

Ispitivanje raspodjele potencijala u sustavu katodne zaštite u ovisnosti o specifičnom otporu elektrolita

Večerić, Matea

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:720409>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Matea Večerić

ISPITIVANJE RASPODJELE POTENCIJALA U SUSTAVU
KATODNE ZAŠTITE U OVISNOSTI O SPECIFIČNOM
OTPORU ELEKTROLITA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: Doc. dr. sc. Helena Otmačić Ćurković

Članovi ispitnog povjerenstva: Doc. dr. sc. Helena Otmačić Ćurković

Dr. sc. Suzana Sopčić

Prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić

Zagreb, lipanj 2015.

Najljepše zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Heleni Otmačić Ćurković na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog završnog rada. Također, srdačno zahvaljujem Krešimiru Kekezu, dipl.chem.ing. te tvrtki PA-EL na korištenju njihove opreme te savjetima u vezi s tematikom

ISPITIVANJE RASPODJELE POTENCIJALA U SUSTAVU KATODNE ZAŠTITE U OVISNOSTI O SPECIFIČNOM OTPORU ELEKTROLITA

KLJUČNE RIJEČI: katodna zaštita, raspodjela potencijala, anoda, koncentracija elektrolita, zaštitni potencijal

SAŽETAK

U ovom radu ispitivana je raspodjela potencijala u ovisnosti o specifičnom otporu elektrolita za sustav katodne zaštite bazena izrađenog od niskougljičnog čelika pomoću titanske anode prevučene slojem miješanih oksida plemenitih metala kružnog presijeka. Za potrebe ispitivanja potencijala pomoću referentne Cu/CuSO₄ elektrode izrađena je Lugginova kapilara koja se pokazala vrlo učinkovitom. Usporedbom raspodjele potencijala za konstantnu struju od 0,7A u tri različite koncentracije elektrolita: 0% NaCl, 0,5% NaCl i 1% NaCl vidljivo je da se s povećanjem koncentracije raspodjela širi po bazenu budući da se smanjuje specifični otpor elektrolita. Dobro raspoređene katodne zaštite pri najnižoj koncentraciji elektrolita skoro da i nema, vrijednosti zaštitnog potencijala vrlo malo prelaze granicu od -850mV, dok je za preostale dvije koncentracije cijela površina bazena pod katodnom zaštitom.

INVESTIGATION OF THE DISTRIBUTION OF POTENTIAL IN CATHODIC PROTECTION SYSTEM AS A FUNCTION OF ELECTROLYTE RESISTIVITY

KEY WORDS: cathodic protection, distribution of potential, anode, electrolyte concentration, protective potential

SUMMARY

In this work was examined the distribution of potential as a function of electrolyte resistivity for a system of cathodic protection in a low carbon steel pool with a disk anode made of titanium and coated with a layer of noble metal oxides. For this purpose, a Luggin capillary with Cu/CuSO₄ reference electrode was made and it proved to be efficient. By comparing the distribution of potential for the constant current of 0,7A in three different electrolyte concentrations of artificial sea water: 0% NaCl, 0,5% NaCl and 1% NaCl it is observed that by increasing concentration of electrolyte the distribution is spreading through the tank as the electrolyte resistivity is decreasing. Cathodic protection at the lowest electrolyte concentration is very poor because the values of protection potential are below -850mV. On the other hand, for the other two electrolyte concentrations the whole surface is under cathodic protection.

Sadržaj

1	UVOD	7
2	TEORIJSKI DIO	8
2.1	KOROZIJA	8
2.2	METODE ZAŠTITE OD KOROZIJE	9
2.3	KATODNA ZAŠTITA.....	10
2.4	KATODNA ZAŠTITA VANJSKIM IZVOROM STRUJE	12
2.4.1	Anode u sustavu zaštite vanjskim izvorom struje	14
2.4.2	Izvedba katodne zaštite vanjskim izvorom struje	15
2.4.3	Raspodjela potencijala u sustavu katodne zaštite	16
3	EKSPERIMENTALNI DIO	19
3.1	SVRHA ISPITIVANJA	19
3.2	PROVEDBA ISPITIVANJA	19
3.2.1	Korozijska zaštita galvanskom anodom.....	20
3.2.2	Korozijska zaštita vanjskim izvorom struje.....	21
3.3	PRIPREMA BAZENA ZA ISPITIVANJE.....	22
3.3.1	Rad napojne stanice	22
3.3.2	Čišćenje bazena i postavljanje anode.....	22
3.3.3	Izrada rastera.....	22
3.3.4	Izrada Lugginove kapilare	23
3.3.5	Punjenje bazena i puštanje katodne zaštite.....	24
3.3.6	Umjeravanje referentne elektrode	25
3.3.7	Specifični otpor elektrolita	26
3.4	MJERENJE RASPODJELE POTENCIJALA	26
4	REZULTATI.....	27
4.1	MJERNI PODACI ZA SUSTAV KATODNE ZAŠTITE GALVANSKOM ANODOM	27
4.2	REZULTATI KATODNE ZAŠTITE VANJSKIM IZVOROM STRUJE	29
4.3	RASPODJELA POTENCIJALA U BAZENU S KATODNOM ZAŠTITOM POMOĆU VANJSKOG IZVORA STRUJE	30
5	RASPRAVA.....	36
5.1	KATODNA ZAŠTITA GALVANSKOM ANODOM	36
5.2	KATODNA ZAŠTITA VANJSKIM IZVOROM STRUJE	36
5.3	UČINKOVITOST LUGGINOVE KAPILARE	36
5.4	RASPODJELA POTENCIJALA U BAZENU S KATODNOM ZAŠTITOM	37

6	ZAKLJUČAK.....	38
7	POPIS SIMBOLA I KRATICA.....	39
8	LITERATURA.....	41
9	ŽIVOTOPIS.....	42

1 UVOD

Katodna zaštita definira se kao smanjenje ili uklanjanje korozije metalnih konstrukcija, a postiže se tako da se konstrukcija polarizira tako da postane katoda u strujnom krugu, tj. da se na njoj isključivo odvija katodna reakcija.

Postoje dvije tehnike katodne zaštite: katodna zaštita galvanskom ("žrtvovanom") anodom i katodna zaštita s vanjskim izvorom struje. U ovom radu će se pozornost obratiti drugoj od spomenutih tehnika te obraditi nova ispitivanja i istraživanja katodne zaštite pomoću vanjskog izvora struje.

Bilo da je riječ o jednoj ili drugoj metodi, katodna zaštita se ostvaruje zahvaljujući odvijanju elektrokemijskih reakcija na anodi i katodi. Mora se naglasiti, da je katodna zaštita moguća samo onda, kada su konstrukcija koja se želi zaštititi i pomoćna (galvanska ili inertna) elektroda istovremeno u električnom kontaktu odnosno da se nalaze u vodljivom mediju. To znači, da se katodno mogu štititi vanjske površine ukopanih, podvodnih i uronjenih metalnih konstrukcija, te unutarnje površine raznih konstrukcija koje sadrže korozivni elektrolit ^[1]

Specifični otpor medija u kojem se vrši katodna zaštita ima veliki utjecaj na zahtjeve sustava katodne zaštite, tj. na potrebnu struju i napon zaštite. Iz tog razloga je u ovome radu ispitivan utjecaj specifičnog otpora elektrolita, umjetne morske vode, na efikasnost sustava katodne zaštite, odnosno na raspodjelu potencija na pojedinim dijelovima štice konstrukcije.

2 TEORIJSKI DIO

2.1 KOROZIJA

Korozija je nenamjerno razaranje konstrukcijskih materijala pod kemijskim, mehaničkim i biološkim djelovanjem okoliša. Koroziju čini skup kemijskih i elektrokemijskih promjena tijekom kojih metal prelazi od elementarnog stanja u spojeve u kojima se najčešće nalazi u prirodi. Proces korozije predstavlja fizikalno-kemijsko međudjelovanje metala i njegova okoliša koje uzrokuje promjenu uporabnih svojstava metala te može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji oni čine. To je spontani proces koji se ne može spriječiti, ali se može usporiti.^[2]

Korozijski proces je u većini slučajeva elektrokemijski proces što znači da odvijanje reakcije na granici faza metal/korozivni medij uključuje izmjenu elektrona na površini metala s ionima u elektrolitu. Elektroni oslobođeni u anodnoj reakciji troše se u katodnoj reakciji:



Kako u obje gornje reakcije sudjeluju elektroni, brzina odvijanja tih reakcija (broj e^{-} u jedinici vremena) može se mjeriti kao električna struja I izražena u jedinicama kulon po sekundi ili amper [C/s ili A].

Prema Wagner-Traudovoj teoriji mješovitog potencijala obje ovdje prikazane reakcije odvijaju se simultano, a rezultat je otapanje površine metala.

Polarizacijska krivulja koja odgovara ukupnom korozijskom procesu koji se odvija na površini metala, ako su i anodna i katodna korozijska reakcija pod aktivacijskom kontrolom, slijedit će jednadžbu:

$$j = j_{kor} * \left[e^{\frac{2,303\eta}{ba}} - e^{\frac{-2,303\eta}{bk}} \right] \quad (3)$$

gdje je

j – gustoća struje [A/m^2]

j_{kor} – korozijska gustoća struje [A/m^2]

η – prenapon [V]

$$\eta = E - E^0$$

$$b_a - \text{nagib anodnog Tafelovog pravca} \quad b_a = \frac{2.303RT}{(1-\alpha)zF}$$

$$b_k - \text{nagib katodnog Tafelovog pravca} \quad b_k = \frac{2.303RT}{\alpha zF}$$

z – broj elektrona

F – Faradayeva konstanta $F = 9.648 \cdot 10^4 \text{ C mol}^{-1}$

R – opća plinska konstanta $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

T – termodinamička temperatura, K

α – koeficijent prijenosa ^[1]

2.2 METODE ZAŠTITE OD KOROZIJE

Metali ili slitine imaju svojstvo da pri fizikalno-kemijskim utjecajima zraka, vlage ili drugog agresivnog okoliša stvaraju razne korozijske produkte (okside, sulfide, karbonate...). U nekim slučajevima ovi korozijski produkti mogu predstavljati prirodnu zaštitu od korozije, dok se u drugim slučajevima korozija nastavlja i u prisutnosti korozijskih produkata pa ju je potrebno usporiti različitim metodama zaštite od korozije. ^[3]

Zaštita konstrukcijskih materijala od korozije provodi se pomoću različitih metoda. Najčešći načini zaštite su: elektrokemijske metode zaštite, zaštita obradom korozijske sredine, oblikovanjem i konstrukcijskim mjerama, zaštita odabirom korozijski postojanih materijala, zaštita prevlakama ili zaštita oplemenjivanjem.

