

Ocjenjivanje korozije armature i oštećenja betona na mostovima primjenom nerazornih ispitivanja

Kušter Marić, Marija; Mandić Ivanković, Ana; Vlašić, Anđelko; Bleiziffer, Jelena; Srbić, Mladen; Skokandić, Dominik

Source / Izvornik: **Građevinar, 2019, 71, 843 - 862**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

<https://doi.org/10.14256/JCE.2724.2019>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:451679>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-01**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 10.6.2019.

Ispravljen / Corrected: 22.9.2019.

Prihvaćen / Accepted: 3.10.2018.

Dostupno online / Available online: 10.10.2019.

Ocjenjivanje korozije armature i oštećenja betona na mostovima primjenom nerazornih ispitivanja

Autori:



Doc.dr.sc. **Marija Kušter Marić**
marijak@grad.hr



Izv.prof.dr.sc. **Ana Mandić Ivanković**
mandicka@grad.hr



Izv.prof.dr.sc. **Anđelko Vlašić**
vlastic@grad.hr



Doc.dr.sc. **Jelena Bleiziffer**
jbleiziffer@grad.hr



Dr.sc. **Mladen Srbić**
msrbic@grad.hr



Dominik Skokandić, mag. ing. aedif.
dskokandic@grad.hr

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Prethodno priopćenje

Marija Kušter Marić, Ana Mandić Ivanković, Anđelko Vlašić, Jelena Bleiziffer, Mladen Srbić, Dominik Skokandić

Ocjenjivanje korozije armature i oštećenja betona na mostovima primjenom nerazornih ispitivanja

U radu se raspravlja o gospodarenju mostovima u Hrvatskoj i njihovoj osjetljivosti na koroziju armature. Predlaže se, te na šest reprezentativnih mostova i razrađuje, novi pristup održavanju u kojemu se vizualni pregledi kombiniraju s nerazornim metodama. Koristeći tu metodologiju, moguće je ranije i točnije otkriti koroziju armature u konstrukcijskim elementima. Dobiveni rezultati i korelacije između različitih mjenjenih parametara važni su ulazni podaci za predviđanje budućeg propadanja konstrukcije i odlučivanje o budućim aktivnostima održavanja.

Ključne riječi:

geometrija pukotine, čvrstoća betona, zaštitni sloj betona, električna otpornost, polučelijasti potencijal

Preliminary note

Marija Kušter Marić, Ana Mandić Ivanković, Anđelko Vlašić, Jelena Bleiziffer, Mladen Srbić, Dominik Skokandić

Assessment of reinforcement corrosion and concrete damage on bridges using non-destructive testing

Management of bridges in Croatia and their vulnerability to reinforcement corrosion is discussed in the paper. New maintenance approach, where visual inspections are combined with the non-destructive testing methods, is proposed and demonstrated on six representative bridges. Using this methodology, reinforcement corrosion on structural elements may be detected earlier and more precisely. Obtained results as well as correlations between different measured parameters are important input parameters for prediction of future degradation of structures and decision making for future maintenance activity.

Key words:

crack geometry, concrete strength, concrete cover, electrical resistivity, half-cell potential

Vorherige Mitteilung

Marija Kušter Marić, Ana Mandić Ivanković, Anđelko Vlašić, Jelena Bleiziffer, Mladen Srbić, Dominik Skokandić

Bewertung von Bewehrungskorrosion und Betonschäden an Brücken durch zerstörungsfreie Prüfung

Das Management von Brücken in Kroatien und ihre Anfälligkeit für Bewehrungskorrosion werden in dem Papier erörtert. An sechs repräsentativen Brücken wird ein neuer Wartungsansatz vorgeschlagen und demonstriert, bei dem Sichtprüfungen mit den zerstörungsfreien Prüfmethode kombiniert werden. Mit dieser Methode kann Bewehrungskorrosion an Strukturelementen früher und genauer erkannt werden. Erhaltene Ergebnisse sowie Korrelationen zwischen verschiedenen gemessenen Parametern sind wichtige Eingabeparameter für die Vorhersage zukünftiger Verschlechterungen von Strukturen und die Entscheidungsfindung für zukünftige Instandhaltungstätigkeiten.

