

Istraživanje brzine korozije u armiranom betonu

Davor Banić, Dubravka Bjegović, Gojko Balabanić

Ključne riječi

korozija,
armirani beton,
armatura,
istraživanje,
brzina korozije,
gustoća korozijske struje

Key words

corrosion,
reinforced concrete,
reinforcing steel,
study, corrosion rate,
density of corrosion
current

Mots clés

corrosion,
béton armé,
ferrailage, étude,
taux de corrosion,
densité du courant de
corrosion

Ключевые слова

коррозия,
железобетон,
арматура,
исследование,
скорость коррозии,
плотность
коррозионного потока

Schlüsselworte

Korrosion,
Stahlbeton,
Bewehrung,
Untersuchung,
Korrosionsgeschwindigkeit,
Dichte des
Korrosionsstroms

D. Banić, D. Bjegović, G. Balabanić

Izvorni znanstveni rad

Istraživanje brzine korozije u armiranom betonu

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja brzine korozije na dvjema grupama armiranobetonskih uzoraka. Ubrzana korozija armature potaknuta je naizmjeničnim ciklusima vlaženja i sušenja u slanoj komori. Mjerena su tri parametra korozije: elektrokemijski potencijal, električni otpor betona i gustoća korozijske struje. Analizirani su rezultati mjerenja te su kao rezultat dane preporuke za ocjenu stanja armature pri istražnim radovima na postojećim konstrukcijama.

D. Banić, D. Bjegović, G. Balabanić

Original scientific paper

Study of corrosion rate in reinforced-concrete

Results obtained by the study of corrosion rate, conducted on two groups of reinforced-concrete samples, are presented in the paper. The accelerated corrosion of steel was incited by alternating wetting and drying cycles in salt chamber. Three corrosion parameters were measured: electrochemical potential, electrical resistance of concrete, and corrosion current density. The measurement results were analysed and, on that basis, recommendations are given for assessing condition of reinforcing steel in the scope of analysis of existing structures.

D. Banić, D. Bjegović, G. Balabanić

Ouvrage scientifique original

Etude de taux de corrosion en béton armé

Les résultats obtenus au cours de l'étude de taux de corrosion, conduite sur deux groupes d'échantillons de béton armé, sont présentés dans l'ouvrage. La corrosion accélérée de l'acier a été incitée par cycles alternés d'humidification et de séchage dans la chambre salée. Trois paramètres de corrosion ont été mesurés: potentiel électrochimique, résistance électrique de béton, et densité du courant de corrosion. Les résultats de mesure ont été analysés et des recommandations sont données pour l'évaluation de la condition de ferrailage dans le cadre de l'analyse des ouvrages existants.

Д. Банич, Д. Бегович, Г. Балабанич

Оригинальная научная работа

Исследование скорости коррозии в железобетоне

В работе показаны результаты экспериментального исследования скорости коррозии на двух группах железобетонных образцов. Ускоренная коррозия арматуры побуждена чередующимися циклами увлажнения и сушения в соляной камере. Измерялись три параметра коррозии: электрохимический потенциал, электрическое сопротивление бетона и плотность коррозионного потока. Анализированы результаты измерений, и затем как результат даны рекомендации по оценке состояния арматуры при исследовательских работах на существующих конструкциях.

D. Banić, D. Bjegović, G. Balabanić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Untersuchung der Korrosionsgeschwindigkeit im Stahlbeton

Im Artikel sind die Ergebnisse einer experimentalen Untersuchung der Korrosionsgeschwindigkeit dargestellt, durchgeführt an zwei Gruppen von Stahlbetonprüfkörpern. Beschleunigte Korrosion der Bewehrung wurde durch wechselweise Zyklen von Befeuchtung und Trocknung in der Salzkammer angeregt. Gemessen wurden drei Korrosionsparameter: elektrochemisches Potential, elektrischer Widerstand des Betons und Dichte des Korrosionsstroms. Die Messungsergebnisse sind analysiert und als Resultat sind Empfehlungen gegeben für die Bewertung des Zustands der Bewehrung bei Untersuchungsarbeiten an bestehenden Konstruktionen.

Autori: **Davor Banić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb; prof. dr. sc. **Gojko Balabanić**, dipl. ing. fiz., Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka

1 Uvod

Korozija čelične armature najčešći je uzrok prijevremenog propadanja i skraćivanja uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija. Postoji više slučajeva u kojima je uzrok sloma armiranobetonske konstrukcije pripisan uznapređovalom propadanju konstrukcije zbog djelovanja korozije [1][2][3][4][6]. Ipak u većini slučajeva doseganje završetka uporabnog vijeka konstrukcije očituje se gubitkom uporabivosti konstrukcije ili njezina dijela koju karakterizira raspucavanje i odlamanje betona te velika deformiranja nosivih i nenosivih elemenata. Kontrola i monitoring korodirane čelične armature od velike su važnosti u praksi pri ocjeni stanja armiranobetonskih konstrukcija. Rano prepoznavanje znakova propadanja omogućuje donošenje odluka za poduzimanje preventivnih i zaštitnih mjera već u početnim stupnjevima propadanja armiranog betona.

Danas kada se razvija velik broj različitih metoda i tehnika popravaka betonskih konstrukcija, kao što su npr. desalinizacija, realkalizacija i katodna zaštita, razumijevanje i kvantificiranje djelovanja korozije čelične armature na ponašanje konstrukcije postaje sve važnije.

Korozija čelične armature bitno utječe na mehanička svojstva armiranog betona. Djelovanje korozije najčešće se očituje:

1. U gubitku nosivosti konstrukcijskog elementa zbog lokalnog ili jednolikog smanjenja poprečnog presjeka čelične šipke
2. U gubitku nosivosti zbog smanjenja i gubitka prionljivosti između betona i armature
3. U gubitku duktilnosti elementa zbog nejednolike raspodjele poprečnog presjeka uzduž duljine šipke i koncentracije naprezanja povezane sa naglim promjenama u geometriji

Ispitivanja korozije u armiranobetonskim konstrukcijama *in situ* dugo traju. Zbog toga je za projektiranje trajnih konstrukcijskih elemenata te za odabir prikladnih materijala i zaštitnih sustava korisno upotrijebiti ubrzane procese korozije. Takvi ubrzani procesi služe za dobivanje kvalitativnih podataka o ponašanju armiranog betona pod djelovanjem agresivnog okoliša u relativno kratkom razdoblju od nekoliko mjeseci do tri godine. Ti podaci mogu biti posebno korisni kada je uporabni vijek elementa ili čitavog sustava ugrožen agresivnim okolišem.

