

Monitoring armaturnog čelika u betonu

Dalibor Sekulić, Dubravka Bjegović, Dunja Mikulić

Ključne riječi

armatura, beton, korozija armature, brzina korozije, metode ispitivanja, procjena korozije, vijek trajanja

Key words

reinforcement, concrete, reinforcement corrosion, rate of corrosion, test methods, corrosion estimate, service life

Mots clés

armature, béton, corrosion de l'armature, vitesse de corrosion, méthodes des essais, évaluation de la corrosion, durée de vie

Schlüsselworte:

Bewehrung, Beton, Bewehrungskorrosion, Korrosionsgeschwindigkeit, Untersuchungsmethoden, Korrosionsabschätzung, Dauer

D. Sekulić, D. Bjegović, D. Mikulić

Pregledni rad

Monitoring armaturnog čelika u betonu

Dan je pregled aktualnih metoda kojima se određuje stanje armature u betonu. Ističe se da je od velike važnosti detektirati koroziju dok njene posljedice još nisu vidljive, a također procijeniti utjecaj korozije armature na nosivost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija. Upozorava se da je određivanje korozije čelika u betonu vrlo složen problem, pri čemu se često dolazi do krivih interpretacija. Za pouzdano zaključivanje nužno je kombinirati više metoda mjerenja.

D. Sekulić, D. Bjegović, D. Mikulić

Subject review

Monitoring behavior of reinforcement embedded in concrete

An overview of current methods for determining condition of reinforcing bars embedded in concrete is presented. It is emphasized that a high significance should be given to early detection of corrosion i.e. before its effects become visible, and to determination of the influence the steel corrosion has on the bearing capacity and usability of reinforced-concrete structures. Authors caution that determination of steel corrosion in concrete is a very complex issue where false interpretations are quite common. Several measurement methods should be combined to make reliable conclusions.

D. Sekulić, D. Bjegović, D. Mikulić

Ouvrage de synthèse

Monitorage de l'acier d'armature dans le béton

On donne un aperçu des méthodes actuelles permettant la détermination de l'état de l'armature dans le béton. On souligne l'importance de la détection de la corrosion alors que ses conséquences ne sont pas encore visibles, ainsi que de l'évaluation des effets de la corrosion sur la capacité portante et la possibilité d'usage des constructions en béton armé. On signale que la détermination de la corrosion de l'acier dans le béton présente un problème très complexe, qui donne lieu souvent à des interprétations erronées. Plusieurs méthodes de mesures doivent être combinées pour une bonne fiabilité.

D. Sekulić, D. Bjegović, D. Mikulić

Übersichtsarbeit

Monitoring der Bewehrung im Beton

Vorgelegt ist ein Überblick der aktuellen Methoden für die Feststellung des Zustandes der Bewehrung im Beton. Hervorgehoben ist die Wichtigkeit der Entdeckung der Korrosion bevor deren Folgen sichtbar werden, ebenso der Abschätzung des Einflusses der Bewehrungskorrosion auf die Tragfähigkeit und Brauchbarkeit der Stahlbetonkonstruktionen. Es wird darauf hingewiesen dass die Feststellung der Stahlkorrosion im Beton ein kompliziertes Problem vorstellt, wobei es oft zu falschen Interpretationen kommt. Zuverlässige Schlüsse erreicht man durch Kombination mehrerer Messungsmethoden.

Autori: **Dalibor Sekulić**, dipl. ing. fizike., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet; prof. dr. sc. **Dunja Mikulić**, dipl. ing. fizike., Građevinski fakultet Sveučilišta "Josipa Jurja Strossmayera" u Osijeku