Elektrokemijskom zaštitom nastoji se održavati materijal u pasivnom ili imunom stanju, na dva načina, ovisno o načinu polarizacije, katodnom ili anodnom zaštitom. Elektrokemijske metode zaštite se upotrebljavaju kao antikorozivna zaštita, najčešće čeličnih konstrukcija, prvenstveno u konstrukcijama koje su ukopane i uronjene (cjevovodi, brodovi, lučka postrojenja, rezervoari, kondenzatori, izmjenjivači topline i dr.). ^[4,5]

Zaštita metala doradom korozijske sredine provodi se uklanjanjem aktivatora korozije ili uvođenjem inhibitora korozije u agresivnu sredinu. Inhibitori korozije su tvari koje dodane u malim količinama u agresivni medij mogu u velikoj mjeri smanjiti brzinu korozije metala. ^[6]

Metali se štite i prevlačenjem organskim i anorganskim (metalnim i nemetalnim) prevlakama koje predstavljaju barijeru agresivnim ionima i vodi. ^[5]

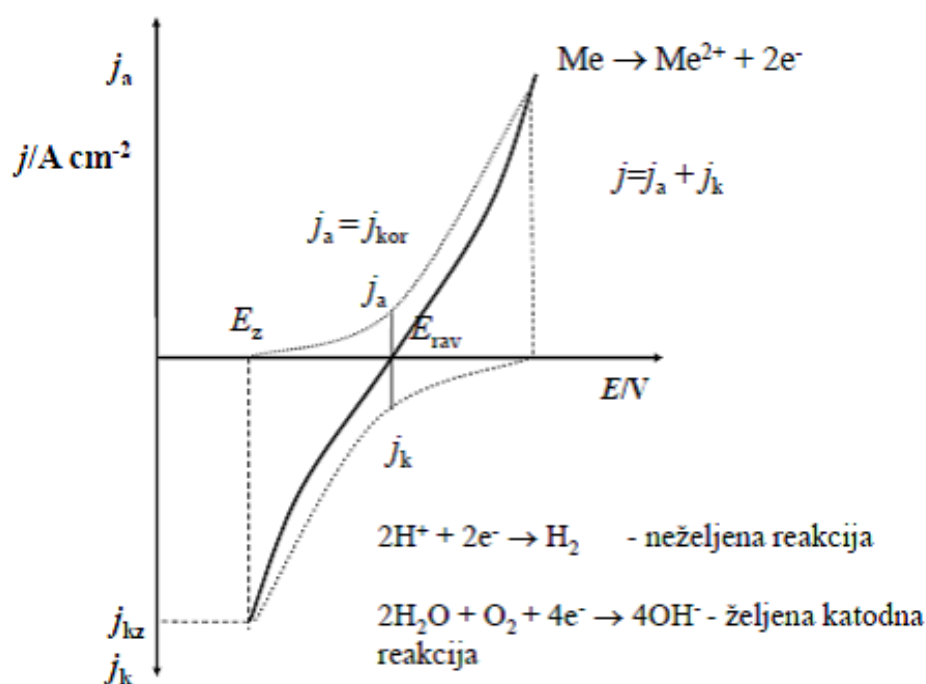
Zaštita od korozije putem površinske obrade i organskim premazima, koja je najčešća, nije u svim slučajevima pogodna jer se mora obnavljati, a to je teško naročito na nepristupačnim mjestima. ^[7]

Kod ukopanih konstrukcija ili brodova zaštita organskim premazima nadopunjuje se katodnom zaštitom. ^[6]

Oplemenjivanje je jedan od načina kako se neotporni metali i slitine mogu zaštititi, nanosom otpornijeg metala na izvorni koji također ima i funkciju dekoracije. U tom postupku koriste se dvije osnovne metode oplemenjivanja metala: elektrokemijski postupak galvanostegije i metalnim listićima. ^[3]

2.3 KATODNA ZAŠTITA

Katodna zaštita je jedna od najznačajnijih metoda zaštite od korozije u elektrolitima. To je elektrokemijska metoda zaštite metalnih konstrukcija od korozije koja se zasniva na polarizaciji štice konstrukcije na potencijale pri kojima se na cijeloj konstrukciji odvija katodna reakcija, a anodna reakcija se ne odvija ili se odvija zanemarivo malom brzinom. ^[3] Metoda se dakle temelji na tome da se metal održava u imunom stanju (pri potencijalima nižim od korozijskog) kada ne korodira. ^[5]



Slika 2-1. Polarizacijska krivulja ^[4]

Mehanizam katodne zaštite može se jednostavno objasniti reakcijama (1) i (2) te slikom 2-1. Korozijski potencijal ovisi o obliku parcijalnih struja-potencijal krivulja. Ukoliko reakcija (1), otapanja metala, ima veću gustoću struje izmjene j od reakcije redukcije, tada katodna reakcija određuje brzinu reakcije. Obrnuto, ako je gustoća struje izmjene reakcije

otapanja metala manja od gustoće struje izmjene reakcije redukcije, tada anodna reakcija određuje brzinu korozije. Korozijski potencijal i polarizacijske krivulje ovise o stanju površine metala.

Kada se površina metala/legure učini dovoljno negativnom tad se povećava koncentracija elektrona koji će ubrzati odvijanje katodne reakcije, a usporavati brzinu anodne reakcije. Dakle, katodnom (negativnom) polarizacijom smanjuje se brzina korozije, i kad je vrijednost polarizacije dovoljno velika, korozijski se proces može potpuno zaustaviti. To znači, da će brzina anodne reakcije biti jednaka nuli, a cijela površina štice metala postaje katoda.^[1]

Sustav može biti štice **žrtvovanom anodom (protektorom)** u kojem do katodne polarizacije dolazi uslijed kontaktom zaštićenog metala s neplemenitijim metalom odnosno elektronegativnijim metalom koji će se otapati. Drugi način u kojem je zaštićeni predmet katodno polariziran je djelovanjem **vanjskog izvora istosmjerne struje**.^[4]

Između dva navedena postupka katodne zaštite nema bitne teorijske razlike jer se oba temelje na istim elektrokemijskim osnovama. Uspostavljanjem *sustava katodne zaštite sa vanjskim izvorom*, metal se spaja na negativni pol izvora istosmjerne struje, tako da se na granici faza konstrukcije i elektrolita, uspostavlja razlika potencijala (elektrodni potencijal), pri kojoj se na cijeloj površini konstrukcije odvija katodna reakcija, dok se anodna reakcija odvija na protuelektrodi – anodi.

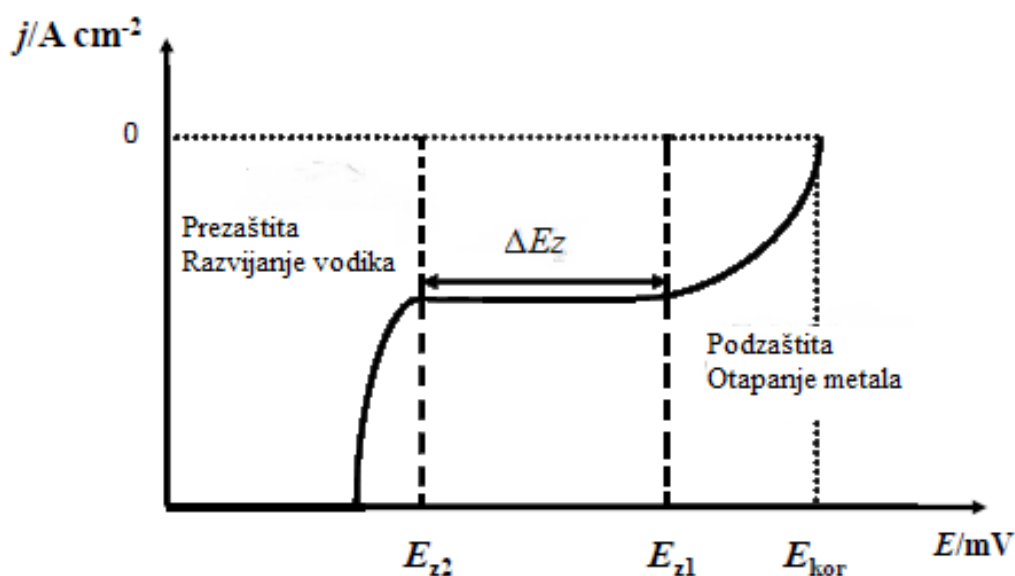
Kriteriji katodne zaštite su zaštitni potencijal i zaštitna gustoća struje. Njihove vrijednosti se za različite uvjete eksploatacije znatno razlikuju. Korozijski potencijal čelika u prirodnoj sredini je u prosjeku oko $-0,55\text{ V}$, a 1928 g. utvrđena je vrijednost potencijala od $-0,85\text{ V}$ kao kriterij za potpunu katodnu zaštitu. Zaštitni potencijal čelika je negativniji ($-0,95\text{ V}$) samo u anaerobnim sredinama, u kojima bakterije reduciraju sulfate u sulfite. Ove se vrijednosti dostižu određenim gustoćama struja koje se kreću od $20\text{--}40\text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$ za ugljični čelik. Potrebne gustoće struja znatno padaju prevlačenjem čeličnih konstrukcija izolacijskim prevlakama (za ugljični čelik ispod $0,3\text{ mA}\cdot\text{m}^{-2}$), pa se zato katodna zaštita vrlo često kombinira s nanošenjem takvih prevlaka, što smanjuje veliki potrošak energije koji bi postojao kod katodne zaštite bez prevlake.

Kao izvori narinute struje služe ispravljači od $10\text{--}20\text{ V}$ koji omogućuju finu regulaciju zaštite. To se lako provodi i automatski pomoću potencioštata.

Budući da je zaštitni potencijal kriterij katodne zaštite, treba povremeno mjeriti potencijal između konstrukcije i referentne Cu/CuSO_4 elektrode na tlu. Iz pada potencijala

konstrukcija/tlo procjenjuje se stupanj zaštite, a samo mjerenje tijekom primjene katodne zaštite je dosta složeno. [5]

U obje vrste katodne zaštite nastoji se postići zaštitni potencijal, ovisno o materijalu, te ga održavati u granicama kako je prikazano na grafikonu na slici 2-2. Tada se na površini konstrukcije odvija samo katodna reakcija redukcije kisika. Ako se ne uspije postići zaštitni potencijal, odnosno ako su vrijednosti potencijala konstrukcije pozitivnije od vrijednosti za zaštitni potencijal, metal se počinje otapati. Pri znatno negativnijim vrijednostima elektrodnog potencijala od zaštitnog odvija se i druga katodna reakcija, razvijanje vodika, što može uzrokovati pojavu vodikove krtosti.



