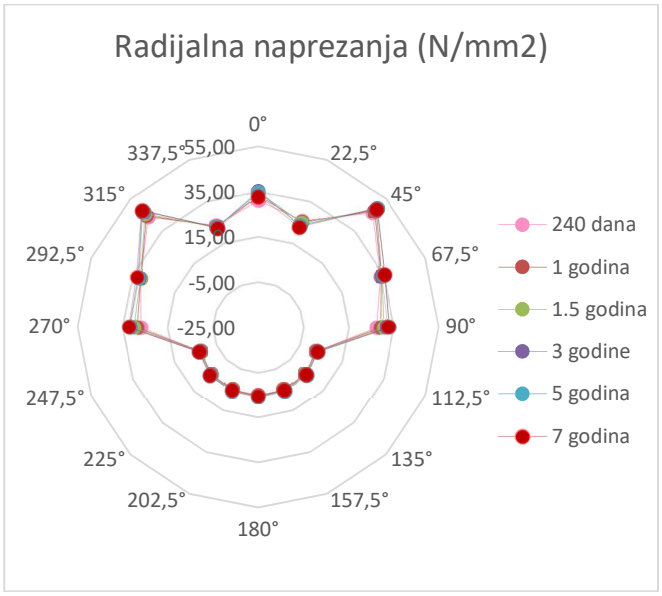


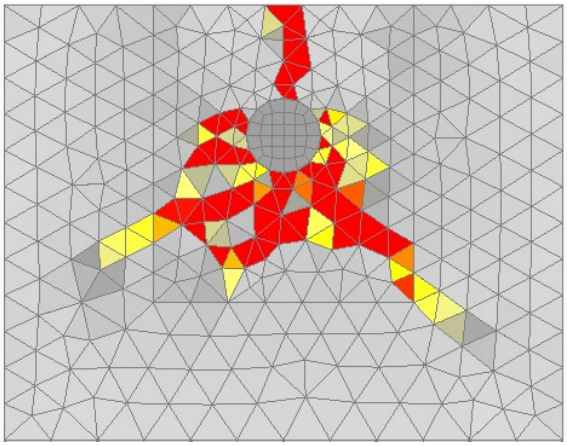
Slika 7.34 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu A2 koji je prethodno bio izložen prirodnoj koroziju 7 godina dana (pogled- sprijeda)





Slika 7.35. Radijalna naprezanja oko glavne šipke te prikaz pukotine prilikom izvlačenja armature iz uzorka za model A1

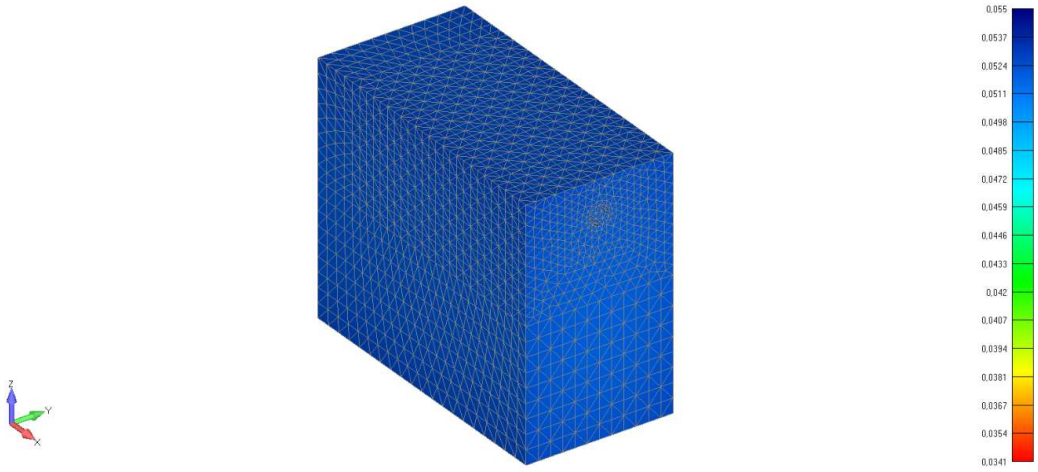




Slika 7.36. Radijalna naprezanja oko glavne šipke te prikaz pukotine prilikom izvlačenja armature iz uzorka za model A2

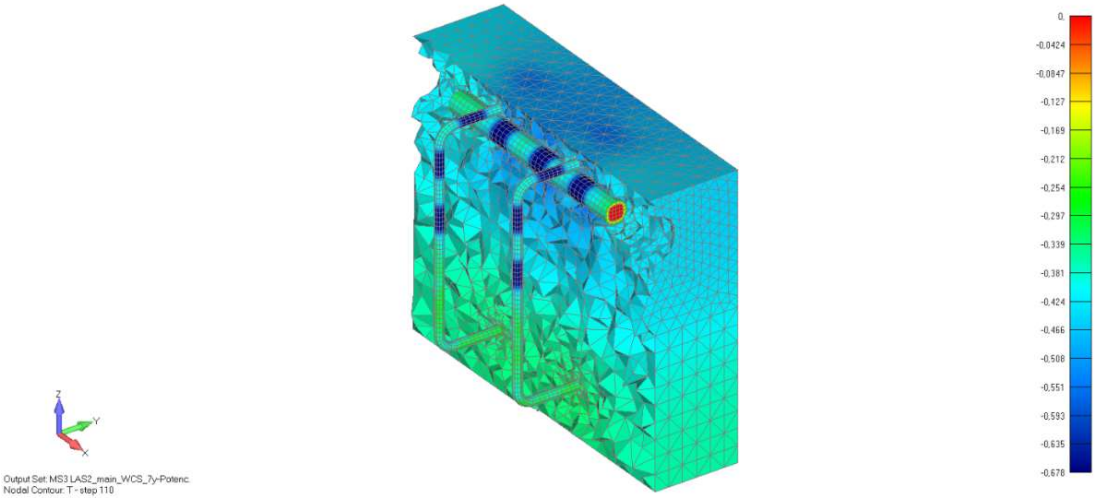
7.2.3. Distribucija kisika električnog potencijala i korozijske gustoće za prirodnu koroziju

U ovom poglavlju će biti prikazana raspodjela električnog potencijala, kisika i korozijske gustoće duž glavne armaturne šipke. Nakon depasivacije armature, između svih parametara, veličina korozije jako ovisi o distribuciji vode i kisika. Na primjer, ukoliko se stvori manjak, proces korozije će se usporiti ili eventualno zaustaviti. U današnjoj numeričkoj analizi, zasićenost vodom iznosi 50% što je prikazano na slici 7.37. Distribucija kisikom ovisi o korozijskom stupnju koji ovisi o mehaničkim uvjetima betona (pukotinama). Više pukotina inducira bolju opskrbu kisikom zbog čega se povećava korozijski stupanj. Na sljedećim grafovima (slika 7.39., 7.40.) je vidljivo da se električni potencijal i tok korozijske struje ponašaju konstantno iz razloga što se saturacija (S_w) ne mijenja.

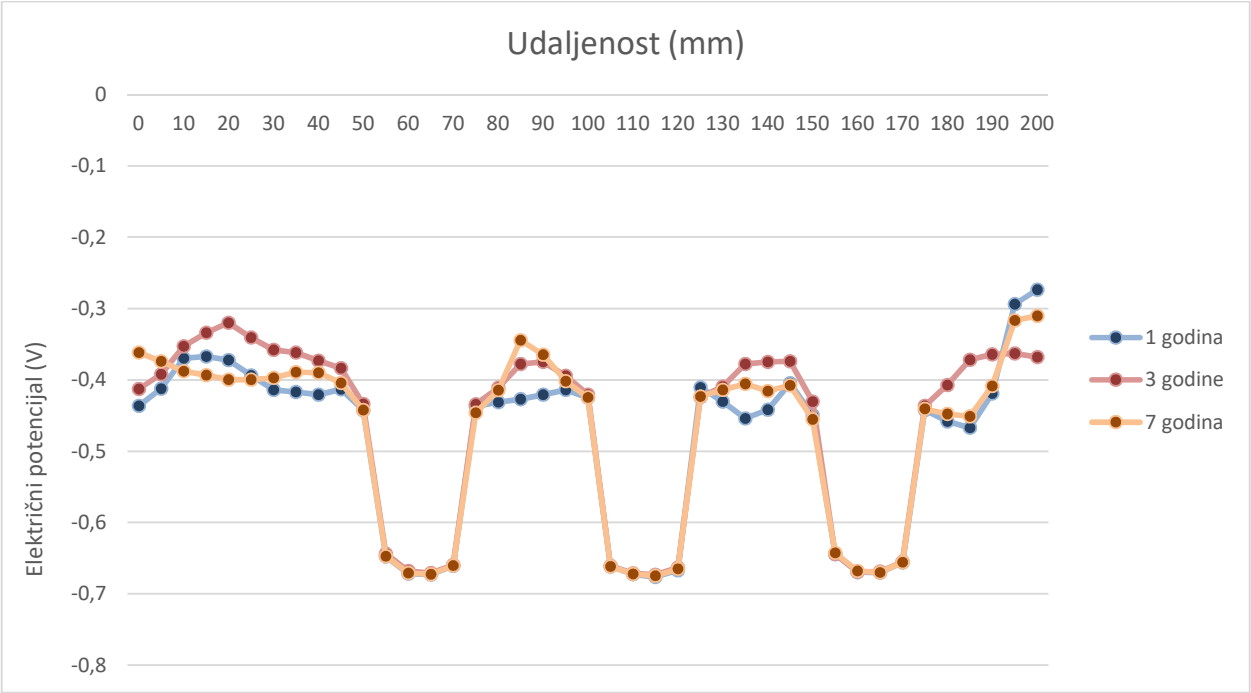


Slika 7.37. Zasićenost vodom betonskog uzorka za prirodnu koroziju

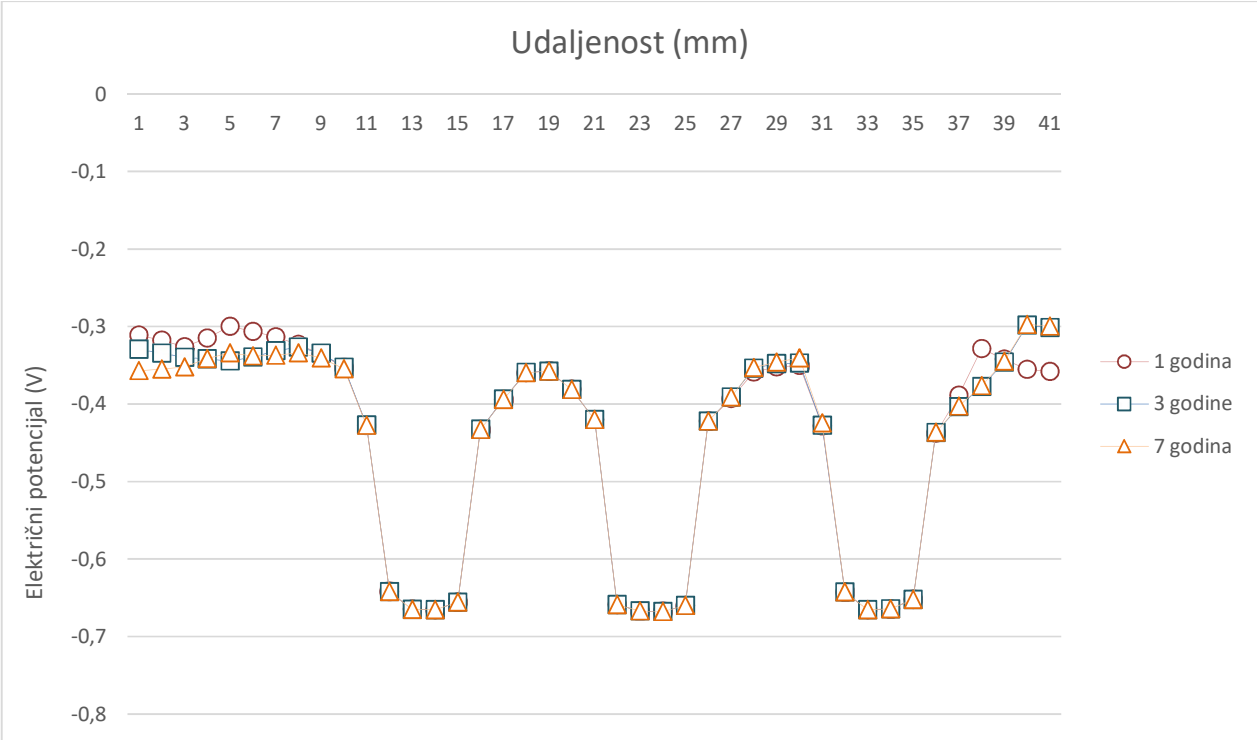
ELEKTRIČNI POTENCIJAL



Slika 7.38. Prikaz raspodjele električnog potencijala (V)



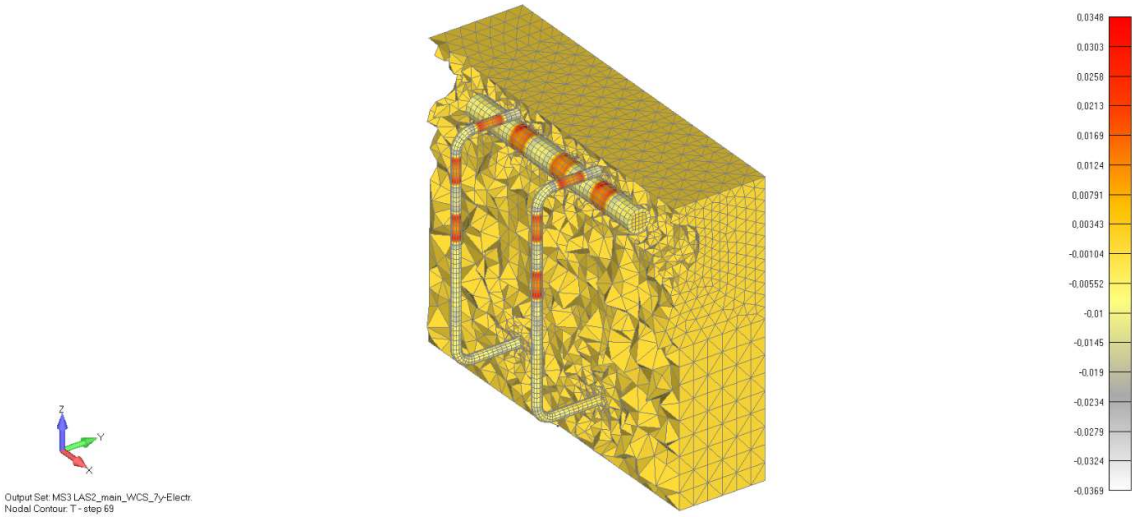
Slika 7.39. Graf raspodjele električnog potencijala (V)duž glavne armaturne šipke za model A1



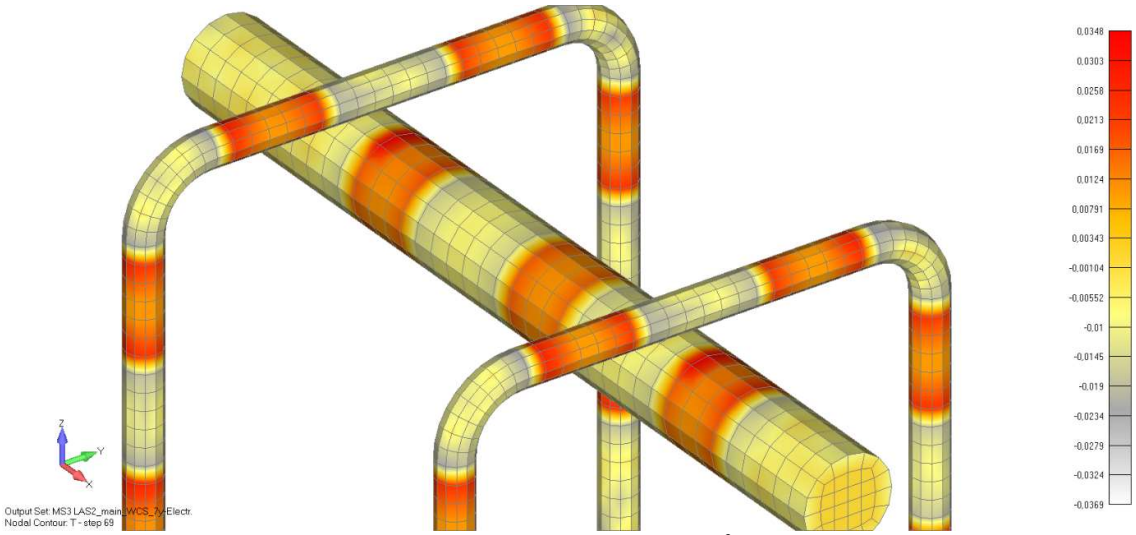
Slika 7.40. Graf raspodjele električnog potencijala (V)duž glavne armaturne šipke za model A2

Korozijska gustoća:

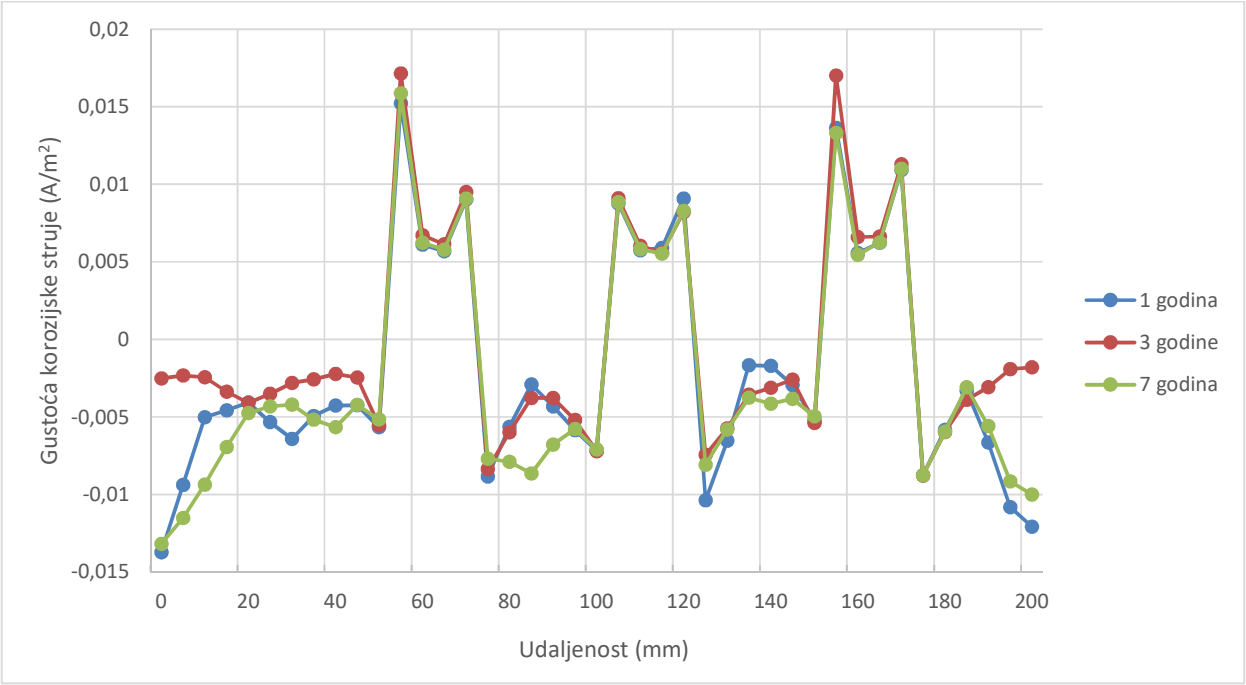
Povećane vrijednosti korozijske gustoće očitane su na mjestu prijelaza iz područja anode u katodu i obrnuto. Na tim mjestima se stvara najviše korozijskih produkata koji uzrokuju stvaranja pukotina u betonu, te nakon pojave prvih pukotina i sam transport korozijskih produkata kroz njih.



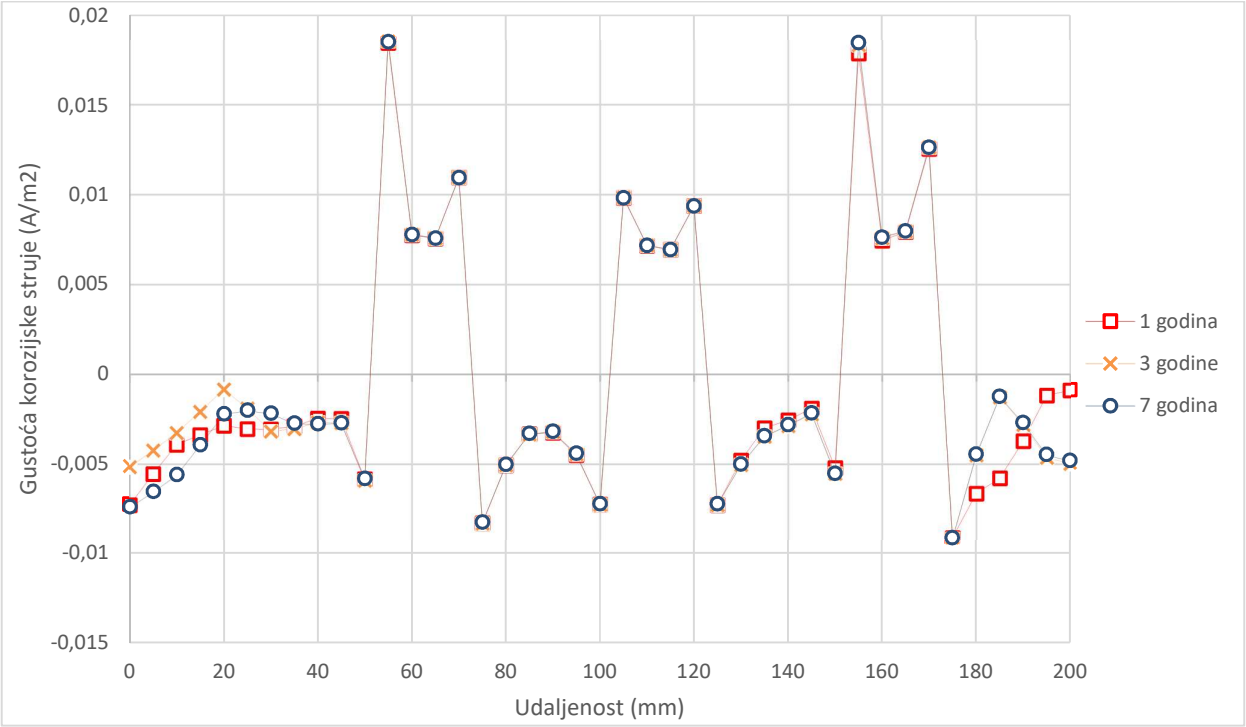
Slika 7.41. Prikaz raspodjele gustoće korozijske struje (A/m^2) na modelu A1



Slika 7.42. Prikaz raspodjele gustoće korozijske struje (A/m^2) na modelu A1 (detalj armature)



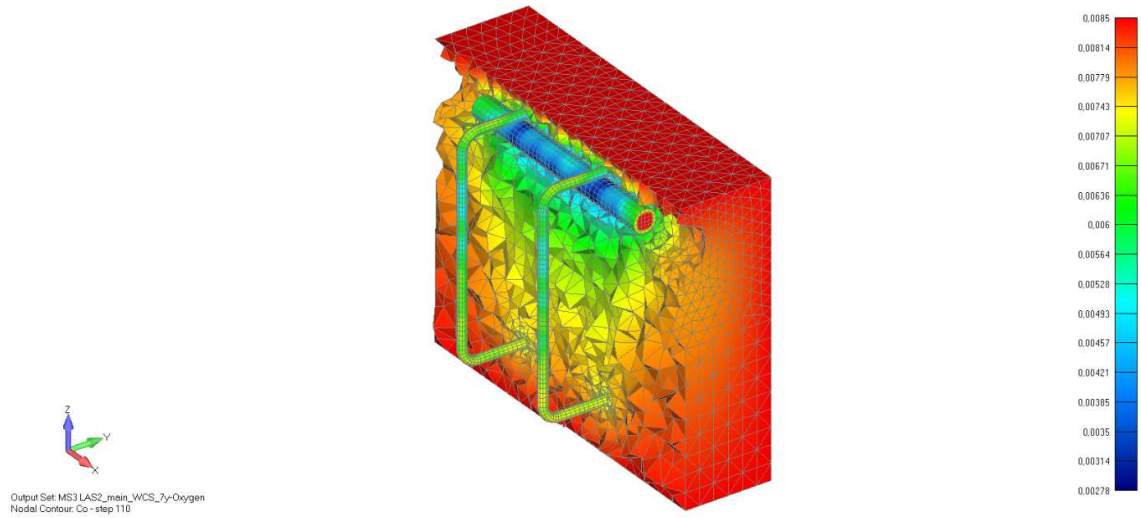
Slika 7.43. Graf raspodjele gustoće korozijske struje (A/m²) duž glavne armaturne šipke na modelu A1