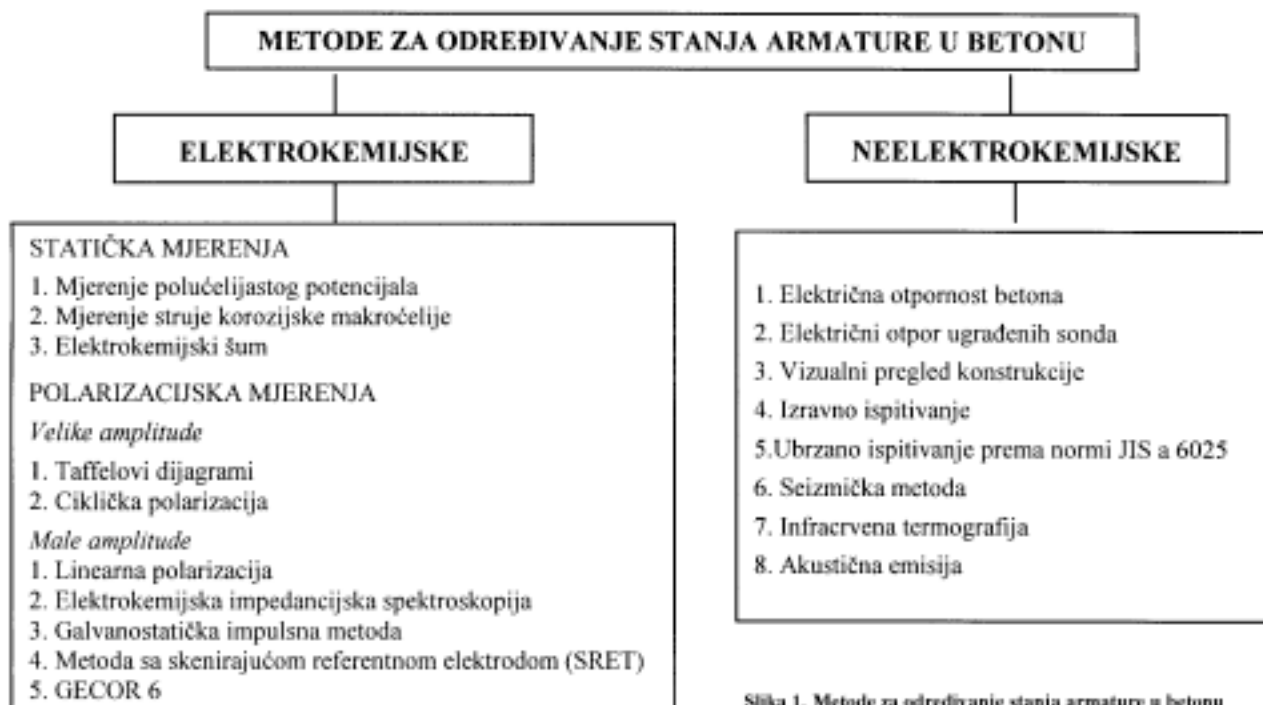
1 Uvod

Problem propadanja armiranobetonskih konstrukcija zbog procesa korozije armaturnog čelika vrlo je ozbiljan i ima velike ekonomske posljedice. Novougrađeni beton zbog svoje alkaličnosti čini površinu armature pasivnom i sprječava koroziju. Međutim, ako se pH vrijednost porne vode u betonu smanji, dolazi do depasivacije površine čelika i do korozije. To se događa zbog, primjerice prodora iona klora iz okoline u beton ili zbog reakcije s atmosferskim CO₂ (karbonatizacija). Produkti korozije zauzimaju veći obujam nego čelik, što uzrokuje vlačna naprezanja u betonu. Ako su vlačna naprezanja u betonu veća od vlačne čvrstoće betona, rezultat je pucanje betona i ljuštenje kore betona. Na mjestima stvaranja pukotina dolazi do pojačanog prodora iona klora i povećane difuzije kisika i ugljičnog dioksida. To daje glavni doprinos smanjivanju pH vrijednosti porne vode i uzrokuje daljnje uništavanje pasivnog filma ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) koji je početno štitio čelik. Na taj način dolazi do daljnjeg širenja korozije. Zbog sloma pasivnog filma na određenim područjima armature dolazi do pojave točkaste korozije što uzrokuje stvaranje mjesta na armaturi s koncentriranim naprezanjima. Osim toga, formiranje pukotina vodi stvaranju galvanskih ćelija i opaža se korozija na izloženim površinama čelika koje djeluju kao anodna područja u odnosu prema neizloženim površinama (katodna područja). Točkasta korozija i formiranje galvanskih makroćelija stvaraju male gubitke metala, no nastaju područja s visokim koncentracijama naprezanja. Zbog korozije dolazi do smanjenja presjeka armature i time do smanjenja nosivosti konstrukcije.

Detektiranje i mjerenje defekata u fazi razvoja korozije, kada još nije moguće vizualno uočavanje pukotina na konstrukciji jedna je od glavnih zadaća istraživača korozije armiranobetonskih konstrukcija. U ovom radu opisane su metode kojima se utvrđuje stanje armature u konstrukcijama na osnovi kojeg se može procijeniti vijek armiranobetonskih konstrukcija. Također je dan pregled aktualnih metoda koje se primjenjuju pri karakterizaciji korozije armaturnog čelika u betonu (slika 1. i tablica 1.).

Tablica 1. Podjela metoda za određivanje stanja armature u betonu prema primjeni

LABORATORIJSKE METODE	IN SITU METODE
Mjerenje struje korozijske makroćelije	Mjerenje polućelijastog potencijala
Elektrokemijski šum	Linearna polarizacija
Taffelovi dijagrami	Galvanostatička impulsna met.
Ciklička polarizacija	GECOR 6
Metoda sa skenirajućom referentnom elektrodom (SRET)	Električna otpornost betona
Izravno ispitivanje	Električni otpor ugrađenih sonda
Ubrzano ispitivanje prema normi JIS a 6025	Vizualni pregled konstrukcije
Elektrokemijska impedancijska spektroskopija	Seizmička metoda
Mjerenje struje korozijske makroćelije	Infracrvena termografija
	Akustična emisija



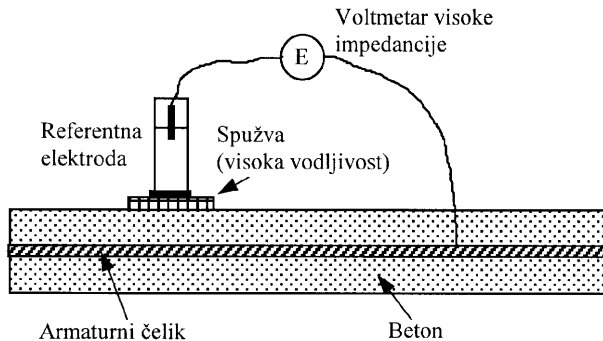
Slika 1. Metode za određivanje stanja armature u betonu

2 Elektrokemijske metode

2.1 Statička mjerenja

2.1.1 Mjerenje polučelijastog potencijala

Princip metode sastoji se u pojavi razlike potencijala između armaturnog čelika i referentne elektrode koja se naziva polučelijom. Polučelija je uglavnom vrlo jednostavna naprava i sastoji se od šipke od čistog metala koji je uronjen u otopinu svojih vlastitih iona (slika 2.). Uloga polučelije je da osigura konstantni potencijal koji je referentna točka u odnosu prema kojoj se mjere potencijali. Najčešće rabljena polučelija jest bakar - bakreni sulfat. Bakar je povezan s armaturnim čelikom preko voltmetra, a otopina bakrenog sulfata je preko vlažne spužve spojena s pornom vodom. Na taj se način dobije elektrokemijska ćelija (baterija), a voltmetar visoke impedancije mjeri napon.

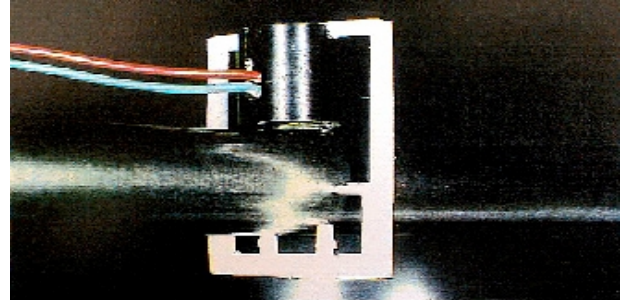


Slika 2. Mjerenje potencijala metodom polučelije

Metoda mjerenja polučelijastog potencijala zasnovana je na brojnim mjerenjima potencijala s otvorenim strujnim krugom i korelaciji tih potencijala sa stvarnim opaženim stupnjem korozije na armaturi. Najčešće se primjenjuju kriteriji prema normi ASTM C 876 gdje se polučelijasti potencijali mjere $Cu/CuSO_4$ referentnom elektrodom (tablica 2.), a dani su i za kalomel i $Ag/AgCl$ elektrode [1].