Slika 2-2. Područje zaštitnog potencijala, prezaštite i podzaštite [4]

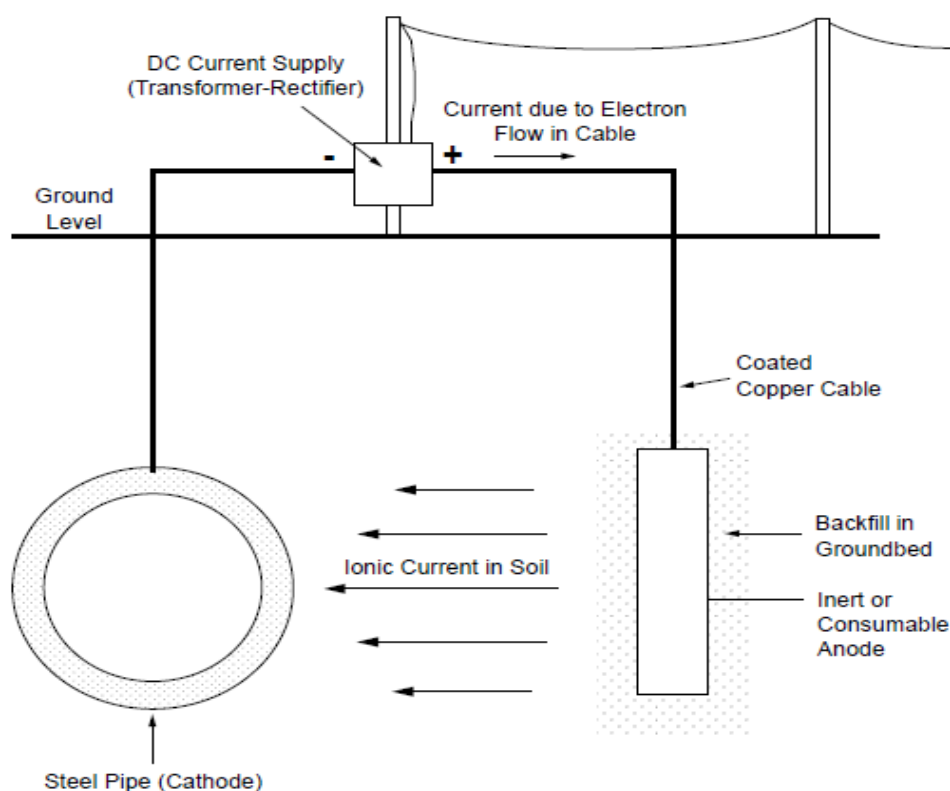
2.4 KATODNA ZAŠTITA VANJSKIM IZVOROM STRUJE

Zaštita vanjskim izvorom struje odabire se pri zahtjevima jake struje i/ili velikog otpora elektrolita. Uz korištenje pri velikoj struji i velikoj izlaznoj snazi, mogu se navesti i ostale prednosti ovakvog sustava, poput mogućnosti ugađanja zaštitnog stupnja, štíćenja velikih površina i konstrukcija koje su slabo prevučene antikorozivnim premazom te korištenja malog broja anoda, čak i u okolišu s velikim specifičnim otporom.

Limitirajući čimbenici su visok rizik uzrokovanja interferirajućeg učinka, manja pouzdanost sustava budući da konstantno ovisi o vanjskom izvoru struje te su mogući tehnički kvarovi i zahtjevi održavanja opreme su veći. Potrebno je priskrbiti vanjski izvor struje i sve dodatne komponente te su zbog toga veći financijski troškovi, a kompleksnija je i robusnija

struktura od same žrtvovane anode. Pojavljuje se i rizik od štete prezaštitom ili krivim spajanjem polova na izvor struje te s katodom i anodom.

Struja se snabdijeva iz transformatora s ugrađenim ispravljačem pomoću kojega se izmjenična struja pretvara u istosmjernu, a može biti potpomognuto generatorom nekog drugog izvora struje na bazi plinovitog ili tekućeg goriva, termoelektrane ili solarnog napajanja. Izvedbe na važnim područjima uključuju sustav cjevovoda i ostalih ukopanih struktura, ugradnju armiranog čelika u beton te konstrukcije u i na moru.^[8]



Slika 2-3. Shema načela katodne zaštite s vanjskim izvorom struje^[8]

Na slici 2-3 shematski je prikazana katodna zaštita vanjskim izvorom struje. Kao izvor struje služi ispravljač koji izmjeničnu struju pretvara u istosmjernu. Iz tog izvora dobiva se zaštitna struja I_z i potencijal se pomiče prema vrijednosti zaštitnog potencijala E_z . Elektroni teku vanjskim strujnim krugom, a u elektrolitu teče ionska struja. Anoda je od inertnog materijala, ne otapa se, nego se na njoj odvija neka druga elektrokemijska reakcija.^[1]

Za zaštitu podzemnih konstrukcija s vanjskim izvorom struje, anode se redovito ukopavaju u ležišta punjena krupicom od koksa, ugljena ili grafita koja je dovoljno vodljiva da i sama sudjeluje u prijenosu struje na tlo, čime bitno smanjuje potrošak anoda. Anode mogu biti ukopane i više od 500 m daleko od zaštićene konstrukcije. Kod ukopavanja anoda u

gradovima i u tvorničkim krugovima sa mnogo podzemnih instalacija postoji opasnost da dio zaštitne struje iz vanjskog izvora kao lutajuća struja izazove koroziju obližnje nezaštićene metalne konstrukcije (tzv. interferencija). Zato se često izvodi zajednička katodna zaštita dviju ili triju bliskih instalacija (npr. plinovoda i vodovoda). Vijek trajanja anoda trebao bi biti najmanje 10 do 20 godina. ^[5]

2.4.1 Anode u sustavu zaštite vanjskim izvorom struje

Anode u sustavu s narinutom strujom ne moraju biti manje plemenite od strukture koju štite. Kod ove metode, potrošnja anode je znatno manja od zaštite žrtvovanom anodom. Iako se ponekad koriste ostaci starog željeza, najčešće su ove anode izrađene od materijala vrlo otpornih na koroziju kako bi se spriječila njihova pretjerana potrošnja. ^[8]

Anode za ovaj sustav zaštite mogu biti topljive i netopljive. Topljive su najčešće od konstrukcijskog ugljičnog čelika, a netopljive se izrađuju od ferosilicija, grafitu, ugljena, magnetita, nikla, olova, platiniranog titana itd. Potpuno su netopljive samo platinirane, dok se ostale, ipak, polako troše. Prednost čeličnih anoda je niska cijena, a nedostatak topljivost, dok su grafitne i ugljene anode trajnije, ali lako lomljive. Grafitne se radi svoje lomljivost impregniraju lanenim uljem. Neznatna potrošnja anode je ključni uvjet dugotrajnosti ovakvog sistema. ^[5]

Trošenje anode ovisi o jačini primijenjene gustoće struje te također o sastavu okoliša u kojem se djeluje (elektrolitu). Naposljetku, u uvjetima anodne polarizacije, može doći do vrlo velike koncentracije otopine. Na primjer, otapanje titanovih anoda prevučenih platinom značajno je snažnije ako su zakopane u tlo u usporedbi s njihovom upotrebom u morskoj vodi. No, određeni onečišćivači u morskoj vodi mogu povećati brzinu otapanja platiniranih anoda. Odnos između primijenjene struje i otapanja anode nije jednostavne linearne prirode, postotak trošenja može porasti više nego se poveća postotak struje.

Zbog ovih kompleksnih veza, iskustvo je odlučujući čimbenik prilikom odabira prikladnih materijala. Za aktivno korodirajuće materijale brzina potrošnje izražava se u gramima po ampersatu (Ah), dok se kod potpuno pasivnih materijala potrošnja mjeri u mikrogramima. Potrošnja za polupasivne materijale nalazi se negdje između ovih ekstrema.

Odabir vrste materijala koji čini anodu ima važan utjecaj na reakcije koje će se odvijati na njenoj površini. Za potrošne materijale i legure poput otpadaka čelika ili lijevanog željeza, primarna anodna reakcija je otapanje metala. S druge strane, na potpuno pasivnoj površini

anode, reakcija otapanja metala je zanemariva i prevladavajuća reakcija postaje razvoj plina. Kisik može nastati u prisutnosti vode, dok se klor razvija ako su kloridni ioni otopljeni u elektrolitu. Takva reakcija nastanka plina odnosi se i na nemetalne vodljive anode poput grafitne. Moguć je i razvitak ugljikovog dioksida prilikom korištenja ugljika kao anodnog materijala. Na djelomično pasivnim površinama važne su obje reakcije, otapanje metala i razvijanje plina.

Očigledno je da prilikom odabira anode za zaštitu od korozije vanjskim izvorom struje postoji širok spektar materijala. Može se birati između ostataka čelika sve do skupocjenih platinskih anoda. Značajke "idealnog" anodnog materijala za ovaj postupak su nizak postotak potrošnje bez obzira na okoliš i reakcijske produkte, nizak stupanj polarizacije bez obzira na pojedine anodne reakcije, visoka električna provodnost i mali otpor na granici faza anoda/elektrolit, značajna pouzdanost sustava, velika mehanička ispravnost kako bi minimizirali mehaničku štetu prilikom ugradnje i servisiranja sustava te velika otpornost na abraziju i eroziju i u svakom slučaju niska cijena, ali u skladu s cjelokupnim planom rada korozijske zaštite.

U praksi, je važno učinkovito balansirati izvedbenim karakteristikama i cijenom materijala. ^[8]

2.4.2 Izvedba katodne zaštite vanjskim izvorom struje

Katodna zaštita konstrukcije s vanjskim izvorom struje može se provesti na dva načina: konstantnim potencijalom (potenciostatskom metodom) ili konstantom strujom (galvanostatskom metodom).

Za katodnu zaštitu konstrukcije neophodno je konstrukciju polarizirati na zaštitni potencijal E_z kod kojeg se postiže granična struja redukcije kisika. Zaštitni potencijal održava se na toj vrijednosti pomoću narinute struje I iz vanjskog izvora. Katodna zaštita uz konstantni potencijal temelji se na održavanju stalnog zaštitnog potencijala E_z konstrukcije u odnosu na referentnu elektrodu. Konstantni potencijal E_z dobiva se iz uređaja ručnim namještanjem ili iz ispravljača s automatskom kontrolom potencijala.

Uređaj za automatsku kontrolu potencijala posjeduje kontrolnu jedinicu koja održava potencijal konstrukcije konstantnim u odnosu na referentnu elektrodu tako da dozvoljava kontinuiranu promjenu struje prilagođenu potrebama katodne zaštite. Automatskoj regulaciji

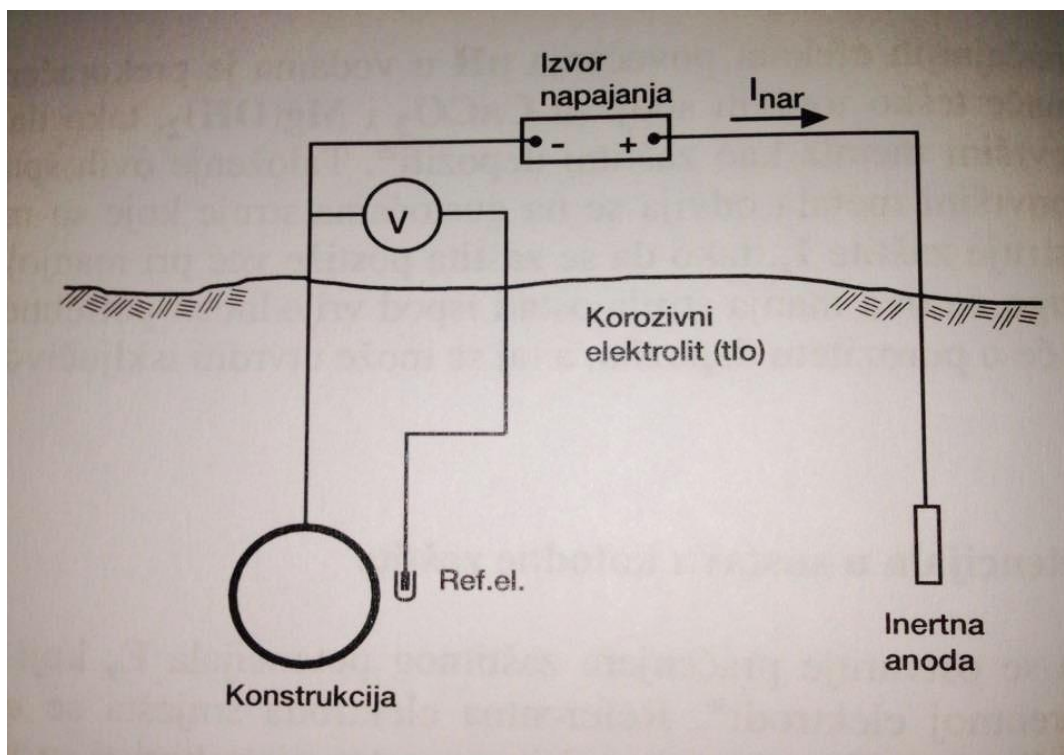
potencijala treba dati prednost pred ručnom regulacijom u nizu slučajeva, npr. kod oštećenja izolacijskog premaza ili prevlake, kad se povećava gola površina metala koja korodira. Kod ručnog namještanja zaštitnog potencijala, ukupna struja I ostaje nepromijenjena, a kako se gola površina povećava, smanjuje se postignuta gustoća struje i konstrukcija više nije dovoljno zaštićena. Automatskom regulacijom potencijal i gustoća struje održavaju se stalnim, tako da se automatski povećava ukupna struja I . Katodna zaštita uz konstantnu struju temelji se na održavanju konstantne struje zaštite I_z . Struja zaštite I_z metalne konstrukcije uvijek se odnosi na određenu veličinu površine koju ta struja mora zaštititi.