Schlüsselwörter:

Rissgeometrie, Betonfestigkeit, Betondeckung, spezifischer elektrischer Widerstand, Halbzellenpotential

1. Uvod

Velika većina infrastrukture, npr. mostovi, zgrade, tuneli, brane - izgrađena je od betona. Više od 90 % mostova na državnim cestama u Hrvatskoj je izvedeno od armiranog ili prednapetog betona [1], a slična raspodjela prema gradivu vrijedi za mostove na drugim cestama u Hrvatskoj, ali i širom svijeta. Prema hrvatskom nacionalnom dodatku HRN EN 1990:2011/NA:2011 europske norme HRN EN 1990:2011 [2], projektirani uporabni vijek je 50 godina za mostove prosječne važnosti i/ili uobičajenih dimenzija te 100 godina za mostove iznimne važnosti i/ili velikih dimenzija. Pouzdanost konstrukcije trebala bi biti iznad minimalno dopuštene razine tijekom predviđenog vijeka trajanja, uz redovito održavanje. Ipak, mnogi betonski mostovi su, zbog propadanja konstrukcije i materijala, u lošem stanju već nakon 20 do 30 godina uporabe te ne mogu doseći projektirani vijek uporabe bez složenih i skupih popravaka [3]. Uzroci dotrajavanja mostova i skraćivanja njihovog uporabnog vijeka su: pogreške i propusti tijekom projektiranja, loša kvaliteta građenja, izostanak održavanja, mehanizmi propadanja uzrokovani agresivnim okolišem, povećanje uporabnih opterećenja i izvanredna djelovanja te vrlo često kombinacija nekoliko prethodno spomenutih uzroka [4-15].

Korozija armature u betonu je najčešći oblik propadanja armiranobetonskih (AB) konstrukcija, osobito mostova izloženih moru i/ili solima za odležavanje. Korozijski proces u AB konstrukcijama se prepoznaje po smeđim mrljama hrđe koje se pojavljuju na površini betona i/ili raspucanom zaštitnom sloju betona. Kloridima izazvana korozija čelika u betonu smanjuje trajnost, ali i nosivost i uporabljivost konstrukcije [16-24]. Štoviše, u posebnim uvjetima može dovesti do rušenja konstrukcije od prednapetog betona uslijed krtog loma korodiranih kabela [25]. Pukotine i oštećenja betona uzrokovana drugim mehaničkim i nemehaničkim procesima dodatno ubrzavaju korozijske procese i uzrokuju progresivno dotrajavanje konstrukcija [6, 7].

Vizualni pregled je najčešće primjenjivana metoda za ocjenjivanje stanja mosta i temelj za planiranje njihova održavanja. No koroziju armature moguće je vizualnim pregledom uočiti tek kada je već uznapredovala. Stoga je u okviru ovog istraživanja, na šest pokaznih primjera mostova, razmatrana primjena nerazornih ispitivanja kao dodatak vizualnom pregledu, radi postizanja veće objektivnosti pri ocjenjivanju konstrukcije mosta i otkrivanja osjetljivosti na koroziju prije pojave vidljivih oštećenja, i/ili točnije ocjene stanja konstrukcije. Također, radi proaktivnog održavanja mostova nužno je predvidjeti buduće stanje konstrukcije pomoću numeričkih modela predviđanja uporabnog vijeka, pri čemu rezultati nerazornih ispitivanja mogu poslužiti za kalibraciju i verifikaciju modela [26, 27].