Provedeno je istraživanje dio opsežnijega znanstvenog istraživanja provedenog u Institutu građevinarstva Hrvatske u sklopu izrade magistarskog rada, cilj kojega je bio detaljnije istražiti ponašanje armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata u korozivski agresivnom okolišu kao što su priobalna područja ili konstrukcije izložene djelovanju soli za sprječavanje odmrzavanja.

Cilj istraživanja opisanog u ovome radu bio je doći do spoznaja koje će pomoći pri ocjeni trenutačnog stanja korodirane armature pri redovnim i izvanrednim pregledima armiranobetonskih konstrukcija te na koji način stupanj korozije utječe na prionljivost između betona i armature.

U svijetu je najveći broj eksperimentalnih istraživanja utjecaja korozije armature na armiranobetonske konstrukcije u posljednjih dvadesetak godina proveden uporabom klorida u sastavu betona ili izlaganjem otopini u kojoj su otopljeni kloridi. Razlikujemo dva osnovna postupka poticanja ubrzane korozije uzoraka izloženih slanim otopinama. U prvom slučaju uzorci se, djelomično ili potpuno, potapaju u slanu otopinu i priključuju na vanjski izvor struje različite jakosti. Struja na ovakav način uzrokuje polarizaciju čelične šipke te dolazi do ubrzanja korozije. Veličina jakosti struje varira s obzirom na ciljano trajanje istraživanja te na način definiranja stupnjeva korozije. Takav način poticanja ubrzane korozije najčešće je uzrokovao jednoliku, a ne točkastu koroziju (engl. *pitting corrosion*) jer se potapanjem uzoraka smanjuje dostupnost kisika.

Pregledom šipki na postojećim konstrukcijama, najčešći oblik korozije uzrokovane kloridima bila je upravo točkasta korozija.

Potapanje uzoraka sprječava dostupnost kisika u kemijskim reakcijama, pa se tako nastali produkti korozije i ekspanzivne sile mogu razlikovati od rezultata na uzorcima koji su bili izloženi ciklusima vlaženja i prosušivanja.

U drugom slučaju uzorci se periodično vlaže otopinom koja sadrži kloride i prosušuju na višim temperaturama. Takav način poticanja korozije traje dulje, ali nastali produkti korozije i njihovo djelovanje na okolni beton slični su onome u stvarnosti.

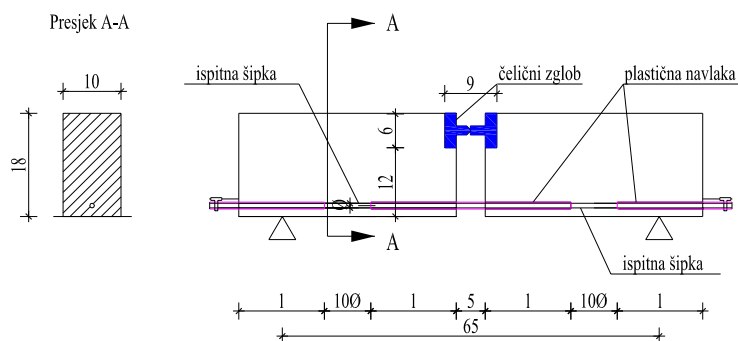
U radu je izložen način poticanja ubrzane korozije i rezultati provedenih mjerenja parametara korozije na armiranobetonskim uzorcima tijekom razdoblja od 1150 dana.

2 Eksperimentalno istraživanje

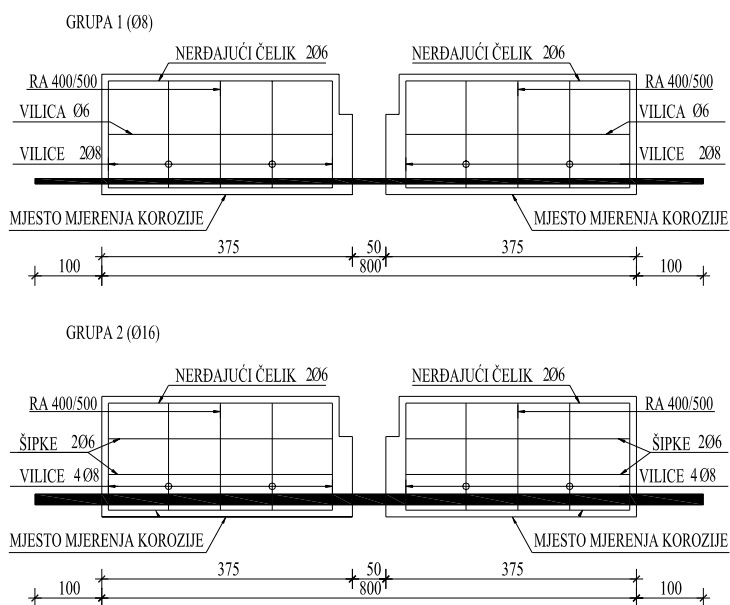
2.1 Oblik i dimenzije uzoraka

Ispitni su uzorci izrađeni u skladu s normom HRN.U1.M1.090 i preporukama RILEM/CEB/FIP [5] za ispitivanje prionljivosti armature i betona. Armiranobetonske su grede širine 10 cm, visine 18 cm i duljine 80 cm. Svaki se uzorak sastoji od dvije polovice povezane ispitnom šipkom na donjoj strani te čeličnim zglobovima na gornjoj strani. Osnovna uloga zgloba jest omogućavanje rotacije dviju polovica greda tijekom ispitivanja prionljivosti. Na kra-

jevima uzoraka ispitna šipka viri oko 10 cm da bi se omogućilo pričvršćivanje uređaja za mjerenje pomaka šipke, ali i uređaja za mjerenje elektrokemijskog potencijala i gustoće korozivne struje, važnih parametara korozije (slika 1.).