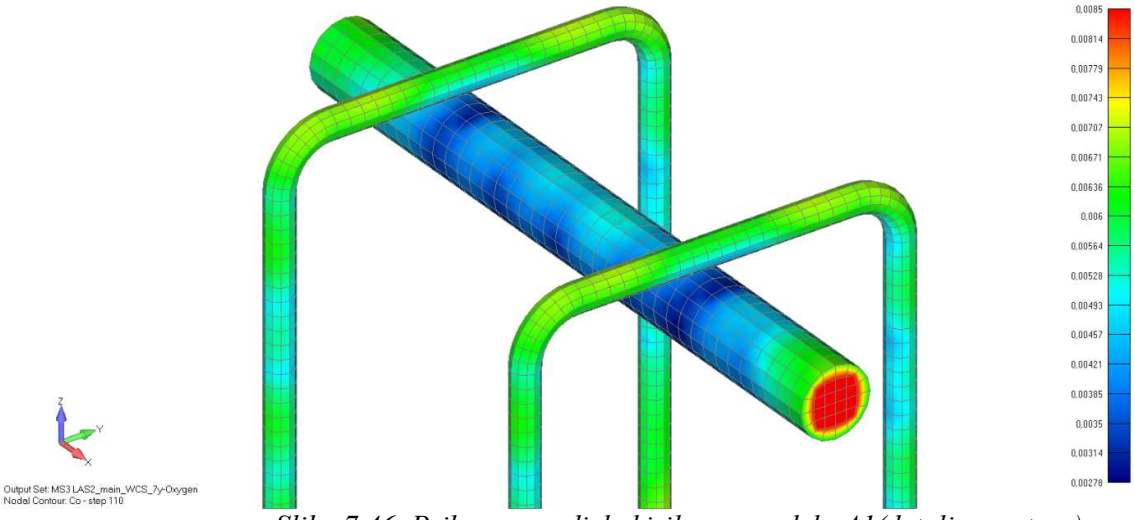
Slika 7.44. Graf raspodjele gustoće korozijske struje (A/m²) duž glavne armaturne šipke na modelu A2

KISIK :

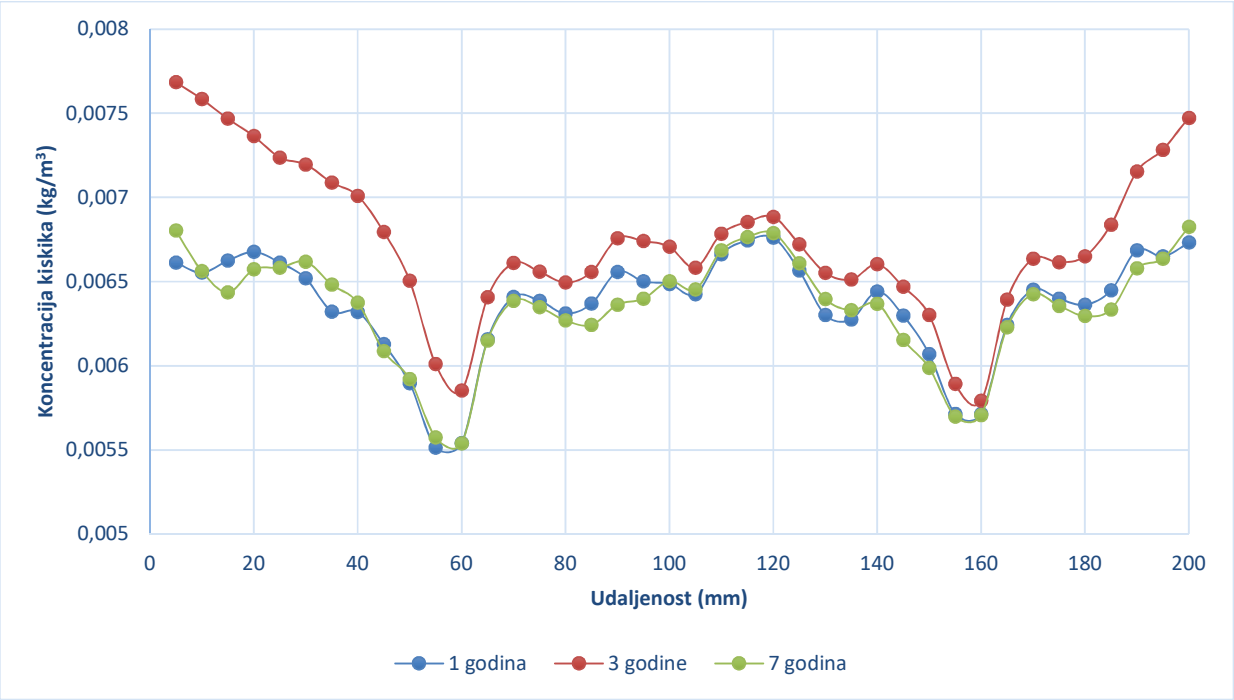
Distribucija kisika duž glavne armature je (relativno) konstantna, razlog je što se kod analize nisu pojavile veće pukotine na površini koje bi rezultirale ulaskom zraka u model i time ubrzale proces korozije. Na grafovima se može vidjeti da je u krajevima šipke koji su bliže armirano betonskoj površini veća koncentracija kisika nego u sredini šipke, a još manje vrijednosti su na položajima anode gdje se kisik troši najviše.



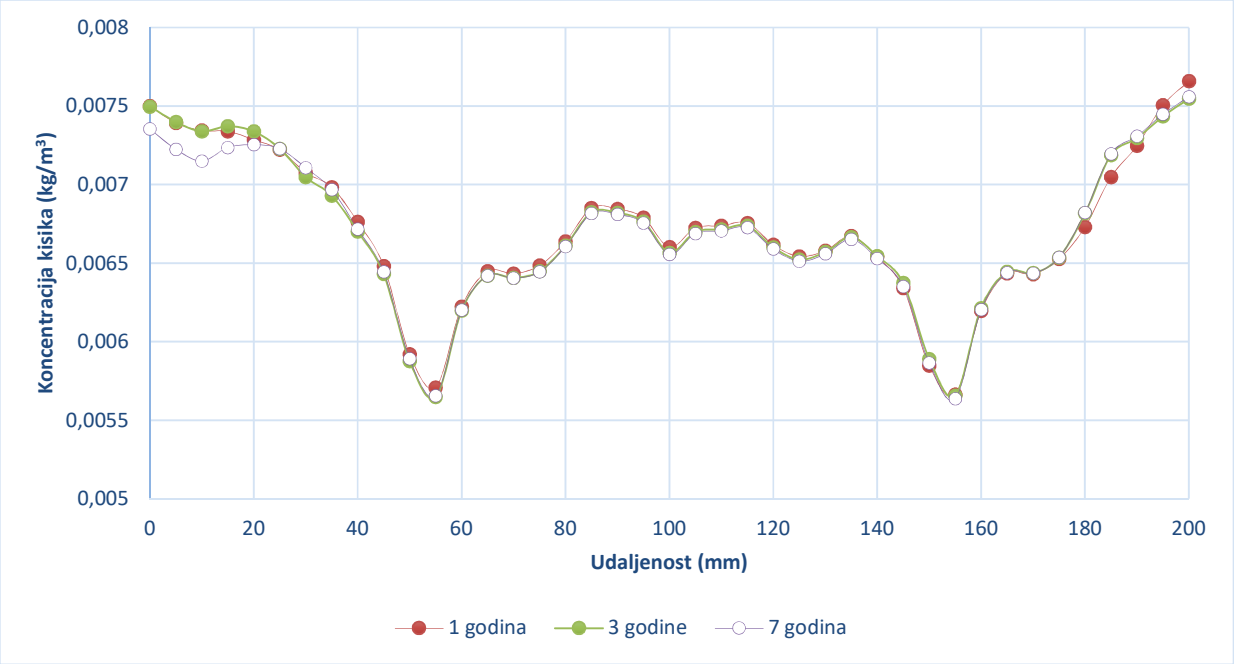
Slika 7.45. Prikaz raspodjele kisika na modelu A1



Slika 7.46. Prikaz raspodjele kisika na modelu A1(detalj armature)



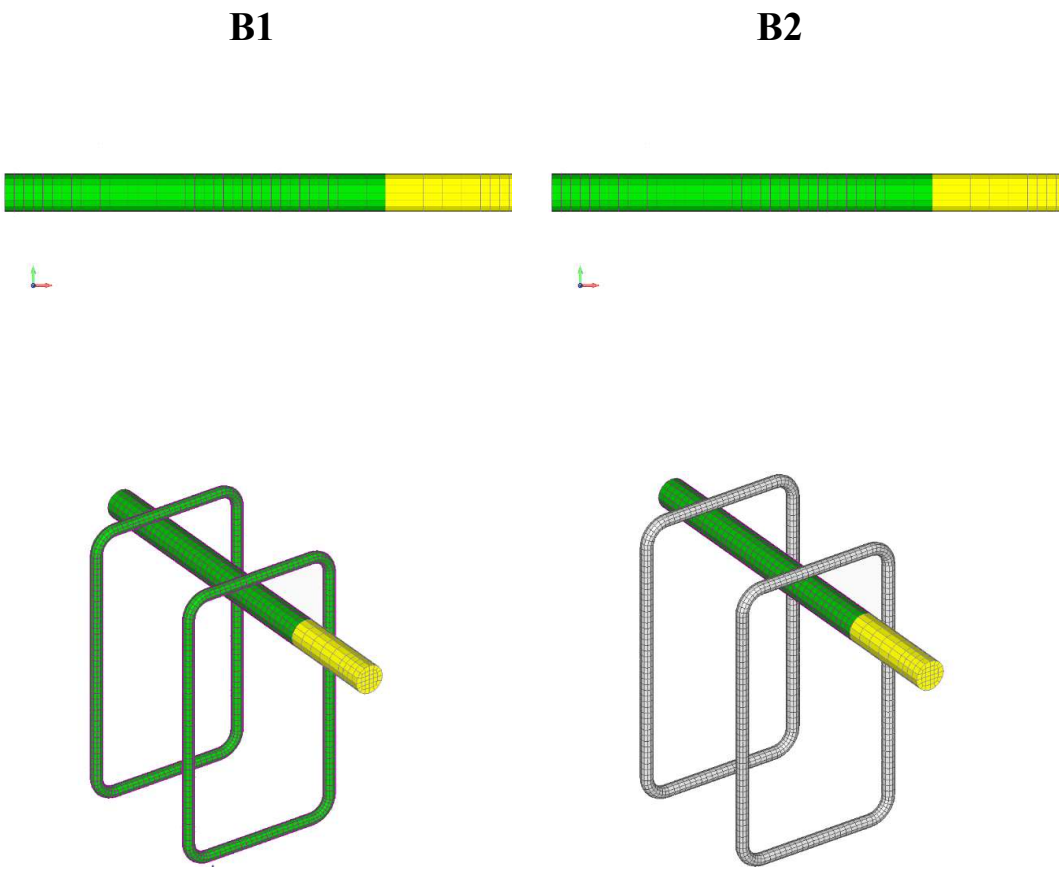
Slika 7.47. Graf raspodjele kisika duž glavne armaturne šipke na modelu A1



Slika 7.48. Graf raspodjele kisika duž glavne armaturne šipke na modelu A2

7.3Ubrzana korozija

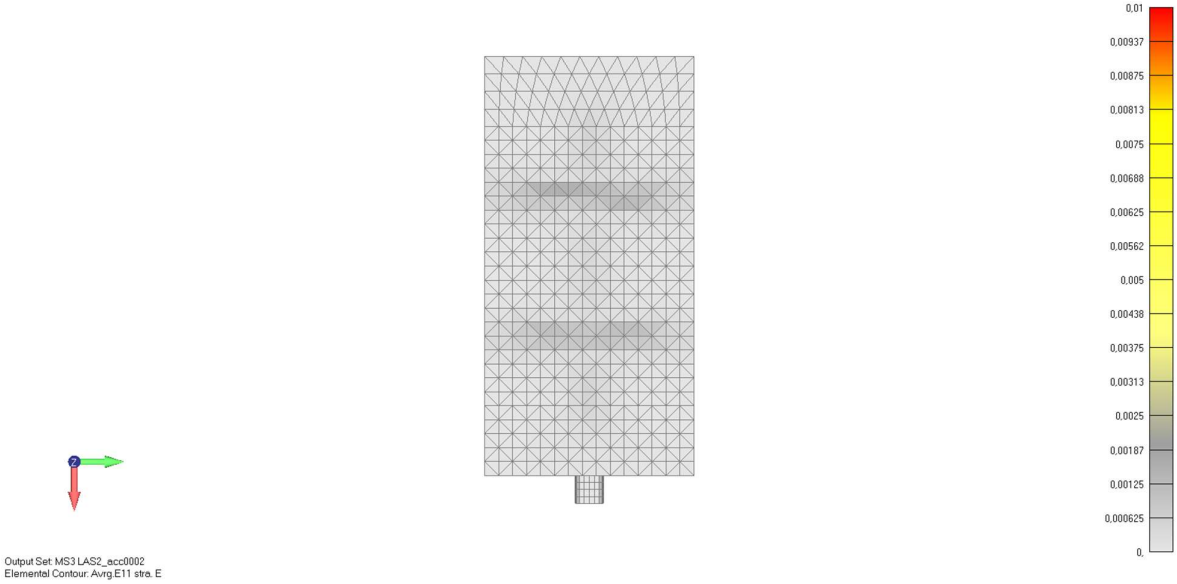
U ovom poglavlju će biti prikazani rezultate utjecaja ubrzane korozije te će se pokušati simulirati stanje eksperimentalnih pokusa i njihova usporedba. Za ubrzanu koroziju razlikuju se dva modela: model B1 i model B2. U prvom slučaju modela B1 glavna armaturna šipka i vilice predstavljaju anodu, a u drugom slučaju modela B2 anodu predstavlja samo glavna armaturna šipka dok vilice nisu aktivirane, kao što je vidljivo na slici 7.49. Razlika u odnosu na prirodnu koroziju i način proračunavanja je taj da se ovdje kod armature zadaje samo anoda, a katoda se zadaje na površini betonskog uzorka. Procesi korozije se odvijaju mnogo brže i vjernije mogu opisati eksperimentalna istraživanja koja traju jako kratko (oko mjesec dana), a proces korozije u stvarnosti je jako dug proces koji traje godinama čak i desetljećima dok se ne uoče oštećenja i propadanja armiranobetonske konstrukcije.



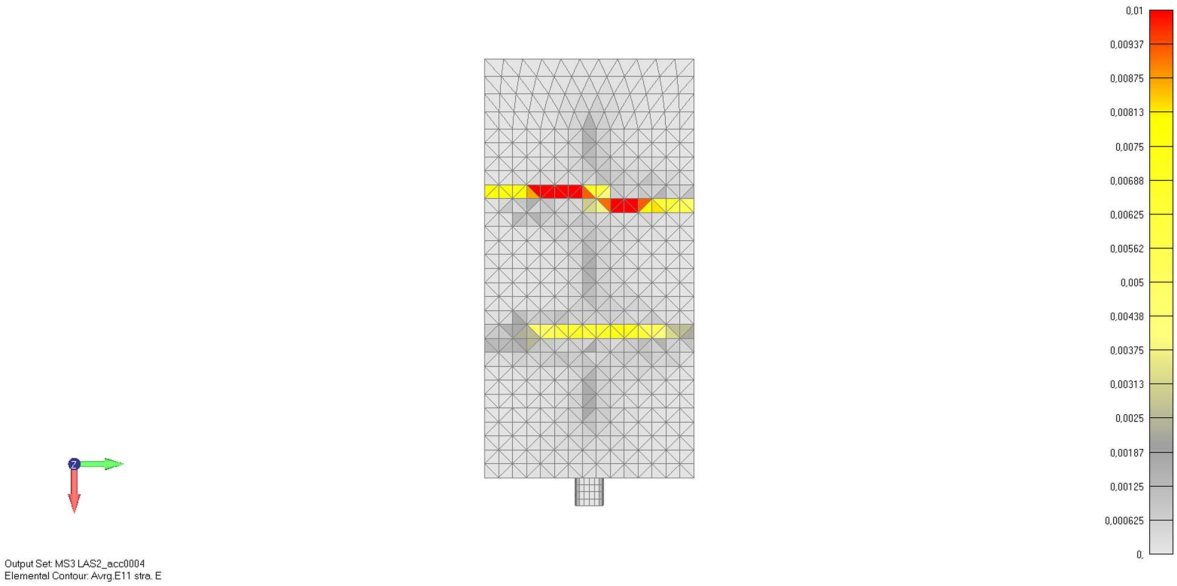
Slika 7.49. Prikaz pozicija anode kod modela B1 (lijevo) i B2 (desno), zelena boja predstavlja anodu, siva ne aktivirano područje a žuta nam predstavlja plastičnu cijev

7.3.1. Prikaz oštećenja armiranobetonske uslijed simuliranja ubrzane korozije

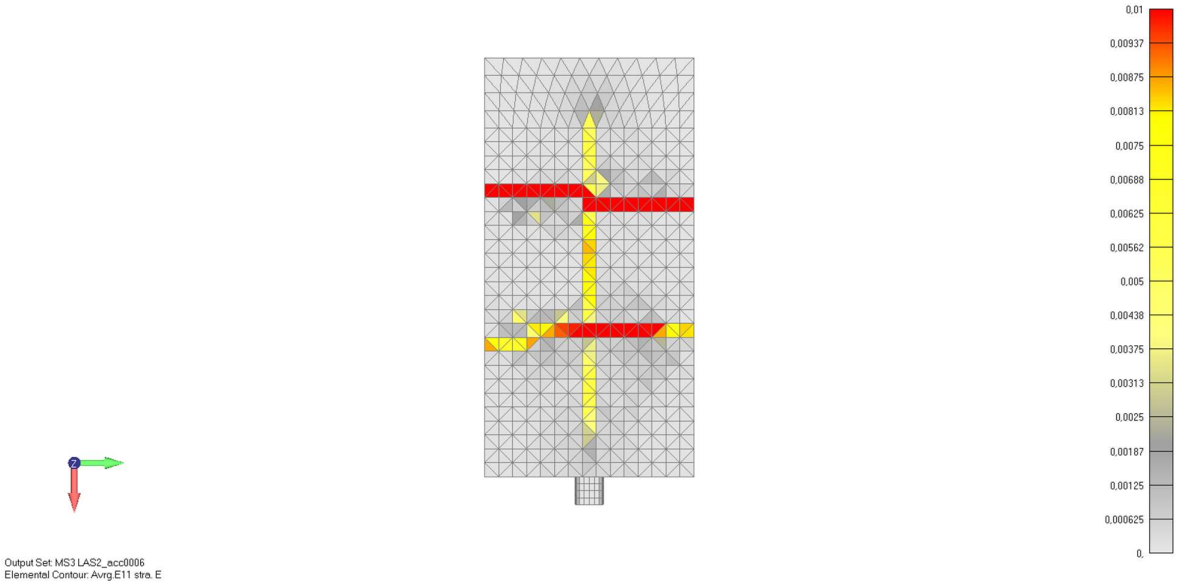
Model B1



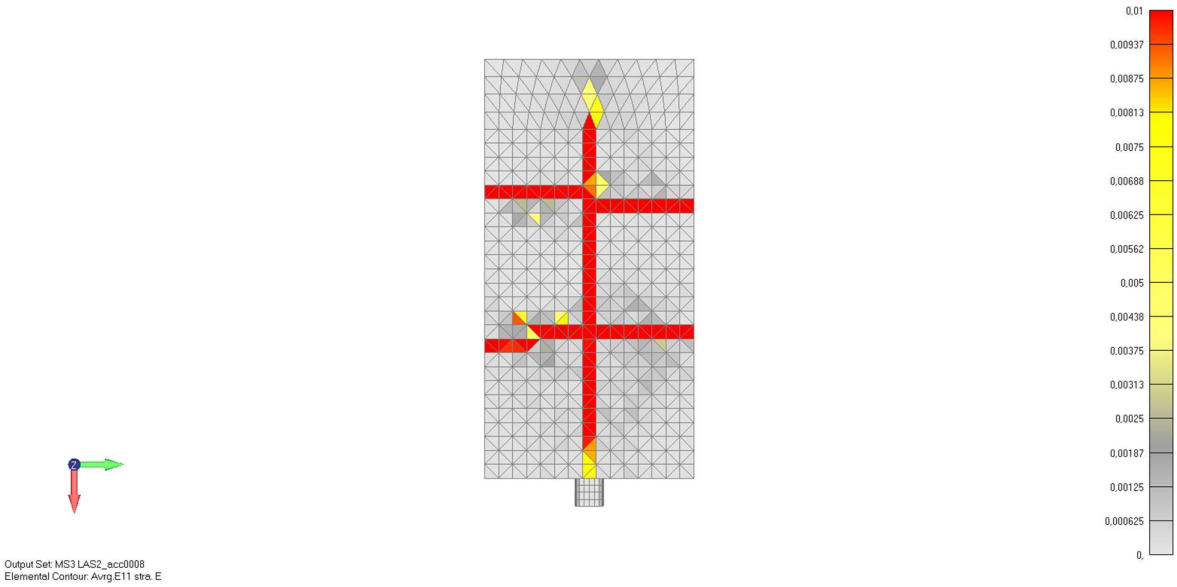
Slika 7.50. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 4 dana za model B1 (pogled od gore)



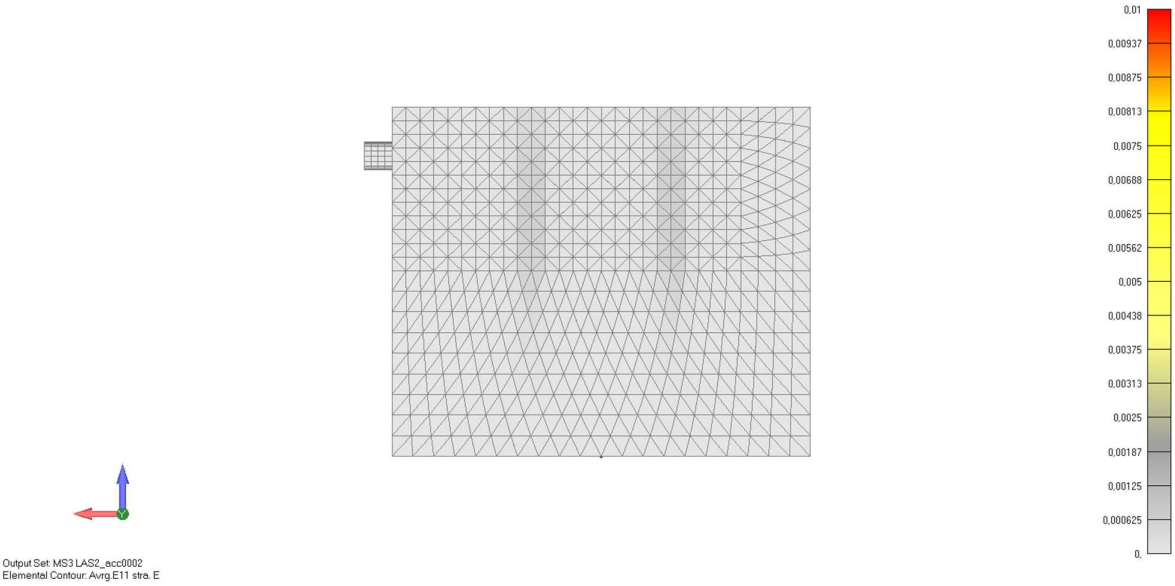
Slika 7.51 Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 8 dana za model B1 (pogled od gore)



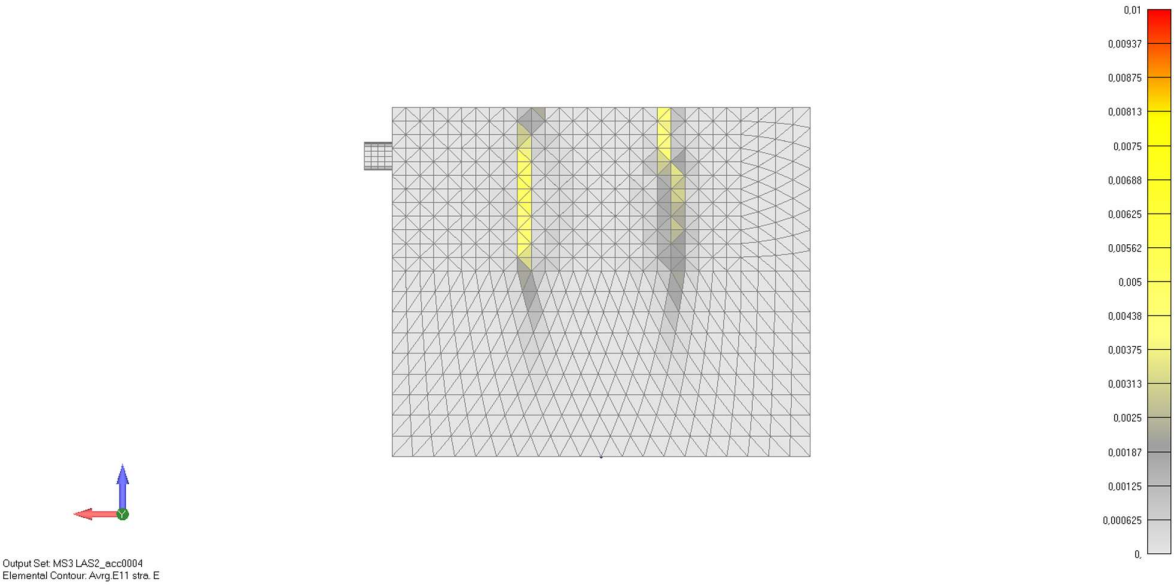
Slika 7.52. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 12 dana za model B1 (pogled od gore)