Radi toga se katodna zaštita najčešće provodi u kombinaciji s prevlakama ili premazima, tako da je površina koja se štiti ograničena na oštećenja i defekte u prevlaci ili premazu. Prisutnost prevlake reducira potrebnu zaštitnu struju za nekoliko redova veličine, međutim, kako zaštitna svojstva prevlake slabe tijekom vremena, katodna se struja mora povećavati za održanje zaštite eksponiranih površina. Katodna se zaštita nekad primjenjuje i na golim površinama, na primjer kod čeličnih konstrukcija uronjenih u morsku vodu. ^[1]

2.4.3 Raspodjela potencijala u sustavu katodne zaštite

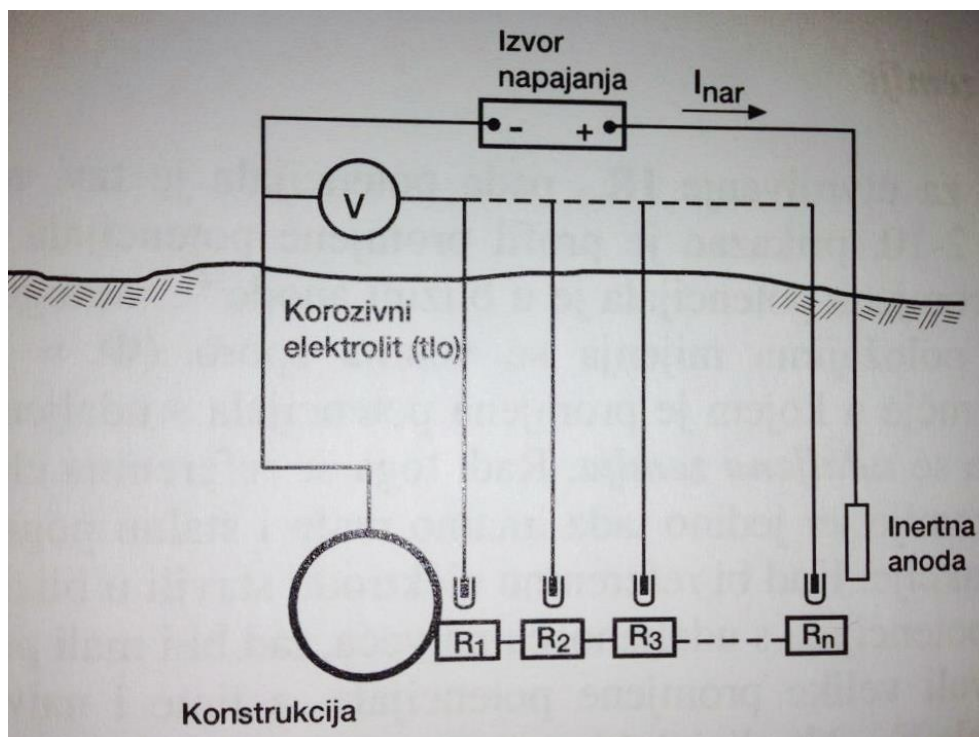
Budući da se raspodjela potencijala u sustavu katodne zaštite, ovisno o geometriji štice predmeta, ne može jednoznačno odrediti, ona uvijek malo odstupa od one vrijednosti koju možemo izmjeriti referentnom elektrodom. Stoga se u ovom radu pokušalo maksimalno se približiti točnom i preciznom očitavanju potencijala kako bi se prikazala potpuna te reprezentativna raspodjela potencijala katodne zaštite čelika.

Katodna zaštita se ostvaruje praćenjem zaštitnog potencijala E_z koji se mjeri prema referentnoj elektrodi. Referentna elektroda smješta se u položaj prema slici 2-4.



Slika 2-4. Mjerenje potencijala štíćene konstrukcije prema referentnoj elektrodi^[1]

Za mjerenje zaštitnog potencijala koristi se voltmetar visoke ulazne impedancije. Visoka ulazna impedancija sprječava dotok struje na referentnu elektrodu koju bi ta struja mogla polarizirati, tj. promijeniti njezin potencijal. Referentna elektroda ne može se staviti na samu površinu konstrukcije radi svojih konačnih dimenzija, tako da se ona uvijek nalazi na nekoj udaljenosti od nje. Posljedica je da vrijednost potencijala koji se mjeri E_m odstupa od stvarne vrijednosti zbog omskog pada potencijala u elektrolitu IR_{el} . Otpor elektrolita i njemu pridruženi IR_{el} postaju to veći, što je veća udaljenost referentne elektrode od štíćene konstrukcije. Na slici 2-5. shematski je prikazan utjecaj pada potencijala IR_{el} na mjereni potencijal štíćene konstrukcije.



Slika 2-5. Utjecaj omskog pada potencijala na mjereni potencijal konstrukcije radi različite udaljenosti referentne elektrode od konstrukcije ^[1]

Potencijal E_m postaje pozitivniji kad se referentna elektroda približava katodi (štićenoj konstrukciji), a negativniji kad se udaljava od nje, tj. približava anodi. Kako je za efikasnu katodnu zaštitu odgovorna samo polarizacija na granici faza metal/korozivni medij, doprinos omskog pada potencijala u mjerenju potencijala konstrukcije mora se eliminirati ili svesti na najmanju moguću mjeru.

Najjednostavniji način uklanjanja IR pogreške postiže se postavljanjem referentne elektrode u neposrednu blizinu metalne konstrukcije. Međutim kod zaštite složenih konstrukcija ili konstrukcija koje su duboko uronjene u morsku vodu to često nije moguće pa se IR potencijal može zanemariti ukoliko je njegova vrijednost unutar dozvoljene pogreške mjerenja. Potrebno je da otpor korozivnog medija bude dovoljno malen i da je referentna elektroda blizu štíćenoj konstrukciji. ^[1]

Raspodjela potencijala u čeličnom bazenu gdje je referentna elektroda prislonjena na površinu katode, a od anode je udaljena za određeni razmak ima zanemarivu IR komponentu, no ovisi o specifičnom otporu elektrolita što želimo i dokazati u ovom radu. Pojavljuje se pad potencijala s povećanjem otpora elektrolita uslijed smanjivanja količine iona koja prenose struju.

3 EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 SVRHA ISPITIVANJA

U ovom radu ispitivana je raspodjela potencijala na ispitnom bazenu sa katodnom zaštitom. Sastoji se od metalne kade volumena 2m^3 koja predstavlja katodu; velike i okrugle ledootporne anode načinjene od titana i dvije manje referentne elektrode, jedna od srebra a druga od cinka. Bazen je oblika kvadra te je na jednoj dužoj stranici, onoj nasuprot anodi, ispitni dio s bijelim zaštitnim premazom(Stopaq), crvenim antikorozivnim lakom za željezo i nezaštićenim dijelom na kojem je vidljiva izražena korozija.



Slika 3-1. Prazan ispitni bazen s vidljivim antikorozivnim premazima i korodiranim dijelovima

3.2 PROVEDBA ISPITIVANJA

Kako bi bez pogreške izvodili pokus izvan sigurnih laboratorijskih uvjeta potrebno je prvo usavršiti mjerenje potencijala na sustavu manjeg razmjera. Iz tog razloga mjeren je potencijal u sustavu zaštite galvanskom anodom te vanjskim izvorom struje u manjoj kadi u laboratoriju.

3.2.1 Korozijska zaštita galvanskom anodom

APARATURA:

-plastična kada napunjena 1/3 vodovodnom vodom

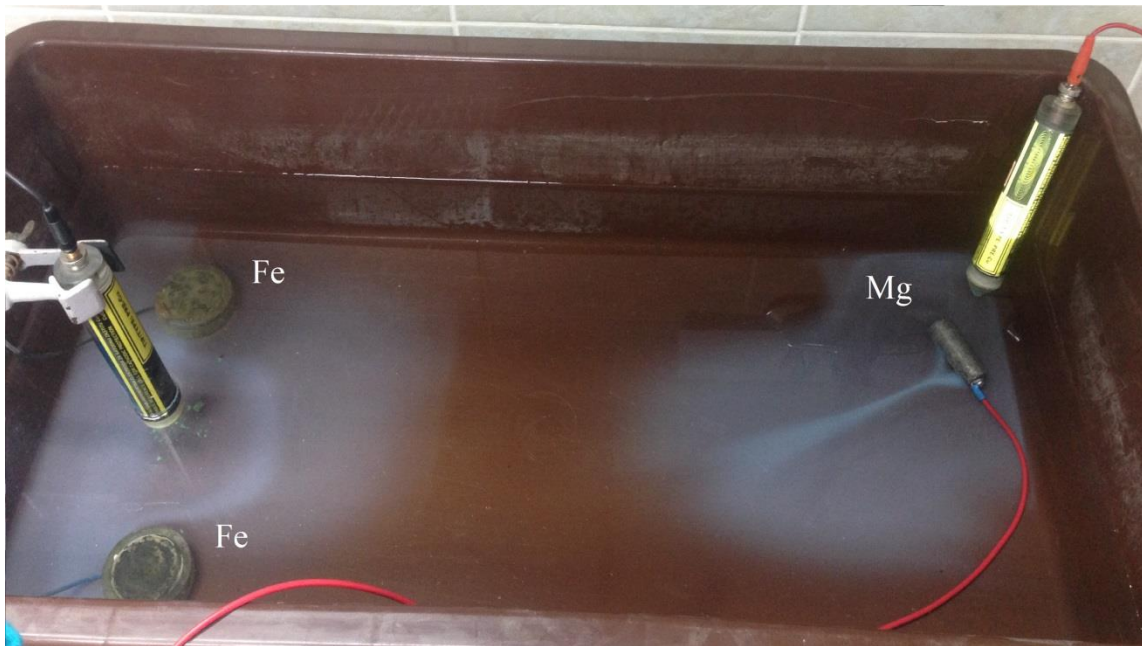
-3 elektrode: KATODA – 2 čelične (jedna zaštićena, jedna ne)

ANODA – magnezij

REFERENTNA ELEKTRODA – Cu/CuSO₄

Čelične (Fe) elektrode moraju se izbrusiti do čiste, glatke površine, a bruse se na isti način u jednu i u drugu stranu (istom brzinom i duljinom trajanja) da se ne bi polarizirala na jednu stranu te da površina nema defekata.