Slika 1. Ispitni uzorak za ispitivanje prionljivosti



Slika 2. Armatura uzoraka za ispitivanje prionljivosti

Ispitna je šipka postavljena simetrično prema poprečnom betonskom presjeku. Zaštitni sloj betona do spona iznosi 1,0 cm, a do glavne šipke 1,8 cm. Odnos c/\varnothing (c je zaštitni sloj betona do vanjske površine vilice, a \varnothing promjer ispitne šipke) za prvu grupu uzoraka iznosi $c/\varnothing = 1,0/0,8 = 1,25$ i $c/\varnothing = 1,0/1,6 = 0,625$ za drugu grupu uzora-

ka. Šipke su u kontaktu s betonom samo na duljini $10\varnothing$, u sredini svakog dijela uzorka, gdje je \varnothing promjer šipke. Duljina $10\varnothing$ smatra se dovoljno kratkom pa su naprezanja prionljivosti na toj duljini jednoliko raspodijeljena. Željena duljina prionljivosti postignuta je tako da se sva duljina čelične armature, osim one u kontaktu s betonom, obloži cijevima od PVC-a tj. plastičnim navlakama (slika 1.). Sva je uzdužna armatura i sva poprečna armatura (osim spona na području duljine prionljivosti) ispitnih uzoraka od nehrđajućeg glatkog čelika vrste X5CrNi-18-10 (W.Nr. 1.4301). Armaturni su koševi povezani s plastičnim vezicama ne bi li se osigurala dobra veza šipki u visokim stupnjevima korozije.

Svojstva čelične armature prikazana su u tablici 1. Ukupno je izrađeno trideset armiranobetonskih uzoraka [7].

Sastav betona čini cement, PC 30dz-45 S, agregat s najvećim zrnom 16 mm i voda. Maseni odnosi sastava betona iznose 1:2:5 (cement: fini agregat: krupni agregat) i prikazani su u tablici 2. Postignuti vodocementni omjer iznosio je 0,52, konzistencija svježeg betona je 15 cm, postignuta prosječna tlačna čvrstoća betona starog 28 dana iznosila je 40 N/mm^2 , statički modul elastičnosti betona 32.600 N/mm^2 , a vlačna čvrstoća betona $4,4 \text{ N/mm}^2$.

Tablica 2. Sastav betona

Cement (kg)		380
Agregat	0 – 1 mm (%/kg)	20/358
	1 – 4 mm (%/kg)	25/448
	4 – 8 mm (%/kg)	20/358
	8 – 16 mm (%/kg)	35/626
voda (l)		198
agregat/cement K		4,71

2.2 Ubrzanje procesa korozije

Za potrebe ubrzanja procesa korozije armature, a u sklopu cjelokupnoga znanstvenog istraživanja, pripremljena je velika slana komora. Slana je komora široka 2 m, du-

Tablica 1. Karakteristike armature pri uzdužnom vlačnom ispitivanju [20]

Opis šipke	Vrsta materijala	Ploštinapresjeka (mm^2)	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ (N/mm^2)	Vlačna čvrstoća R_m (N/mm^2)	Izduljenje A_{10} (%)	Modul elastičnosti E (N/mm^2)
šipka $\varnothing 6$	Nehrđajući	26,4	739	922	29,1	210 000
šipka $\varnothing 8$	BSt 500S	53,6	606	707	14,6	210 000
šipka $\varnothing 16$	BSt 500S	201	622	726	15,0	210 000

gačka 6 m i 2,5 m visoka i u nju se mogu smjestiti svi armiranobetonski uzorci (slika 3.). U komori je postavljen sustav reguliranja temperature okoline u rasponu od 0° to 90° C i relativne vlažnosti zraka (RH) u rasponu 10 % do 100 %. U slanoj komori ugrađene su cijevi s automatskim prskalicama, na stropu i u podu, kojima se na uzorke raspršuje slana voda u obliku sitnih kapljica. Pokraj komore nalazi se rezervoar obujma oko 5000 cm³ u kojem je pohranjena slana voda (slika 3.) s koncentracijom otopine od 3,8 %. Slanost ove otopine predstavlja prosječnu godišnju slanost na srednjem Jadranu. Ona se uz pomoć sustava uronjene pumpe i cijevi dovodi do slane komore. Na slici 4. prikazana je unutrašnjost kontrolne prostorije s računalom, pumpom te ostalim pomoćnim uređajima s pomoću kojih se upravlja sustavom uz kontrolirane uvjete u slanoj komori. Slana je komora automatizirana te ima mogućnost simuliranja raznih uvjeta okoline.



Slika 1. Prikaz slane komore

U prostoriji pokraj komore provodi se kontinuirana (24 sata) kontrola uvjeta okoline u komori. Osnovni su parametri kojima se karakteriziraju svojstva okoline relativna vlažnost i temperatura zraka. Oni se prate uz po-



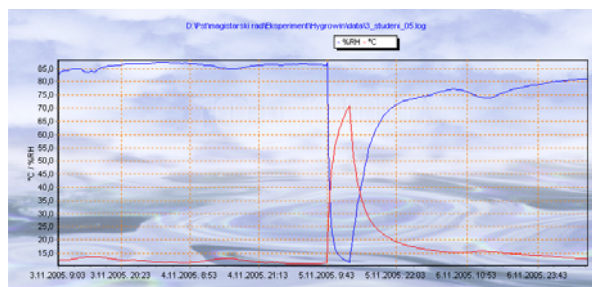
Slika 4. Kontrolna prostorija

moć sonde postavljene unutar komore, a sve se kontinuirano registrira na osobnom računalu programskim paketom HYGROWIN.

Ubrzani proces korozije potaknut je razarajućim naizmjeničnim djelovanjem ciklusa vlaženja površine betonskih uzoraka i ciklusa sušenja koji se postiže s povišenom temperaturom od oko 90° C. Ciklusima vlaženja i sušenja oponaša se područje plime i oseke priobalnog područja, kao najagresivniji okoliš za armiranobetonske konstrukcije. Jedan karakterističan ciklus vlaženja i sušenja traje tri dana, tako da se tipičan tjedan sastoji od dva ciklusa vlaženja i sušenja te jednog dodatnog dana prirodnog prosušivanja [8][9]

Tablica 3. Tjedni termohigrometrijski uvjeti tijekom eksperimentalnog istraživanja

Dan u tjednu	Temp. °C	Vlaž. RH (%)	Vlaženje s NaCl	Pribilježka
Poned.	20	-	0,05 h i 2 h pauze (8 h)	vlaženje
Utorak	20	80	-	prirodno sušenje
Srijeda	70 - 80	20	-	sušenje
Četvrtak	20	-	0,05 h i 2 h pauze (8 h)	vlaženje
Petak	20	80	-	prirodno sušenje
Subota	70 - 80	20	-	sušenje
Nedjelja	20	80	-	prirodno sušenje



Slika 5. Promjena temperature i relativne vlažnosti u jednom ciklusu od tri dana

Odabrani je ciklus karakteristična prosječna izmjena plime i oseke Jadranskog mora. Tablica 3. prikazuje tipične tjedne termohigrometrijske uvjete tijekom eksperimentalnog istraživanja zajedno s uvjetima okoline u komori svakog dana u tjednu. U danima vlaženja uzoraka (ponedjeljak i četvrtak) ciklus vlaženja sastojao se od 2 minute prskanja te 118 minuta prirodnog sušenja. Takav se postupak ponavljao ukupno četiri puta tijekom dana. Na slici 5. prikazana je karakteristična promjena temperatu-

re (crvena linija) i relativne vlažnosti zraka (plava linija) u jednom ciklusu ubrzane korozije.