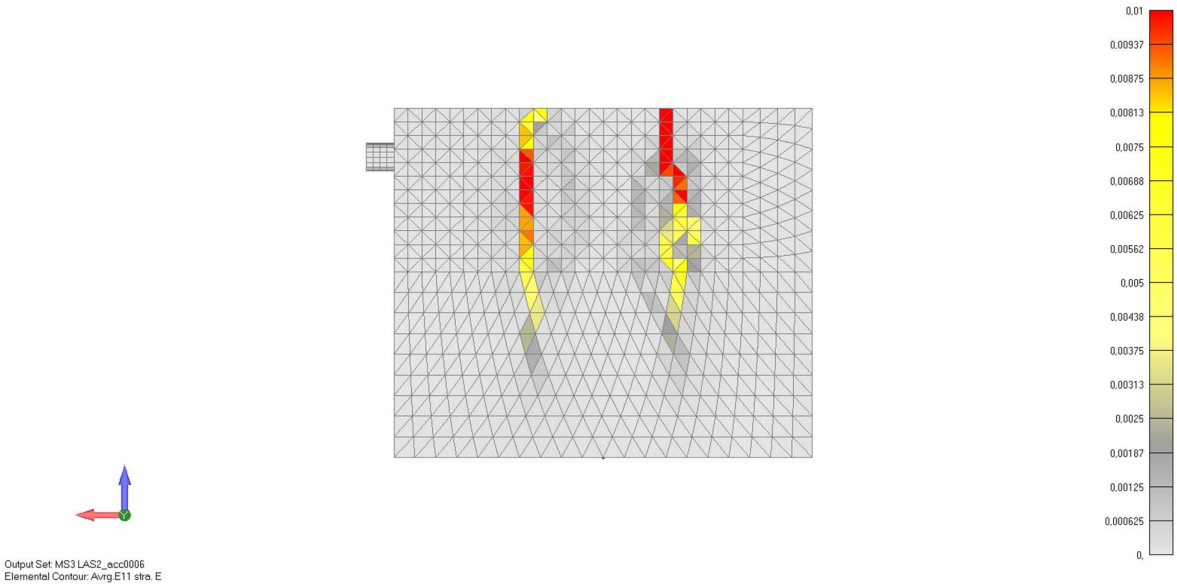
Slika 7.53. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 16 dana za model B1 (pogled od gore)



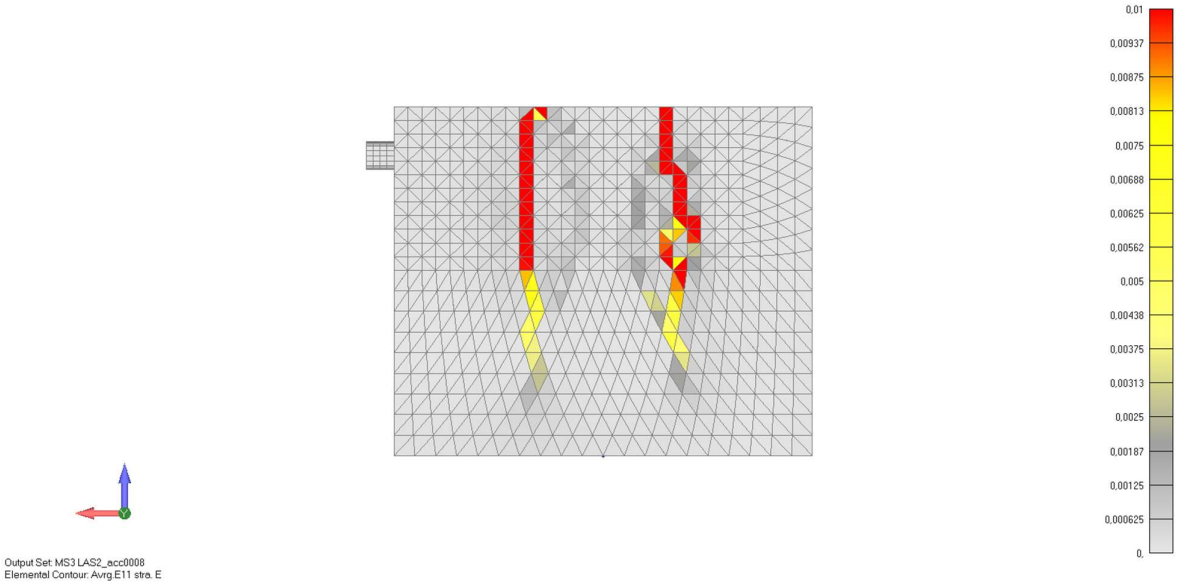
Slika 7.54. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 4 dana za model B1 (pogled zdesna)



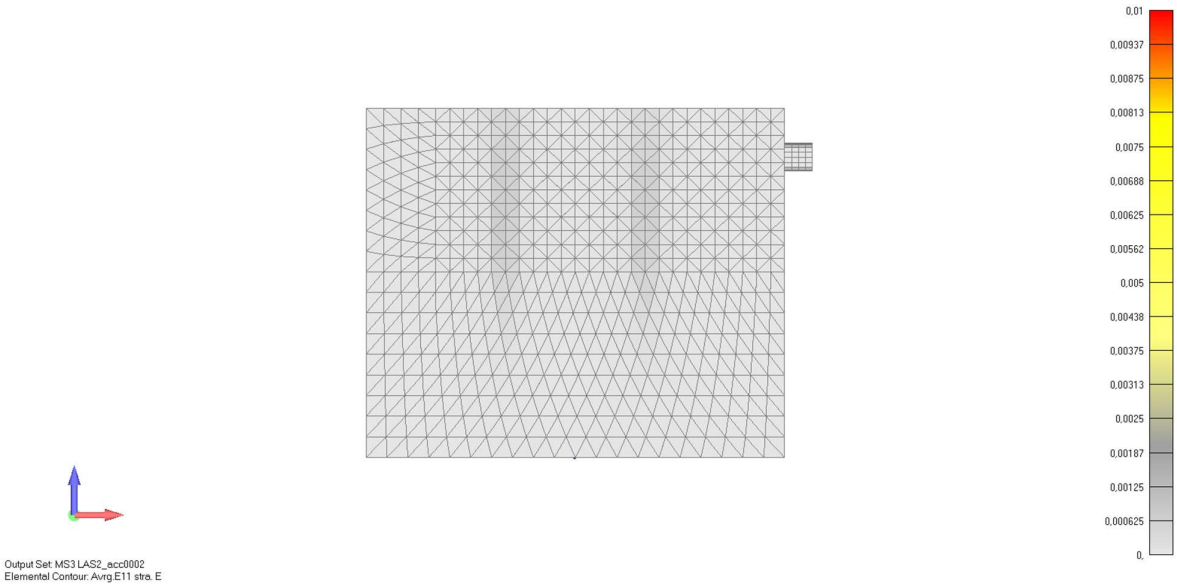
Slika 7.55. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 8 dana za model B1 (pogled zdesna)



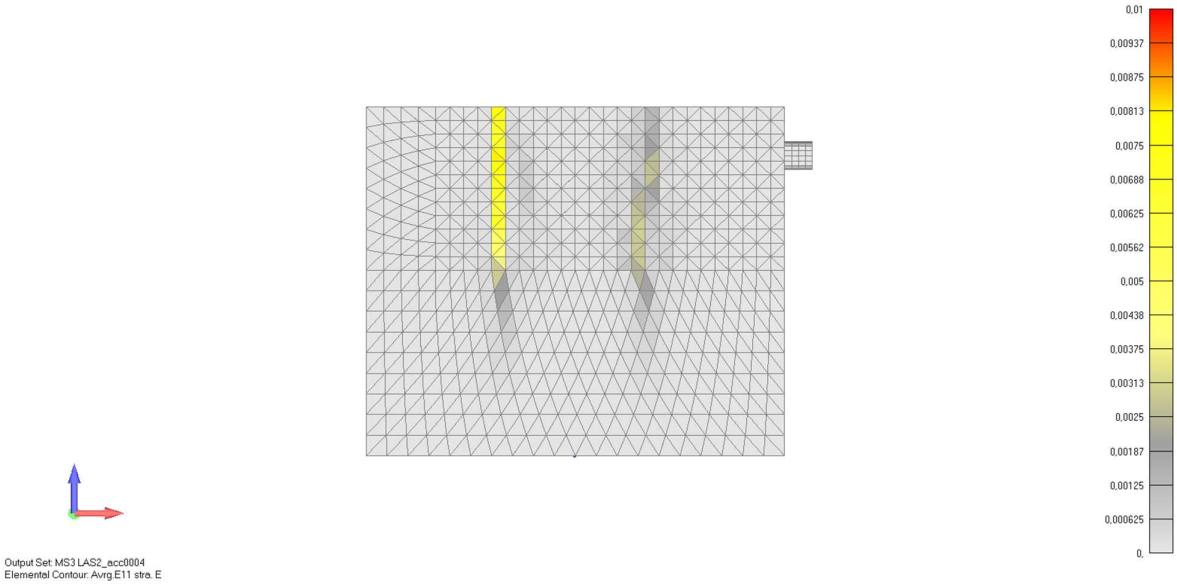
Slika 7.56. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 12 dana za model B1 (pogled zdesna)



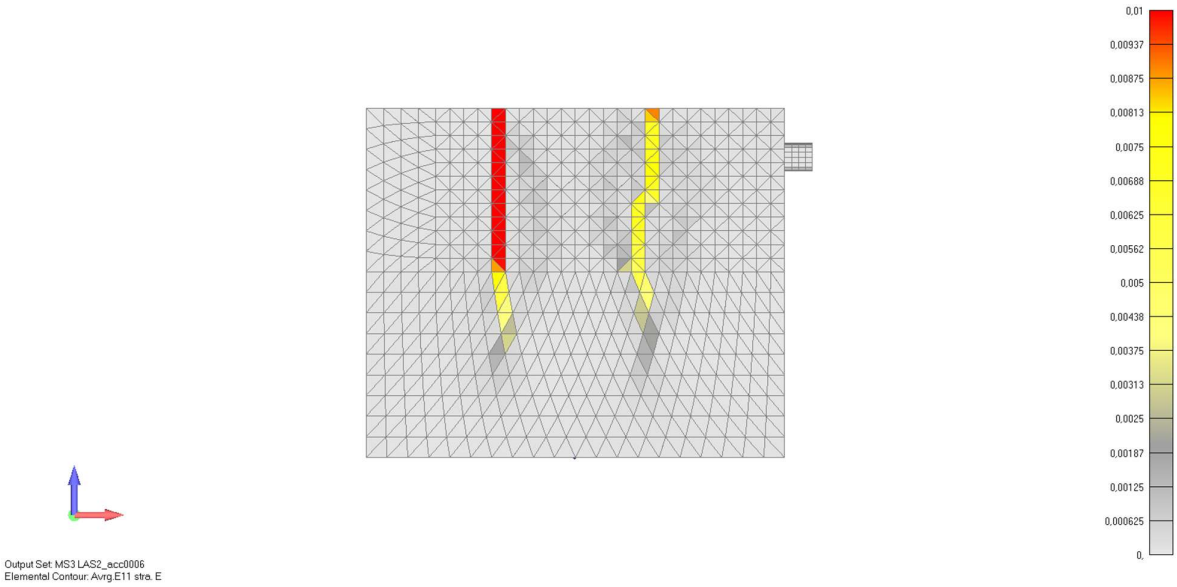
Slika 7.57. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 16 dana za model B1 (pogled zdesna)



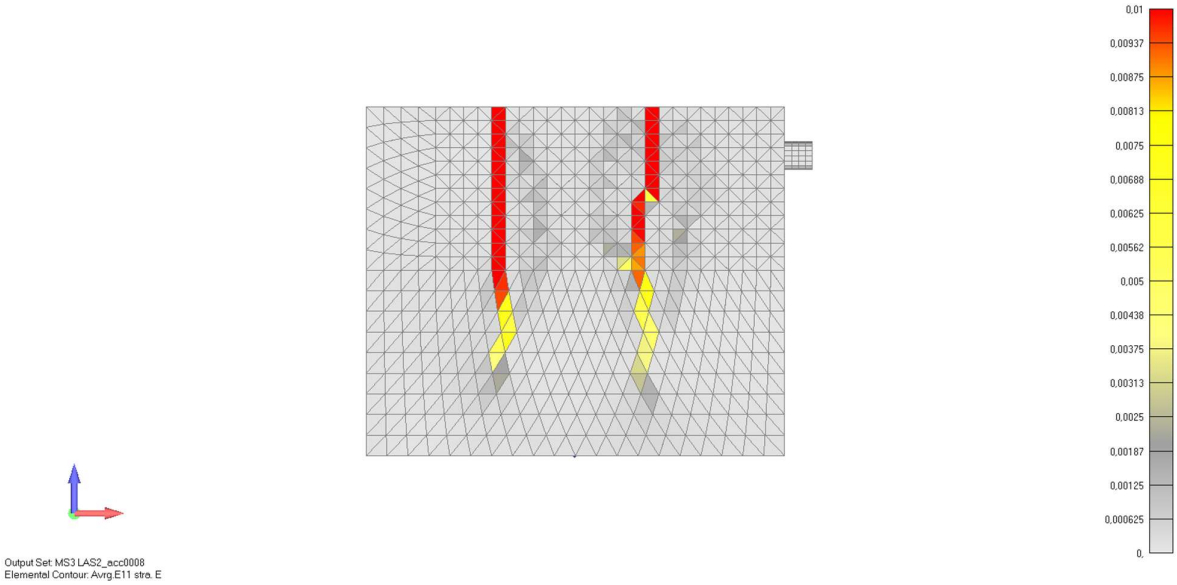
Slika 7.58. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 4 dana za model B1 (pogled slijeva)



Slika 7.59. m Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 8 dana za model B1 (pogled zdesna)

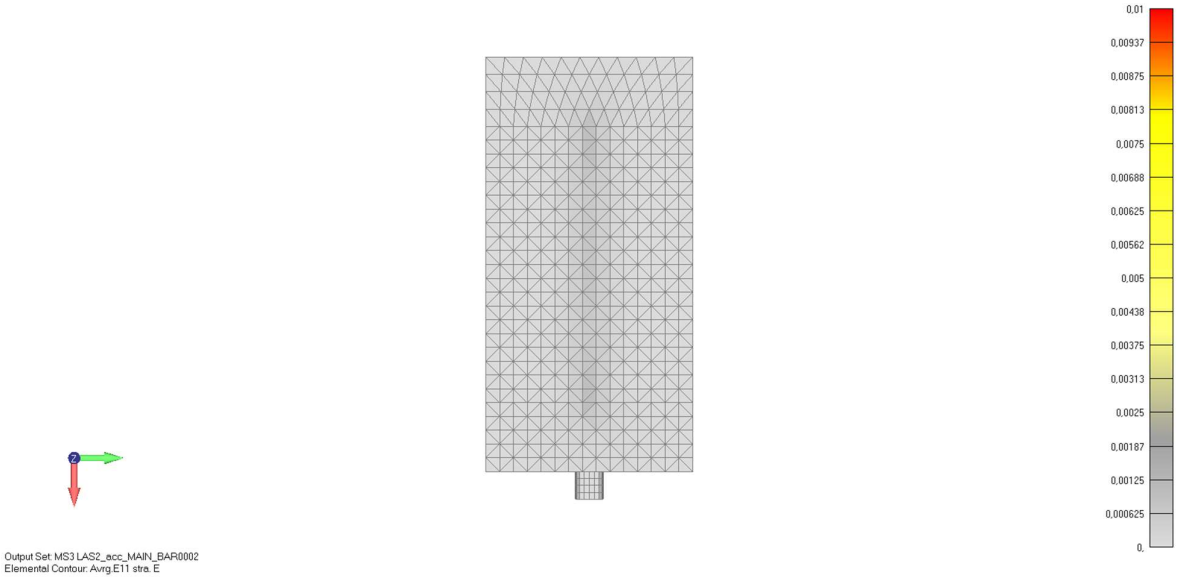


Slika 7.60. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 12 dana za model B1 (pogled zdesna)

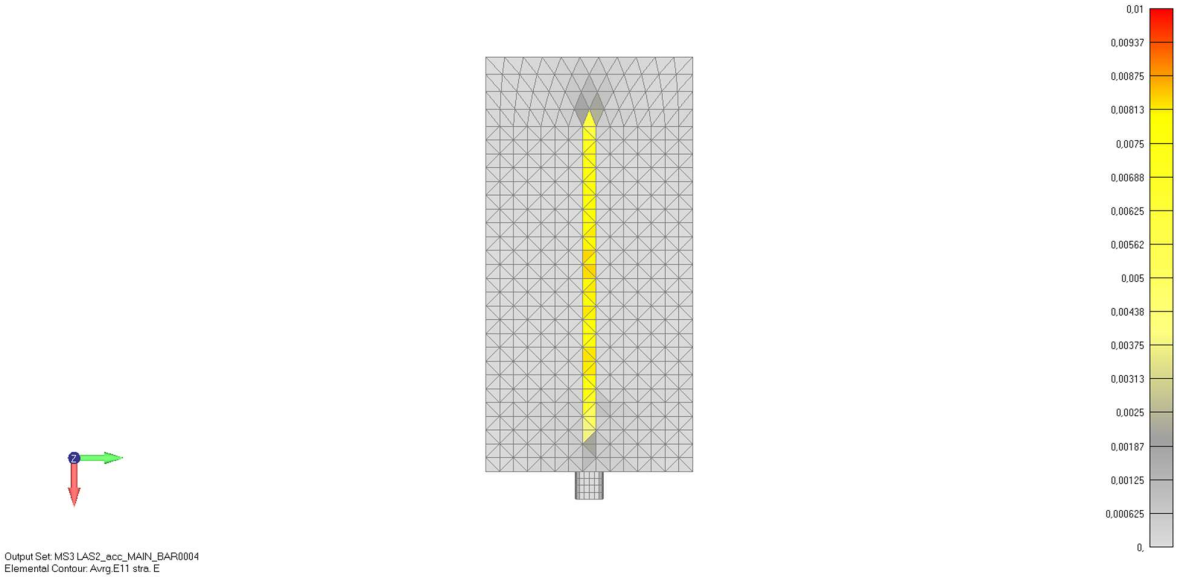


Slika 7.61. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 16 dana za model B1 (pogled zdesna)

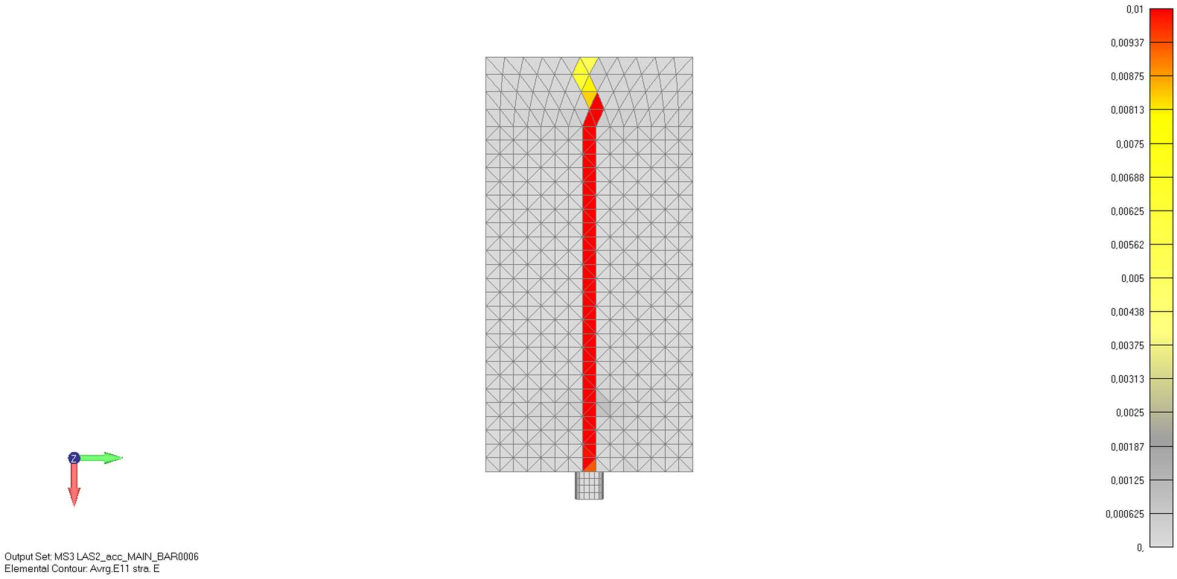
Model B2



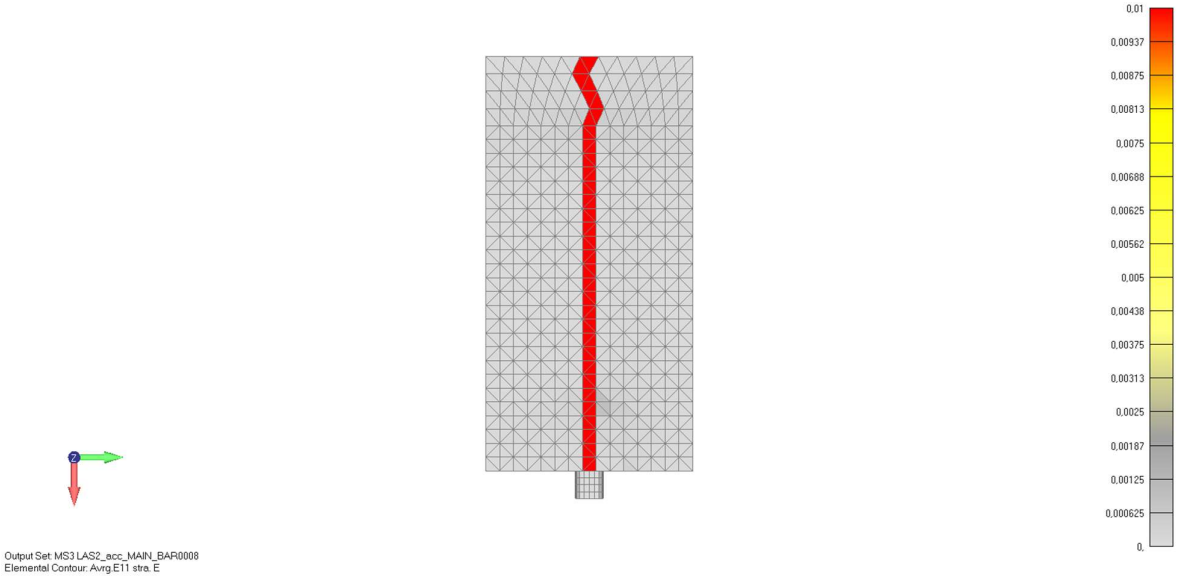
Slika 7.62. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 4 dana za model B2 (pogled od gore)



Slika 7.63. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 8 dana za model B2 (pogled od gore)



Slika 7.64. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 12 dana za model B2 (pogled od gore)



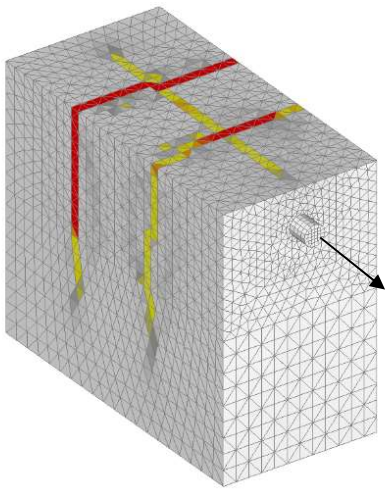
Slika 7.65. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka uslijed utjecaja ubrzane korozije nakon 16 dana za model B2 (pogled od gore)

7.3.2. Pull-out test na modele B1 i B2 nakon izlaganja uzoraka ubrzanoj koroziji

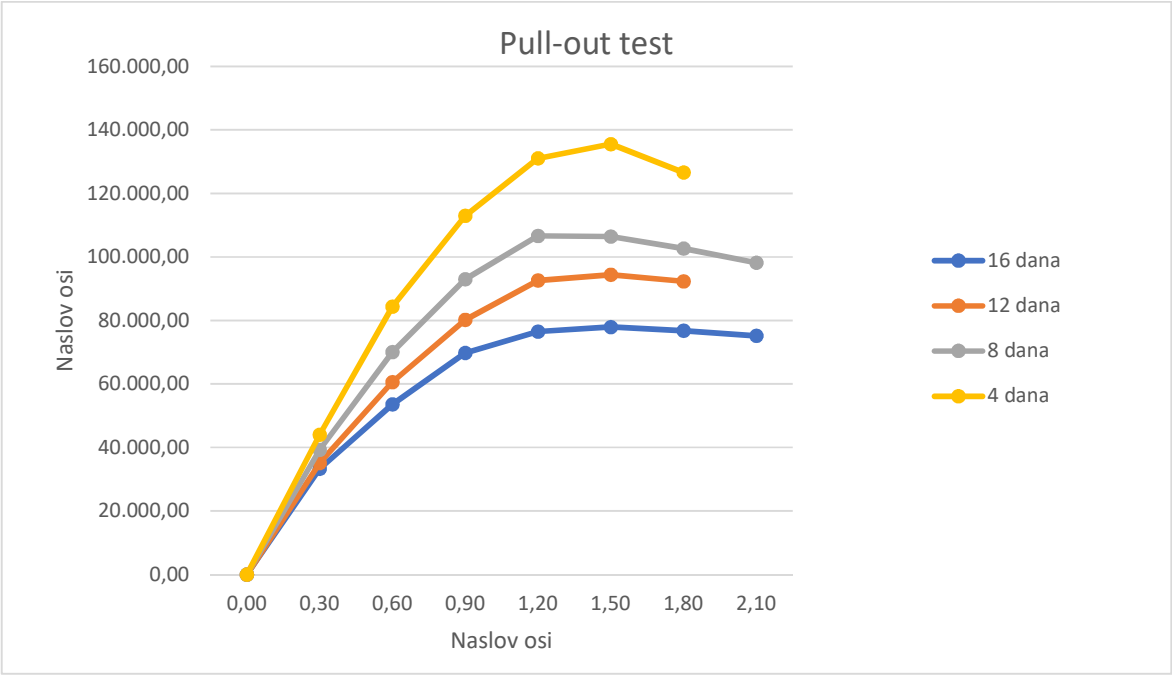
Nakon ispitivanja modela B1 i B2 na utjecaje ubrzane korozije u različitim vremenskim razdobljima od 4, 8, 12, 16 dana, modeli su ispitani na otpor izvlačenja armature iz uzorka (pull-out test). Princip pull-out testa je da se u zadane čvorove nanose jedinični pomaci i automatski se računa sila otpora tom pomaku, odnosno crta se dijagram sila-pomak. Iz dijagrama se očita kritična (maksimalna) sila. Na sljedećim slikama (slike 7.67., 7.68.) su dani dijagrami iz kojih se zaključuje da kritična sila pada proporcionalno s produljenje vremena izlaganja armirano betonskog uzorka ubrzanoj koroziji. Što je uzorak bio duže izložen utjecajima korozije to je rezultiralo s većim pukotinama u armiranobetonskom uzorku i većem smanjenju poprečnog presjeka armature. Uspoređujući rezultate pull-out testa između modela B1 i B2 može se očitati da za jednako vremensko izlaganje ubrzanoj koroziji, uzorak B2 ima veću kritičnu silu. Razlog tomu je što kod modela B2 vilice nisu uključene u proces korozije pa samim time nisu ni korodirale ni zadale dodatna oštećenja armiranobetonskoj konstrukciji. U sljedećoj tablici 9. su dane kritične sile izvlačenja armature iz uzorka za modele B1 i B2 nakon 4, 8, 12, 16 dana korozije armature.