2. Gospodarenje mostovima u Hrvatskoj

U ovo istraživanje je uključeno pet društava za upravljanje, građenje i održavanje cesta koja su odgovorna otprilike za 3500 mostova - računajući i nadvožnjake i podvožnjake, na različitim

vrstama cesta u Hrvatskoj (tablica 1.) [26]. Sva ta društva imaju ažurirani popis mostova, ali su sustavi gospodarenja mostovima (SGM) uspostavljeni samo u Hrvatskim autocestama d.o.o. i Hrvatskim cestama d.o.o. [1, 26].

Oba sustava gospodarenja mostovima, i Hrvatskih autocesta i Hrvatskih cesta, imaju odgovarajući algoritam za ocjenu stanja svakog konstrukcijskog elementa na temelju opsežnih podataka o uočenim oštećenjima. Algoritam Hrvatskih autocesta pohranjen je u računalnom sustavu, a algoritam Hrvatskih cesta primjenjuje se ručno [1, 26]. Ocjena stanja konstruktivnih elemenata drugih cestovnih mostova provodi se bez standardizirane procedure za vizualni pregled te su rezultati manje objektivni, što posebno vrijedi za mostove na cestama nižeg razreda (županijske, lokalne i nerazvrstane ceste) [1, 26].

Uz izvanredna djelovanja (poplave, klizišta, potres, udar vozila i plovila) nakon kojih slijedi izvanredni vizualni pregled, rezultati periodičnih vizualnih pregleda osnova su za izradu programa održavanja mosta i donošenje odluka o pojačanom održavanju (popravicima, ojačanjima i rekonstrukciji) [1]. Posebni vizualni pregled, nadopunjen ispitivanjima na terenu i/ili laboratorijskim ispitivanjima, obično se provodi nakon što je donesena odluka o nužnosti radova pojačanog održavanja s ciljem utvrđivanja opsega i složenosti radova sanacije [26].

Većina društava za upravljanje cestama izrađuju plan održavanja samo godinu dana unaprijed, na temelju četverogodišnjeg programa održavanja javnih cesta. Nadalje, ne osiguravaju modeliranje predviđanja dotrajavanja i dostatne analize dotrajavanja konstrukcije tijekom vremena. Jedinu iznimku u takvoj praksi predstavljaju veliki i važni mostovi i pripremne analize mostova na državnim cestama [28].

2.1. Osjetljivost mostova na koroziju armature izazvanu kloridima

Betonski mostovi izloženi kloridima iz soli za odležavanje i/ili morskog okoliša osobito su osjetljivi na koroziju armature uzrokovanu kloridima. Iako se u Hrvatskoj razlikuju tri tipa klime - kontinentalna, snježno-šumska i mediteranska, temperature ispod točke smrzavanja i snijeg su mogući na svim hrvatskim cestama, čak i u najjužnijim i najtoplijim krajevima kao što je Dubrovnik. Kao soli za odležavanje na državnim cestama i autocestama koriste se natrijev klorid (NaCl) i kalcijev klorid (CaCl₂) bez pijeska ili sitnog šljunka. Postoje dva načina posipanja cesta solju: preventivni i kurativni. Preventivno posipanje se provodi:

- pri vlažnom kolniku, kada temperatura zraka naglo pada prema 0 °C
- neposredno prije početka padanja snijega
- kod suhog ili vlažnog kolnika kada se očekuje, odnosno prognozira pojava "ledene kiše".

Kurativno posipanje se obavlja kada je smanjena hvatljivost kolnika, a može se koristiti suha i ovlažena sol, što ovisi o stanju