2.3 Mjerenje parametara korozije

Prije svakog mjerenja, dijelovi šipki koji vire 10 cm iz uzorka, pažljivo su očišćeni od slojeva produkata korozije čeličnom četkom da bi se osigurao kvalitetan spoj s brojačkom elektrodom. Svi su uzorci vizualno pregledavani i opažanja dokumentirana, a pogotovo mjesta kontakta rebraste armature i betona, da bi se utvrdio rast crvenih mrlja na površini i uočio trenutak pojave uzdužne pukotine na površini betona.

Na svakom uzorku definirana su dva mjesta, po jedno na svakoj polovici, na kojima su mjereni parametri korozije. Mjerna su se mjesta nalazila točno u sredini duljine prijanjanja čeličnih šipki i betona, tj. na kojima je ispitna šipka u kontaktu s betonom (slika 1.).

Parametri korozije mjereni su galvanostatičkom impulsnom metodom koja se temelji na polarizaciji armature primjenom konstantne struje male jakosti od 25 μA [10]. Ova jakost struje uzrokuje eksponencijalnu anodnu promjenu potencijala armature. Parametri korozije koji su praćeni u eksperimentu su elektrokemijski potencijal, E (mV), otpor betona, R ($k\Omega$), i gustoća korozijske struje, I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Mjerenje parametara korozije uređajem *GalvaPulse* provedeno je periodički tijekom trajanja cijelog eksperimenta, u razdoblju od 1150 dana, da bi se pratila korozijska aktivnost (slika 6.). Mjerenje se u početku provodilo češće, svakih sedam dana, a kasnije svaka dva do tri tjedna. Pri svakom su mjerenju atmosferski uvjeti u slanoj komori bili približno jednaki, temperatura od 15° do 20°C i RH \approx 40 %. Razlog je takvu režimu smanjenje utjecaja temperature i relativne vlažnosti zraka na točnost izmjerenih podataka, posebno elektrokemijskog potencijala, zbog različitih uvjeta okoline u slanoj komori.



Slika 6. Mjerenje uređajem GalvaPulse

3 Rezultati istraživanja

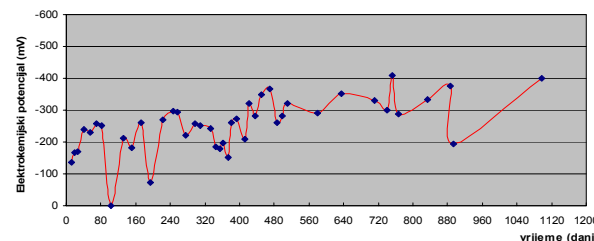
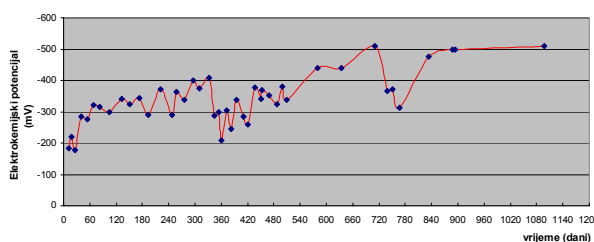
3.1 Elektrokemijski potencijal

Tablica 4. Kriteriji za procjenu stanja armature na osnovi mjerenja elektrokemijskog potencijala

E (mV)	Kriterij
$-200 < E$	Vrlo velika vjerojatnost (90%) da nema korozije
$-200 < E < -350$	Neodređenost ima li korozije
$E > -350$	Vrlo velika vjerojatnost (90%) za prisutnost korozije

Rezultati mjerenja pokazuju velike negativne vrijednosti elektrokemijskih potencijala (negativnije od -200 mV) kod uzorka armiranih šipkama promjera 8 mm već u relativno kratkom vremenu (40 dana) od početka ubrzanog procesa korozije. Ovako veliki potencijali pokazuju da je čelik lokalno postao anoda i da više nije pasivan te da su ova mjesta u aktivnoj koroziji.

Približno to se podudara s razdobljem tijekom kojeg je granična koncentracija klorida na površini šipki dostigla vrijednost od 0,4 % mase cementa. Sadržaj klorida određen je uzimanjem praha na kontrolnim uzorcima i ispitivanjem kemijskom analizom prema HRN EN 196-21:2003 [7]. Duljina trajanja ovog tzv. razdoblja inicijacije korozije armature proračunana je također uz pomoć determinističkoga matematičkoga modela trajnosti LIFE 365 i dobiveni su podudarajući rezultati [7]. U tablici 4. dani su kriteriji za procjenu korozije armature prema elektrokemijskom potencijalu za bakrenu elektrodu.



Slika 7. Promjena elektrokemijskog potencijala u razdoblju od 1150 dana: (gore) uzorak sa šipkom promjera 8 mm, (dolje) uzorak sa šipkom promjera 16 mm

Iz rezultata prikazanih na slikama 7.(gore) i 7.(dolje) može se zaključiti da šipka manjeg promjera (8 mm) dostiže negativne elektrokemijske potencijale brže (40

dana) od šipke promjera 16 mm (55 do 70 dana). Elektrokemijske potencijale negativnije od -350 mV (90 postotna vjerojatnost za prisutnost korozije, prema tablici 4.) uzorci sa šipkom promjera 8 mm dostižu približno 130. dana eksperimenta, dok uzorci sa šipkom 16 mm isti potencijal dostižu u prosjeku tek oko 470. dana eksperimenta. Iz prethodno navedenog vidi se da šipke manjeg promjera, u jednakoj agresivnoj sredini korodiraju brže od šipki većih promjera u istom razredu čvrstoće betona (C 30/37).

Na primjer, oko 120-og dana elektrokemijski potencijal uzoraka sa šipkom \varnothing 8 prosječno iznosi -350 mV, dok uzoraka sa šipkom \varnothing 16 iznosi samo -250 mV. Prema tablici 4. za uzorke sa šipkom \varnothing 16 u istom razdoblju ne može se sa sigurnošću tvrditi da su u stanju aktivne korozije.