Tablica 9. Vrijednosti sile izvlačenja pull-out testa za ubrzanu koroziju

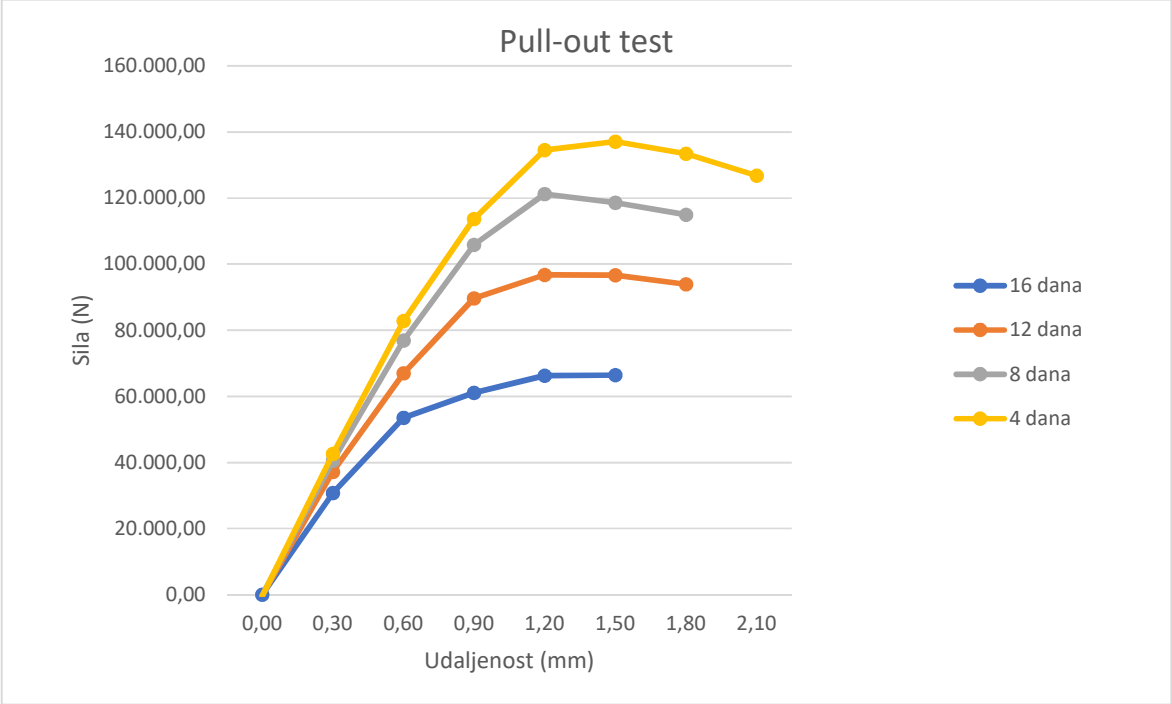
REZULTATI ISPITIVANJA-UBRZANA KOROZIJA				
Kritična sila izvlačenja na modelu bez utjecaja korozije iznosi: 141,12 kN				
Trajanje korozije	Model B1		Model B2	
	sila (kN)	pad sile (%)	sila (kN)	pad sile (%)
4 dana	135,53	3,96	137,08	2,86
8 dana	106,63	24,44	121,23	14,09
12 dana	94,37	33,13	96,68	31,49
16 dana	77,96	44,76	78,90	44,01



Slika 7.66. Prikaz korodiranog modela te smjer izvlačenja armature iz uzorka

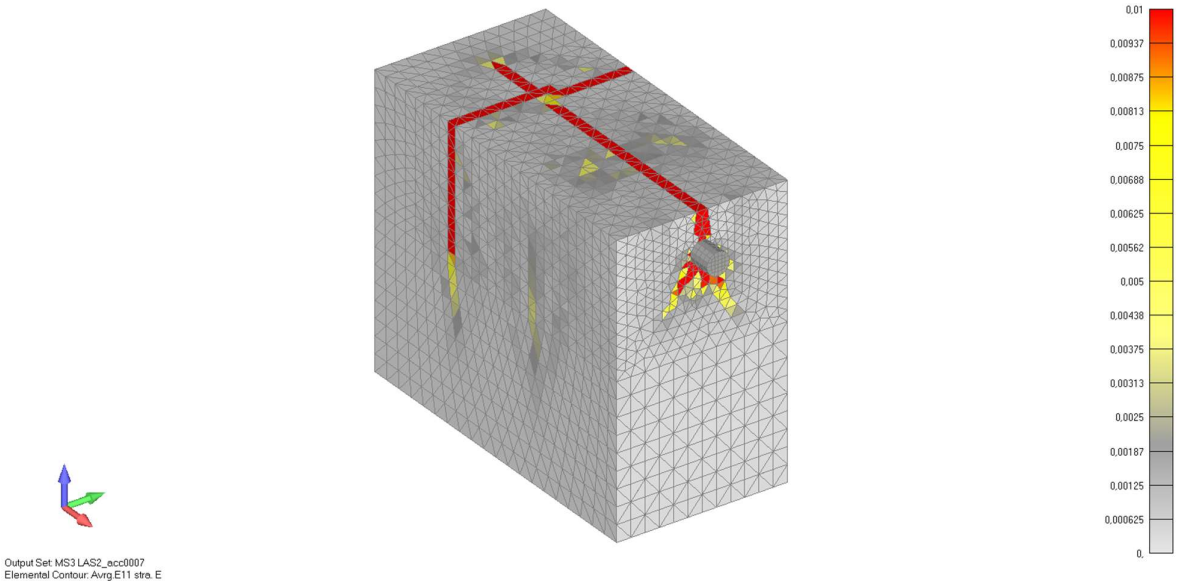


Slika 7.67. Graf pomak-sila za pull-out test na modelu B1

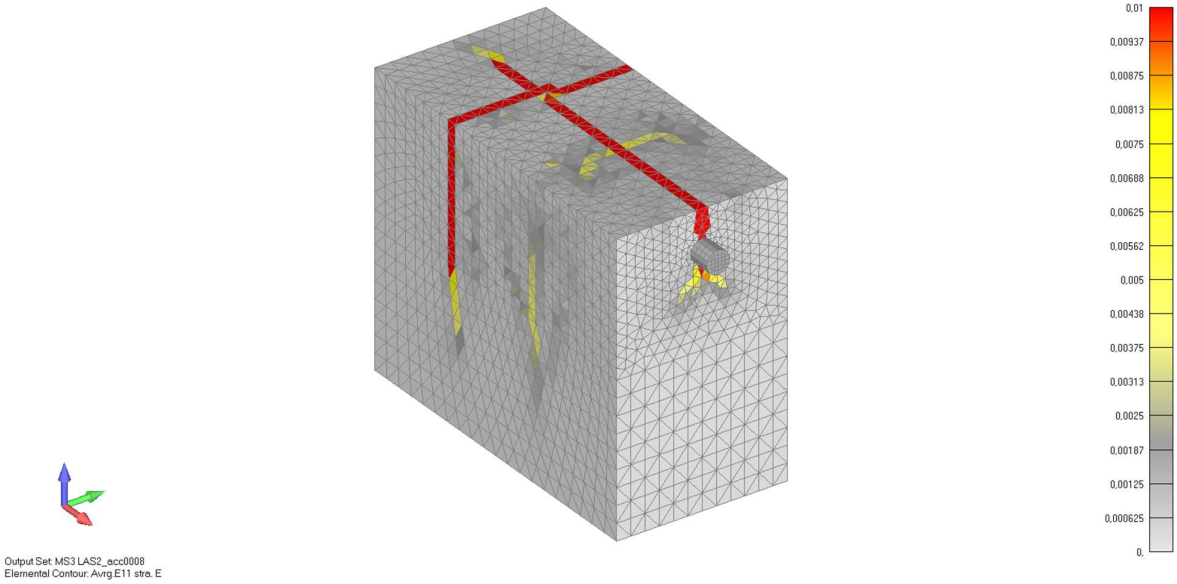


Slika 7.68. Graf pomak-sila za pull-out test na modelu B2

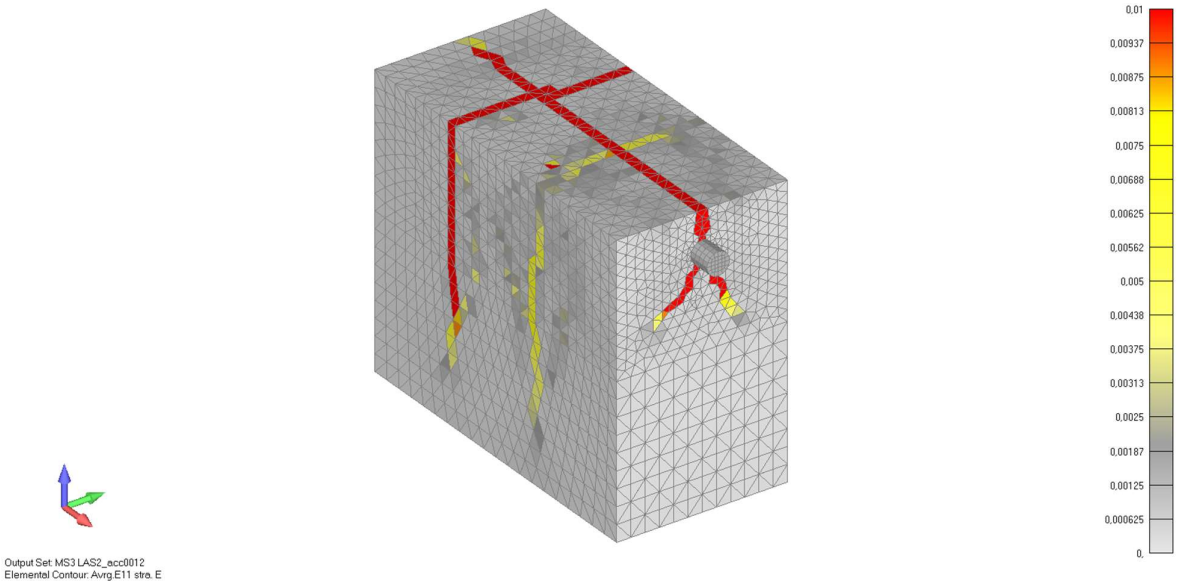
MODEL B1



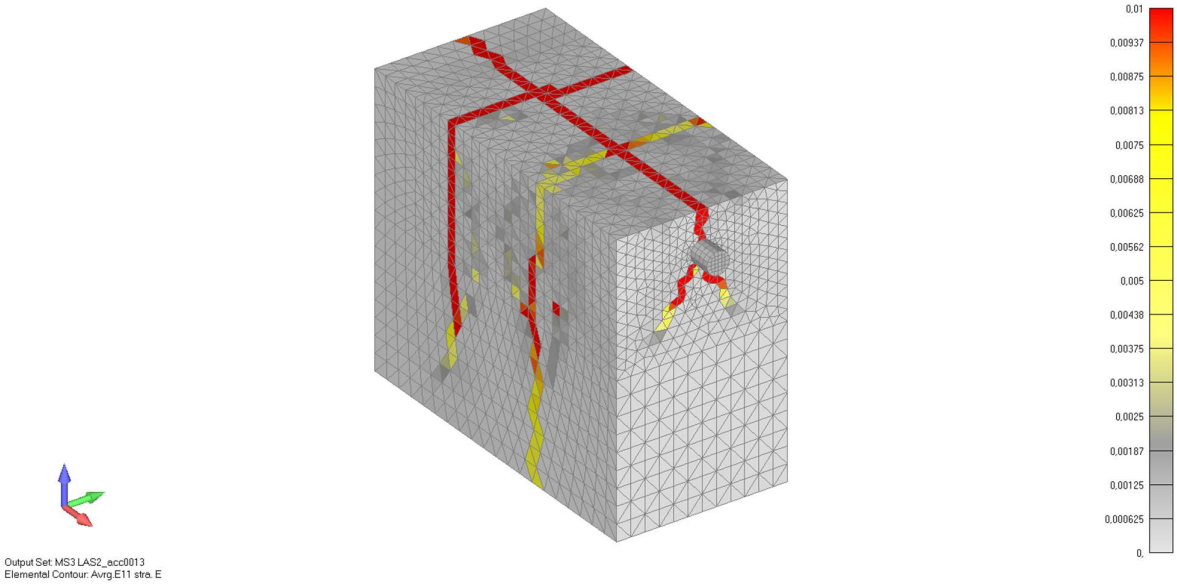
Slika 7.69. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 4 dana (pogled-aksonometrija)



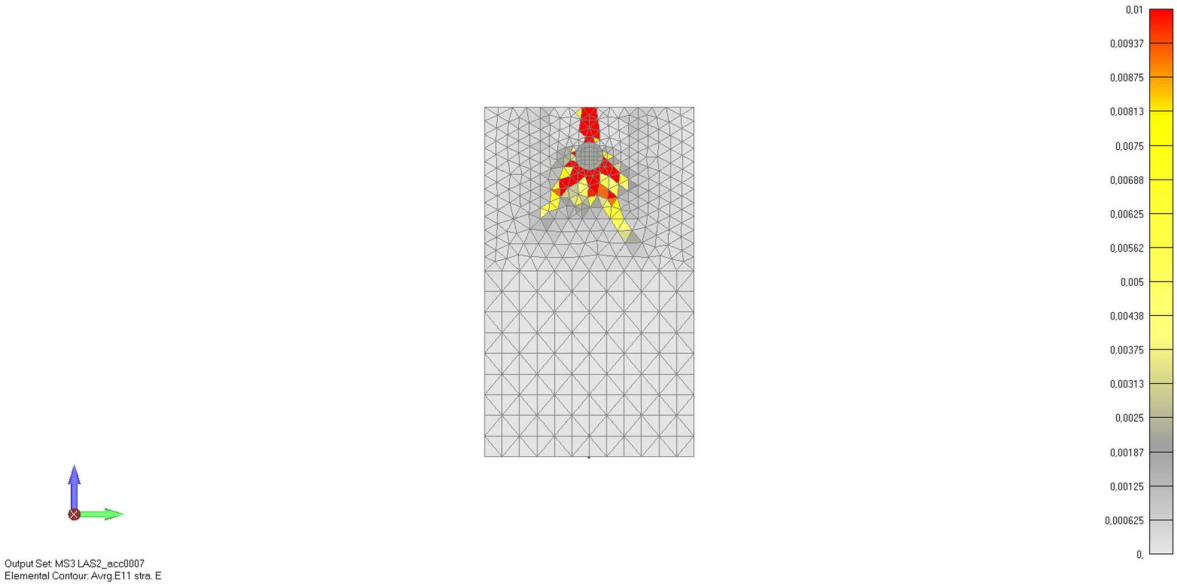
Slika 7.70. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 8 dana (pogled-aksonometrija)



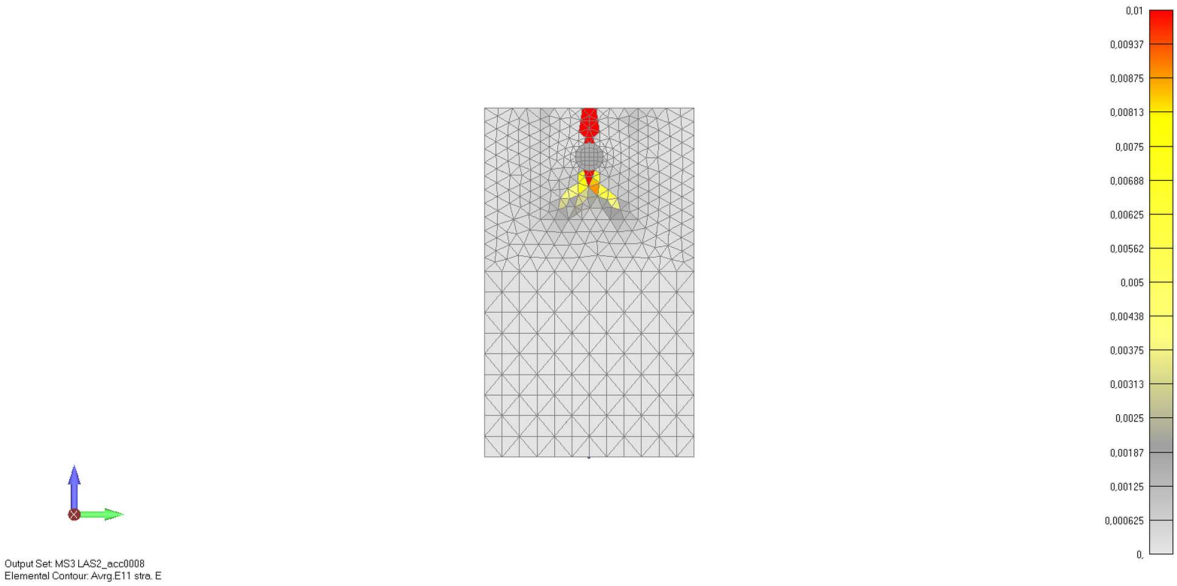
Slika 7.71. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 12 dana (pogled-aksonometrija)



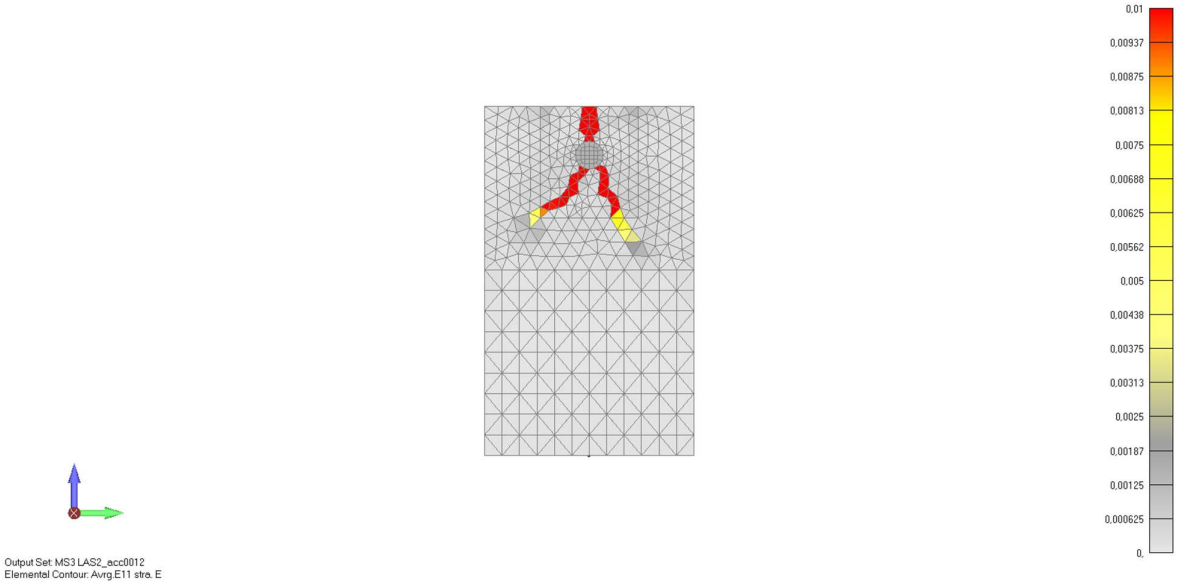
Slika 7.72. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 16 dana (pogled-aksonometrija)



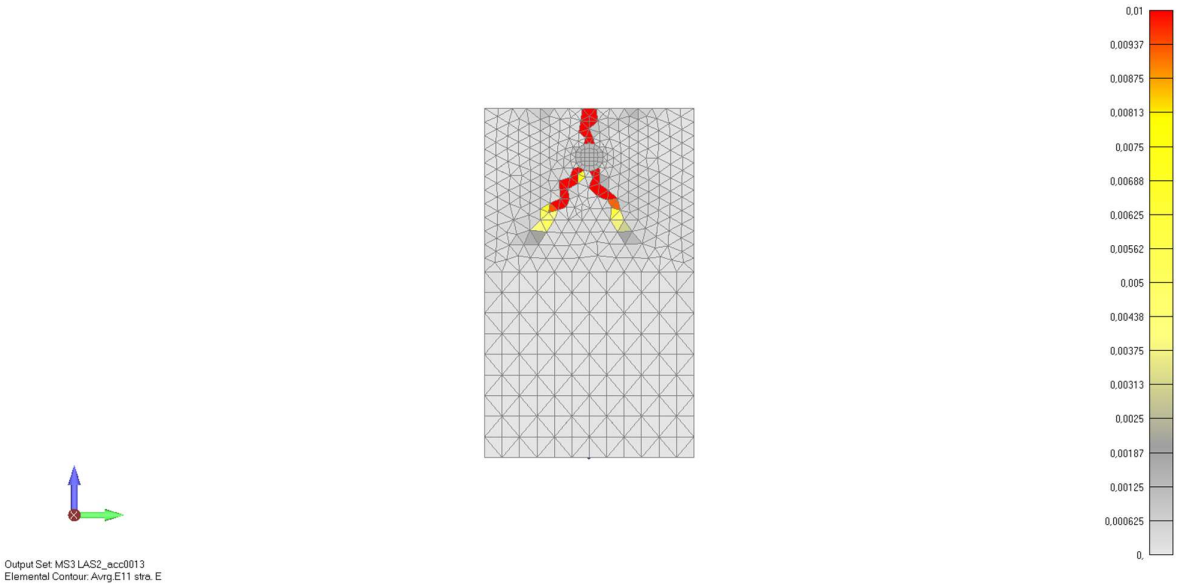
Slika 7.73. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 4 dana (pogled-sprijeda)



Slika 7.74. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 8 dana (pogled-sprijeda)

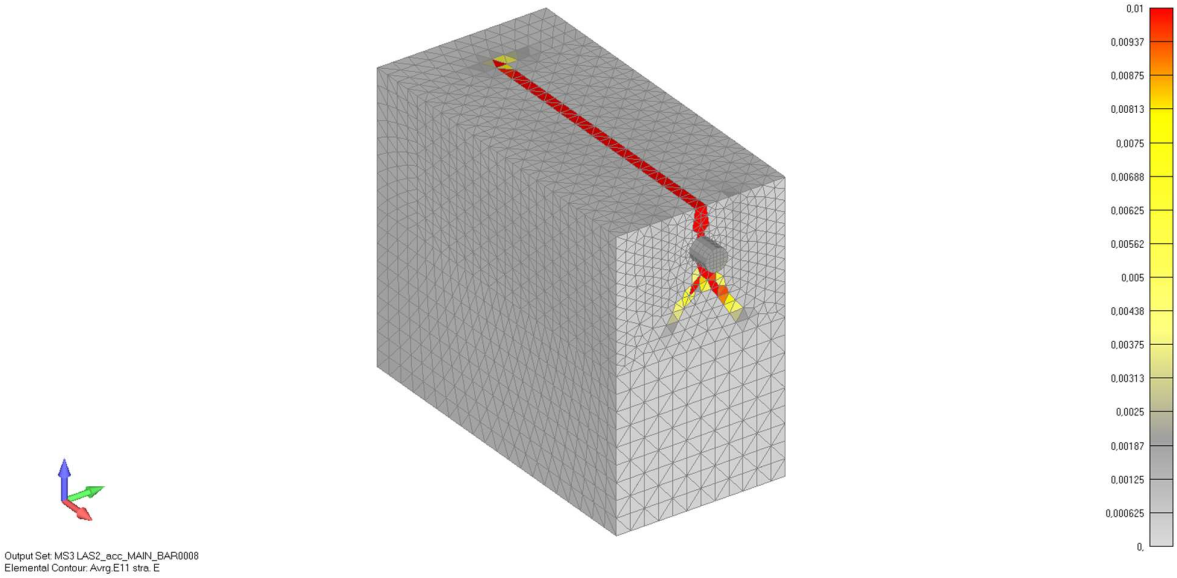


Slika 7.75. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 12 dana (pogled-sprijeda)