Stvarna raspodjela potencijala na vanjskoj površini betona nije ista kao potencijal u betonu koji je u neposrednom kontaktu s površinom čelika. Prostorna rezolucija ove metode ovisi o električnom otporu betona i o debljini betonskoga zaštitnog sloja. Distribucija potencijala

postaje šira i stoga slabije definirana na vanjskoj površini betona [2]. Takvo ponašanje sistema može biti objašnjeno zašto katkad mjerenja potencijala daju krive rezultate. Da bi se izbjegle ove teškoće, u beton se mogu ugraditi senzori za mjerenje polučelijastog potencijala [3], ili kroz izbušene rupe, ili prije ugradnje betona. Na taj se način omogućava mjerenje potencijala u neposrednoj blizini armature čime se eliminira utjecaj sloja betona između senzora i armature na potencijal. Metoda omogućuje mnogo bolju prostornu rezoluciju u odnosu prema metodama sa sensorima na površini betona (slika 3.).



Slika 3. Smještaj minisenzora za mjerenje potencijala

2.1.2 Mjerenje struje korozijske makročelije

Tijekom korozijskog procesa formiraju se korozijske ćelije. Korozijske makročelije karakteriziraju se kao raspodjela anodnih i katodnih područja s određenim područjima lokalne korozije. Lokalne razlike u debljini pokriva betona, propusnosti betona i ostali faktori uzrokuju promjene u razlikama potencijala između susjednih dijelova čelične armature, što vodi stvaranju korozijskih makročelija [4]. Napon ΔU u makročelijskom elementu jednak je razlici potencijala između aktivnog i pasivnog čelika i može premašiti 0,5 V. Zbog ove razlike potencijala može doći do toka struje:

$$I = \Delta U / (R_E + R_A + R_C) \quad (1)$$

gdje je:

I - tok struje (μA)

ΔU - napon u makročelijskom elementu (mV)

R_E - električni otpor betona (Ω)

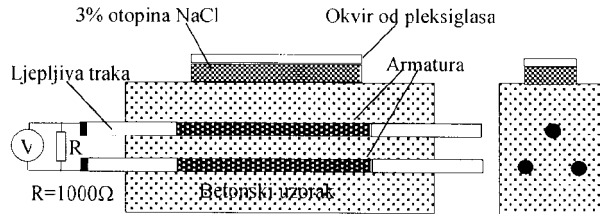
R_A - električni otpor anodne reakcije (Ω)

R_C - električni otpor katodne reakcije (Ω)

Tablica 2. Kriteriji za procjenu korozije armature prema polučelijastim potencijalima za različite tipove polučelija

$Cu/CuSO_4$	Kalomel (SCE)	$Ag/AgCl$	Interpretacija
$E > -200mV$	$E > -126mV$	$E > -119mV$	Vrlo velika vjerojatnost (90%) da nema korozije
$-200mV < E < -350mV$	$-126mV < E < -276mV$	$-119mV < E < -269mV$	Neodređenost ima li korozije ili ne
$E < -350mV$	$E < -276mV$	$E < -269mV$	Vrlo velika vjerojatnost (90%) za prisutnost aktivne korozije

U laboratorijskim ispitivanjima uglavnom se koristi konfiguracija prikazana na slici 4., koju propisuje norma ASTM G 109. U beton se ugrađuju tri šipke od armaturnog čelika između kojih se spaja otpornik i voltmetrom mjeri pad napona. Iz izmjerenog se pada napona prema Ohmovu zakonu računa korozivna struja. Mjerenja se obavljaju dok makročelijska struja najmanje polovice uzoraka ne dosegne jakost od $10 \mu A$, što daje indicaciju da je armatura potpuno korodirana. Nakon završenog ispitivanja iz uzoraka se vadi armatura i vizualno se pregledava kao potvrda mjerenja [5].



Slika 4. Konfiguracija za mjerenje struje makročelije prema ASTM G 109

Metoda mjerenja struje korozivne makročelije pogodna je i za mjerenja na konstrukciji. Primjenjuje se više različitih mjernih sustava. Sustav za mjerenje prema Raupachu i Schiesslu [6] sastoji se od sonda izrađenih od mekog čelika i izoliranih oslonaca. Sonde se mogu ugraditi u novu konstrukciju ili u konstrukciju kojoj je potrebna sanacija, smještene su na različite dubine, čime je omogućeno mjerenje napredovanja depasivacijske fronte.

2.1.3 Elektrokemijski šum

Elektrokemijski šum su fluktuacije potencijala i struje koji su spontano generirani procesom korozije. Potencijal korodirajuće armature može varirati malo (manje od 1 mV) u vremenskom intervalu reda veličine sekunde, te nekoliko stotina mV u razdoblju više dana i tjedana. Analiza fluktuacija potencijala nakon spektralnog rastavljanja može omogućiti ne samo otkrivanje korozije, već i karakterizaciju procesa korozije. Izmjereni signali mogu se analizirati primjenom matematičke analize. Strujni šum može se staviti u relaciju s općim stupnjem korozije, dok naponski šum sadrži više informacija o vrsti korozije. U slučaju kompleksnih tipova korozije kao što je metastabilna točkasta korozija i nestabilna pasivacija inducirana inhibitorom korozije, takva matematička analiza se pokazala bezuspješnom pa neki istraživači predlažu primjenu teorije kaosa na elektrokemiju procesa korozije [7, 8].

2.2 Polarizacijska mjerenja

Karakteristika polarizacijskih mjerenja jest da se na sustav djeluje signalom izvana te se prati odziv sustava. Postoje dva načina izvođenja polarizacijskih mjerenja:

Potenciostatička - Na mjernoj se elektrodi uporabom posebnog uređaja - potenciostata uspostavlja određeni potencijal, a mjeri se struja odziva sustava.

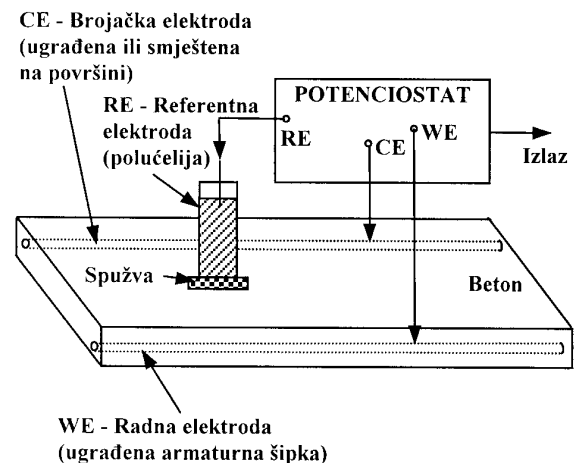
Galvanostatička - na mjernoj elektrodi se s pomoću galvanostata uspostavlja određena struja i mjeri se napon odziva sustava.