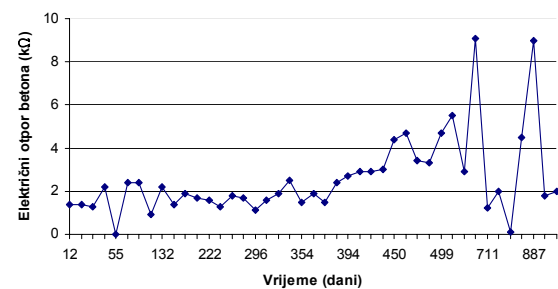
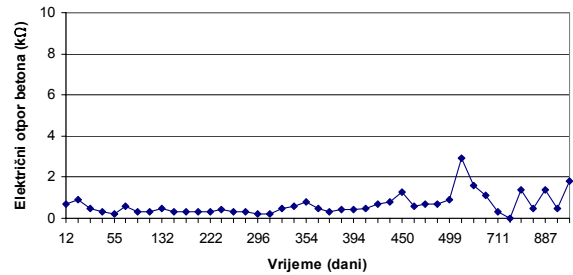
Na slikama 7. vidi se promjena potencijala tijekom vremena i ona se uglavnom pripisuje malim promjenama RH i temperature okoline i samog betona. Veći padovi elektrokemijskog potencijala za trajanja eksperimenta rezultat su usporavanja korozije zbog smanjenja dostupnosti kisika, ali i vlage, do šipaka zbog nastanka slojeva hrđe na spoju šipka-beton, kao i zbog same metode mjerenja parametra korozije. Posljednje navedeno proizlazi iz činjenice da su mjerenja provedena periodično tokom trajanja eksperimenta, pri čemu se vlažnost same površine betona kao i zaštitnog sloja znatno razlikovala. Primijećene su veće oscilacije elektrokemijskog potencijala kod uzoraka sa šipkom 16 mm, nego kod uzoraka sa šipkom promjera 8 mm glede vrijednosti izmjenjenog potencijala između dvaju mjerenja (slike 7.(gore) i 7.(dolje)). Zamijećeno je također da su vrijednosti potencijala nakon dana vlaženja bila znatno veća nego kada su mjerenja provedena nakon dana prosušivanja. Iz navedenog se zaključuje da vlažnost betona ima veću ulogu u brzini korozije armature od kisika. Općenito se može zaključiti da unatoč pojedinačnim smanjenjima potencijala gledajući ukupno, potencijali se povećavaju do vrlo velikih vrijednosti, čak i do -500 mV nakon 1150 dana (slika 7. gore).

3.2 Otpor betona

Električni otpor betona jako ovisi o vlažnosti okoline i betona pa je zato razdoblje s velikom vlažnošću (RH>90 %) rezultiralo povećanjem mjerene korozijske struje zbog smanjenja električnog otpora betona, dok su manje struje zabilježene kad je beton suh, tj. kad su mjerenja provedena nakon razdoblja zagrijavanja.

Na slikama 8.(gore) i 8.(dolje) vidi se da se otpor betona s vremenom povećava kod šipki promjera 16 mm i više od četiri puta (2 do 9,1 k Ω), a kod šipki 8 mm u prosjeku 2 puta (0,7 do 1,6 k Ω) prema početnim vrijednostima u eksperimentu. Analizom rezultata mjerenja svih 1150

dana zaključuje se da je otpor betona kod šipki promjera 16 mm u većini slučajeva i više od tri puta veći u promatranom vremenskom razdoblju u odnosu na otpor šipki promjera 8 mm.



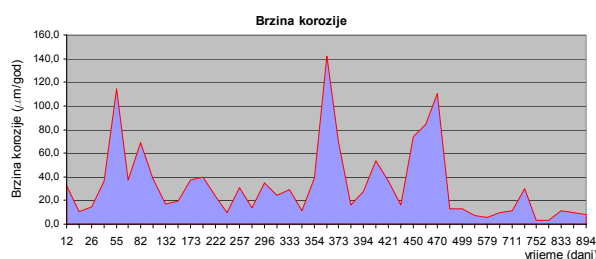
Slika 8. Promjena električnog otpora u razdoblju od 1150 dana: (gore) uzorak sa šipkom promjera 8 mm, (dolje) uzorak sa šipkom promjera 16 mm

Električni otpor betona kod šipki promjera 8 mm s napredovanjem korozije postupno opada, no povremeno njegovo povećanje pripisuje se porastu produkata korozije u okolini čelične šipke. Ti produkti korozije stvaraju dobru izolaciju od prodora vlage i kisika. Produkti korozije, posebno u prisutnosti velike vlažnosti, popunjavaju dijelom pukotine i šupljine u okolnom betonu. To uzrokuje povećanje otpora zaštitnog sloja betona, pogotovo kod šipaka promjera 16 mm, što se i vidi na slikama 8. Razlike u izmjenjenim vrijednostima mogu se objasniti promjenom vodljivosti betona uzrokovane prosušivanjem. Vrlo važan faktor koji je potrebno uzeti u razmatranje pri analizi izmjenjenog otpora betona jest stanje površine i način kontakta mjernog uređaja s betonom.

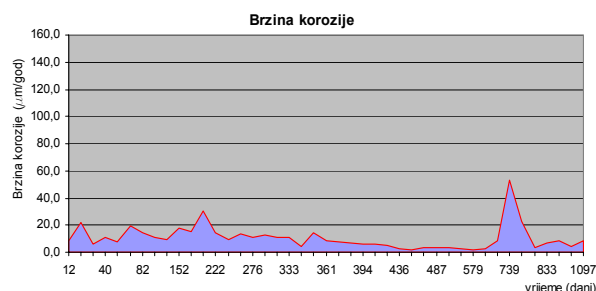
3.3 Gustoća korozijske struje

Izmjerena gustoća korozijske struje, I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), jedan je od glavnih indikatora korozijske aktivnosti [11]. Brzina korozije je dinamički parametar koji ovisi o temperaturi, relativnoj vlažnosti, difuziji kisika u beton, kao i svojstvima otopine u porama o kojima direktno ovisi provodljivost betona. Omjer obujma produkata korozije i metala varira od 2 do 7.

Na prikazanim slikama 9. i 10. vidi se jaka korozija šipke ($4,5$ do $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) vrlo brzo, već nakon 4 do 6 tjedana, od početka eksperimenta prema kriterijima u tablici 5.