Cu/CuSO₄ referentna elektroda, načinjena od kalupa od plexiglasa u kojem se nalazi se kruti bakrov (II) sulfat-prah i bakar, da bi bila upotrebljiva puni se vodom, ali ne do vrha pri čemu se dobiva otopina modre galice. Vrh elektrode je keramički s polupropusnom membranom kroz koju se tijekom mjerenja može difundirati CuSO₄.



Slika 3-2. Mjerenje potencijala u sustavu katodne zaštite žrtvovanom anodom

3.2.2 Korozijska zaštita vanjskim izvorom struje

APARATURA:

-plastična kada napunjena 1/3 vodovodnom vodom

-3 elektrode: KATODA – 2 čelične (jedna zaštićena, jedna ne)

ANODA – inertna platinska elektroda obložena rutenijevim oksidom

REFERENTNA ELEKTRODA – Cu/CuSO_4

U aparaturu se dodaje izvor struje- tiristor – potencijostat pomoću kojeg kontroliramo potencijal u sustavu.

Spajanjem prvo katode pa anode u strujni krug s referentnom elektrodom na mjernom instrumentu – multimetru izmjeri se potencijal katode i anode a zatim se na potencijostatu namjesti zaštitni potencijal, prethodno određen u pokusu s galvanskom anodom, vrijednosti -1,02V. Kada sustav dosegne zaštitni potencijal, sve dok napojna stanica radi, materijal će biti pod katodnom zaštitom.



Slika 3-3. Sustav katodne zaštite pomoću napojne stanice

3.3 PRIPREMA BAZENA ZA ISPITIVANJE

3.3.1 Rad napojne stanice

Elektrode su kablovima spojene na napojnu stanicu koja očitava vrijednosti struje i potencijala te održava zaštitni potencijal koji zadajemo.

Budući da je katodna zaštita određeno vrijeme bila u funkciji prije našeg pokusa upoznajemo se s radom stanice te tako promatramo raspon potencijala. Namještanjem potencijala na ispravljaču na početnu vrijednost -0,4V te daljnjim povećavanjem potencijala uočavamo burniju reakciju, na anodi se razvijaju kisik i klor, a na katodi vodik i osjeti se miris klora. Prilikom pojačanja do 50V iskoči osigurač, reakcija doseže maksimum, a bazen je pun mjehurića.

3.3.2 Čišćenje bazena i postavljanje anode

Prije samog ispitivanja bazen se mora isprazniti i očistiti te pripremiti podloga, elektrode i otopina.

Ispušta se voda te se izvade elektrode (anoda, referentne elektrode). Zatim se otpoji sve uključeno u struju te se miče mjerna transformatorska stanica. Podigne se krov, a bazen se stavi na viličar i odveze do kanalizacijskog otvora gdje se okrene na bočnu stranu gdje je bila anoda kako bi zaostala voda iscurila van, a bazen se čisti mlazom vode. Bazen se pušta do drugog dana da se osuši kako bi se mogao ponovo pripremiti za uporabu – silikoniziranje otvora za elektrode, namještanja anode i dodatnog silikoniziranja obruba da voda ne može curiti i ako je potrebno nadomještanja epoksidnog premaza koji služi oko anode kao dielektrik da se struje ne bi odmah zatvarale i da se potencijal širi bazenom.

3.3.3 Izrada rastera

Potom su pomoću korektora nacrtane oznake u oblika znaka X na svakih 10 cm po cijeloj kadi. Mjerna mreža sadrži 598 mjernih točaka (slika 3-7). Mreža obuhvaća bliske točke u kojima se očitava potencijal kako bi se uočila raspodjela potencijala na cijeloj površini bazena vrlo precizno te efektivno. Uz pomoć bijele transparentne boje olakšana je vidljivost kroz vodu.



Slika 3-4. Označavanje ispitnih točaka u bazenu

3.3.4 Izrada Lugginove kapilare

Kako bi se što točnije mogao odrediti potencijal u određenoj točki izrađena je Lugginova kapilara. Od dvokomponentne epoksidne smole izliven je šuplji štap u koji je stavljena referentna Cu/CuSO_4 elektroda. Na dno se postavlja gumeni čep kojem se škarama odrezao vrh kako bi se izolirao vrh elektrode. Na taj način elektrodi ne smetaju okolne struje i ona mjeri samo potencijal u točki u koju se prisloni na metalnoj površini. Na referentnu elektrodu pričvršćen je dugačak električni kabel pomoću kojeg se ona povezuje na voltmetar.



Slika 3-6. Lugginova kapilara

3.3.5 Punjenje bazena i puštanje katodne zaštite

Opisani ispitni bazen pripremljen je kako bi se na njemu mogla provesti predviđena ispitivanja.

Bazen se zatim puni vodom do označene razine izolacije te se spajaju svi potrebni priključci i elektrode: referentna Ag/AgCl elektroda, ledootporna anoda. Referentna elektroda Ag/AgCl neće biti od prevelike važnosti budući da potencijal ne podešavamo prema njoj, već mjerimo potencijal u svakoj točki pomoću prijenosne referentne elektrode.

Bazen se ostavi pola sata bez puštanja struje kako bi se stvorili korozijski članci, a potom se pušta konstantna struja jakosti 1,7A izračunata na osnovu vrijednosti u Tablici 1.

Tablica 1. Zahtjevi vrijednosti gustoće struje za zadani okoliš pri antikorozivnoj zaštiti čelika^[9]

OKOLIŠ	Potrebna gustoća struje mA/m ²
GOLI ČELIK:	
Sterilno, prirodno tlo	4,3 – 16,1
Stacionarna, svježa voda	53,8
Morska voda	53,8 – 269,0

RAČUN:

$$P = 6,33m^2$$

$$j = 0,269A/m^2$$

$$j = \frac{I}{P}$$

$$I = j * P = 0,269 \frac{A}{m^2} * 6,33m^2$$

$$I = 1,7A$$

gdje **P** označava površinu štíćene katode. Ovim računom prikazano je koliku struju je potrebno namjestiti na ispravljaču kako bi katodna zaštita ostvarena tom gustoćom struje odgovarala za sva tri mjerenja koja se provode u tri različite koncentracije otopine.

3.3.6 Umjeravanje referentne elektrode

Prije svakog mjerenja treba umjeriti referentnu elektrodu prema drugoj Cu/CuSO₄ koja je u plastičnoj kadi u laboratoriju u zatvorenim uvjetima i uvijek jednaka, a kako bi bili sigurni da je na istom potencijalu umjeravamo je prema cinkovoj elektrodi.

Umjeravanje Cu/CuSO₄ elektroda za naš eksperiment je bitno, budući da takva elektroda nije namijenjena za mjerenja u slanoj vodi, nego je pogodnija za mjerenja koja se izvode u tlu jer je kloridni ioni razaraju, ali za ovakvo kratkotrajno mjerenje ona može poslužiti.

Drugi razlog umjeravanja referentne elektrode je taj da ispitujemo pri različitim koncentracijama elektrolita, tj. elektroda mora biti pogodna za mjerenje u slatkoj i u slanoj vodi-moru, bez promjene potencijala.

To je osobito bitno za brodove koji ploveći prelaze iz mora u "bočatu" vodu gdje naglo opada raspodjela potencijala.

Umjeravanje je prikazano u Tablici 2., provedeno prije svakog mjerenja raspodjele potencijala:

Tablica 2. Umjeravanje referentne elektrode

	Prije 1. mjerenja	Prije 2. mjerenja	Prije 3. mjerenja
$E(\text{REF2})$ vs. $E(\text{Zn})$	+963mV	+765mV	+727mV
$E(\text{REF1})$ vs. $E(\text{Zn})$	+951mV	+751mV	+712mV
$E(\text{REF1})$ vs. $E(\text{REF2})$	−6mV	−12mV	−19mV

$E(\text{REF1})$ – Cu/CuSO₄ elektroda koju želimo umjeriti, s kojom ćemo naknadno izvoditi eksperiment

$E(\text{REF2})$ – Cu/CuSO₄ elektroda prema kojoj umjeravamo

$E(\text{Zn})$ – cinkova elektroda prema kojoj prethodno umjeravamo drugu bakrenu elektrodu

Također kada se uključi napojna stanica koja pušta konstantnu struju, prije svakog mjerenja, nakon što se promjeni koncentracija elektrolita, potrebno je pričekati sat vremena kako bi se sustav stabilizirao.

3.3.7 Specifični otpor elektrolita

Ispitivanja su provedena u tri otopine različite masene koncentracije NaCl-a: 0% (vodovodna voda), 0,5% i 1% i to u volumenu od 1,6 m³ elektrolita.

Kako bi se izmjerilo specifični otpor elektrolita, uzimao se uzorak svake otopine u kojoj se provodio eksperiment. Vrijednosti su dobivene pri 22°C. Mjerenja su napravljena pomoću konduktometra HandyLab 200.

Vrijednosti su prikazane u Tablici 3.:

Tablica 3. Specifični otpor elektrolita za različite koncentracije vodene otopine morske soli

	vodovodna voda	0,5% NaCl	1% NaCl
Specifični otpor/ Ωm^{-1}	14,36	1,42	0,60

3.4 MJERENJE RASPODJELE POTENCIJALA

Ispitivanja nije bilo moguće provesti na izračunatoj struji od 1,7A jer strujni izvor mogao postići maksimalan napona od 50V, tako da je maksimalna dosegnuta struja u vodovodnoj vodi 0,7A i to je parametar koji je korišten za mjerenja u ostalim koncentracijama elektrolita. Već s tom vrijednošću se napon popeo na preko 40V.



Slika 3-7. Prikaz napojne stanice

Provedena su tri mjerenja sa po 598 točaka po plohama na bazenu i rezultat je upisan u tablice. Prije svakog mjerenja potrebno je umjeriti referentnu elektrodu.