Naneseni potencijal odnosno struju moguće je s pomoću posebnog uređaja kontinuirano polako mijenjati i pratiti odziv, pa se u tom slučaju radi o potenciodinamičkim i galvanodinamičkim mjerenjima.

2.2.1 Velike amplitude

Tafelovi dijagrami

Primjenom vanjskog izvora napona čelična se armatura u betonu polarizira na potencijal ± 250 mV do ± 300 mV u odnosu prema korozivskom potencijalu te se mjeri struja odziva. Uređaj se sastoji od potenciostata i tri elektrode (slika 5.). Centralnom brojačkom elektrodom (CE) polarizira se armatura u betonu koja služi kao radna elektroda (WE). Referentna elektroda obično je kalomel ili srebro-srebrni klorid polučelija [9].



Slika 5. Shematski prikaz uređaja za polarizacijska mjerenja

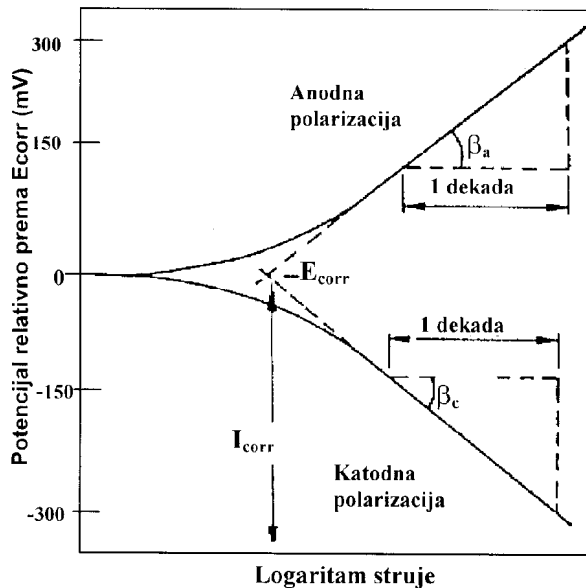
Pri mjerenju uzorak se najprije polarizira anodno (pozitivnim potencijalom) te odmah nakon toga katodno. Na taj se način dobije dijagram ovisnosti dobivene struje o primijenjenom potencijalu (tzv. Tafelov dijagram) (slika 6.). Linearni se dio Tafelova dijagrama ekstrapolira te presjek s E_{corr} daje struju korozije i_{corr} .

Metoda Tafelovih dijagrama široko se primjenjuje pri proučavanju korozije metala uronjenih u otopine, no kod armiranog betona nailazi se na teškoće. Primjena vanjskog potencijala u anodnom smjeru može izazvati točkastu koroziju, što mjerenje čini destruktivnim. Katodnom polarizacijom dolazi do pogrešaka uzrokovanih kapacitivnim efektima. Zbog toga se metoda ne primjenjuje široko za određivanje stupnja korozije (i_{corr}). Me-

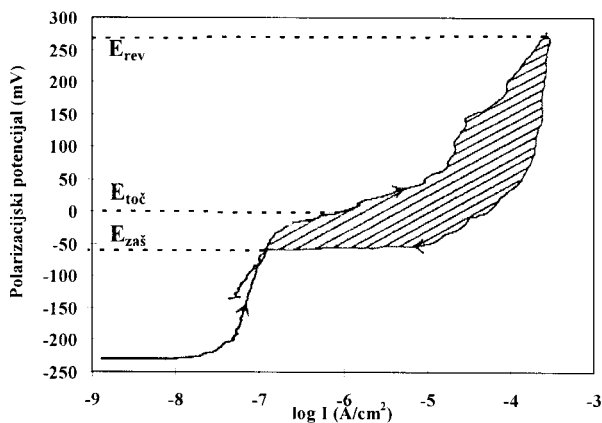
đutim, dobivaju se korisne informacije o djelovanju dodatka betonu, identifikaciji kloridima izazvanog sloma pasivnog filma na čeliku, djelovanju inhibitora korozije [10].

Ciklička polarizacija

Ciklička polarizacija su u osnovi Tafelovi dijagrami (slika 6.), ali je opseg primijenjenog potencijala drugačiji, a potencijal se nanosi i u suprotnom smjeru (slika 7.). Nanošenjem potencijala u oba smjera dobiva se petlja histereze. Za anodne se polarizacije na metalnoj površini razvija lokalna korozija, dok katodna polarizacija nastoji zaustaviti pokrenuti razvoj lokalne korozije. Mjerenja se uglavnom obavljaju u otopinama koje simuliraju pornu vodu betona sa soli u otopini ili bez nje. Metoda se rabi za određivanje tendencije za razvoj točkaste korozije [11]. Iz dijagrama na slici 7. može se odrediti točkasti potencijal ($E_{toč}$) kao potencijal kod kojeg dolazi do nagle promjene struje.



Slika 6. Tafelov dijagram



Slika 7. Dijagram cikličke polarizacije

2.2.2 Male amplitude

Linearna polarizacija

Kod metode linearne polarizacije na uzorak se primjenjuje napon na isti način kao kod Tafelove metode, ali u mnogo manjem iznosu ($E_{corr} \pm 25$ mV). Ovisnost struje o potencijalu bit će linearna:

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta E} \quad (2)$$

Omjer struje primijenjene na armaturu i odzivnog potencijala E_{dev} daje polarizacijski otpor R_p :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{B}{i_{corr}} \text{ gdje je: } B = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)} \quad (3)$$

Dobivena je Stern - Gearyeva relacija (4) iz koje se poznavajući vrijednost B može izračunati struja korozije [12, 13]:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (4)$$

gdje je:

i_{corr} - intenzitet korozije ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

B - vrijednost koja varira od 13 do 52 mV u većini metal/medij sustava.

R_p - polarizacijski otpor ($k\Omega$)

Kada je određena struja korozije može se izračunati gubitak mase čelika primjenom Faradeyeva zakona:

$$\text{gubitak mase} \left[\text{g} / \text{cm}^2 \right] = \frac{i_{corr} t W_m / V}{F} \quad (5)$$

gdje je:

W_m - molekularna masa (g/mol)

t - vrijeme (s)

V - valencija

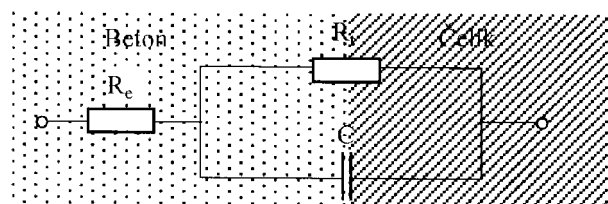
F - Faradeyova konstanta (96500 C)

Kod metode linearne polarizacije zahvaljujući malom primijenjenom potencijalu, izbjegavaju se teškoće koje se pojavljuju kod metode Tafelovih dijagrama. Metoda je brza i sve se više primjenjuje za određivanje stupnja korozije.