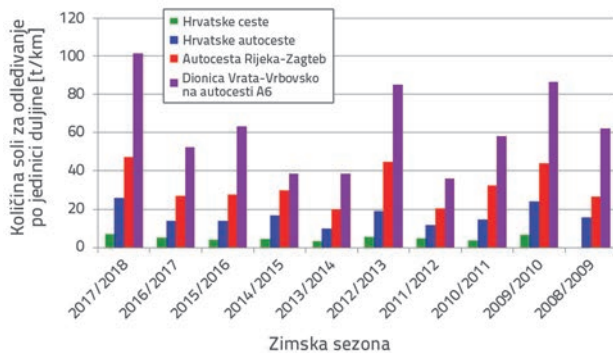
Tablica 1. Politike gospodarenja mostovima koje primjenjuju društva za upravljanje cestama uključena u istraživanje [26]

| Društvo za upravljanje cestama | Hrvatske autoceste | Autocesta Rijeka - Zagreb | Hrvatske ceste | Grad Zagreb | Županijska uprava za ceste Krapinsko-zagorske županije |
|---|---|---|---|---|---|
| Ukupna duljina cestovne mreže [km] | 2 x 920,5 (puni profil autoceste) | 2 x 175,0 (puni profil autoceste) | 7129,62 | 2589,00 | 661,23 |
| Vrsta ceste | Autoceste | Autoceste | Državne ceste | Nerazvrstane ceste | Županijske i lokalne ceste |
| Broj mostova | 1 213 (L > 5 m) | 75 velikih mostova; > 100 nadvožnjaka, podvožnjaka i ostalih prolaza / prijelaza | ≈ 1 800 (L > 2 m) | ≈ 228 (L > 2 m) | 70 (L > 5 m) |
| Razdoblje za koje se donosi program ulaganja u održavanje | 1 godina | 1-2 godine | 4 godine | 1 godina | 1 godina |
| Ažuriran popis mostova | Da | Da | Da | Da | Da |
| Sustav gospodarenja mostovima | Da, od 2008. | Ne | Da, od 1996., ažuriran 2001. | Ne | Ne |
| Temelj za odlučivanje o popravcima, rekonstrukciji ili uklanjanju mostova | Periodični vizualni pregledi; opasnosti koje slijede izvanredni vizualni pregledi | Periodični vizualni pregledi; opasnosti koje slijede izvanredni vizualni pregledi | Periodični vizualni pregledi; opasnosti koje slijede izvanredni vizualni pregledi | Periodični vizualni pregledi; opasnosti koje slijede izvanredni vizualni pregledi | Periodični vizualni pregledi; opasnosti koje slijede izvanredni vizualni pregledi |
| Izrađene standardizirane procedure za vizualni pregled mostova | Da | Da | Da | Ne | Ne |
| Vrste i učestalost periodičnih vizualnih pregleda mostova | | | | | |
| Rutinski - redovna ophodnja ceste | min 3x/danu | min 3x/danu | min 1x/danu | n.d. | županijske: min 2x/mjesecu; lokalne: min 1x/mjesecu |
| Sezonski vizualni pregled | 2x/godini | 2x/godini | - | - | 2x/godini |
| Godišnji vizualni pregled | - | - | 1x/2 godine | 1x/2 godine | - |
| Glavni vizualni pregled | 1x/6 godina | 1x/6 godina | 1x/6 godina | 1x/6 godina | 1x/6 godina |

na kolniku. Soli ovlažene otopinom natrijevog ili kalcijevog klorida koriste se u sljedećim uvjetima: zaleđeni kolnik, povećana vlaga u zraku i niske temperature, golomrazice, niske magle i kiše koja pada na pothlađeni kolnik, smrznutog i uglađenog snijega na kolniku, vlažnog kolnika u uvjetima koji upućuju na mogućnost nastanka poledice te svim navedenim u kombinaciji s bočnim vjetrom.

Na slici 1. prikazana je sezonska potrošnja soli za odleđivanje po jediničnoj duljini na autocestama i državnim cestama u proteklom desetljeću na temelju analize podataka dobivenih od društava za upravljanje cestama. Prosječna sezonska potrošnja soli za odleđivanje po kilometru državne ceste za oba smjera (dvije prometne trake) je 5,0 t/km. Prosječna sezonska potrošnja soli za odleđivanje po kilometru svake odvojene kolničke trake autoceste (dvije prometne trake) je 16,65 t/km u Hrvatskim autocestama i 32,08 t/km u Autocesti Rijeka - Zagreb. Prosječna sezonska potrošnja soli za odleđivanje po kilometru svake odvojene kolničke trake autoceste (dvije prometne trake)

na dionici Vrata - Vrbovsko autoceste A6, duljine 34,9 km i pod upravom Autoceste Rijeka - Zagreb, a na kojoj su najizraženiji zimski uvjeti, iznosi čak 62,12 t/km.