4 REZULTATI

4.1 MJERNI PODACI ZA SUSTAV KATODNE ZAŠTITE GALVANSKOM ANODOM

U sustavu katodne zaštite čelika s galvanskom anodom od magnezija odvijale su se slijedeće reakcije na elektrodama:



Izmjerene su početne vrijednosti potencijala na katodama i anodi:

$$E_{k,1} = -0,726\text{V}$$

$$E_{k,1} = -0,724\text{V}$$

$$E_{a,1} = -1,650\text{V},$$

te konačne vrijednosti u 150-oj minuti katodne zaštite za štice i nezaštićenu katodu:

$$E_{k,2} = -0,760\text{V}$$

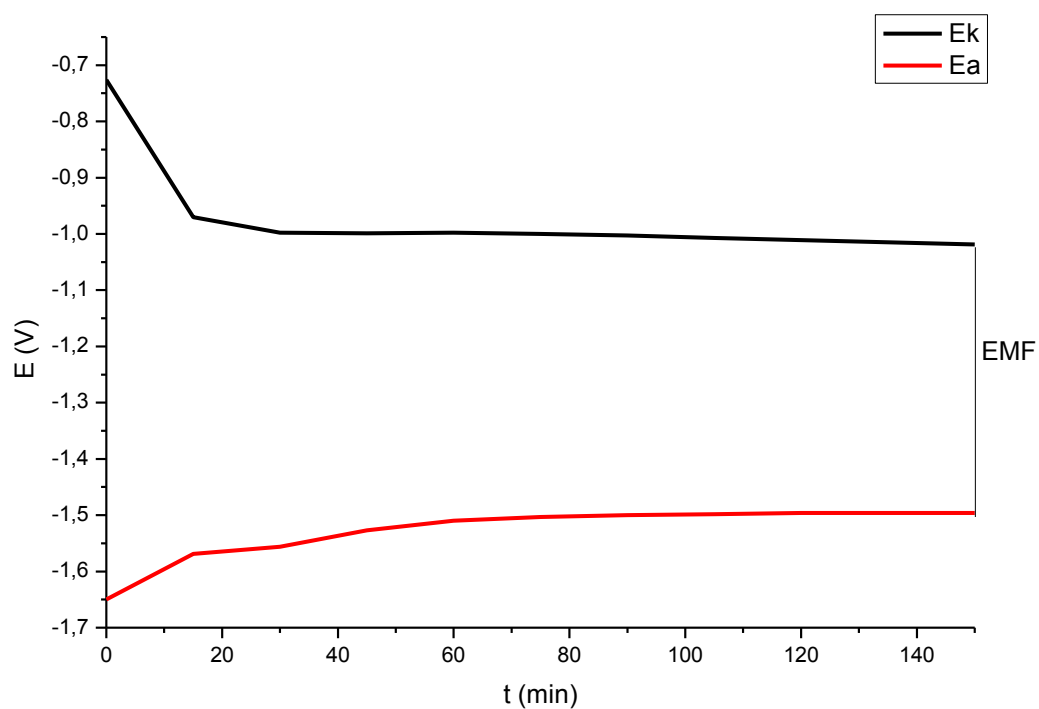
$$E_{kz,2} = -1,065\text{V}.$$

U tablici 4. prikazano je kako su se kretale vrijednosti potencijala anode i štice katode tijekom vremenskog perioda od 1 sat i 15 minuta.

Tablica 4. Vrijednosti potencijala anode i štice katode u vremenu t

t/min	E_{kz}/V	E_a/V
0	-0,726	-1,650
15	-0,970	-1,569
30	-0,998	-1,556
45	-0,999	-1,527
60	-0,998	-1,510
75	-1,000	-1,503
90	-1,003	-1,500
105	-1,007	-1,498
120	-1,011	-1,496
135	-1,015	-1,496
150	-1,019	-1,496

Slika 4-1. grafički prikazuje promjene potencijala elektroda u sustavu, dok je na slici 4-2. vidljiva promjena površine katode koja nije bila pod katodnom zaštitom.



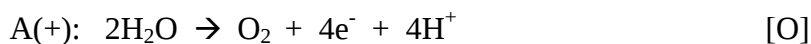
Slika 4-1. Grafički prikaz promjene potencijala anode i katode u galvanском članku



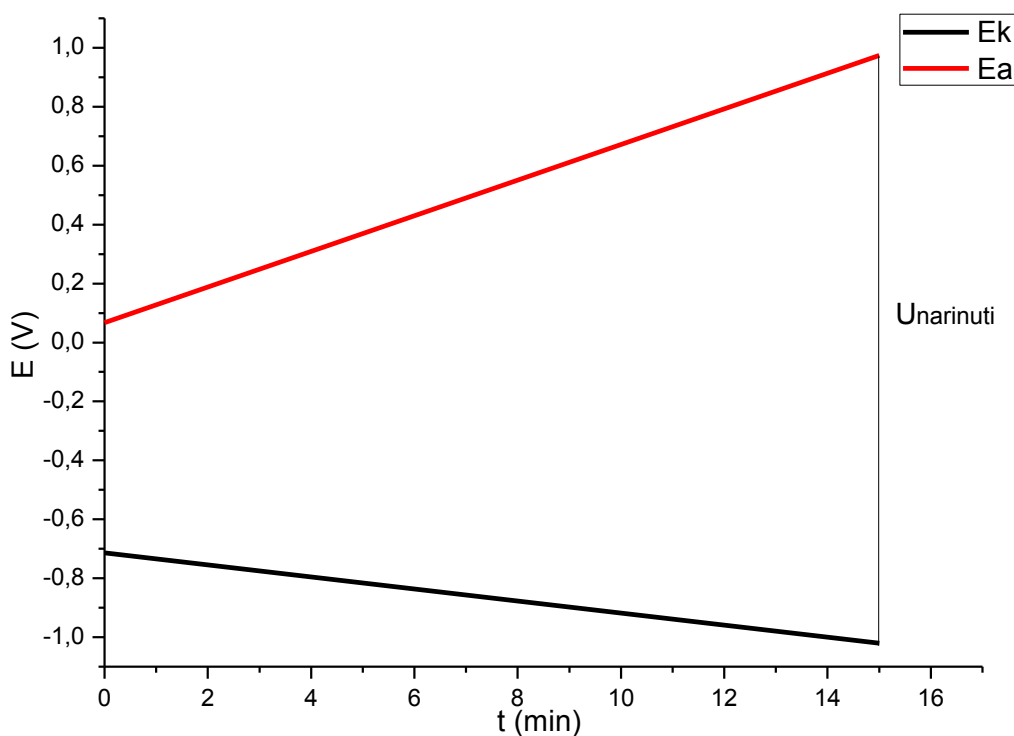
Slika 4-2. Razlika u stanju površine štice i nezaštićene Fe elektrode nakon katodne zaštite

4.2 REZULTATI KATODNE ZAŠTITE VANJSKIM IZVOROM STRUJE

U sustavu katodne zaštite čelika pomoću vanjskog izvora struje te s inernom platinskom anodom odvijale su se slijedeće reakcije na elektrodama:



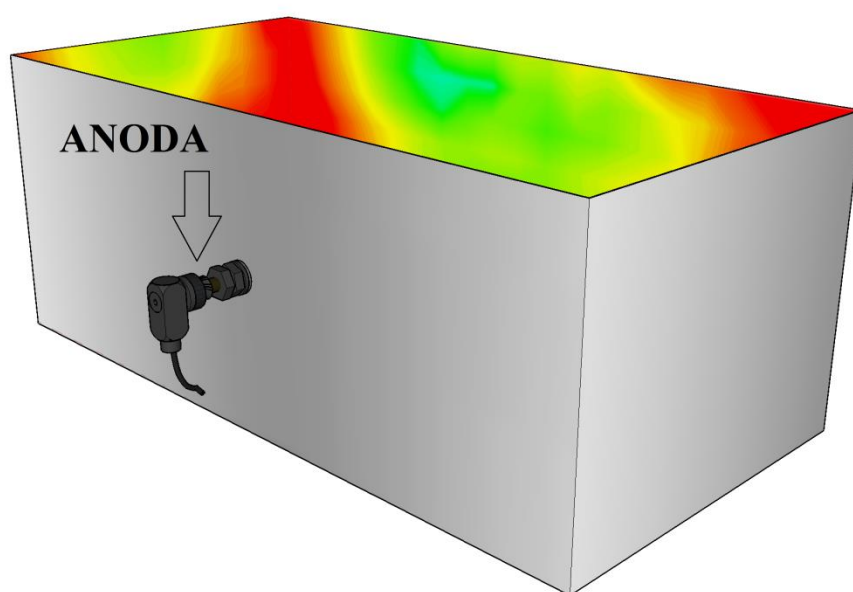
Na slici 4-3. grafički je prikazana linearna promjena potencijala tijekom vremenskog perioda od 15 minuta uzrokovana narinutim naponom U .



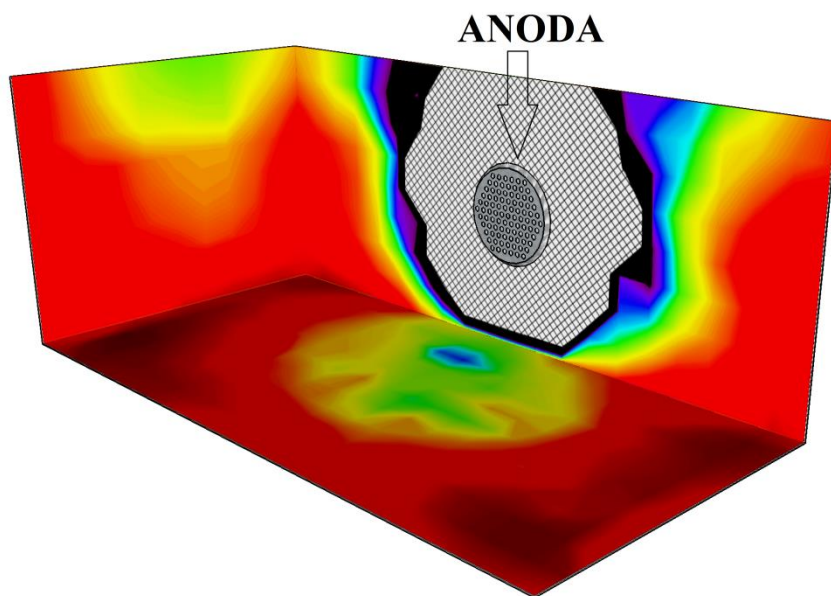
Slika 4-3. Grafički prikaz promjene potencijala anode i katode u sustavu katodne zaštite

4.3 RASPODJELA POTENCIJALA U BAZENU S KATODNOM ZAŠTITOM POMOĆU VANJSKOG IZVORA STRUJE

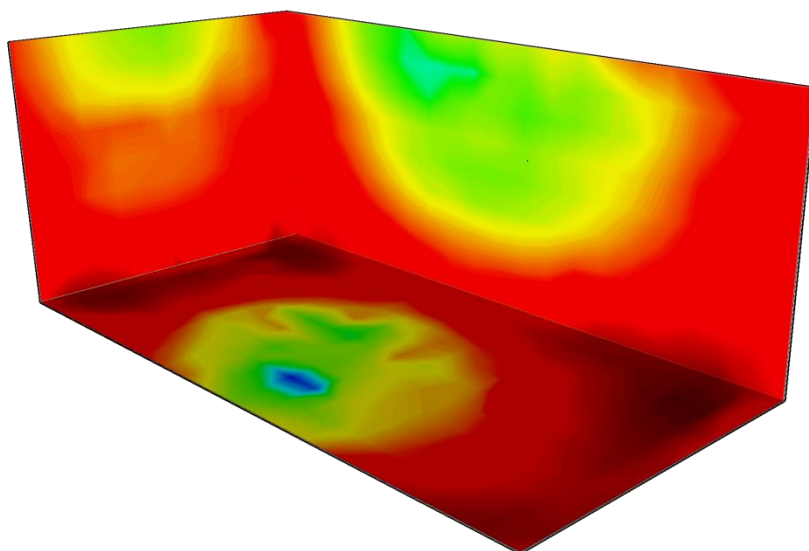
Na sljedećim slikama prikazan je raspored potencijala u sustavu katodne zaštite vanjskim izvorom struje za tri različite koncentracije otopine s pogledima na anodu, suprotno od anode te planarnim prikazom.