Elektrokemijska impedancijska spektroskopija

Metoda elektrokemijske impedancijske spektroskopije koristi se polarizacijom izmjeničnom strujom. Uređaj koristi potencijostat koji snima i održava korozijski potencijal (E_{corr}) i spektralni analizator za analizu izmjeničnog

signala. Armaturna mreža koja služi kao radna elektroda s pomoću potencioštata održava se na potencijalu E_{corr} i na nju se primjenjuje sinusni napon (10 do 20) mV u širokom frekvencijskom opsegu. Promatra se odziv na ulazni signal koji je također sinusnog oblika, no s određenim faznim pomakom u odnosu prema ulaznom signalu i različitom amplitudom. Elektrokemijski proces u betonu, posljedica kojeg je ovakvo ponašanje odzivnog napona, modelira se električnim krugom prikazanim na slici 8. [14].



Slika 8. Ekvivalentni krug za armirani beton

Impedancija ovakvog kruga dana je jednadžbom:

$$Z = R_e + \frac{R_t}{1 + j\omega C R_t} \quad (6)$$

gdje je:

ω - kutna frekvencija $\omega = 2\pi f$ (s^{-1})

j - imaginarna jedinica

R_e - omski otpor betona (elektrolita) (Ω)

R_t - ukupni površinski otpor (Ω)

C - ukupni površinski kapacitet (μF).

Galvanostatička impulsna metoda

Anodni strujni impuls kratkog trajanja (tipično 8 sekunda) primjenjuje se galvanostatički na armaturu i promatra se rezultirajuća promjena potencijala. Potencijal se mjeri s pomoću $Cu/CuSO_4$ referentne elektrode i visokoimpedancijskog voltmetra [15]. Kada se strujni impuls i_{app} primijeni na korozijski sustav, potencijal V_t u danom se vremenu t može izraziti kao:

$$V_t = I_{app} [R_p [1 - \exp(-t/(R_p C_{dl}))] + R_\Omega] \quad (7)$$

gdje je:

R_p - polarizacijski otpor (Ω)

C_{dl} - kapacitet dvostrukog sloja (μF)

R_Ω - omski otpor (Ω)

Određivanje korozije uređajem "GECOR 6"

"GECOR 6" je uređaj za mjerenje stupnja korozije razvijen u projektu Eureka/Eurocare EU-401 i konstruiran je tako da omogućava mjerenja *in situ* [16, 17]. Uređaj (slika 9.) sastoji se od kontrolnog dijela i dvaju senzora.



Slika 9. Uređaj "Gecor 6"

Senzor "A" sastoji se od tri bakar/bakreni sulfat referentne elektrode, dvije koncentrične brojačke elektrode od nehrđajućeg čelika i spužve. Senzor "B" sastoji se od bakar/bakreni sulfat referentne elektrode, brojačke elektrode sa spužvom i sonde za mjerenja temperature i relativne vlažnosti.

Mjerenja *in situ* omogućava dodatna koncentrična brojačka elektroda koja služi za ograničavanje područja mjerenja, kako bi se dobio stvarni stupanj korozije. Sustav se postavlja električnim spajanjem na armaturu i postavljanjem senzora na betonsku površinu preko vlažne spužve, kako bi se omogućio električni kontakt. Uređajem se mogu mjeriti sljedeći parametri [18]:

- Gustoća korozijske struje I_{corr} ($\mu A/cm^2$)
- Polučelijasti potencijal E_{corr} (mV)
- Električna otpornost betona ($k\Omega cm$)
- Temperatura ($^{\circ}C$)
- Relativna vlažnost (% RH)

U tablici 3. dan je kriterij za određivanje stanja armaturnog čelika na osnovi struje korozije po jedinici površine armature (gustoće korozijske struje).

Tablica 3. Procjena stanja armature na osnovi mjerenja gustoće korozijske struje

I_{corr}	Kriterij za procjenu
$< 0,1 \mu A/cm^2$	Nizak stupanj korozije
$0,1-0,5 \mu A/cm^2$	Nizak do srednji stupanj korozije
$0,5-1 \mu A/cm^2$	Visok stupanj korozije
$>1 \mu A/cm^2$	Vrlo visok stupanj korozije

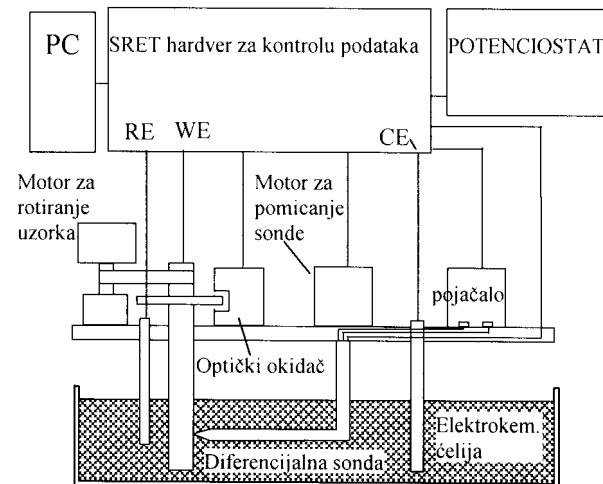
Dodatna mjerenja koja služe za točniju interpretaciju rezultata jesu mjerenja električne otpornosti betona. U tablici 4., dan je kriterij za procjenu stanja armature na osnovi otpornosti, koji su eksperimentalno utvrdili istraživači što su radili s uređajem "GECOR" [17].