Slika 9 Promjena gustoće korozivne struje u razdoblju od 1150 dana - uzorak sa šipkom promjera 8 mm



Slika 10. Promjena gustoće korozivne struje u razdoblju od 1150 dana - uzorak sa šipkom promjera 16 mm

[14][15]. To vrijedi i za šipke promjera 8 i 16 milimetara. Vjerojatnost postojanja korozije, za razdoblje od 40 dana od početka eksperimenta, ocijenjena prema ovom parametru ne poklapa se sasvim s vjerojatnošću korozije armature ocijenjene prema elektrokemijskom potencijalu (prosječno -280 mV kod šipki $\varnothing 8$ i -180 mV kod šipki $\varnothing 16$). Mjerenja na uzorcima iskazuju periodičnu promjenu brzine korozije zbog promjena uvjeta okoline u slanoj komori. Rezultati mjerenja pokazuju da je gustoća korozivne struje kod uzoraka s promjerom 8 mm, u prosjeku iznosila oko $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, veća otprilike dva puta za isto vremensko razdoblje i u istoj agresivnoj okolini od gustoća korozivne struje uzoraka s promjerom 16 mm (oko $1,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Usporedbom dijagrama može se uočiti da se gustoća korozivne struje kod uzoraka sa šipkom promjera $\varnothing 16$ mm znatno usporava te je gustoća korozivne struje jednolika u razdoblju od 300 dana i iznosi u prosjeku $0,20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (mala korozija prema tablici 5.), pa je njezina vrijednost uvijek manja od gustoće korozivne struje uzoraka sa šipkom $\varnothing 8$ mm. Vrijednosti gustoće korozivne struje, u vremenu 350 do 510 dana, su u području pasivnog stanja (70 %) ili u malom stupnju korozije (30 %) prema kriterijima iz tablice 5.

Pojedinačno izmjerena gustoća korozivne struje iznosila je i do $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, što je povećanje od 15 do 200 puta u odnosu na gustoću korozivne struje izmjerene tijekom ispitivanja stanja vijadukata u Španjolskoj i Velikoj Britaniji gdje je najveća brzina korozije iznosila $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, no većina mjerenja nalazila se u granicama od 0,2 do

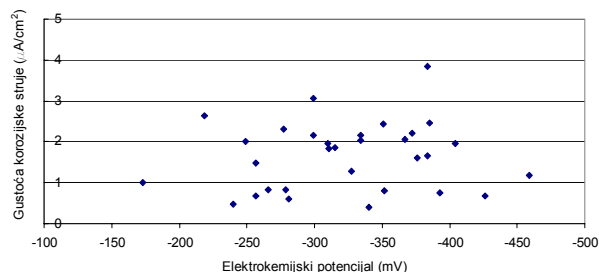
$1,9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [13]. Prema Faradayevu zakonu elektrokemije [11] vrijedi da $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ odgovara smanjenju promjera poprečnog presjeka ugljičnog čelika približno $11,6 \mu\text{m}/\text{godinu}$, što znači da najveća izmjerena vrijednost gustoće korozivne struje od $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ odgovara približno smanjenju promjera presjeka čelične armature od $335 \mu\text{m}$ na godinu.

Tablica 5. Procjena stanja armature na osnovi mjerenja gustoće korozivne struje [21]

$I_{\text{corr}} [\mu\text{A}/\text{cm}^2]$	Korozija
< 0.1	zanemariva
$0.1 - 0.5$	mala korozija
$0.5 - 1$	srednja korozija
> 1	velika korozija

Prosječna postignuta izmjerena vrijednost gustoće korozivne struje kod uzoraka s ispitnom šipkom od $\varnothing 8$ iznosila je $2,25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, a kod uzoraka s $\varnothing 16$ $1,16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. To odgovara brzini korozije $26,1 \mu\text{m}/\text{godinu}$ za uzorke s šipkom $\varnothing 8$ i $13,4 \mu\text{m}/\text{godinu}$ za uzorke sa šipkom $\varnothing 16$.

Na slici 11. prikazan je odnos elektrokemijskog potencijala i gustoće korozivne struje u razdoblju od 1150 dana. Može se zaključiti da se ne može odrediti njihova međusobna ovisnost te se ova dva parametara moraju promatrati neovisno jedan od drugoga pri ocjeni je li konstrukcija u aktivnoj koroziji li ne.



Slika 11 Odnos gustoće korozivne struje (I_{corr}) i elektrokemijskog potencijala (E)

U velikom broju slučajeva ova dva parametra nisu bila u korelaciji, tj. povećanje izmjerene vrijednosti elektrokemijskog potencijala nije nužno značilo i povećanje vrijednosti gustoće korozivne struje. Razlog tomu je različita ovisnost ovih dvaju parametra o temperaturi i vlazi okoline, ali i samog betona. Za točniju ocjenu stanja armature u istražnim je radovima potrebno mjeriti oba parametra te donositi posebno procjenu prema kriterijima za oba parametra.

3.4 Gubitak mase čelika

Gubitak mase šipke zbog korozije određen je na dva načina:

- Prosječne vrijednosti korozivne struje uvrštene su u jednadžbu Faradayeva zakona (1) da bi se dobio teorijski gubitak mase šipke [13].

b) Gubitak mase čelika izmjeri se fizikalnom procjenom gubitka mase vaganjem šipke na preciznoj vagi nakon što se šipka izvadi iz betonskog uzorka. Važu se šipke armature izvađene iz uzoraka na kojima izmjerene vrijednosti korozijskih mjerenja još ne pokazuju pojavu korozije i korodirane armaturene šipke očišćene od produkata korozije. Korodirana šipka se prvo očisti mehanički (čeličnom četkom), a zatim kemijskim sredstvima do metalnog sjaja.

Izvađena je šipka izvagana nakon temeljnog čišćenja od produkata korozije. Nakon čišćenja izrezani su dijelovi šipaka 10 Ø, koji su bili u izravnom kontaktu s betonom, te su izvagani na preciznoj vagi proizvođača Metler Toledo. U eksperimentu se pretpostavljalo da je čitava površina šipki, 8 mm i 16 mm, u kontaktu s betonom polarizirana. U armiranobetonskim konstrukcijama, gdje je čelična armatura električno povezana, precizno poznavanje površine šipke koja je polarizirana tijekom mjerenja galvanostatičkom impulsnom metodom vrlo je složeno i najveći je izvor pogrešaka.