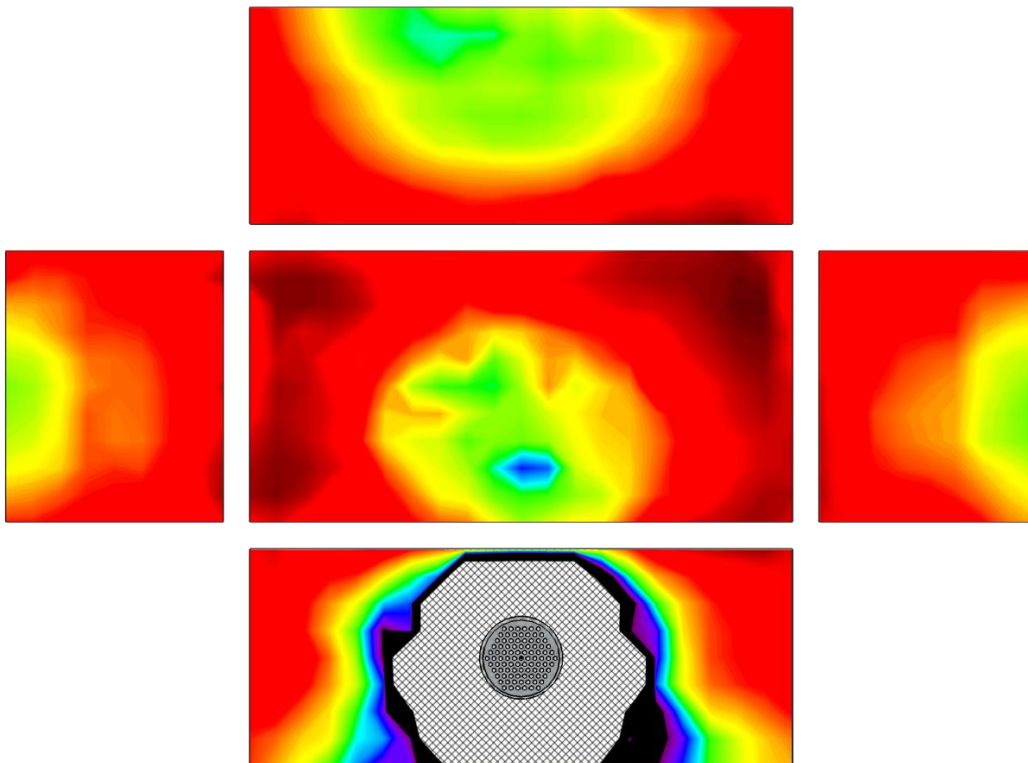
Slika 4-4. Prikaz cijelog bazena te vanjskog dijela anode



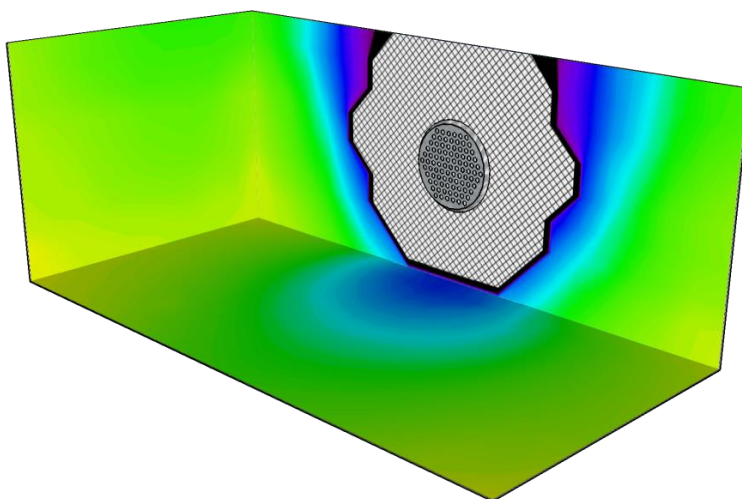
Slika 4-5. 3D prikaz raspodjele potencijala u slatkoj vodi, pogled na anodu



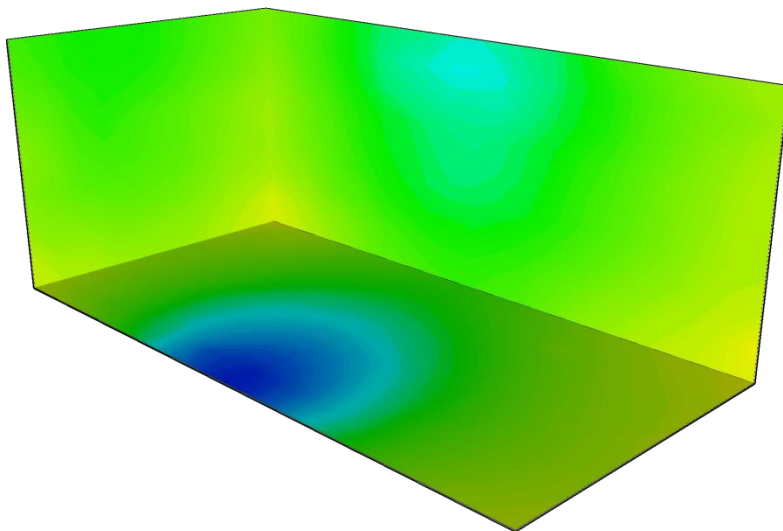
Slika 4-6. 3D prikaz raspodjele potencijala u slatkoj vodi, pogled suprotno od anode



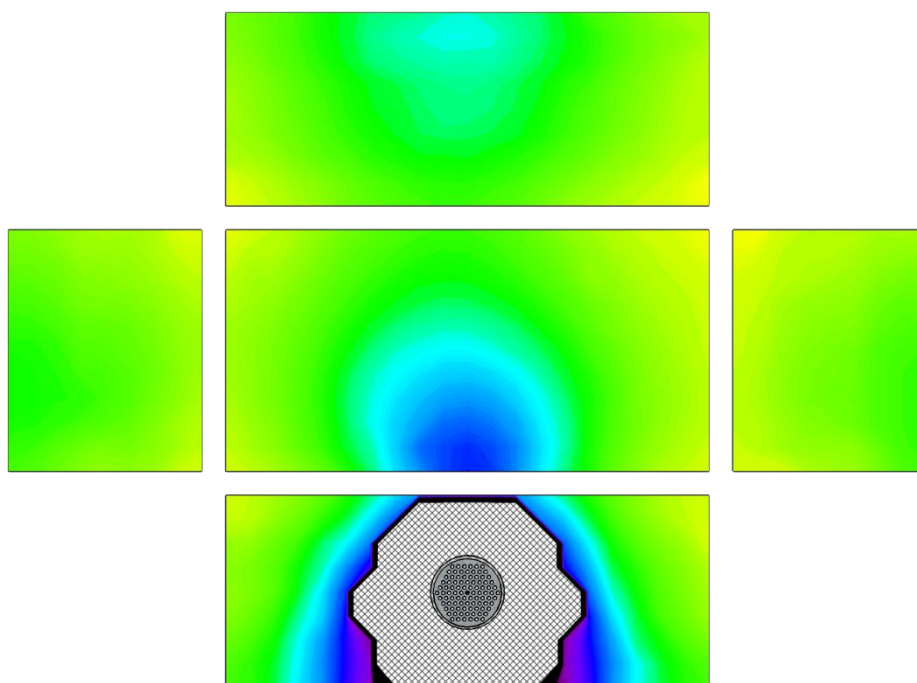
Slika 4-7. Planaran prikaz raspodjele potencijala u slatkoj vodi, 0% NaCl



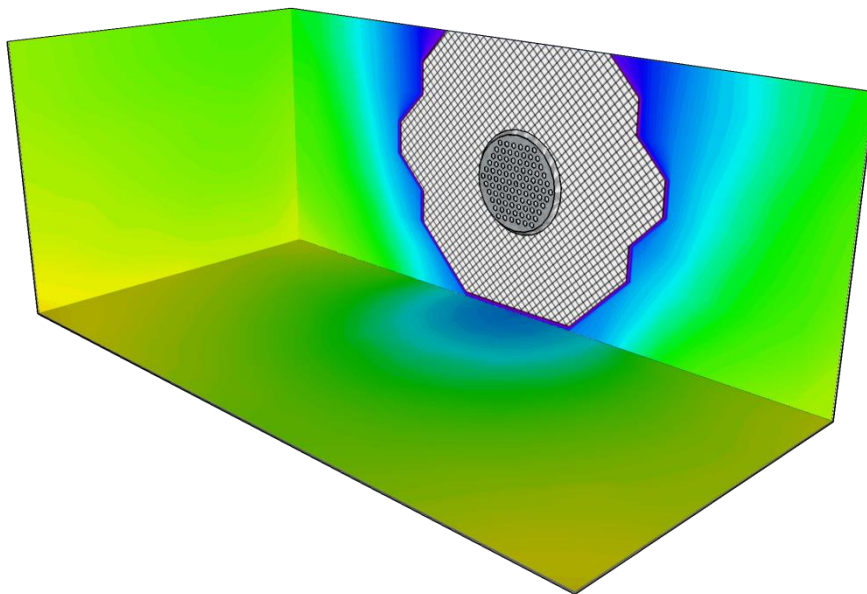
Slika 4-8. 3D prikaz raspodjele potencijala u bočatoj morskoj vodi, 0,5% NaCl, pogled na anodu



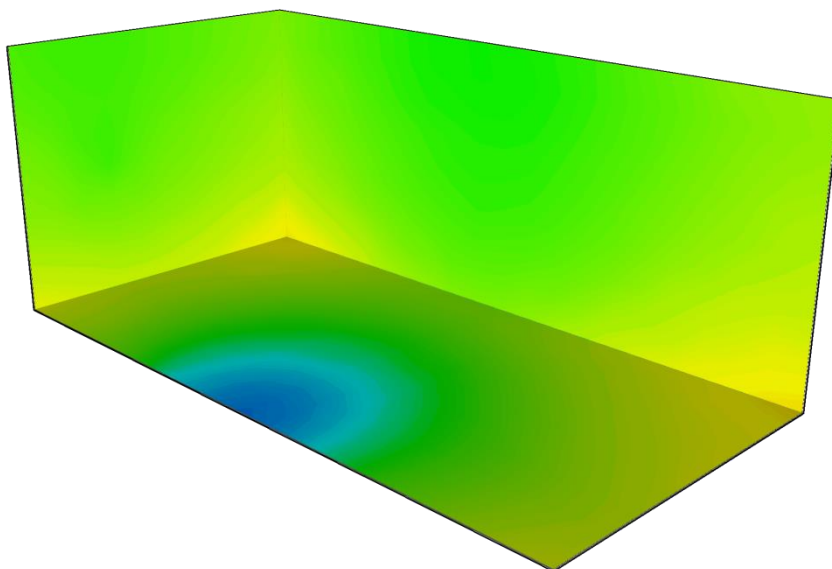
Slika 4-9. 3D prikaz raspodjele potencijala u bočatoj morskoj vodi, 0,5% NaCl pogled suprotno od anode