Tablica 4. Stanje armature na osnovi mjerenja otpornosti betona

Otpornost	Kriterij za procjenu
> 100 kΩcm	Nemoguće je razlikovati aktivni od pasivnog čelika -beton je previše suh.
50-100 kΩcm	Nizak stupanj korozije
10-50 kΩcm	Srednji do visok stupanj korozije
< 10 kΩcm	Otpornost više nije parametar koji određuje stupanj korozije

Metoda sa skenirajućom referentnom elektrodom (SRET)

Pri lokaliziranoj koroziji anodna se i katodna reakcija obično događa na odvojenim mjestima između kojih je razlika potencijala zanemariva zbog velike vodljivosti metala. U elektrolitu će ionski transport proizvesti male, ali mjerljive razlike potencijala, lokalno prema anodnim i katodnim mjestima. SRET metoda mjeri mikrogalvanske potencijale koji postoje lokalno prema površini materijala što se ispituje s pomoću posebno dizajnirane sonde koja skenira površinu. Metoda omogućuje dinamičku informaciju o korozijskoj aktivnosti, koja je dana varijacijama ionskog toka u elektrolitu na mikroskopskoj ljestvici. U tom pogledu SRET-om se može koristiti pri proučavanju pasivacije i u njezinu slomu, koroziji na rubu zrna, pucanju pod naprezanjima zbog korozije. Slika 10. prikazuje shemu uređaja [19].



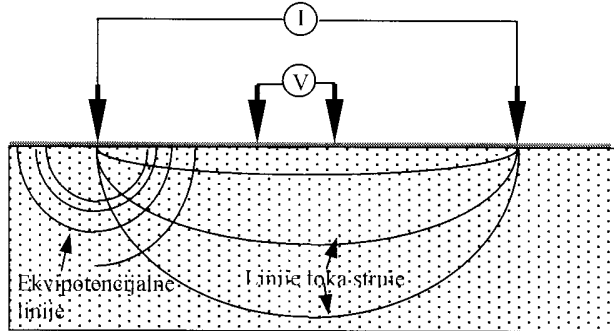
Slika 10. Uređaj sa skenirajućom referentnom elektrodom

3 Neelektrokemijske metode

3.1 Električna otpornost betona

Mogućnost pojave korozije čelične armature u betonu ovisi o električnoj vodljivosti betona koja je povezana s udjelom porne vode i klorida u betonu. Stoga je na osnovi mjerenja električne otpornosti betona moguće predvidjeti stupanj korozije čelične armature u betonu.

Danas najčešće rabljeni uređaj jest mjerac električne otpornosti sa 4 mjerne sonde, koje se direktno utisnu u beton uz uporabu vlage ili pogodnog gela da bi se osigurao električni kontakt (slika 11.). Uređaj radi tako da se kroz dvije vanjske elektrode pušta strujni tok i mjeri razlika potencijala između dviju unutarnjih elektroda [9].



Slika 11 Shematski prikaz Wennerova uređaja za mjerenje električne otpornosti betona

Otpornost betona određuje jednačba:

$$\text{Otpornost} = 2 \cdot R \cdot D \quad (\Omega \text{ cm}) \quad (8)$$

gdje je:

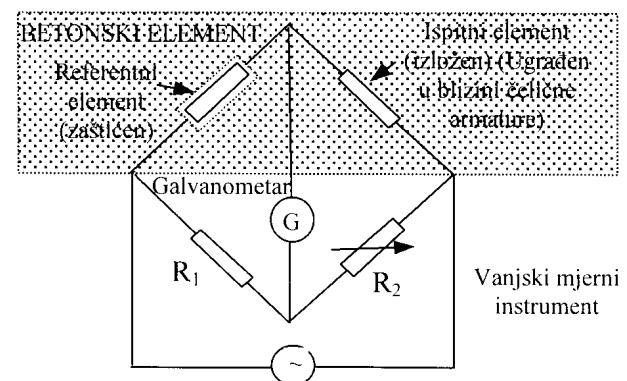
R - otpor zbog tzv. "iR" pada impulsa između elektrode senzora i armaturene mreže (Ω)

D - promjer elektrode senzora (cm)

Mjerenja električne otpornosti korisna su dodatna mjerenja da bi se definirala područja od interesa ili potvrdili rezultati za betone loše kvalitete. Rezultati se mogu upotrijebiti samo uz mjerenja ostalim metodama [2].

3.2. Električni otpor ugrađenih sonda

Ova je metoda bazirana na činjenici da je električni otpor materijala obrnuto proporcionalan njegovu presjeku. Pojavom korozije dolazi do smanjenja poprečnog presjeka armaturnog čelika i porasta otpora. Za mjerenje se rabi Wheatstonov most (slika 12.). Mjerenje promjene otpora provodi se između sonde izložene koroziji (smještene u betonu blizu armature) i zaštićene sonde koja se također



Slika 12. Shematski dijagram sustava za mjerenje korozije pomoću električnog otpora sondi uloženi u beton

nalazi u betonu. Omjer otpora tih dviju sonda jest mjerilo za promatranje stupnja korozije i dan je relacijom:

$$\frac{R_e}{R_p} = \frac{K_e / t_e}{K_p / t_p} \quad (9)$$

gdje je:

R_e i t_e - otpor i promjer izložene sonde (Ω), (cm)

R_p i t_p - otpor i promjer zaštićene sonde (Ω), (cm)

K_e i K_p - konstante

Ove sonde omogućuju periodično promatranje korozijske aktivnosti. Zbog praktične nemogućnosti postavljanja velikog broja sonda po cijeloj konstrukciji metoda je ograničena na mjerenje samo kritičnih točaka konstrukcije. Drugi nedostatak jest taj što se ne mjeri korozija same armature nego sonde, što ne mora dati pravu sliku korozije armaturnog čelika. Primjena metode korisna je u konstrukcijama gdje armaturni čelik nije dostupan, poput konstrukcija u vodi i tunela. Naročito se primjenjuje kod konstrukcija u morskoj vodi, podzemnih konstrukcija, kemijskih postrojenja i svuda gdje je jak "napad" klorida.

3.3 Vizualni pregled

Vizualna detekcija korozije promatranjem vanjskih uvjeta jest najočitija metoda za procjenjivanje korozije armaturnog čelika u betonu. U ranim fazama vanjskih vidljivih oštećenja, hrđa se neće vidjeti, no na površini betona mogu se uočiti fine, tanke pukotine, debljine vlasi kose. Potrebno je vršiti vrlo pažljivo motrenje jer ove pukotine nije jednostavno detektirati, čak niti iskusnim promatračima. Interpretacija se zasniva isključivo na znanju i iskustvu osobe koja obavlja pregled. Postoje i ekspertni sustavi koji vode neiskusnog inženjera ili tehničara kroz različite vrste oštećenja na armiranobetonskim konstrukcijama. Unaprijed planirani vizualni pregled tijekom uporabe objekta veoma je koristan i pravodobno upozorava na pojavu korozije armature [2].