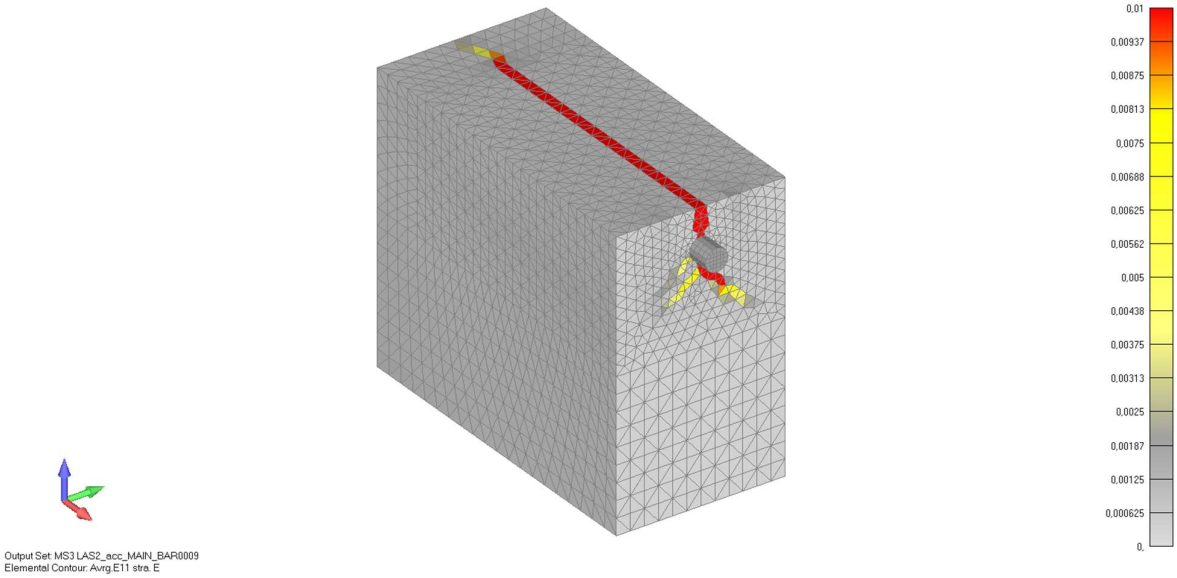


Slika 7.76. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B1 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 16 dana (pogled-sprijeda)

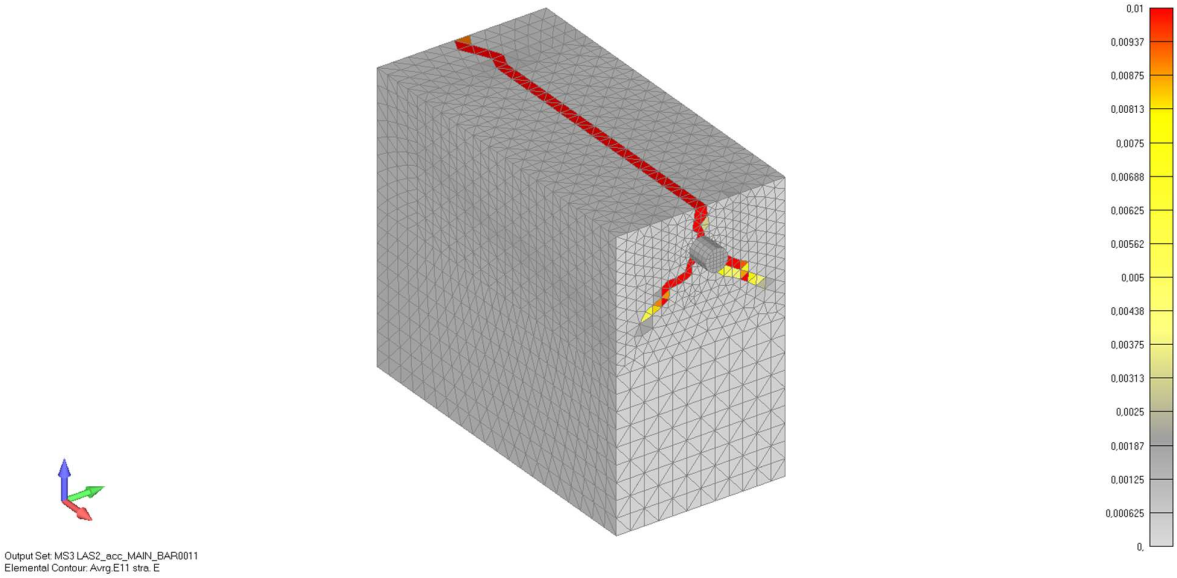
MODEL B2



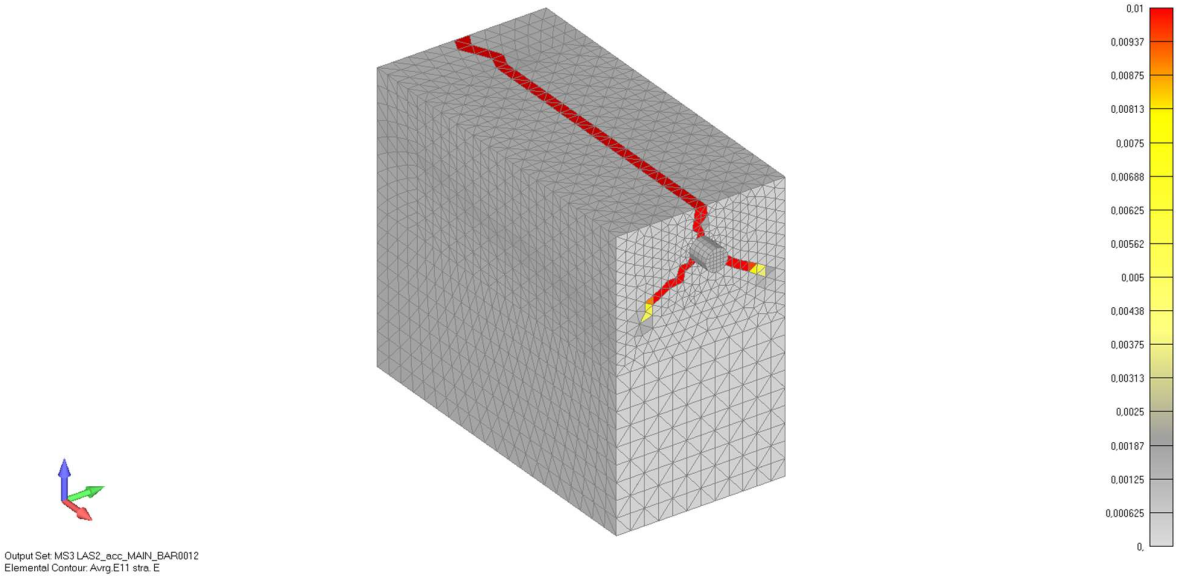
Slika 7.77. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 4 dana (pogled-aksonometrija)



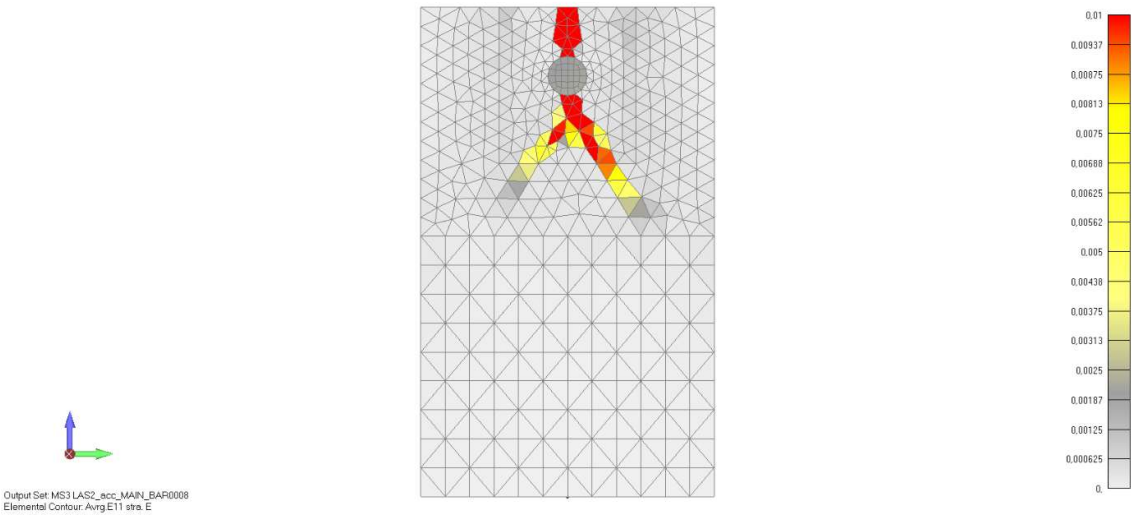
Slika 7.78. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 8 dana (pogled-aksonometrija)



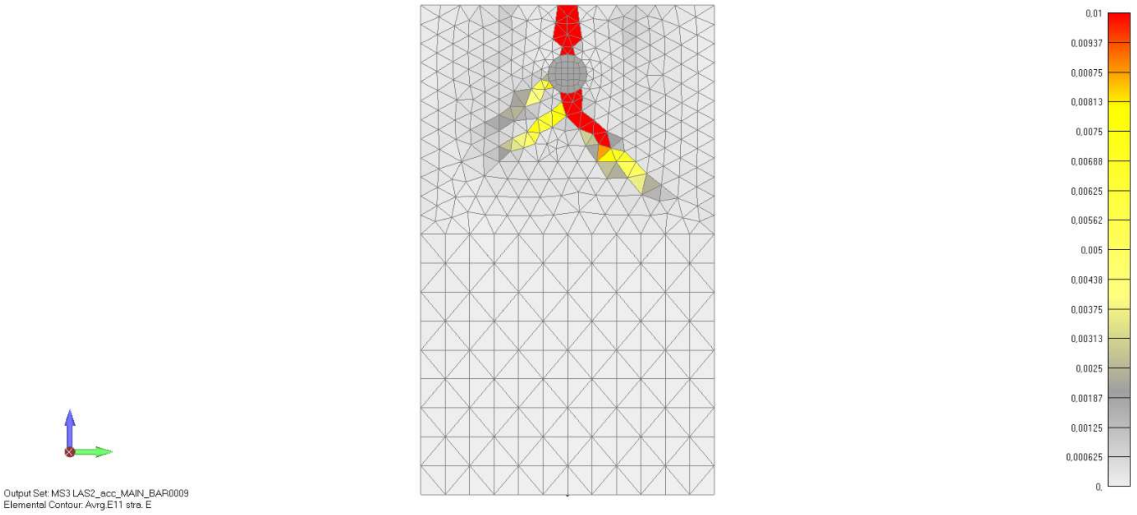
Slika 7.79. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 12 dana (pogled-aksonometrija)



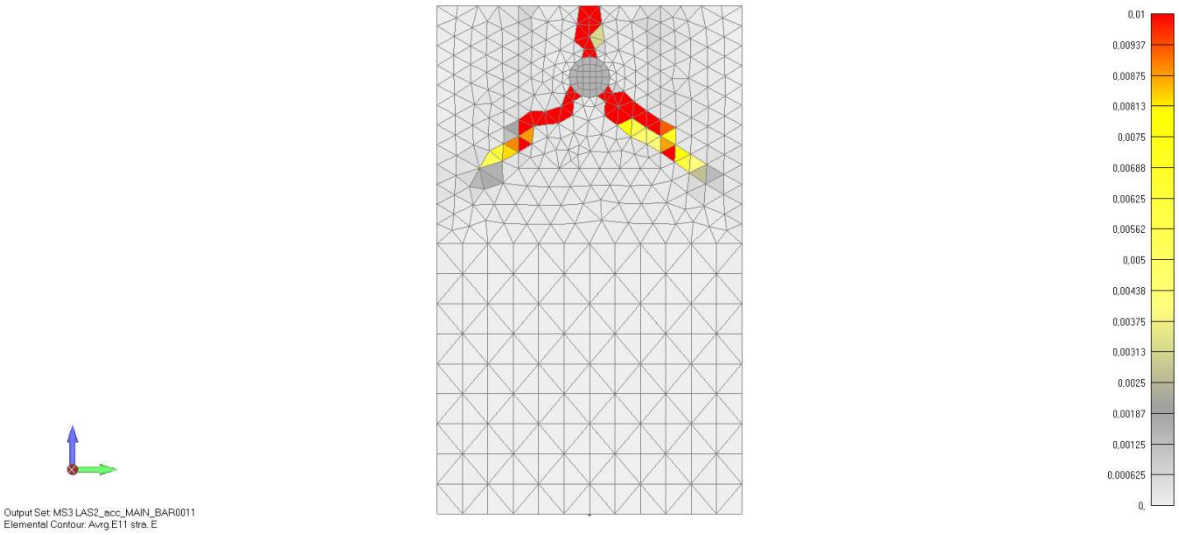
Slika 7.80. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 16 dana (pogled-aksonometrija)



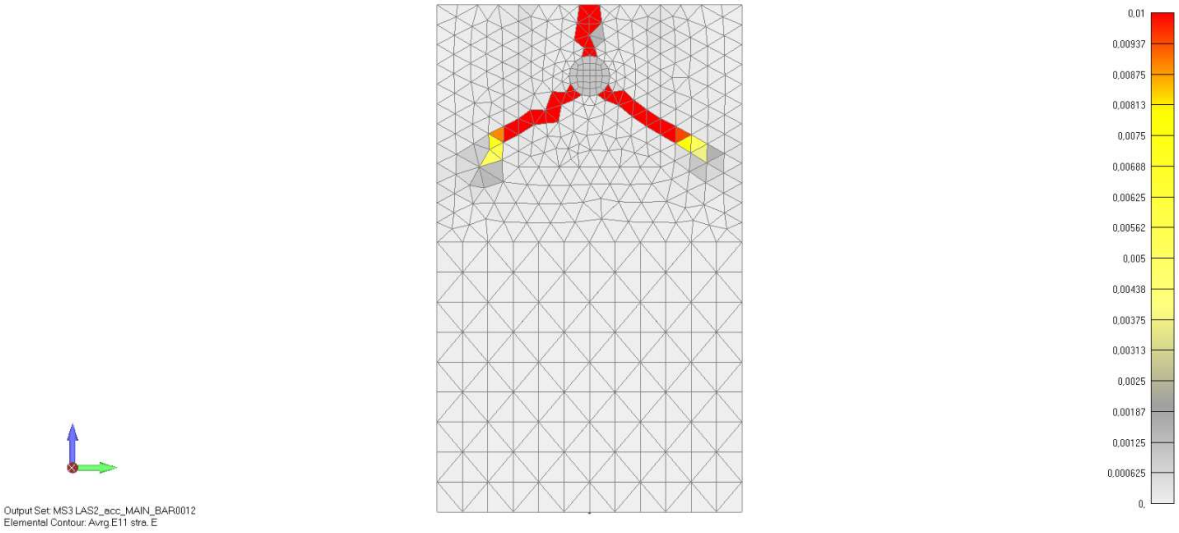
Slika 7.81. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 4 dana (pogled-sprijeda)



Slika 7.82. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 8 dana (pogled-sprijeda)



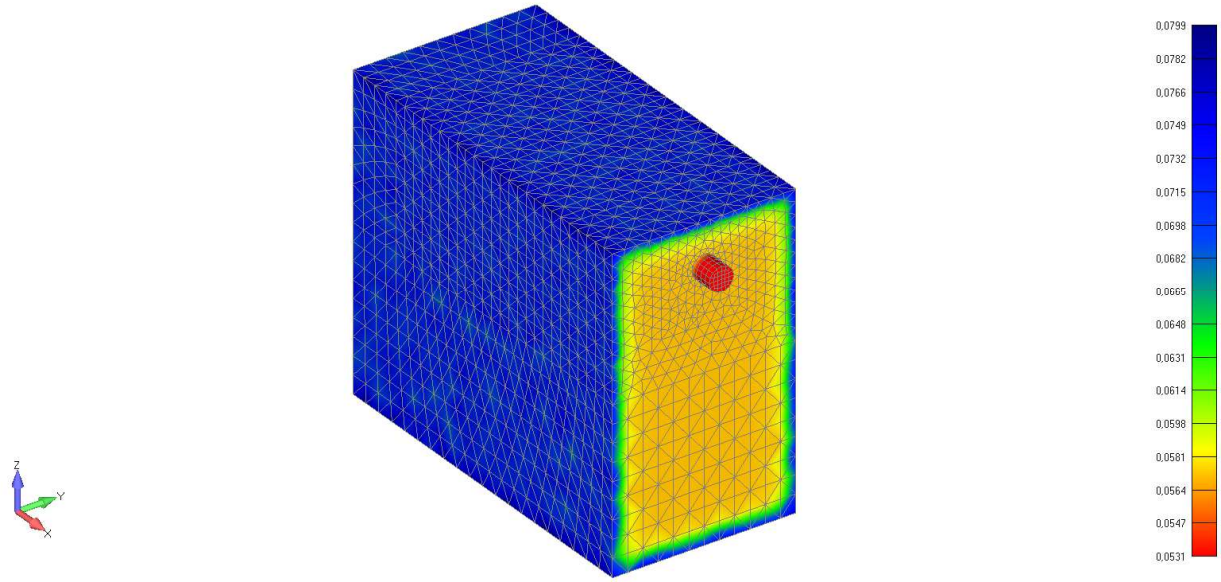
Slika 7.83. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 12 dana (pogled-sprijeda)



Slika 7.84. Prikaz oštećenja armiranobetonskog uzorka nakon provedenog pull-out testa na modelu B2 koji je prethodno bio izložen ubrzanoj koroziji 16 dana (pogled-sprijeda)

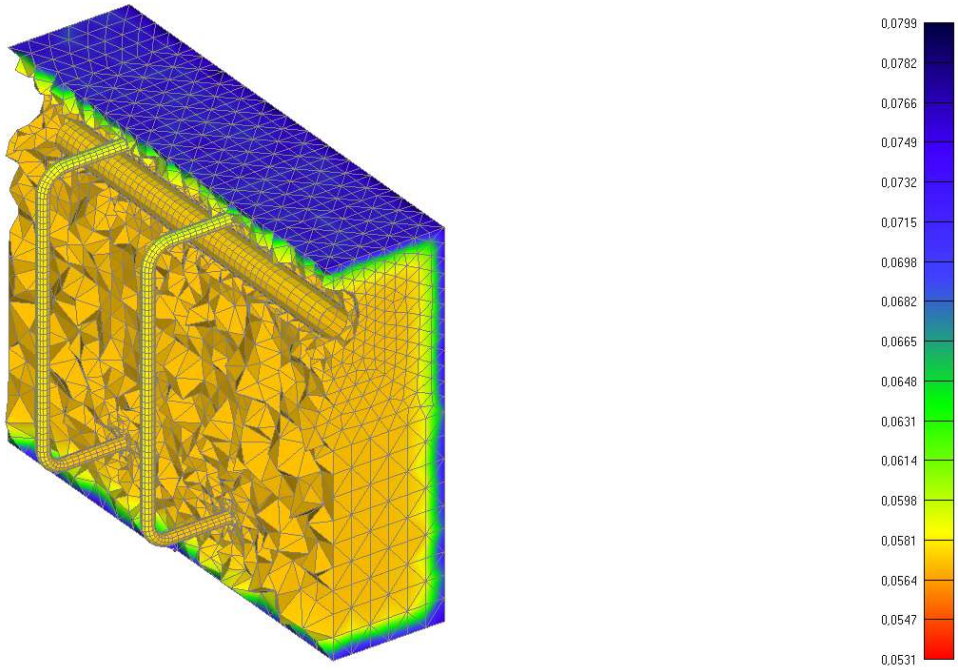
7.3.3. Distribucija kisika električnog potencijala i korozijske gustoće za prirodnu koroziju

U ovom poglavlju će se prikazati raspodjela električnog potencijala i korozijske gustoće duž glavne armaturne šipke. Nakon depasivacije armature, između svih parametara, veličina korozije jako ovisi o distribuciji vode i kisika. Na primjer, ukoliko se pojavi manjak, proces korozije će se usporiti ili eventualno zaustaviti. U današnjoj numeričkoj analizi, zasićenost vodom iznosi 50% što je prikazano na slici 7.85. Distribucija kisikom ovisi o stupnju korozije koji ovisi o mehaničkim uvjetima betona (pukotinama). Više pukotina inducira bolju opskrbu kisikom zbog čega se poveća korozijski stupanj. Zasićenost betona unutar uzorka iznosi 50%, a na površini je zadana saturacija 80% i svakim korakom voda ulazi u armirano betonski uzorak i povećava cjelokupnu zasićenost betona vodom. Stupanj korozijske struje se povećava kroz vrijeme što je vidljivo na slikama 7.86. i 7.87.

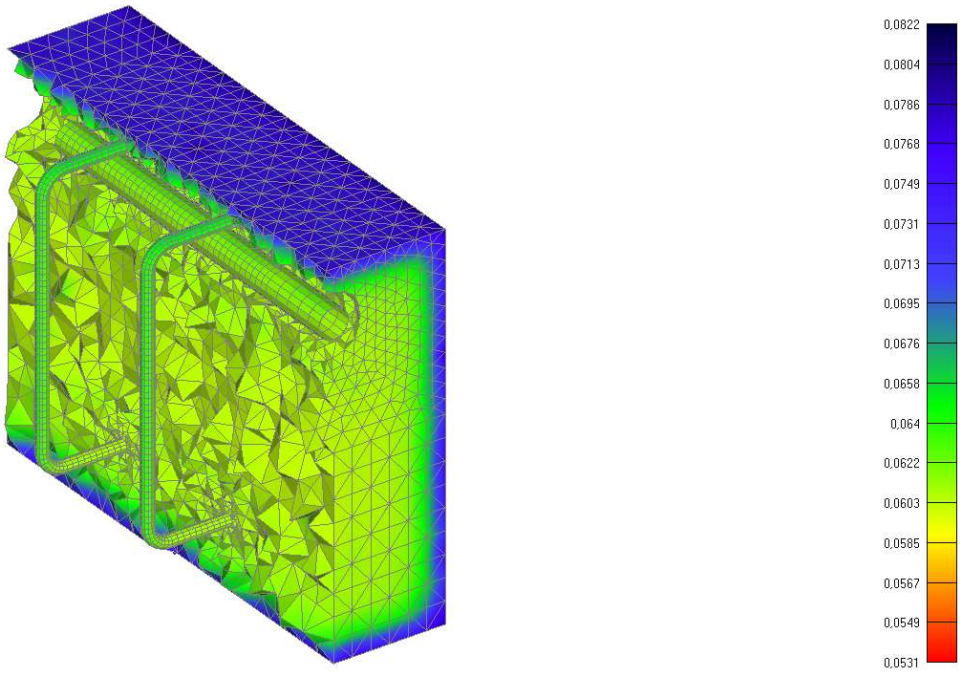


Slika 7.85. Zasićenost vodom betonskog uzorka za ubrzanu koroziju

Na sljedeće dvije slike 7.86. i 7.87. može se primijetiti kako je zasićenost vode unutar armiranobetonskog uzorka porasla tokom analize. Na samom početku analize zasićenost vodom betona je iznosila 55%, dok je nakon 16 dana saturacija porasla na 65%.