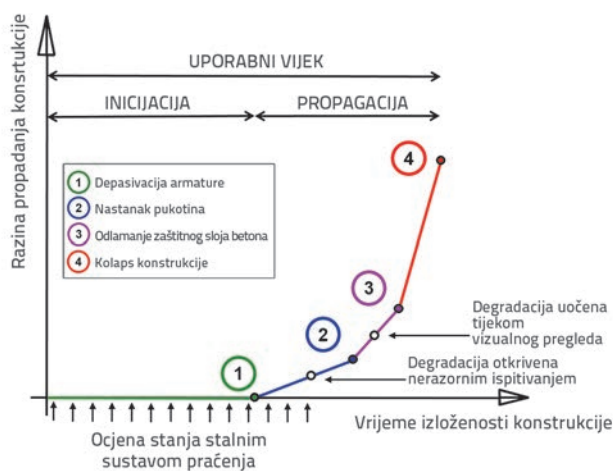
Slika 1. Sezonska potrošnja soli za odleđivanje po kilometru državne ceste za oba smjera (dvije prometne trake) i svake odvojene kolničke trake autoceste (dvije prometne trake)

Tijekom slabih i srednjih zimskih uvjeta, npr. temperature ispod 0 °C s maglom i mrazom, državne ceste se posipaju jedanput dnevno, a autoceste jedanput ili dvaput dnevno. Razlika u učestalosti posipanja državnih cesta i autocesta izraženija je tijekom jakih zimskih uvjeta: državne ceste se posipavaju solju dva puta dnevno, a na autocestama četiri do čak osam puta dnevno. Veće brzine vozila na autocestama pridonose jačem i širem rasprostiranju soli za odleđivanje nošenih zrakom. Stoga nije iznenađujuće da su mostovi i nadvožnjaci na autocestama osjetljiviji na koroziju uzrokovanu kloridima u odnosu na konstrukcije na cestama nižih razreda, bez intenzivnog prometa [3].

Jadranska obala predstavlja ekstremno agresivan morski okoliš za betonske konstrukcije, osobito na lokacijama armiranobetonskih lučnih mostova velikih raspona - Krčkog mosta, Paškog mosta i Masleničkog mosta, uslijed kombinacije sljedećih fenomena [6, 10, 30]:

- relativno visoki salinitet Jadranskog mora od 3,5 do 3,8 % mase vode
- jaka bura podiže morsku pjenu i nanosi kloride na sve konstrukcijske elemente
- vruća ljeta, s maksimalnom godišnjom temperaturom zraka do 37 °C, ubrzavaju prodor klorida u beton
- 10 - 15 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja godišnje
- prosječna godišnja relativna vlažnost zraka od 71 % pogodna je za koroziju čelika u betonu.

Korozija čelične armature u betonu odvija se u dvije faze (slika 2.): inicijacije i propagacije [21, 31, 32].



Slika 2. Propadanje konstrukcije uslijed korozije armature i moguće metode ocjenjivanja (preuzeto iz [21, 29] i prilagođeno)