3.4 Ubrzano ispitivanje korozije prema normi JIS A 6025

Metoda se primjenjuje pri ispitivanju efikasnosti inhibitora korozije [11, 21]. Ispitivanje se provodi u tri faze:

- a) Ispitivanje čelične armature uranjanjem u slanu uvodu.

Čelična se armatura nalazi uronjena u posebno pripravljenu otopinu soli. U određenim vremenskim razmacima mjere se prirodni elektrodni potencijali i obavlja vizualno utvrđivanje korozije.

- b) Ispitivanje ubrzanje korozije kod čelične armature u betonu.

Za ispitivanje se izrađuju cilindrični betonski uzorci s ugrađenim armaturnim šipkama i s dodanim solima i inhibitorima korozije u svježi beton. Norma propisuje držanje uzoraka u autoklavnoj posudi u uvjetima zasićene vodene pare pri tlaku od 10 bara i temperaturi 180°C. Na ovaj način dolazi do ubrzanje korozije armature. Nakon dva ciklusa u autoklavu, armatura se vadi i mjeri se korodirana površina. Računa se stupanj prevencije korozije:

Stupanj prevencije korozije =

$$= \frac{\sum P_{0,z} - \sum I_{0,z}}{\sum P_{0,z}} \times 100 [\%] \quad (10)$$

gdje je:

$P_{0,z}$ - ukupna korodirana površina 6 armaturnih šipki za beton tretiran inhibitorom (mm^2)

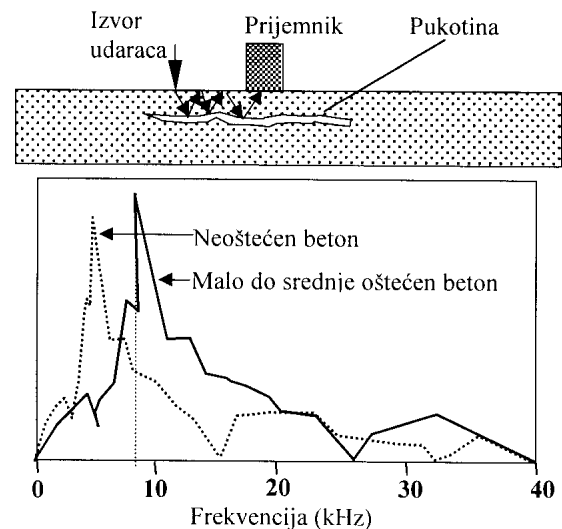
$I_{0,z}$ - ukupna korodirana površina 6 armaturnih šipki netretiranih inhibitorom korozije (mm^2)

- c) Ispitivanje vremena vezivanja i tlačne čvrstoće betona

Uspoređuje se razlika u vremenu vezivanja i razlika u tlačnoj čvrstoći uzorka s dodanim inhibitorom korozije i uzorkom bez dodanog inhibitora korozije.

3.5 Seizmička metoda

Najjednostavnija primjena ove metode jest udaranje čekićem po površini betona, pri čemu se unutarnje pukotine i odlamanja betona detektiraju karakterističnim šupljim zvukom. Po površini betona se može vući i lanac, pri čemu se također prati promjena zvuka.



Slika 13. Odziv signala za različite stupnjeve oštećenja betona

Danas su razvijene instrumentalne metode koje imaju prednost zbog puno veće preciznosti i mogućnosti otkrivanja početnih oštećenja. Uređaj se sastoji od mehaničkog udarača ili piezo-električnog uređaja koji generira multifrekvencijski akustični signal, akcelerometra koji detektira dio energije upadnog vala koji se reflektirao na unutarnjim pukotinama i digitalne jedinice za prikupljanje i spektralnu analizu podataka. Različiti tipovi defekata mogu imati različite spektralne "potpise" koji omogućuju identifikaciju pukotina i odlamanja u betonu. Slika 13. prikazuje rezultate ispitivanja ploče mosta, gdje metoda nalazi najveću primjenu [22]. Iz omjera brzine kompresijskog vala V_P i dvostruke povratne frekvencije f_T računa se debljina betonske ploče. U slučaju delaminacija (lisnatosti) u konstrukciji val se reflektira na manjoj dubini, pa je frekvencija povratnog vala viša nego za neoštećenu ploču.

3.6 Infracrvena termografija

Metoda infracrvene termografije zasniva se na principu da prisutnost pogrešaka u materijalu mijenja tok topline i djeluje na temperaturu površine, na osnovi čega se mogu odrediti položaji skrivenih oštećenja. Glavni dijelovi uređaja za infracrvenu termografiju su infracrvena kamera, sustav za skeniranje i sistem za prikupljanje podataka. Metoda se preporučuje za ispitivanja velikih površina betona, kao što su ploče mostova i sl. Moguće je skenirati i više od 100 m² u minuti [9].

3.8 Akustična emisija

Akustična emisija jest pojava elastičnih valova koji su generirani brzim otpuštanjem energije iz lokaliziranih izvora u materijalu. Produkti korozije zauzimaju veći obujam od čelika, što uzrokuje lokalne koncentracije naprezanja u betonu. Kada naprezanja postanu veća od vlačne čvrstoće betona dolazi do pucanja betona i dio

elastične energije se disipira u kinetičku energiju u obliku elastičnih valova. Elastični se valovi šire do površine betona, gdje se mogu detektirati s pomoću piezoelektričnih senzora.

Dobiveni se električni signali filtriraju, pojačavaju i obrađuju. Prednosti su metode što je za detekciju dovoljno postaviti mali broj piezoelektričnih senzora i u sustav se ne unosi nikakav signal koji bi mogao utjecati na njegovo ponašanje [23].

4 Zaključak

U radu su opisane danas najviše primjenjivane metode za određivanje stanja armature u betonu. Usporedbom različitih pristupa može se zaključiti da nerazorne metode imaju prednost pred razornim metodama jer omogućavaju kontinuirano praćenje stanja armature, mjerenja su moguća po cijeloj armiranobetonskoj konstrukciji, brže su i zahtijevaju manje troškova. Kod razornih metoda korozija armaturnog čelika može se izravno ustanoviti, ali ograničeni smo na određene točke konstrukcije i nemoguće je dobiti podatke za cijelu konstrukciju. S druge strane valja imati na umu da je određivanje stanja armaturnog čelika nerazornim metodama vrlo kompleksan problem i mogućnost pogrešne interpretacije rezultata mjerenja je velika. Upravo su zbog toga u radu naglašeni opis: elektrokemijskih procesa u armiranom betonu i uzročnici koji mogu dovesti do pogrešne procjene stanja armature. Iz ovoga slijedi da je u primjeni potrebno kombinirati više istraživačkih metoda kako bi se na najmanju moguću mjeru svela mogućnost pogreške. Tek na taj način može se dobiti jasna indikacija o uzrocima oštećenja i procijeniti stanje armature.