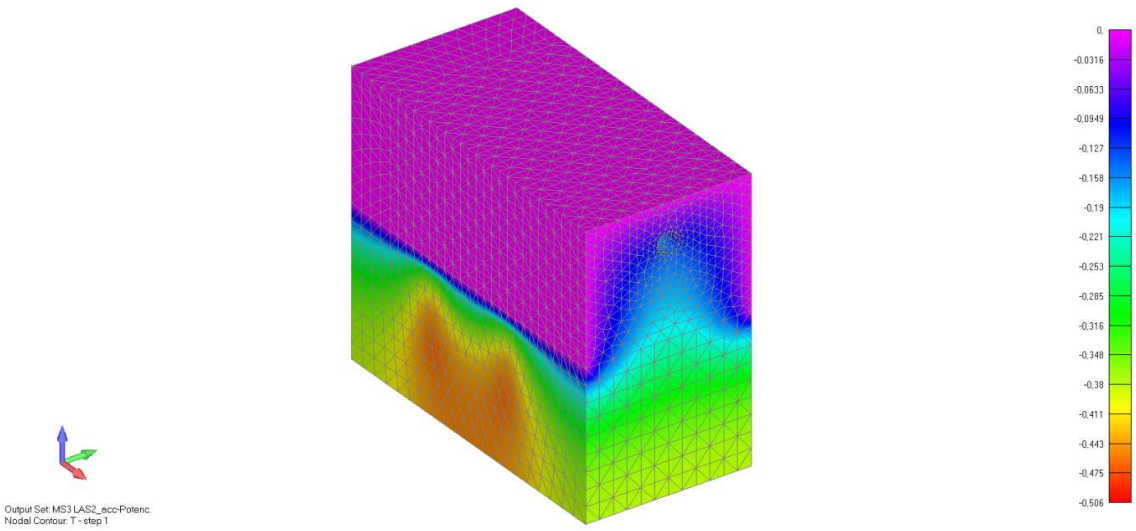
Slika 7.86. Zasićenost vodom armiranobetonskog uzorka na samom početku analize



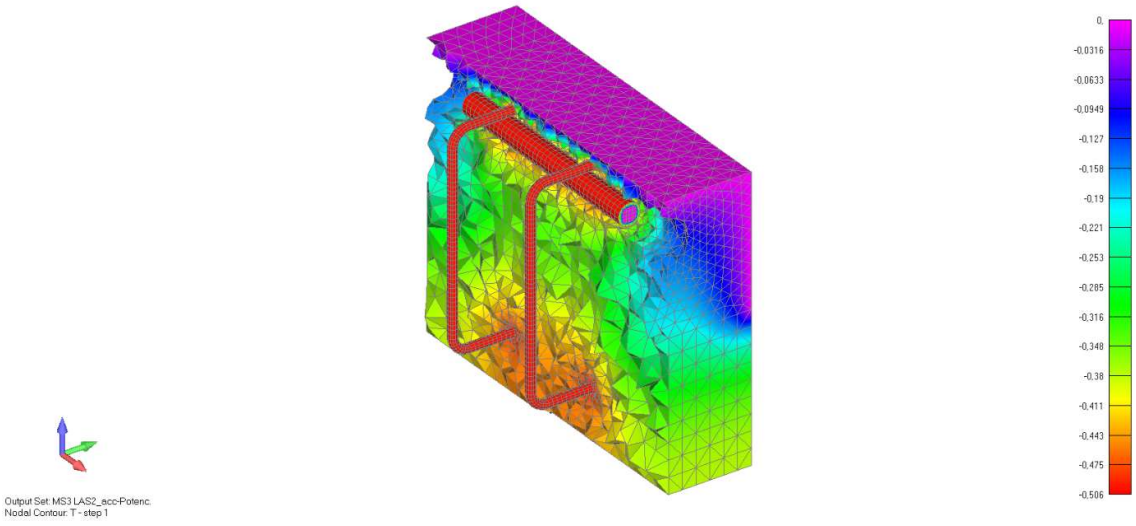
Slika 7.87. zasićenost vodom armiranobetonskog uzorka nakon 16 dana

ELEKTRIČNI POTENCIJAL model B1 :

Električni potencijal kod ubrzane korozije je konstantan tijekom trajanja procesa te za područje anode iznosi -0.500 V, dok za područje katode koje se nalazi na gornjoj površini betona iznosi 0.00 V. Na sljedećim slikama (slika 7.88., 7.89.) su dani prikazi vrijednosti potencijala na uzorku. Na slikama se može vidjeti da vrijednost na gornjoj površini betona iznosi 0.00 V, odnosno to u ovom procesu ubrzane korozije predstavlja katodu, dok su crvenom bojom označene vilice i glavna armaturna šipka koje primaju vrijednosti -0.500V.



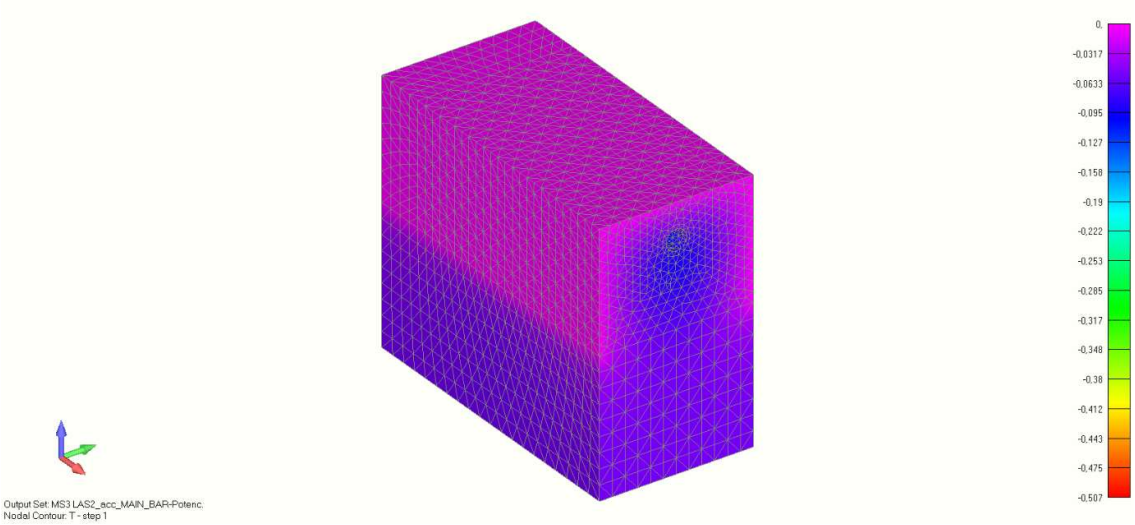
Slika 7.88. Vrijednosti električnog potencijala na površini armiranobetonskog uzorka



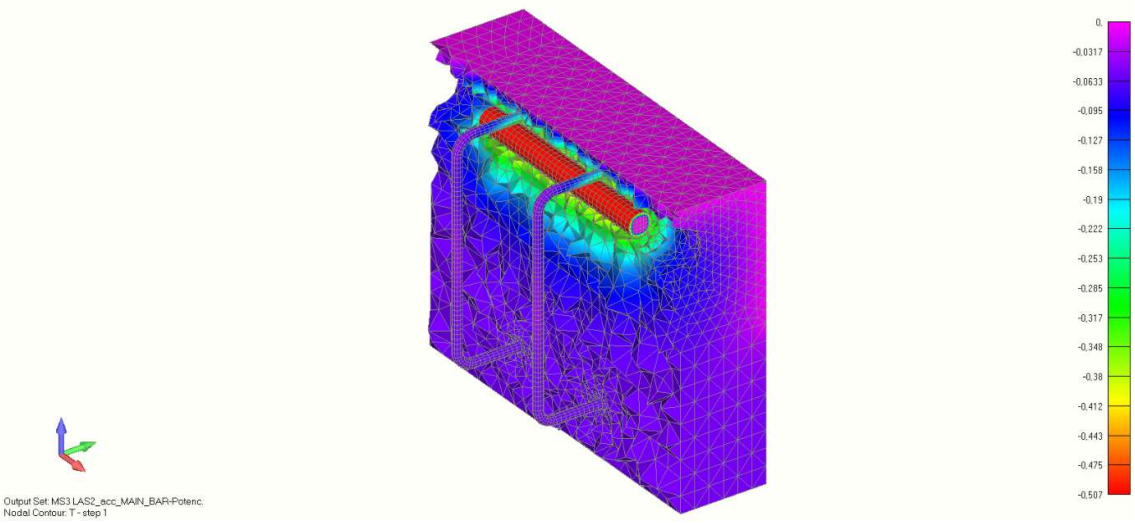
Slika 7.89. Vrijednost električnog potencijala unutar armirano betonskog uzorka

ELEKTRIČNI POTENCIJAL model B2

Za razliku od modela B1 kod modela B2 vilice nisu aktivirane što je vidljivo na slici 7.91. Crvenom bojom su prikazane vrijednosti od -0.500 V koje reprezentiraju anodu, u ovom slučaju je to glavna armaturna šipka. Električni potencijal je u ovom slučaju konstantan kod analize ubrzane korozije.



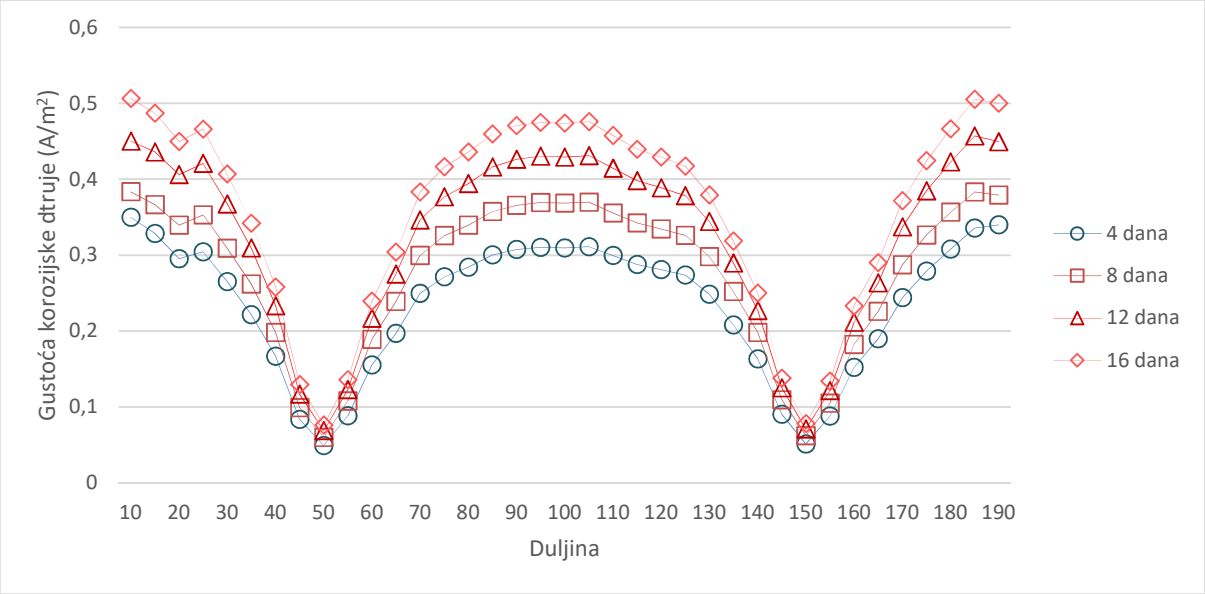
Slika 7.90. vrijednosti električnog potencijala na površini armiranobetonskog uzorka za model B2



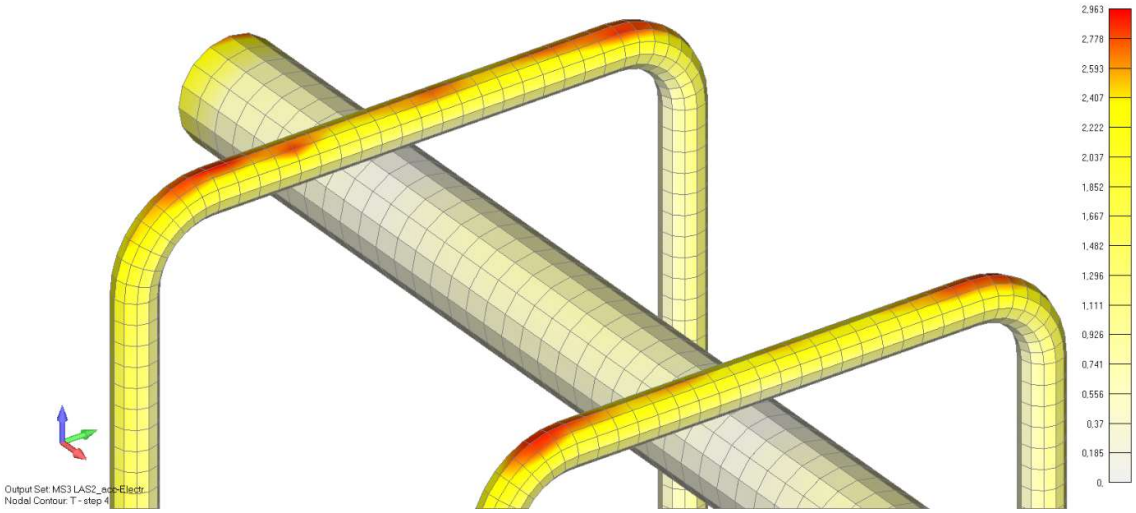
Slika 7.91 Vrijednosti električnog potencijala unutar armiranobetonskog uzorka za model B2

Korozijska gustoća (model B1)

Iz grafa na slici je uočljivo da se najveće vrijednosti očitavaju na kraju armaturne šipke i u sredini, a to je iz razloga što se vilice koje se nalaze iznad armaturne glavne šipke ponašaju kao zaštita glavne šipke te su tako na mjestima točno ispod njih vrijednosti korozijske gustoće na glavnoj šipci približno jednake nuli. S druge slike 7.93. može se vidjeti da je stupanj korozijske struje višestruko veći na vilicama (oko 3 puta) nego na glavnoj šipci. To znači da vilice više korodiraju što je također zaključak iz provedenih eksperimentalnih istraživanja. Pogotovo su korodirali krajevi na vilicama koji su se pokazala kao najosjetljivija područja u procesu ubrzane korozije.



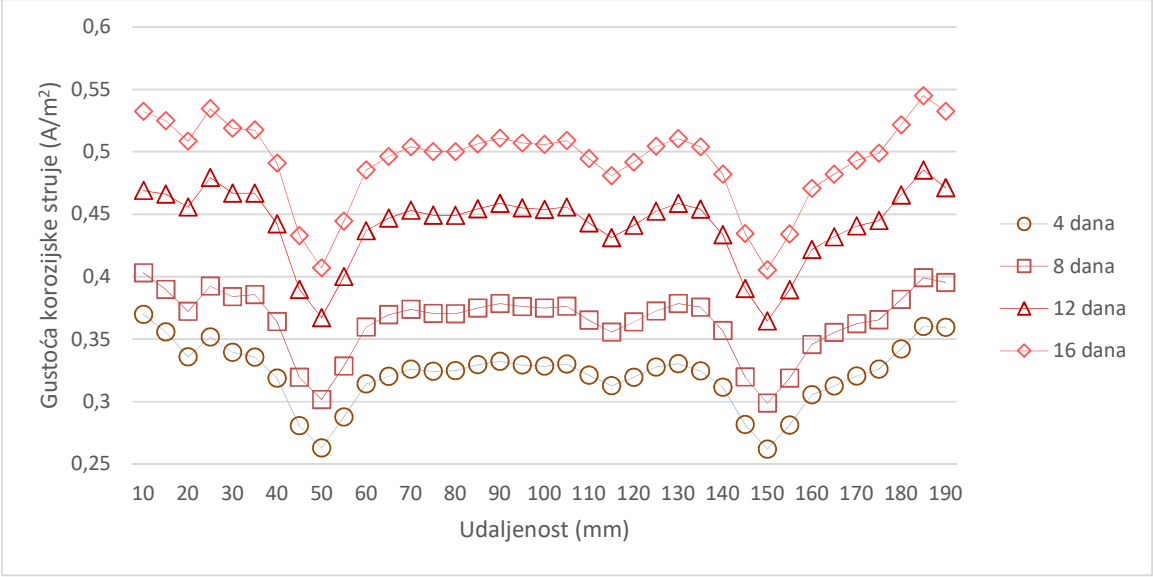
Slika 7.92. Graf korozijske gustoće duž glavne armaturne šipke za model B1



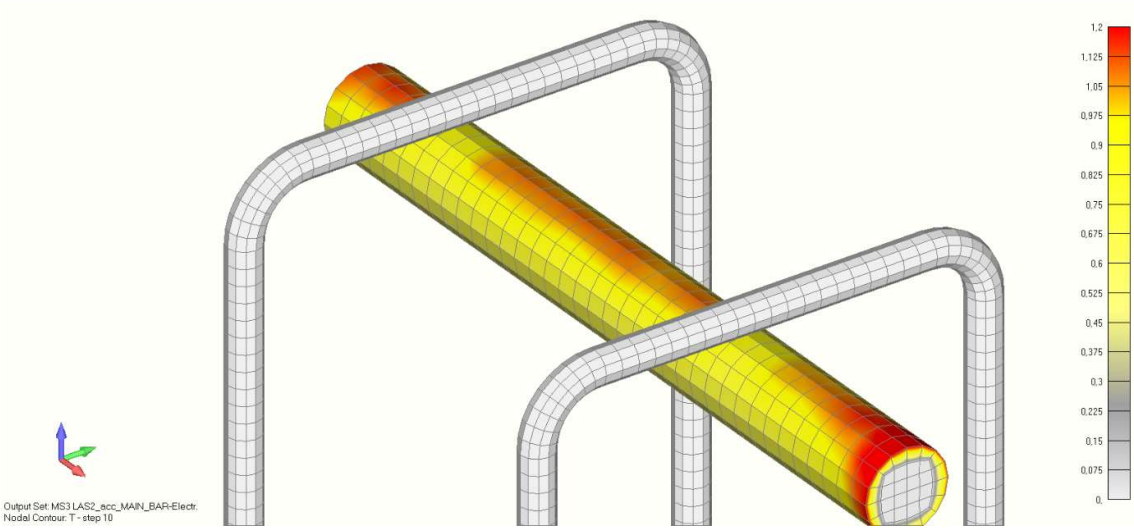
Slika 7.93 Stupanj korozijske gustoće na armaturi za model B1

Korozijska gustoća (model B2)

Za razliku od raspodjele korozijske struje od modela B1 kod modela B2 anodu simulira glavna armaturna šipka, dok vilice nisu aktivirane kao što je vidljivo na slici 7.95. U ovom slučaju vilice također štite glavnu armaturu od korodiranja, ali ne u tolikoj mjeri jer nisu uključene u sam proces. U usporedbi grafova za oba slučaja uočljive su veće vrijednosti korozijske gustoće za model B2 u odnosu na model B1.



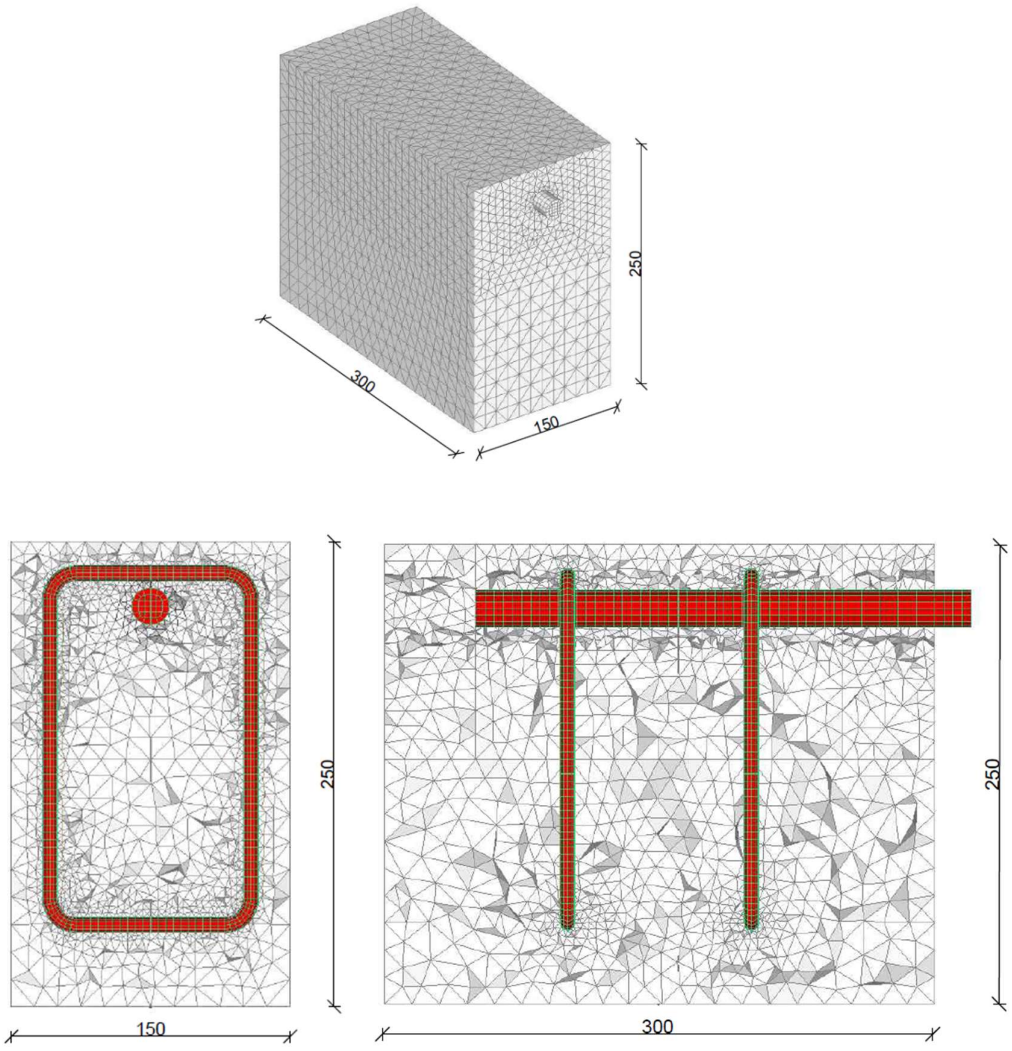
Slika 7.94. Graf korozijske gustoće duž glavne armaturne šipke za model B2



Slika 7.95. Stupanj korozijske gustoće na armaturi za model B2

6.3. Usporedba prirodne i ubrzane korozije

Usporedba prirodne i ubrzane korozije napravit će se na dijelu armiranobetonske grede dimenzija b/h=150/250mm te ukupne duljine 300mm. Prikazat će se nastala oštećenja uslijed pojedine korozije te za približno jednaka oštećenja (širine pukotina) ab grede usporediti raspodjela ukupne korozije te raspodjela pritisaka korozionih produkata. Armiranobetonska greda je armirana s jednom glavnom uzdužnom šipkom promjera 20mm te dvije vilice promjera 8mm na razmaku 100mm što je vidljivo na sljedećoj slici 7.96.



Slika 7.96. Geometrijske karakteristike modela

OŠTEĆENJA IZAZVANA DJELOVANJEM KOROZIJE :

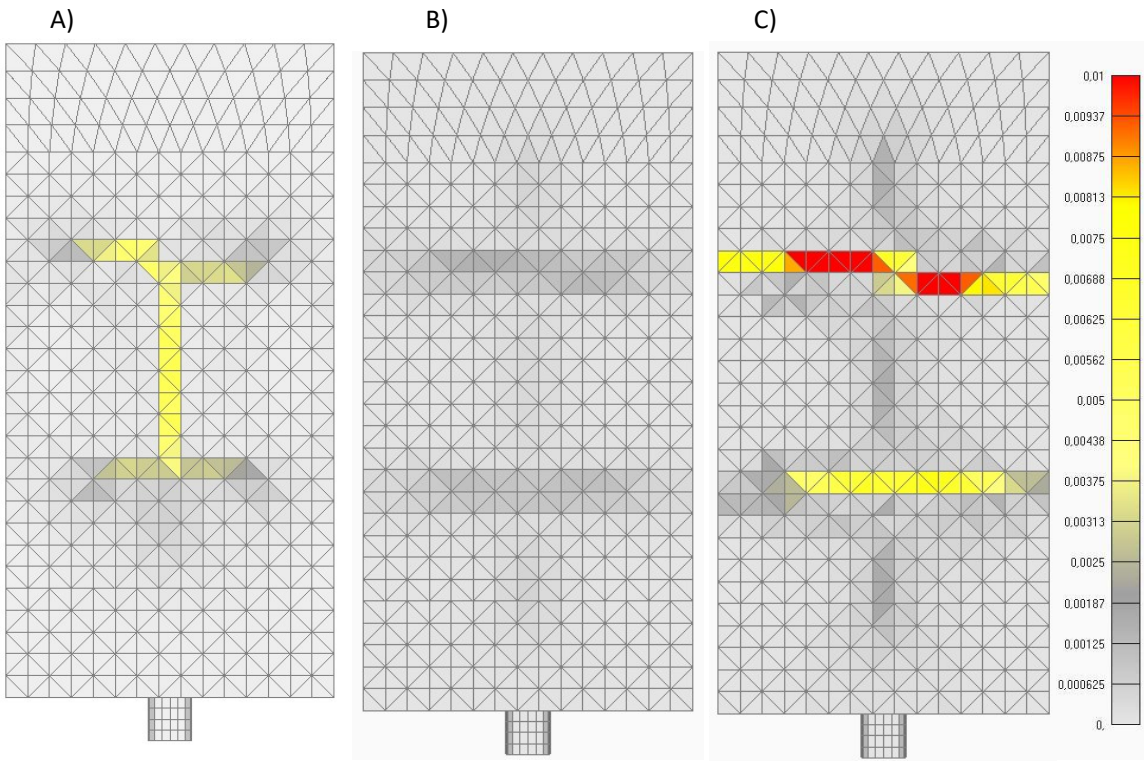
Slijedi prikaz oštećenja na površini armiranobetonske grede i to redom:

A) - prirodna korozija nakon 7 godina

B) - ubrzana korozija nakon 4 dana

C) - ubrzana korozija nakon 8 dana

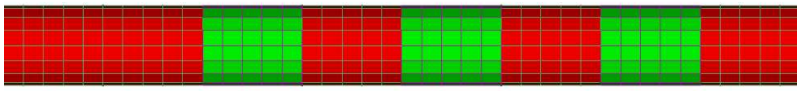
Žarko crvena boja predstavlja pukotine veće od 0.1mm kao što se može očitati sa legende (slika 7.97.). Sa sljedećih slika je vidljivo da veličine pukotina od prirodne korozije nakon 7 godina odgovaraju pukotinama negdje između 4 i 8 dana ubrzane korozije. Također se može uočiti da kod ubrzane korozije više dolaze do izražaja pukotine koje se pojavljuju iznad vilica dok kod prirodne korozije imamo izraženiju uzdužnu pukotinu iznad glave armaturne šipke.