Fazu inicijacije karakterizira prodor klorida u beton i ona završava depasivacijom čelične šipke dosežanjem kritične koncentracije slobodnih kloridnih iona u pornoj otopini u betonu u dodiru s površinom čelika. Faza propagacije obuhvaća elektrokemijske procese otapanja željeza što dovodi izravno do smanjenja poprečnoga presjeka armature i stvaranja korozijskih produkata (hrđe). Volumen korozijskih produkata je 2 do 7 puta

veći od volumena reaktanata, što ima za posljedicu lokalno raspucavanje betona i smanjenje prionjivosti između betona i šipke [6, 33]. Raspucavanje betona i smanjenje prionjivosti betona i armature dovodi do odvajanja zaštitnog sloja betona. Vizualnim pregledom se korozija armature u betonu može opaziti tek u uznapredovanoj fazi [26]. Naime, prije depasivacije armature nema korozijskih oštećenja, dok se oštećenja na početku propagacije, u obliku mikropukotina u betonu, teško uočavaju bez posebnih uređaja. Dodatno, vizualni se pregled, kao glavni alat za ocjenu stanja mosta, temelji na subjektivnoj odluci osobe koja provodi pregled, koja može znatno varirati zbog različitih razina znanja i iskustva [1].

2.2. Utjecaj oštećenja betona na koroziju armature

Neoštećeni beton, dobre kvalitete, s dovoljnom debljinom zaštitnog sloja betona, djeluje kao fizička prepreka koja štiti pasivni film na čeličnoj armaturi od depasivacije uzrokovane dosežanjem granične koncentracije klorida na razini armature. Nadalje, raspucani beton omogućuje brži prodor klorida do razine armature što skraćuje vrijeme depasivacije, a u fazi propagacije omogućuje dovoljne količine kisika na anodnim i katodnim dijelovima armature što rezultira većom brzinom korozije.

Utjecaj pukotina na prodor klorida u beton opsežno je istraživao na uzorcima u laboratorijskim uvjetima, pri čemu je eksperimentalno utvrđena difuznost raspucanog betona s pukotinama širine 0,2 do 0,4 mm, 10 do 10³ puta veća nego u neraspucanom betonu jednake kvalitete [34-37]. Međutim, još uvijek je iznimno malo istraživanja kojima je cilj kvantificirati utjecaj pukotina u betonu, ali i drugih nedostataka, na koroziju armature u postojećim konstrukcijama u stvarnom okolišu, s pratećom numeričkom analizom [38, 39].

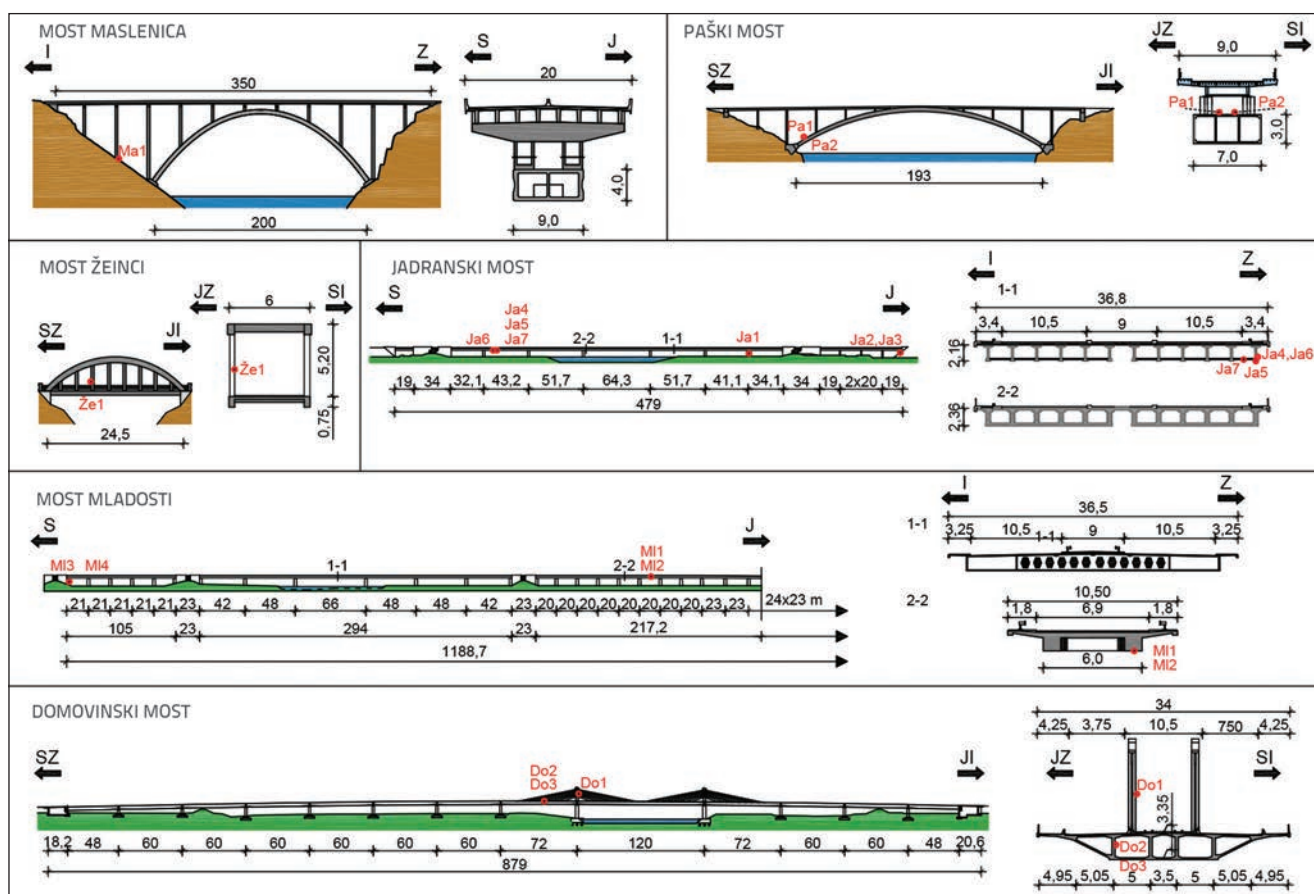
3. Pokazni primjerci mostova - studije slučaja