Većina opisanih metoda primjenjuje se na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu i u Institutu građevinarstva Hrvatske u Zagrebu.

LITERATURA

- [1] Ayala, V.; Ingalls, A.; Genesca, J.: *Mathematical Modeling of Rebar Corrosion in Seawater*, InterCorr/96, the 1st Online Corrosion Conference, 1996.
- [2] Sagüés, A.A.: *Corrosion Measurement Techniques for Steel in Concrete*, Corrosion 93, The NACE Annual Conference and Corrosion Show, paper No 353, 1993., str. 1.-22.
- [3] Nagayama, M.; Tamura, H.; Shimozava K.: *Corrosion Monitoring Using Embedded Minisensors on Rebars in Concrete Rehabilitated with a VCI*, general Building Research Corporation of Japan 5-8-1, Fujishirodai, Suita, Osaka, Japan.
- [4] Elsener, B.; Böhni, H.: *Potential Mapping and Corrosion of Steel in Concrete, Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, N.S. Berke, V. Chaker, D. Whiting, EDS., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, str. 143.-156.
- [5] Tournay, P.; Berke N.: *A Call for Standardized tests for Corrosion Inhibiting Admixtures*, Concrete International, April 1993., str. 57.-62.
- [6] Schiessl, P.; Raupach, M.: *Monitoring System for the Corrosion Risk of Steel in Concrete Structures*, Concrete International, 1992., 7, str. 52.-55.
- [7] Katwan M.J.; Hodgkiess T.; Arthur P.D.: *Electrochemical Noise Technique for the Prediction of Corrosion Rate of Steel in Concrete Materials and Structures*, Vol29, June 1996, str. 286.-294.
- [8] Legat, A.; Osredkar, J.; Kuhar, V.; Leban, M.: *A Comparison between the Results of Measurements of Electrochemical Noise and Simultaneous Measurements of Corroded Surfaces*, EMCR 97, Trento, 1997.

- [9] Devalapura, R. K.; Kamel, M.R.; Arumugasaamy, P.: *Nondestructive Techniques for Corrosion Evaluation of Steel in Concrete, Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, Proceedings of International Conference held at the University of Sheffield, Vol 1, July 1994., str. 300.-309.
- [10] Abdul-Hamid, J. Al-Tayyib; Mohammad Shammim Khan, *Corrosion Rate Measurements of Reinforcing Steel in Concrete by Electrochemical Techniques*, ACI Materials Journal, May-June 1988., str. 172.-177.
- [11] Bjegović, D.; Miksic, B.; Stehly R.: *Test Protocols for Migrating Corrosion Inhibitors (MCI) in Reinforced Concrete*, Emerging Trends in Corrosion Control - Evaluation, Monitoring, Solutions, Vol 1, Akademia Books International and NACE International, India Section, New Delhi, India 1999. str. 3.-18.
- [12] Bjegović, D.: *Elektrokemijski aspekti korozije armiranog betona*, Građevinar, vol. 51, br 7, 1994., str. 405.-415.
- [13] Andrade, C.; Alonso, C.: *Corrosion Rate Monitoring in the Laboratory and on Site*, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 4, 1996., str. 315.-328.
- [14] Lemoine, L.; Wenger F.; Galland J.: *Study of the Corrosion of Concrete Reinforcement by Electrochemical Impedance Measurement*, Corrosion rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, N.S. Berke, V. Chaker, and D. Whiting, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990., pp. 118.-133.
- [15] Elsener, B.; Wojtas H.; Bohni H.: *Galvanostatic Pulse Measurements - Rapid on Site Corrosion Monitoring*, Proceedings of International Conference held at the University of Sheffield, 24 - 28 July, 1994., Vol 1, str. 236.-246.
- [16] Broomfield, J. P.; Rodriguez, J.; Ortega, L. M.; Garcia, A. M.: *Corrosion Rate and Life Prediction for Reinforced Concrete Structures*, GEOCISA Spain, Structural Faults and Repairs Symposium, June 1993.
- [17] Broomfield, J. P.; Rodriguez J.; Ortega L. M.; Garcia A. M.: *Corrosion Rate Measurements in Reinforced Concrete Structures by a Linear Polarization Device*, GEOCISA Spain, Philip D.Cady International Symposium on The Condition Assessment, Protection, Repair and Rehabilitation of Concrete Bridges Exposed to Aggressive Environments, ACI fall Convention, Minneapolis, Minnesota, November 1993.
- [18] Erić, Lj.; Bjegović, D.: *Korозиjski monitoring mjerjenjem brzine korozije armature u armirano betonskim konstrukcijama*, Ceste i mostovi, god. 45, 1999. br. 3-4, str. 79.-84.
- [19] Akid, R.: *Application of the Scanning Reference Electrode Technique to the Study of Steel Corrosion in a Cement-based Coating*, Conference held at the University of Sheffield, 24.-28. July, 1994. Vol 1, str. 278.-289.
- [20] Broomfield, J. P.: *Assesing Corrosion Damage on Reinforced Concrete Structures*, Proceedings of International Conference held at the University of Sheffield, 24-28 July, 1994. Vol 1, str. 1.-25.
- [21] Bjegović, D.; Mavar, K., *Ispitivanje ubrzane korozije armature u betonu*, (rad u pripremi za objavu)
- [22] Gucinski N.; Maher, A.: *Nerazorna ispitivanja seizmičkim metodama za optimalno održavanje i gospodarenje cestama*, Zbornik radova, Drugi hrvatski kongres o cestama, 24.-27. listopada 1999., knjiga 1, str. 211.-218.
- [23] Hartt, W.; Dunn, S; Weng, M.; Brown, R.: *Application of Acoustic Emission to Detection of Reinforcing Steel Corrosion in Concrete*, Paper No. 49, Corrosion/81, National Assoc. of Corrosion Engineers, Houston, 1981.

Slika 1. Shematski prikaz metoda za određivanje stanja armature u betonu