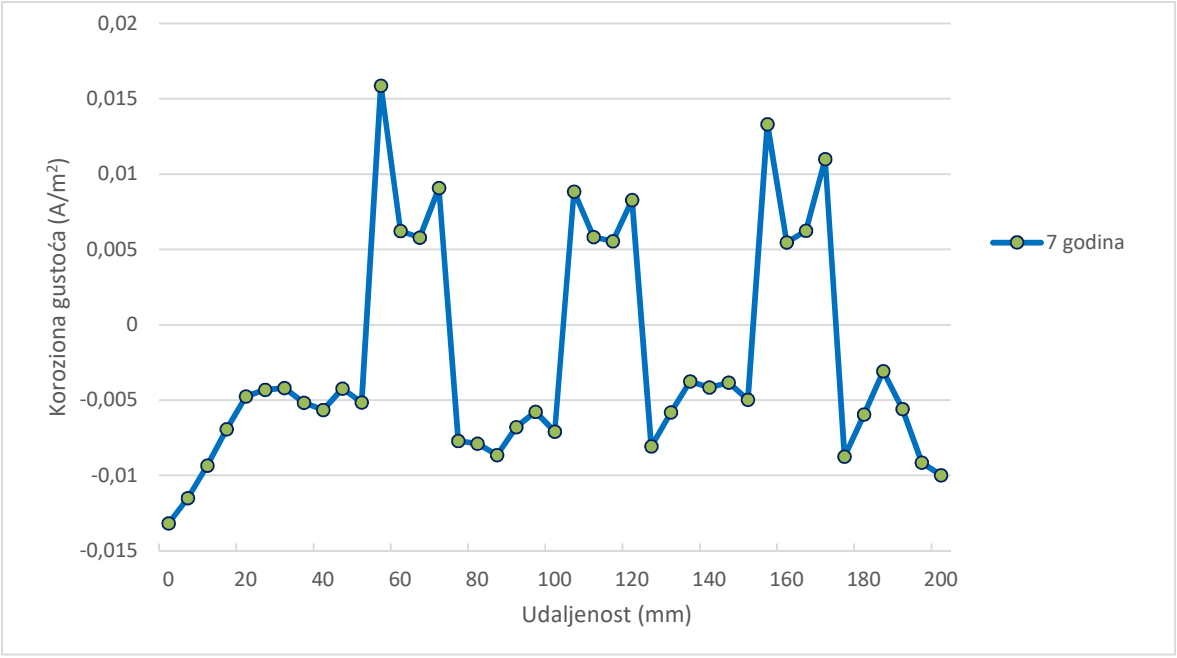


Slika 7.97.pukotine na gornjoj površini armiranobetonske grede

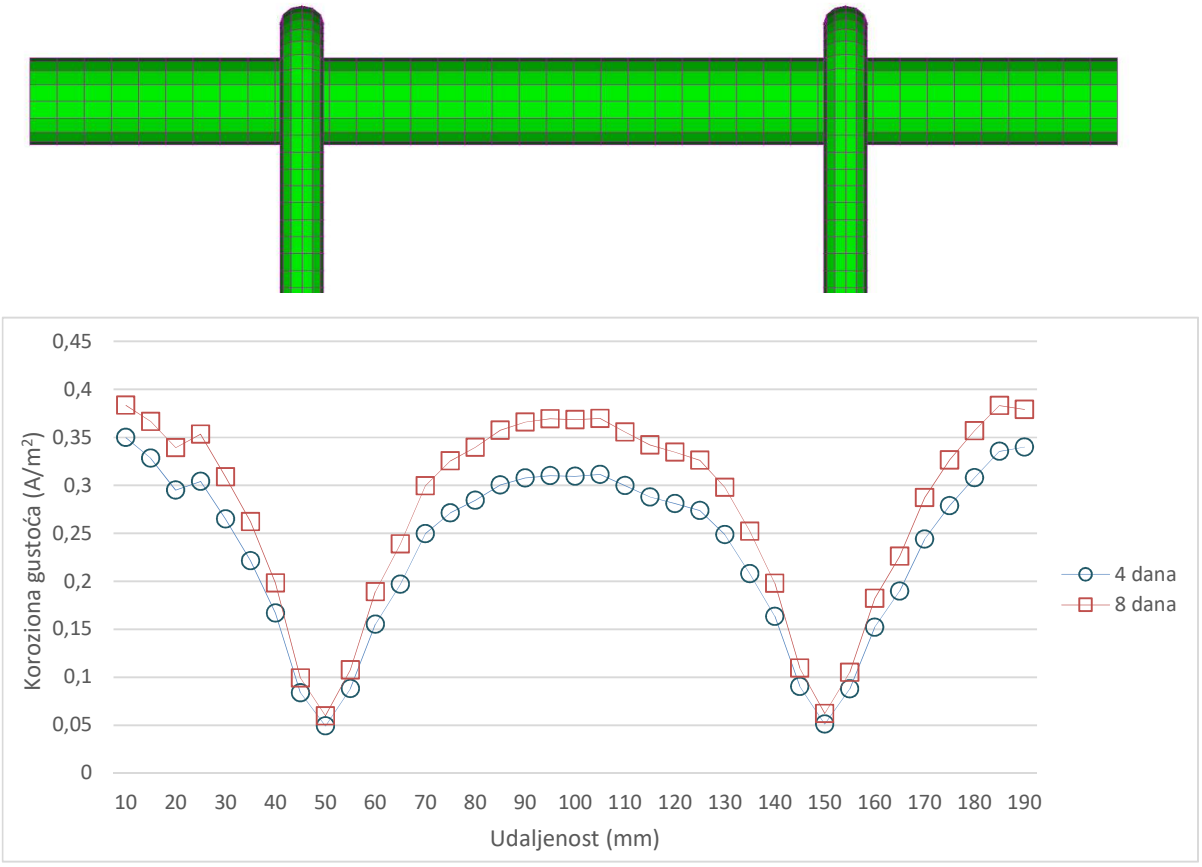
RASPODJELA UKUPNE KOROZIJE:

Kod prirodne korozije vidljivo je da su najveće vrijednosti korozijske gustoće na prijelazima između katode i anode. U slučaju ubrzane korozije anodu predstavlja cijela glavna armaturna šipka i vilice. Najveće vrijednosti korozijske gustoće za ubrzanu koroziju se očitavaju na sredini šipke i u krajevima, dok ispod vilica te vrijednosti naglo opadaju. Na sljedećim slikama (slike 7.98., 7.99.) dan je graf korozijske gustoće duž glavne šipke i vilica, te je dana skica položaja anode i katode na armaturi (crvena boja predstavlja katodu, a zelena anodu).

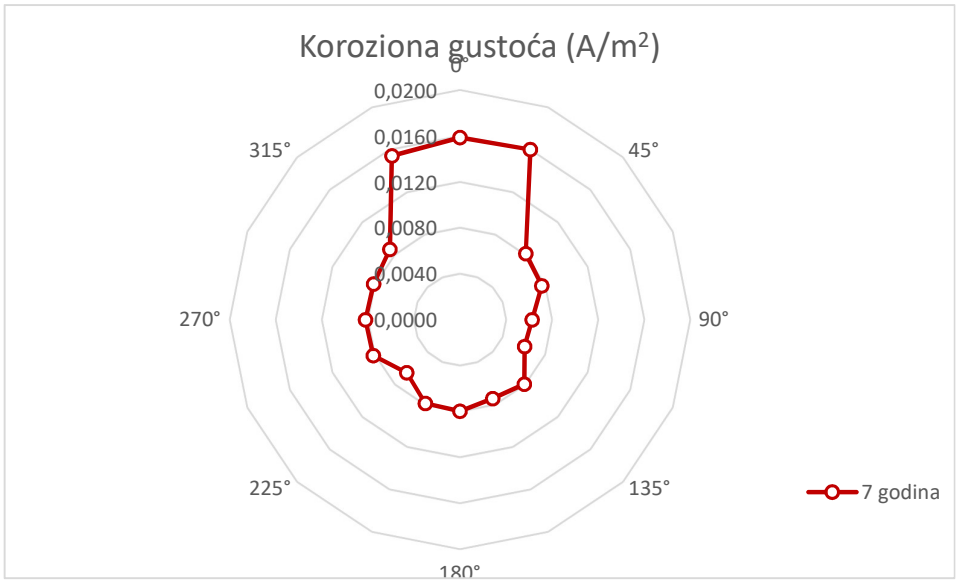




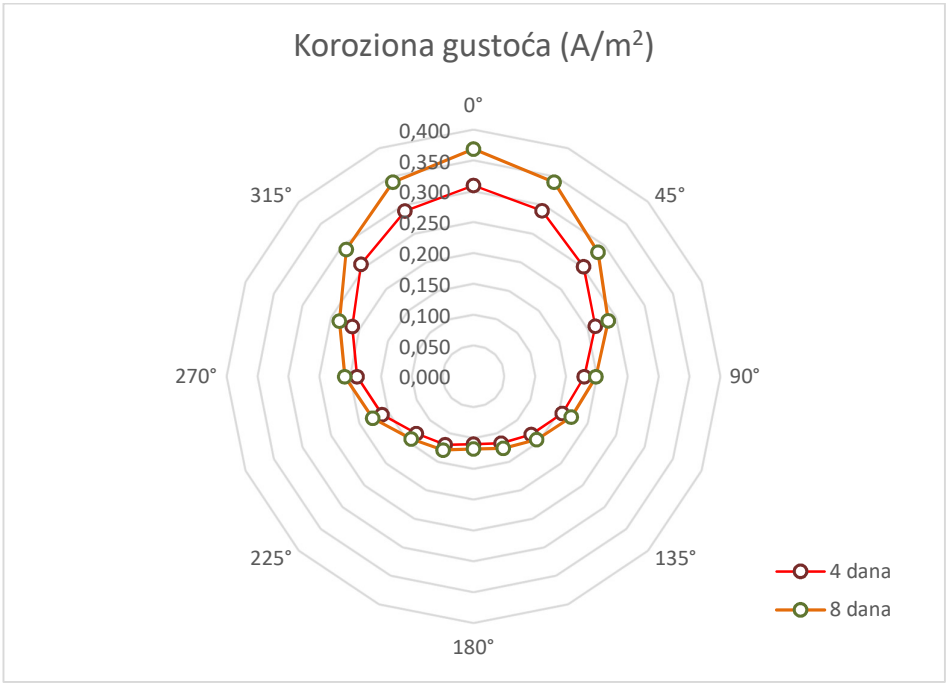
Slika 7.98. Gustoća korozijske struje za prirodnu koroziju nakon 7 godina



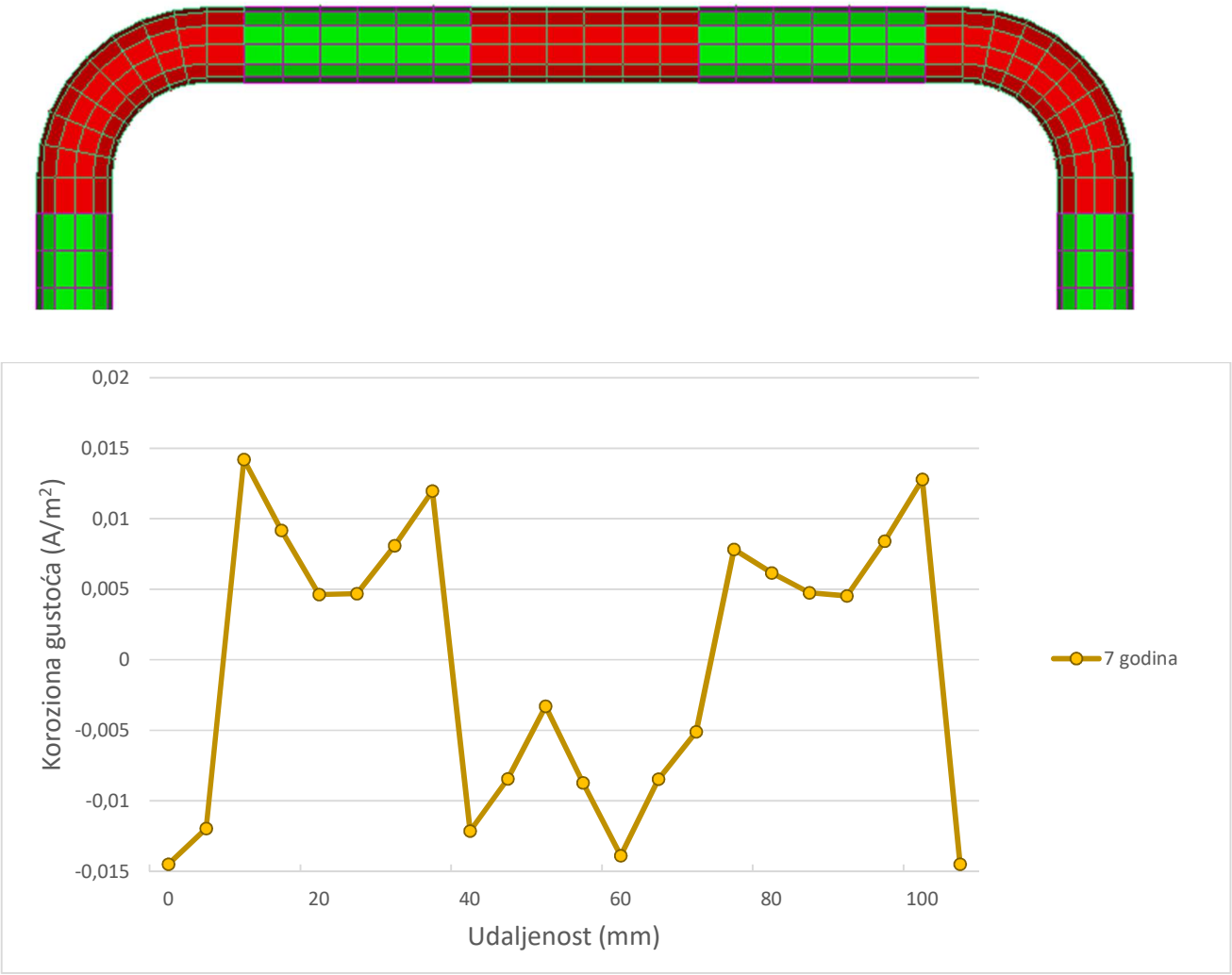
Slika 7.99. Gustoća korozijske struje na glavnoj šipci za ubranu koroziju nakon 4 i 8 dana



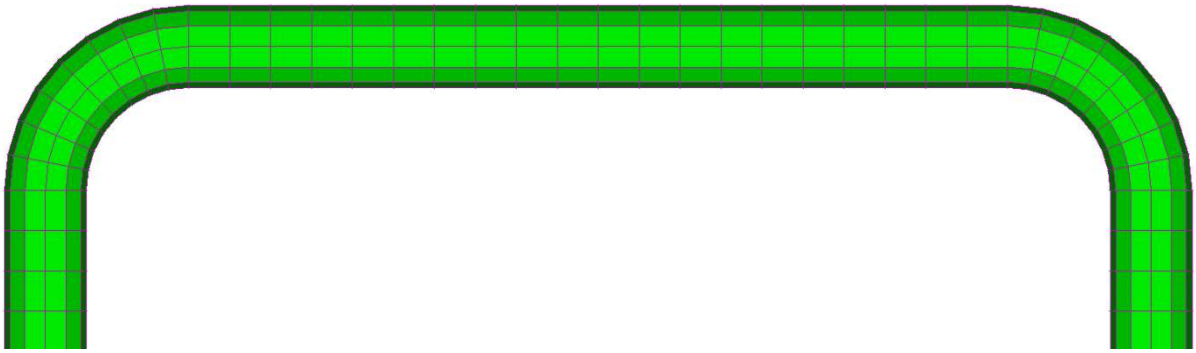
Slika 7.100. Gustoća korozijske struje na poprečnom presjeku glavne šipke za prirodnu koroziju nakon 7 godina

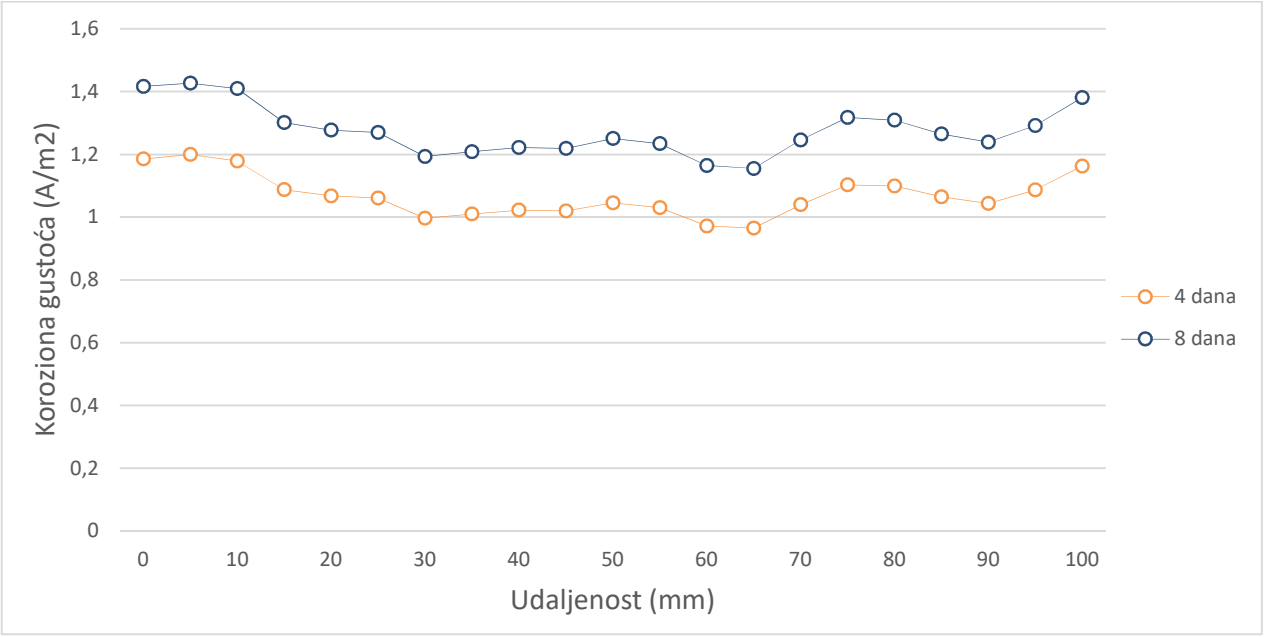


Slika 7.101. Gustoća korozijske struje na poprečnom presjeku glavne šipke za ubranu koroziju nakon 4 i 8 dana



Slika 7.102. Gustoća korozijske struje na vilicama za prirodnu koroziju nakon 7 godina



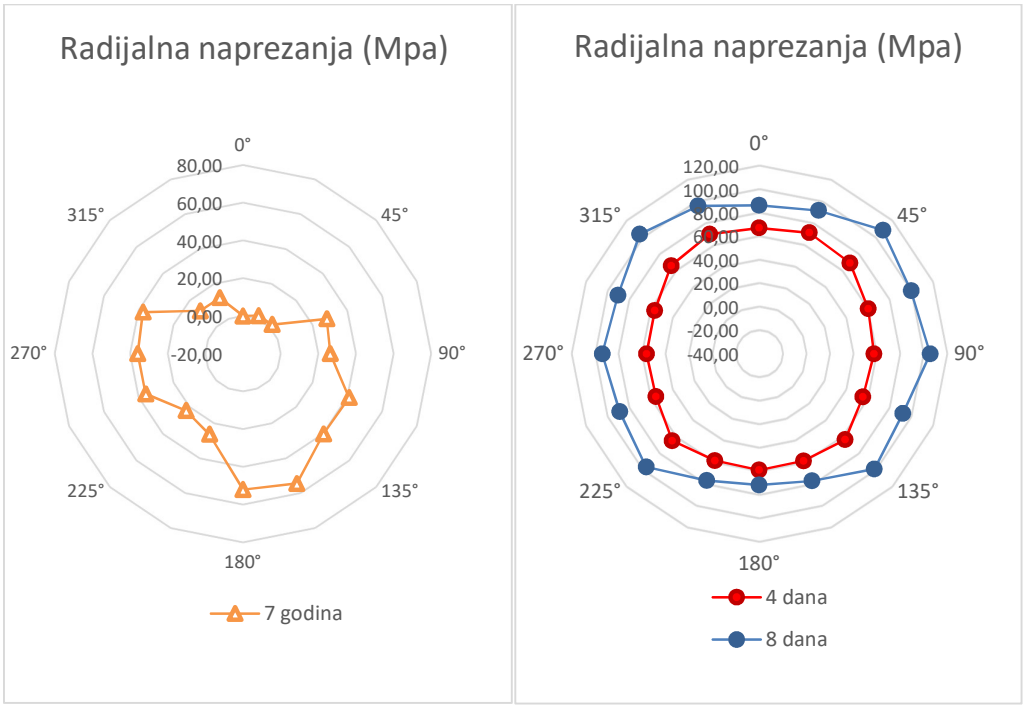


Slika 7.103. Gustoća korozijske struje na vilicama šipci za ubranu koroziju nakon 4 i 8 dana

RASPODJELA PRITISAKA KOROZIONIH PRODUKATA

Kod procesa korozije dolazi do stvaranja korozijskih produkata (hrđe) koji zauzimaju višestruko veći volumen od čelika. Posljedica toga je stvaranje pritiska između betona i čelika što se može prikazati pomoću radijalnih naprezanja oko armaturne šipke. Za prirodnu koroziju radijalna naprezanja se očitavaju na području tranzicije anode i katode gdje se očitavaju najveće vrijednosti. U slučaju ubrzane korozije očitavanje će se vršiti na sredini armaturne šipke gdje su maksimalna radijalnih naprezanja. S grafova (slika 7.104.) se može vidjeti da su najveća radijalna naprezanja za prirodnu koroziju 55Mpa, dok su za ubrzanu koroziju 70Mpa nakon 4 dana i 110Mpa nakon 8 dana.

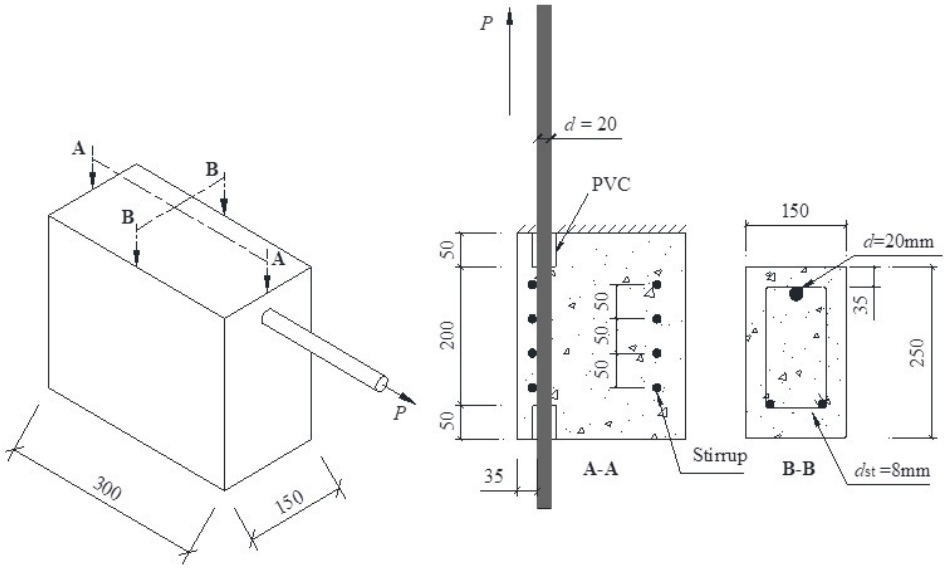
Prirodna korozija *Ubrzana korozija*



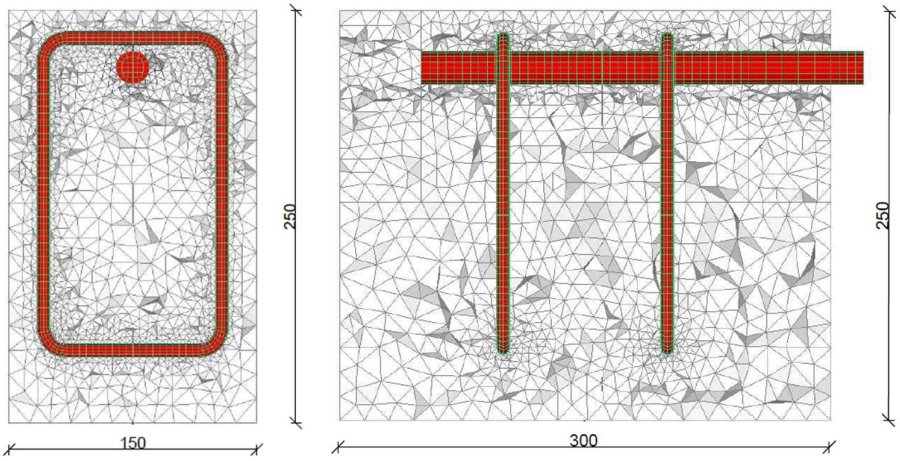
Slika 7.104. Radijalna naprezanja oko glavne šipke za prirodnu i ubrzanu koroziju

6.4. Usporedba ubrzane korozije i eksperimentalnih rezultata

U ovom poglavlju će se prikazati usporedba eksperimentalnih rezultata i numeričke analize za ubrzanu koroziju. Prikazat će se oštećenja uslijed djelovanja procesa korozije, te za približno jednaka oštećenja eksperimentalnih i numeričkih uzoraka dati usporedbu. Armiranobetonska greda je armirana s jednom glavnom uzdužnom šipkom promjera 20mm te dvije vilice promjera 8mm na razmaku 100mm što je vidljivo na sljedećoj slici (slika 7.105.).