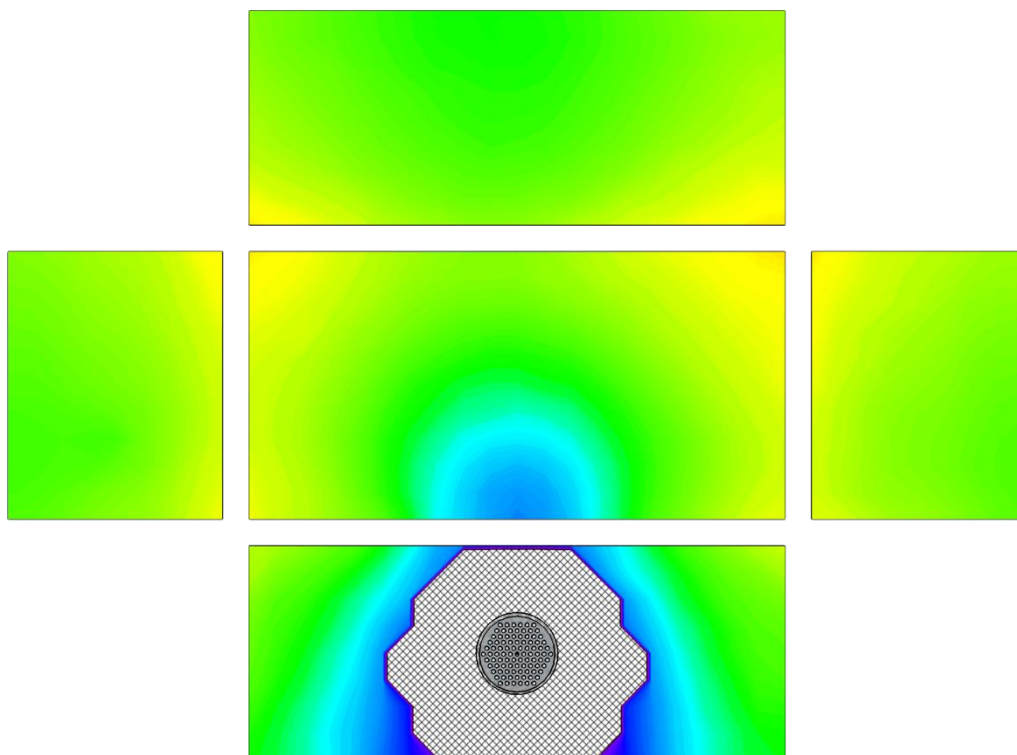
Slika 4-10. Planaran prikaz raspodjele potencijala u bočatoj morskoj vodi, 0,5% NaCl



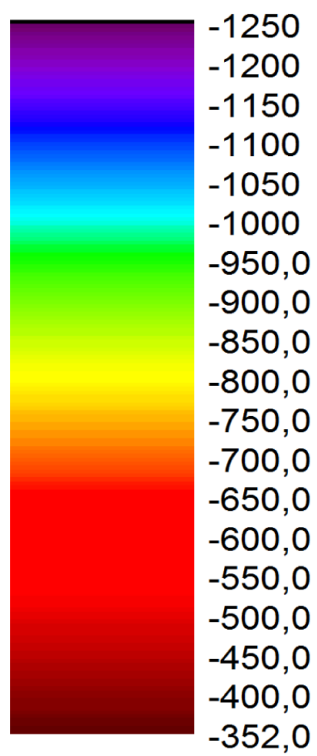
Slika 4-11. 3D prikaz raspodjele potencijala u morskoj vodi, 1,0% NaCl, pogled na anodu



Slika 4-12. 3D prikaz raspodjele potencijala u morskoj vodi, 1,0% NaCl pogled suprotno od anode



Slika 4-13. Planaran prikaz raspodjele potencijala u morskoj vodi, 1,0% NaCl



Slika 4-14. Paleta boja s pripadajućim vrijednostima potencijala u milivoltima [mV]

5 RASPRAVA

5.1 KATODNA ZAŠTITA GALVANSKOM ANODOM

Učinkovito je provedena katodna zaštita žrtvovanom magnezijevom anodom koja ima negativniji standardni redukcijski potencijal od čeličnih katoda. Na slikama je uočljivo da je jedna željezna katoda vrlo dobro zaštićena te je površina ostala čista, a na nezaštićenoj katodi na površini se stvorio sloj korozijskih produkata.

5.2 KATODNA ZAŠTITA VANJSKIM IZVOROM STRUJE

Vanjskim izvorom struje polarizirana je katoda na vrijednosti potencijala katodne zaštite za čelik koje se kreću između -850 mV i -1000 mV te je na grafikonu vidljivo kako je katoda dobro zaštićena zaštitnim potencijalom od -1019 mV.

5.3 UČINKOVITOST LUGGINOVE KAPILARE

Isprobana Lugginova kapilara vrlo dobro radi, vidljiva je raznolika raspodjela korozijskog potencijala. Elektroda bi inače hvatala potencijal oko sebe i prikazivala na voltmetru srednju vrijednost. No, to nije cilj ovog ispitivanja. Pomoću malog otvora na gumenoj kapici na vrhu elektrode stvara se vrlo uski prolaz do otopine, tj. direktni kontakt sa metalnom površinom kako bi referentna elektroda mogla mjeriti potencijal točno u točki u koju je prislonjena.

5.4 RASPODJELA POTENCIJALA U BAZENU S KATODNOM ZAŠTITOM

Rezultati ispitivanja raspodjele potencijala u bazenu s katodnom zaštitom pomoću vanjskog izvora struje pokazuju da je najbolja raspodjela potencijala za sva tri medija u blizini anode i na stranici kade (katode) na kojoj se nalazi anoda jer su dobivene najveće vrijednosti zaštitnog potencijala. Na suprotnoj strani od anode najbolja raspodjela potencijala je od sredine prema vrhu kade, a slično je i s bočnim stranama gdje raspodjela malo više naginje prema anodi. Kutevi i dno imaju najpozitivnije potencijale zbog udaljenosti od anode i jer ona mora slati struju na veću površinu prema dnu i uglovima. Moguće je i da se niži potencijal očitava prema vrhu zbog većeg dotoka kisika.

Ako se krene od najmanje koncentracije elektrolita 0% NaCl prema većoj, očituje se veliki porast ravnomjerne raspodjele potencijala. Pri najnižoj koncentraciji skoro pa i nema katodne zaštite koja počinje pri potencijalima od oko -850mV (početak zelenog područja). Ove vrijednosti potencijala dobivene su većinom samo u neposrednoj blizini anode. Pri koncentracijama otopine s 0,5% i 1% NaCl raspodjela potencijala je povoljna, skoro je cijela površina pod katodnom zaštitom te su rezultati vrlo slični.

Vidljivo je na planarnom grafikonu raspodjele potencijala za otopinu od 1% NaCl da se malo povećavaju žuta područja, dok su pri 0,5% NaCl gotovo pa sve vrijednosti potencijala unutar zelenog pojasa, odgovarajućeg katodnoj zaštiti za željezo i niskougljični čelik, osim kutova koji su u žutom području.

Iz toga možemo zaključiti da aranžman katodne zaštite u slatkoj vodi s jednom anodom nije dostatan jer uslijed velike otpornosti elektrolita struja se zatvara na najbližim točkama uzrokujući time prepolarizaciju, već se najbolja zaštita postiže u vodi s koncentracijom 0,5% NaCl, a osobito 1% NaCl. Problem je kod katodne zaštite u slatkoj vodi što je specifični otpor elektrolita prevelik.

6 ZAKLJUČAK

Dobiveni rezultati jasno pokazuju da raspodjela potencijala ovisi o specifičnom otporu elektrolita; što je otpor veći, raspodjela je lošija. Smanjivanjem otpornosti elektrolita, povećavamo broj iona u samom elektrolitu te time doprinosimo boljem širenju struje od anode prema katodnom prostoru čime poboljšavamo katodnu zaštitu materijala.

Za praktičnu primjenu katodne zaštite važno je poznavati specifični otpor medija kako bi se regulirala struja katodne zaštite tako da cijela konstrukcija bude polarizirana na potencijale unutar područja zaštite. U ovakvim situacijama nepovoljna vodljivost elektrolita može se kompenzirati povećanim brojem anoda.

7 POPIS SIMBOLA I KRATICA

$[O]$ - reakcija oksidacije

$[R]$ - reakcija redukcije

ΔE - razlika potencijala, [V]

$A(+)$ – anoda

AC - izmjenična struja

Ag/AgCl - srebro/srebrov klorid elektroda

b_a - nagib anodnog Tafelovog pravca $b_a = \frac{2.303RT}{(1-\alpha)zF}$

b_k - nagib katodnog Tafelovog pravca $b_k = \frac{2.303RT}{\alpha zF}$

Cu/CuSO₄ - bakar/bakrov sulfat elektroda

DC - istosmjerna struja

e^- - elektron

E - potencijal, [V]

E_a - potencijal anode, [V]

E_k - potencijal katode, [V]

E_{kor} - korozijski potencijal, [V]

E_m - mjereni potencijal, [V]

E_z - zaštitni potencijal, [V]

F - Faradayeva konstanta $F = 9.648 \cdot 10^4 \text{ C mol}^{-1}$

I - struja, [A]

IR_{el} - omski pad potencijala u elektrolitu, [Ω]

I_z - struja zaštite, [A]

j - gustoća struje [A/m^2]

j_g - granična gustoća struje, [A/m^2]

j_{kor} - korozijska gustoća struje [A/m^2]

$K(-)$ – katoda

M - metal

Oks - oksidans

R - opća plinska konstanta $R = 8.314 J K^{-1} mol^{-1}$

Red - reducens

T - termodinamička temperatura, K

t - vrijeme, [min]

z - broj elektrona

α - koeficijent prijenosa

η - prenapon [V] $\eta = E - E^0$

8 LITERATURA

- [1] Jarić B., Rešetić A., *Korozija : Elektrokemijske osnove i katodna zaštita*, Korexpert, Zagreb, 2003.
- [2] Bakula N., *Protection of construction steel with corrosion inhibitors*, diplomski rad, FKIT, Zagreb, 2005.
- [3] <http://www.ace-of-diamonds.com/oplemenjivanje.php> (pristup 06. lipnja 2015.)
- [4] Otmačić Ćurković H., *Metalni materijali, korozija i zaštita-predavanja*, FKIT, Zagreb, 2015.
- [5] Levanić T., *'Metode zaštite od korozije'*, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2009.
- [6] Stupnišek-Lisac E., *Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala*, FKIT, Zagreb
- [7] http://www.pfst.hr/uploads/KZMpredavanje_8.ppt (pristup 04. lipnja 2015.)
- [8] Roberge P. R., *Handbook of Corrosion Engineering*, McGraw – Hill, SAD, 1991.
- [9] Shreir L.L., *Corrosion, Volume 2: Corrosion Control*, Butterworth-Heinemann Ltd; 2nd edition , London, April, 1976.

9 ŽIVOTOPIS



Rođena 3. veljače 1993. u Zagrebu. Od 1999. do 2007. pohađala je OŠ „Grof Janko Drašković“, a od 2007.-2011. godine opću gimnaziju „Tituš Brezovački“ te je obje završila s 5,0 prosjekom ocjena i proglašena učenicom generacije te nagrađena s medaljonom „Nikola Tesla“. Godine 2011. upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer Kemija i inženjerstvo materijala. Na fakultetu se ističe sudjelovanjem u brojnim aktivnostima poput rada na Zavodu za fizikalnu kemiju kao demonstratorica u laboratoriju i aktivnim igranjem odbojke za tim „FKIT Tigrovi“.