Predložena metodologija inovativnog proaktivnog programa održavanja, u kojem se vizualni pregled kombinira s nerazornim ispitivanjima kako bi se mjerili pokazatelji ponašanja vezani uz materijal, konstrukciju i koroziju te kako bi se odredila njihova međusobna ovisnost, prikazana je na šest betonskih cestovnih mostova različitih po vrsti, starosti, materijalu i zahtjevima prometa (tablica 2., slika 3.) [26, 27]. Most Maslenica na autocesti i Paški most na državnoj cesti izloženi su morskom okolišu, a ostali su mostovi smješteni u kontinentalnoj klimi.

Inicijalni vizualni pregled je proveden na svakom mostu kako bi se otkrila oštećenja (pukotine) na konstrukcijskim elementima i tako utvrdila mjesta za nerazorna ispitivanja. Mjerna mjesta su raspodijeljena po dijelovima mosta tako da im se može pristupiti bez posebnih platformi, ali na način da su uključeni različiti konstrukcijski elementi npr. stupovi, upornjaci, devijatori, vješaljke i nosači. Mjesta su odabrana na način da se obuhvate različiti uzročnici oštećenja i raspucavanja: skupljanje, slijeganje, temperaturna djelovanja, pogreške u projektiranju i razradi detalja, preopterećenje, korozija armature itd.

Tablica 2. Osnovni podaci o mostovima za studije slučaja [26, 27]