(a)

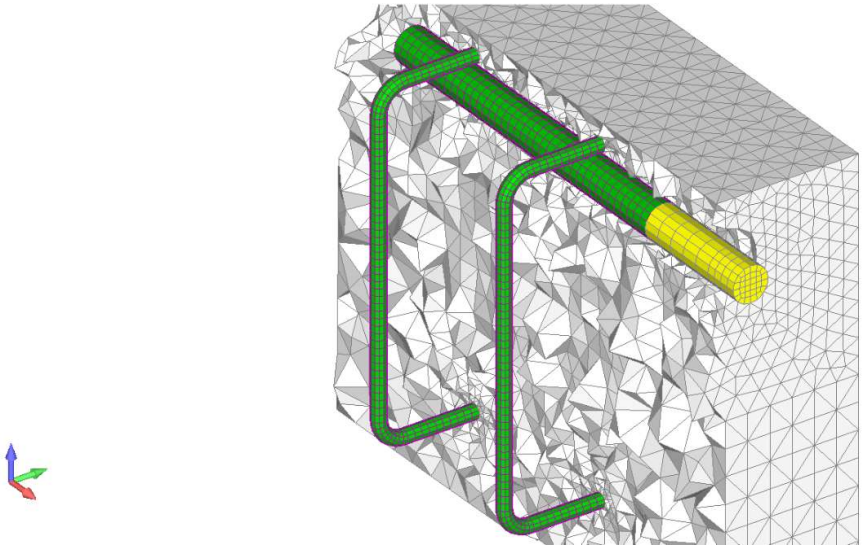


(b)

Slika 7.105. Prikaz geometrije uzorka: (a) skica eksperimentalnog uzorka [14] (b) prikaz numeričkog modela za ubrzanu koroziju

Modeli za usporedbu

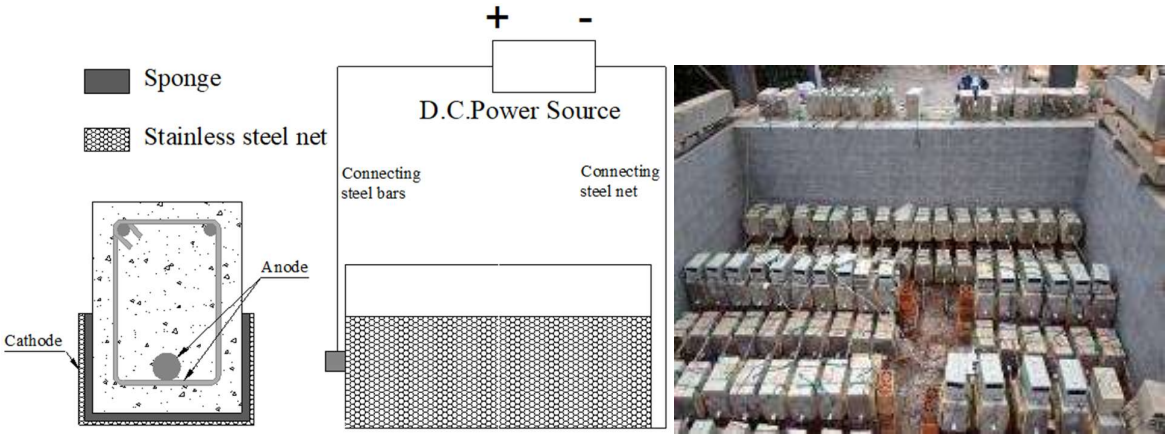
Za ubrzanu koroziju odabire se model B1 jer u odnosu na model B2 daje sličnija oštećenja armiranobetonskog uzorka s eksperimentalnim istraživanjima. Kod modela B2 područje anode je bilo zadano na uzdužnoj i poprečnoj armaturi što znači da je cijela armatura bila izložena koroziji te prouzročila oštećenja betona. Na sljedećoj slici 7.106. i tablici 10. će biti dan prikaz modela B1, te razina pada sile za pull-out test za ubrzanu koroziju i eksperimentalna istraživanja.



Slika 7.106. Prikaz numeričkog modela B1 (zelena boja predstavlja područje anode, žuta boja predstavlja plastičnu cijev oko glavne armaturne šipke

Tablica 10. Vrijednosti sile izvlačenja pull-out testa za ubrzanu koroziju

REZULTATI ISPITIVANJA-UBRZANA KOROZIJA				
Kritična sila na modelu bez utjecaja korozije iznosi: 141,12 kN				
Trajanje korozije	**Model B1**		**Model B2**	
	sila (kN)	pad sile (%)	sila (kN)	pad sile (%)
4 dana	135,53	3,96	137,08	2,86
8 dana	106,63	24,44	121,23	14,09
12 dana	94,37	33,13	96,68	31,49
16 dana	77,96	44,76	78,90	44,01



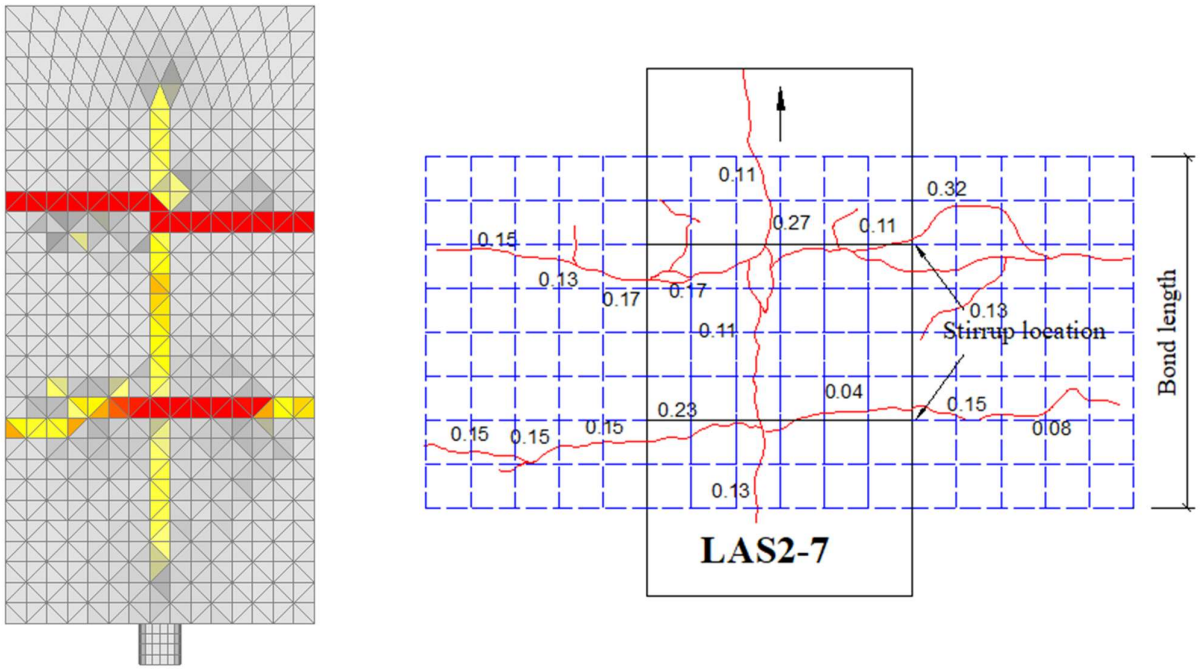
Slika 7.107. Ubrzana korozija: (a) šematski prikaz ubrzane korozije; (b) uzorci uslijed ubrzane korozije[14]

Tablica 33. Rezultati pullout testa na seriji uzoraka LAS2 [14]

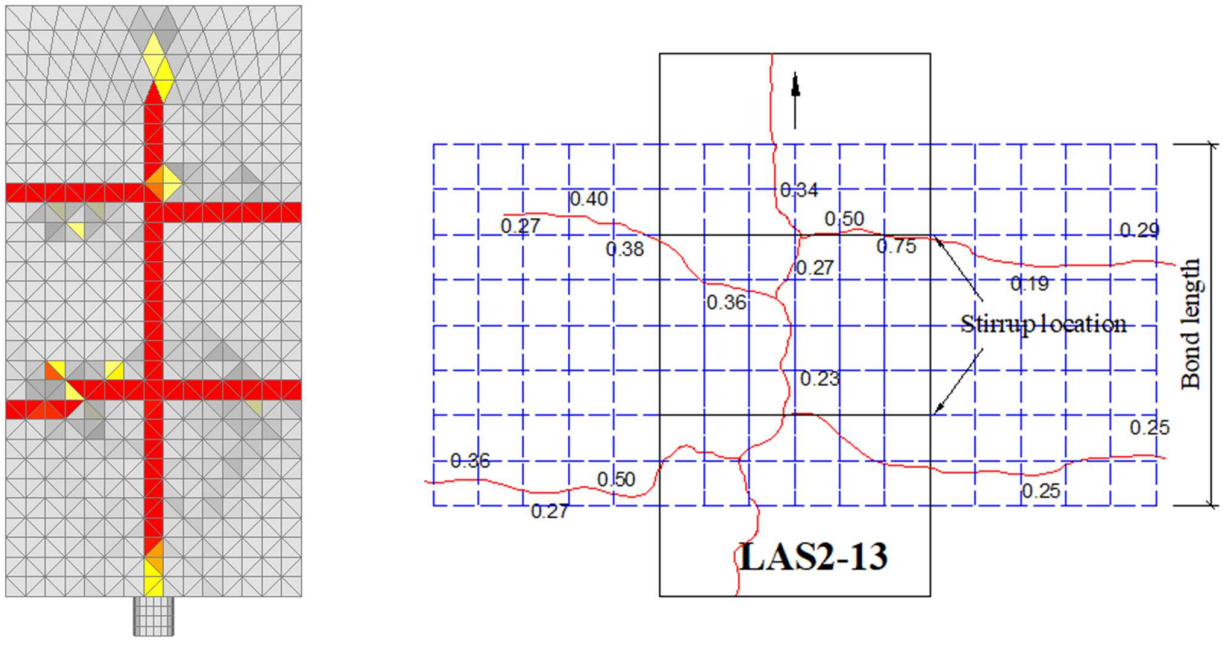
Uzorak	P_u **(kN)**	τ_u **(MPa)**
LAS2-0-1	147.04	11.71
LAS2-0-2	144.43	11.50
LAS2-0-3	147.03	11.71
LAS2-4	132.87	10.58
LAS2-7	118.28	9.42
LAS2-10	134.15	10.68
LAS2-13	89.58	7.13
LAS2-16	90.42	7.20

Usporedba će se raditi na osnovi veličina pukotina na površini betonskog uzorka, te razini pada sile čupanja glavne armaturne šipke iz uzorka. Stoga će se usporediti eksperimentalni uzorci „LAS2-7“ i „LAS2-13“ s ubrzanom korozijom nakon 12 i 16 dana.

Usporedba veličine pukotina eksperimentalnih istraživanja i ubrzane korozije:

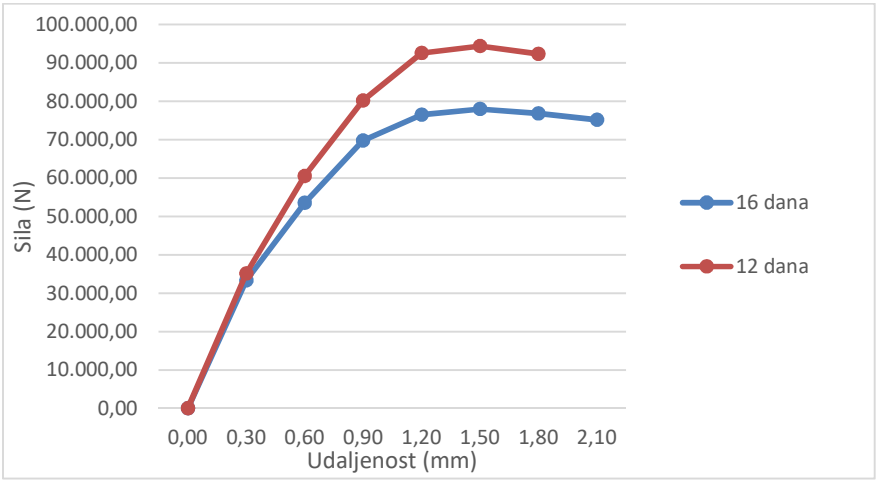


Slika 7.108. Usporedba ubrzane korozije nakon 12 dana i eksperimentalnog uzorka LAS2-7

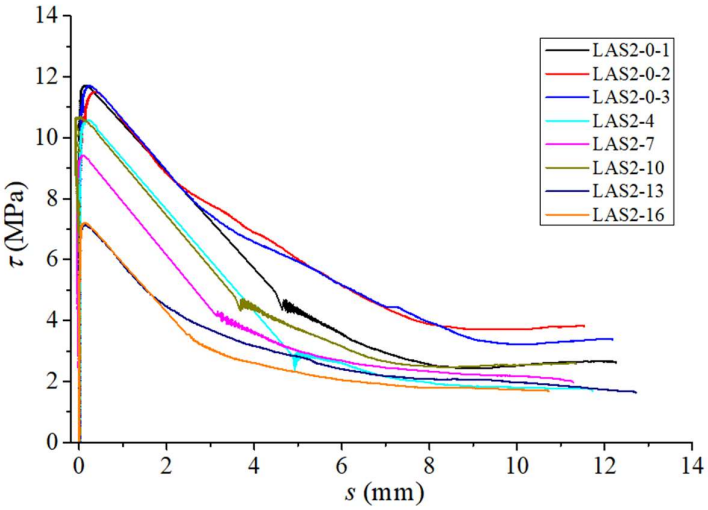


Slika 7.109. Usporedba ubrzane korozije nakon 12 dana i eksperimentalnog uzorka LAS2-7

Za približno jednaku veličinu pukotina od ubrzane korozije i eksperimentalnih uzoraka dobiva se malo veći pad sile izvlačenja armature iz uzorka za ubrzanu koroziju. Kritična sila izvlačenja kod eksperimentalnog uzorka „LAS2-7“ iznosi 118,28kN, dok za ubrzanu koroziju nakon 12 dana sila izvlačenja iznosi 94,37kN, za uzorak „LAS2-13“ sila iznosi 89,58kN u usporedbi za ubrzanu koroziju nakon 16 dana vrijednost sile iznosi 77,96kN. Iz prethodnih slika (slike 7.108., 7.109.) može se vidjeti da za oba primjera nastaje slična struktura pukotina. Na eksperimentalnim i numeričkim primjerima primjećuje se jedna uzdužna pukotina iznad glavne armaturne šipke i dvije lateralne pukotine koje se otprilike nalaze u razinama iznad armaturnih vilica.

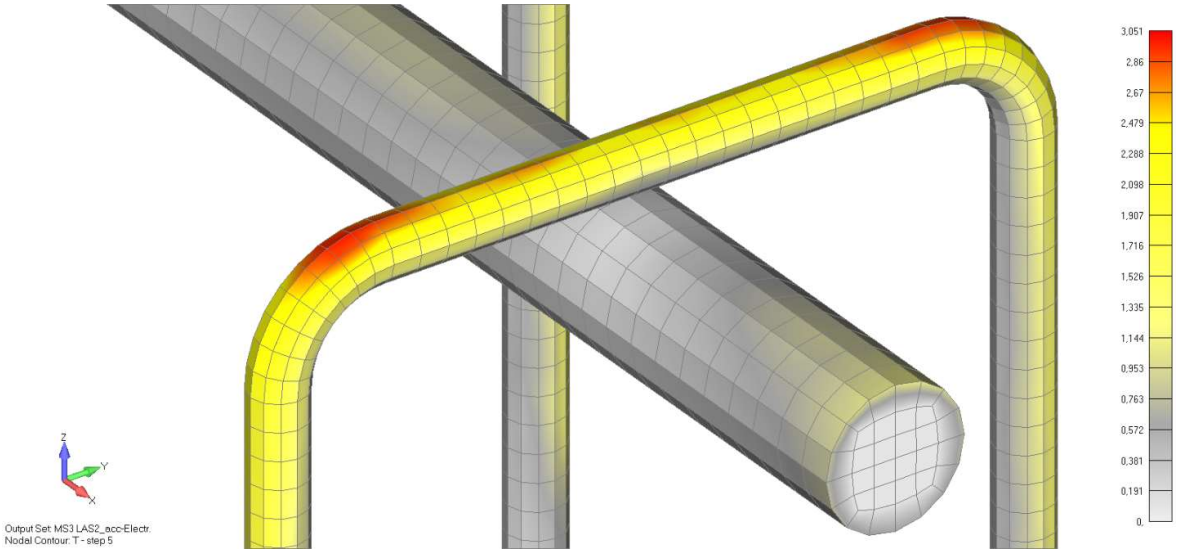


Slika 7.110. Graf pomak-sila za ubrzanu koroziju nakon 12 i 16 dana(možeš pretvorit ovaj graf u naprezanje



Slika 7.111. Graf naprezanje-pomak za seriju uzoraka lAS2 [14]

Jedan od zaključaka eksperimentalnih istraživanja je bio da su vilice višestruko više korodirale u odnosu na uzdužnu armaturu - čak 3.5 puta. Vilice su najviše korodirale s vanjske strane (strana bliža površini) u krajevima. Kod numeričke analize je primijećena isto ponašanje, odnosno kod modela B1, koji je najsličniji u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima, gustoća korozijske struje je otprilike 3 puta veća na vilicama nego glavnoj armaturnoj šipci, a vrijednosti su pogotovo veće u kutevima vilica. S donje slike se može vidjeti da je prosječna vrijednost korozijske gustoće na vilicama reda veličine 2 A/m^2, dok se na šipki te vrijednosti kreći oko 0,6 A/m^2.



Slika 7.112. Prikaz vrijednosti gustoće korozijske struje na uzdužnoj i poprečnoj armaturi za model B1

Slika 7.113. Prikaz oštećenja vilica u eksperimentalnim istraživanjima[14]

8. ZAKLJUČAK

U prezentiranom radu je korišten nedavno razvijeni 3D kemo-higro-termo-mehanički model pomoću kojeg su izvršeni proračuni i analize koji opisuju procese korozije. Na temelju provedenih ispitivanja i rezultata vidljivo je oštećenje i znatan pad nosivosti armiranobetonskog elementa uslijed utjecaja korozije na njega. Istraživanje se može podijeliti na dva dijela: ispitivanje utjecaja prirodne korozije i ispitivanje utjecaja ubrzane korozije.

Tablica 11. Vrijednosti sile izvlačenja pull-out testa za prirodnu koroziju

REZULTATI ISPITIVANJA-PRIRODNA KOROZIJA				
Kritična sila izvlačenja na modelu bez utjecaja korozije iznosi: 141,12 kN				
Trajanje korozije	Model A1		Model A2	
	sila (kN)	pad sile (%)	sila (kN)	pad sile (%)
1 godina	137,29	2,83	132,68	5,98
3 godine	135,78	3,78	132,09	6,40
7 godina	132,86	5,86	130,05	7,84

Kod ispitivanja prirodne korozije koriste se dva modela koja su imala različite pozicije anode i katode unutar elementa. Iz tablice 11. je vidljiv pad sile kod izvlačenja armature iz uzorka. Kod modela A1 koji je obuhvaćao veću površinu anode u odnosu na model A2, rezultat su veće pukotine u betonu te malo veći pad nosivosti. U oba slučaja pukotine su se pozicionirale na mjestima najvećeg transporta korozijske struje koja se nalazi na prijelazu anode i katode. Stvaranje korozijskih produkata je uzrokovalo vlačna naprezanja u betonu i pri prekoračenju vlačne čvrstoće betona došlo je do oštećenja odnosno stvaranja pukotina.

Tablica 12. Vrijednosti sile izvlačenja pull-out testa za ubrzanu koroziju

REZULTATI ISPITIVANJA-UBRZANA KOROZIJA				
Kritična sila na modelu bez utjecaja korozije iznosi 141,12 kN				
Trajanje korozije	Model B1		Model B2	
	sila (kN)	pad sile (%)	sila (kN)	pad sile (%)
4 dana	135,53	3,96	137,08	2,86
8 dana	106,63	24,44	121,23	14,09
12 dana	94,37	33,13	96,68	31,49
16 dana	77,96	44,76	78,90	44,01

Kod ubrzane korozije ispitivanja su također provedena na dva modela. Prvom modelu B1 anoda je zadana na uzdužnoj i poprečnoj armaturi, dok je kod drugog modela B2 anoda zadana samo na uzdužnoj armaturi. U usporedbi oštećenja na površini armiranobetonskog modela, model B1 je imao jednu uzdužnu pukotinu iznad glavne armaturne i dvije lateralne pukotine iznad vilica,

dok je model B2 imao samo uzdužnu pukotinu iznad uzdužne armature. Iz tablice 12. je vidljivo da imamo veći pad nosivosti kod modela B1 za ista vremenska razdoblja od 4, 8, 12 i 16 dana. Ovo se može objasniti tako što kod modela B1 korodiraju i vilice i uzdužna armatura, a u modelu B2 samo uzdužna armatura. Također, može se reći da se kod modela B1 vilice ponašaju kao vrsta zaštite uzdužne armature tako što privlače dio struje na sebe i područjima ispod sebe smanjuju tok korozijske struje. Model B1 dosta dobro odgovara eksperimentalnim rezultatima u pogledu pozicija oštećenja armiranobetonskog uzorka, veličine pukotina te padu nosivosti sile izvlačenja armature iz uzorka. Dolazi se do zaključka da je simulacija korozije u armiranobetonskom elementu realistična. Sve numeričke analize koje su provedene u ovom radu služe za predviđanje ponašanja nosive konstrukcije te usporedbu s provedenim eksperimentalnim istraživanjima. Jako je bitno nastaviti raditi eksperimentalna istraživanja na temu korozije armirano betonskih konstrukcija te time omogućiti daljnji razvoj 3D modela koji će te pojave što vjerodostojnije opisivati. Na taj način uštedjet će se puno novaca te unaprijediti modeliranje konstrukcija koje se nalaze u jako agresivnom okolišu.

9. LITERATURA

[1] Ožbolt, Joško; Oršanić, Filip; Balabanić, Gojko; Modeling pull-out resistance of corroded reinforcement in concrete: Coupled three- dimensional finite element model *// Cement and Concrete Composites,* **46** (2014), 41-55 doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.10.014 (članak, znanstveni)

[2] Joško Ožbolt, Yijun Li, Ivica Kozar; Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint, Internationa Journal of Solids and Structures 38 , 2001.

[3] Jpško Ožbolt, Finite element code MASA (**MA**croscopic **S**pace **A**nalysis)

[4] Ninčević, Krešimir; Utjecaj nastavljanja armature na nosivost i oštećenje betona armiranobetonske grede prethodno izložene djelovanju visokih temperatura; diplomski rad, 2014.

[5] Kušter, Marija; Ožbolt, Joško; Balabanić, Gojko, Modeliranje korozije u armiranobetonskim konstrukcijama izloženih mehaničkim oštećenjima i kloridima // *Zbornik radova: 20. Savjetovanje o zaštiti materijala i industrijskom finišu "KORMAT 2012*" / Stojanović, Ivan ; Alar, Vesna (ur.). Zagreb : Hrvatsko društvo za zaštitu materijala, 2012. 141-156 (pozvano predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

[6] Tuutti, K.: Corrosion of steel in concrete, Report No. 4, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

[7] Bažant, Z.P.: Physical model for steel corrosion in concrete sea structures – theory, Journal of the Structural Division, ASCE 105 (1979) 1137-1153.

[8] Ožbolt, J.; Balabanić, G.; Periškić, G.; Kušter, M.: Modelling the effect of damage on Transport processes in concrete, Construction and Building Materials 24 (2010) 1638-1648.

[9] Ožbolt, J.; Balabanić, G.; Kušter, M.: 3D numerical modelling of steel corrosion in concrete structures. Corrosion Science 53 (2011) 4166-4177.

[10] Ožbolt, Joško; Numerički 3D kemo-higro-termo-mehanički model betona (https://www.gradri.uniri.hr/hr/znanstveno-istrazivacki-rad/80-hr/znanstveno-istrazivacki-rad/projekti/5504-numericki-3d-kemo-higro-termo-mehanicki-model-betona.html).

[11] Šverko, Ivan; Utjecaj prodora klorida na beton u morskom okolišu, diplomski rad, Rijeka 2016.

[12] Bjegović, D., Štrimer, N., Teorija i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.

[13] Oršanić, Filip; Chemo-hygro-thermo-mechanical model for simulation of corrosion induced damage in reinforced concrete, doktorski rad, Stuttgart 2015.

[14] Hongwei Lin, Yuxi Zhao, Joško Ožbolt, Christian Fischer, Zhangyao Feng; Cover cracking and bond deterioration induced by the corrosion of longitudinal steel bars and stirrupseksperimentalna istraživanja (eksperimentalna istraživanja)

Korišteni programski paketi:

[1] MASA (**MA**croscopic **S**pace **A**nalysis)

[2] FEMAP®

[3] AutoCad 2018

[4] Microsoft Office Excell

[5] Microsoft Office Word