Gubitak mase šipke proračunava se prema izrazu [17]:

$$\Delta m = \frac{A \cdot S}{z \cdot F} \sum \bar{J}_{corr} \cdot \Delta t \quad (1)$$

gdje je:

Δm - gubitak mase metala zbog korozije (g)

A - molarna masa željeza (55,847 g/mol)

\bar{J}_{corr} - prosječna korozijska struja na pretpostavljenoj korodiranoj ploštini S (cm²) između dvaju mjerenja (µA/cm²)

Δt - vrijeme između dvaju mjerenja (s)

z - naboj iona nastalog korozijom (2)

F - Faradayeva konstanta (96 487 As/mol)

S - pretpostavljena ploština šipke u aktivnoj koroziji površina.

U tablici 6. prikazane su prosječne vrijednosti gubitka mase armature, izmjerene i proračunane. Početna masa promatranih dijelova šipaka ($l_b = 10 \text{ Ø} = 80 \text{ mm}$ za $\text{Ø} 8$ i $l_b = 10 \text{ Ø} = 160 \text{ mm}$ za $\text{Ø} 16$) iznosi 31,30 g za $\text{Ø} 8 \text{ mm}$ i 263,57 g za $\text{Ø} 16 \text{ mm}$. U tablici 6. vidi se da je zabilježeni gubitak mase u prosjeku 0,42 g kod šipki promjera 16 mm što je vrlo mala količina (0,04 % do 0,2 %) u odnosu na ukupnu težinu mjenog uzorka pa se može zanemariti. Kod šipki promjera 8 mm izmjereni gubitak mase je u prosjeku 2,7 puta veći (1,13 g u odnosu na 0,42 g) prema početnoj težini mjenog uzorka te gubitak mase iznosi u prosjeku 2,1 %.

Usporedbom izmjerenih i proračunanih vrijednosti pokazano je da je proračunani prosječni gubitak mase, kod šipki promjera 16 mm, veći u odnosu na izmjereni, 0,42 g prema 1,42 g.

Kod šipki promjera 8 mm rezultati su suprotni, proračunana prosječna vrijednost gubitka mase, 0,67 g jest manja od izmjerene vrijednosti, 1,13 g.

Razlika između proračunog i izmjerenog gubitka mase je u vrlo složenom i relativno nepoznatom području čelika koji je polariziran primijenjenim potencijalom i/ili području čelika koje je korozijski aktivno.

Općenito se smatra da je korozija jednolika na polariziranoj površini šipke te da se izmjerena korozijska struja dijeli s „procijenjenom“ polariziranom ploštinom da bi se dobila prosječna brzina korozije. U analizi rezultata pretpostavljeno je da šipka korodira jednoliko po cijelom opsegu kao i u drugim istraživanjima [20], što u stvarnosti, pregledom šipke nakon ispitivanja, nije potvrđeno. Iz tablice 6. može se zaključiti da je prethodno navedena pretpostavka točnija za šipke promjera 8 mm nego za šipke promjera 16 mm. Razlog je u činjenici da je na manjoj duljini izloženosti, 80 mm u odnosu na 160 mm, veća vjerojatnost da je zadovoljena pretpostavka o koroziji cijele izložene površine.

Tablica 6. Usporedba mase šipaka promjera 8 i 16 mm kod dubine penetracije korozije $x = 0,025 \text{ mm}$

l_b (10Ø)	Oznaka uzorka	Izmjereni gubitak mase m_i (g)	Proračunani gubitak mase m_p (g)	Postotak izmjerenog gubitka mase u
160 mm za Ø16	16-10-L	0,14	1,23	0,05
	16-10-D	0,27	1,51	0,1
	16-9-L	0,50	1,22	0,2
	16-9-D	0,15	1,54	0,04
	16-7-L	0,52	1,49	0,2
	16-7-D	0,94	1,45	0,1
80 mm za Ø8	8-3-L	1,35	0,92	2,9
	8-3-D	1,08	0,84	2,7
	8-4-L	0,87	0,58	1,8
	8-4-D	0,97	0,64	2,0
	8-5-L	0,85	0,45	1,4
	8-5-D	1,65	0,59	1,9

4 Zaključak

U radu je opisan način poticanja korozije armature izlažanjem uzoraka ciklusima prskanja otopinom natrijeva klorida i sušenjem na povišenim temperaturama.

Rezultat ubrzane korozije ovako provedenim ciklusima vlaženja i sušenja jest točkasta korozija utvrđena vizualnim pregledom, a ne jednolika kao u istraživanjima s poticanjem korozije s konstantnom strujom velike jakosti koja se često primjenjuje u istraživanjima.

Prosječna gustoća korozijske struje u eksperimentu iznosila je u prosjeku $2,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ kod uzoraka sa šipkom promjera 8 mm i $1,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ kod uzoraka sa šipkom promjera 16 mm. Najveća postignuta izmjerena gustoća korozijske struje je kod šipki promjera 8 mm iznosila $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, što iznosi trenutačno povećanje gustoće korozijske struje i do 30 puta u odnosu na koroziju u konstrukciji ($0,2-1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) [10]. Stvaranje korozije na promatranim armiranobetonskim uzorcima slično je stanju u konstrukciji, a postiže se u relativno kratkom vremenu (oko 2 do 4 godine) uporabom agresivnijih uvjeta okoline.

Mjerenje parametara korozije, elektrokemijskog potencijala i gustoće korozijske struje, praktična je i konkretna metoda kojom se može otkriti makročelijski tip korozije.

Promjene pri mjerenju elektrokemijskog potencijala mogu nastati zbog razlike u koncentraciji klorida, kontakta elektrolita između elektrode i betona, karbonatizacije površine betona kao i velikog otpora betona.

Razlike u pojedinim mjerenjima proizlaze iz radikalne promjene uvjeta okoline, a posebno temperature i vlažnosti betona. Prema podacima [14][15] vrijednosti parametra korozije mogu se mijenjati za faktor od 2 do 10 ovisno radi li se o površinskoj ili točkastoj koroziji.

Promatrajući cjelokupno razdoblje eksperimenta, razlike u elektrokemijskom potencijalu su dovoljno male pa je vrijednosti elektrokemijskog potencijala dovoljno iskazati u milivoltima zaokruženim na vrijednost 10 mV.

Promatrajući nezavisno elektrokemijski potencijal i gustoću korozijske struje na uzorcima sa šipkama 8 i 16 mm zaključuje se da su, prema izmjerenim parametrima korozije u ovom radu, šipke manjeg promjera korodirale dva do tri puta brže u jednakim uvjetima okoline i jednakoj kvaliteti betona.

Brzina korozije, izražena u $\mu\text{m}/\text{god}$ ili $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, od triju je navedenih parametara najvažniji parametar za kvantitativno predviđanje vremena pojave pukotina u betonu nastalih korozijom čelične armature, smanjenje promjera

šipke te za cijeli proces propadanja betonskih konstrukcija. Brzina korozije je dinamički parametar koji se mijenja s promjenom klimatskih uvjeta (temperature i relativne vlažnosti), s vremenom izloženosti i količinom klorida. Mjerenje brzine korozije galvanostatičkom impulsnom metodom predstavlja trenutačnu vrijednost pri određenim uvjetima u trenutku mjerenja.

Eksperimentalni podaci ovoga rada pokazali su da prosječna brzina korozije određena uređajem Galva Pulse potcjenjuje stvarnu koroziju kod šipki promjera 8 mm, a precjenjuje kod šipki promjera 16 mm kada je dubina penetracije korozije u armaturu manje od 0,025 mm. Za precizniju ocjenu stanja armature galvanostatičkom impulsnom metodom u praksi potrebno je provesti više mjerenja na istom mjernom mjestu pri različitim uvjetima okoline.

Mjerenje i elektrokemijskog potencijala i gustoće korozijske struje je praktična i konkretna metoda kojom se locira korodirana čelična armatura, ali samo u trenutačnom stanju. Tijekom analize izmjerenih vrijednosti, elektrokemijskog potencijala i gustoće korozijske struje treba ova dva parametra razmatrati odvojeno, a zaključke donositi na temelju vrijednosti i kriterija za svaki parametar posebno. Mjerenja na konstrukciji potrebno je provesti više puta na istome mjernom mjestu, i to u različitim i u jednakim klimatskim uvjetima (temperaturi i relativnoj vlazi) da bi se uzeli u obzir klimatski faktori (temperatura i vlažnost zraka) koji mogu znatno utjecati na rezultate mjerenja ovim nerazornim metodama.

Valja istaknuti da se rezultati prikazani u ovome radu odnose na mali stupanj korozije, tj. za dubinu penetracije korozije $x = 0,025 \text{ mm}$ u čelične šipke.

Provedenim istraživanjima utvrđeno je da primijenjena metoda ubrzane korozije ne narušava integritet armature i okolnog betona (što se događa u slučaju ubrzane korozije primjenom vanjskoga izvora struje) i da se može uspješno rabiti pri istraživanjima utjecaja korozije na prionljivost armature i betona.

LITERATURA

- [1] Bentz, D. P.; Clifton, J. R.; Synder, K. A.: *Corrosion of Metals in Concrete* (222R-85), ACI JOURNAL, Proceedings V. 82, No.1, Jan-Feb., 1985 pp 3-32
- [2] Broomfield, J. P.: *Rebar Corrosion- What Do We Know For Sure?*, International conference: Repair of Concrete Structures, Svolcer, Norway, May, 1997
- [3] Dhir, R. K.; MacCarthy, M. J.: *Concrete Durability and Repair Technology*, Thomas Telford., London, 1999.
- [4] Swamy, R. N.: *Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, Proceedings of the International Conference, University of Sheffield, July 1997, pp 24-28
- [5] RILEM/CEB/FIP, Recommendation, Bond Test for Reinforcing Steel, Materials and Structure 6 (32), 1973
- [6] Amleh, L.: *Bond Deterioration of Reinforcing Steel in Concrete Due to Corrosion*, PhD Thesis, December 2000, McGill University, Montreal, Canada

- [7] Banić, D. I.: *Prionljivost između betona i armature u betonskim konstrukcijama oštećenih korozijom armature*, magistarski rad, Građevinski fakultet, Zagreb, 2007.
- [8] Chun Qing, Li: *Initiation Of Chloride-Induced Reinforcement Corrosion in Concrete Structural Members-Experimentation*, ACI Structural Journal, V. 98, No. 4, July-August 2001.
- [9] Chun Qing, Li: *Corrosion Initiation of Reinforcing Steel in Concrete under Natural Salt Spray and Service Loading – Results and Analysis*, ACI Material Journal, V. 97, No. 6, November-December 2000.
- [10] Broomfield, J. P.; Rodriguez, J.; Ortega, I. M.; Garcia, A. M.: *Corrosion Rate Measurement in Reinforced Concrete Structures by a Linear Polarization Device*, Special report 151, Philip D. Cady International Symposium “Concrete Bridges in Aggressive Environments”, 1994, ACI, pp 163-182
- [11] Erić, Lj.; Bjegović, D.: *Korozijski monitoring mjerenjem brzine korozije armature u armiranobetonskim konstrukcijama*, Ceste i mostovi 45 (1999) 3-4, 79-84 (4)
- [12] Grandić, D.; Bjegović, D.; Radić, J.: *Nosivost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature*, Građevinar 52, 2000, 153-162
- [13] Mangat P. S.; Elgarf, M. S.: *Bond Characteristics of Corroding Reinforcement in Concrete Beams*, Materials and Structures, Vol. 32, March 1999, pp. 89-97
- [14] Rodrigez, J., Ortega, L. M.; Arangoncilo, J.: *Corrosion Rate and Structural Performance*, Workshop MESINA, Madrid, 1999
- [15] Rodriguez, J.; Ortega, L. M.; Cassal, J.; Diez, J. M.: *Assessing Structural Conditions of Concrete Structures with Corroded Reinforcement*, Int. Congress Concrete Repair Rehabilitation and Protection, Dundee, UK, June 1996
- [16] Sekulić, D.; Bjegović, D.; Mikulić, D.: *Monitoring armaturnog čelika u betonu*, Građevinar 52, 2000, 577-586
- [17] Tuutti, K.: *Corrosion of Steel in Concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm Sweden, 1982
- [18] Service Life Prediction –State of the Art Report, ACI Committee 365, January 10, 2000.
- [19] Protection of Metals in Concrete against Corrosion” – State of the Art, ACI Committee 222, 2001
- [20] HRN U.M1.090., 1982. g., «Određivanje adhezije između armature i betona»
- [21] Andrade, C.; Alonso, C.: *Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*, Materials and Structures, Vol. 37, November 2004, pp 623-643
- [22] Esih, I., Dugi, Z.: *Tehnologija zaštite korozije I*, Školska knjiga Zagreb, 1989.