| Most | Most Maslenica | Paški most | Most Žinci | Jadranski most | Most mladosti | Domovinski most |
|-----------------------------|------------------------------------|---|--|------------------------------------|--|--|
| Otvoren za promet | 1997. | 1968. | 1913. | 1981. | 1974. | 2006. |
| Vrsta mosta | Lučni s kolnikom gore | Lučni s kolnikom gore | Lučni s preuzetim potiskom | Kontinuirani nosač | Kontinuirani nosač | Most prednapet po ekstradosu |
| Glavni raspon [m] | 200 | 193,20 | 24,50 | 63 | 66 | 120 |
| Duljina [m] | 374,74 | 279,6 | 24,5 | 479 | 294 | 879 |
| Širina [m] | 20,40 | 9,0 | 6,0 | 36,8 | 36,5 | 34 |
| Rasponski sklop | 8 prednapetih T nosača + AB ploča | 2 kontinuirana čelična nosača + ortotropna kolnička ploča | Roštijl od uzdužnih i poprečnih AB nosača + AB ploča | 12 prednapetih I nosača + AB ploča | Glavni most: 2 čelična sandučasta nosača + AB ploča; Pristupni vijadukti: roštijl od prednapetih uzdužnih i AB poprečnih nosača + AB ploča | Izvana prednapeti betonski sandučasti nosač + poprečno prednapeta betonska ploča |
| Vrsta veziva | Portland cement PC 45 s 30 % zgure | Portland cement PC 350 | nije poznato | nije poznato | nije poznato | nije poznato |
| Godina posljednjeg popravka | 2017. | 1999. | - | - | 2010.* (*pristupni vijadukti) | 2012. |



Slika 3. Mostovi za studije slučaja: karakteristični nacrti s naznačenim mjernim mjestima

3.1. Most Maslenica

Most Maslenica na autocesti smješten je na jadranskoj obali, na prijelazu preko Novskog ždrila koje karakterizira vrlo agresivna mikroklima. Pri projektiranju mosta posebna je pozornost posvećena problematiki trajnosti:

- za optimizaciju sastava betona primijenjen je numerički model predviđanja uporabnog vijeka
- smanjen je broj spojeva u konstrukciji
- povećana je debljina zaštitnog sloja betona - 10 cm za temelje luka te 5 cm za ostale elemente
- bolja razrada detalja u odnosu na starije AB mostove
- postavljen je sustav stalnog praćenja konstrukcije.

Ipak, nakon devet godina izloženosti morskim uvjetima, tijekom prvog vizualnog pregleda 2006., na mostu su uočeni znakovi korozije uzrokovane kloridima [40, 41]. Oštećenja uslijed kloridne korozije su znatno napredovala tijekom nekoliko sljedećih godina [27, 42-44] i most je popravljen 2018. Površinska zaštita obuhvaća impregnaciju koja sprečava koroziju, reparaturni mort i zaštitni premaz, a na najizloženijim i najviše oštećenim elementima upotrijebljen je beton armiran čeličnim vlaknima i povećana je debljina zaštitnog sloja [27, 44].

Gornji dio temelja stupa S2 (oznaka: Ma1), izložen kloridima nošenim zrakom, nije bio obuhvaćen popravkom 2018. godine, pa je on korišten kao mjerno mjesto u okviru ovog istraživanja (slika 3.).

3.2. Paški most

Paški most osigurava čvrstu cestovnu vezu preko tjesnaca Ljubačka Vrata između otoka Paga i hrvatskog kopna. Potpuno betonska konstrukcija izgrađena je 1968. primjenom tada inovativne konzolne metode građenja velikih AB lukova [45]. Most je smješten u iznimno agresivnom morskom okolišu s jakim vjetrovima uslijed kojih dolazi do zapljuskivanja i prskanja konstrukcijskih elemenata morskom vodom i zrakom nošenom solju [10]. Dodatno, most je pogođen projektilima tijekom Domovinskog rata u 90-ima. Luk je 1991. godine ojačan i zaštićen dodatnim slojem armiranog morta i premazom, a temeljita je rekonstrukcija izvedena 1999. kada je betonski rasponski sklop potpuno uklonjen i zamijenjen čeličnom konstrukcijom, nadlučni stupovi su obloženi betonom i čelikom te je obnovljen zaštitni premaz luka [46]. Posljednji pregled i ispitivanja betonskih dijelova Paškog mosta izvršeni su 2015. [47] te je uslijedio projekt sanacije 2017. [48] koji obuhvaća šest različitih tehnika popravka ovisno o stupnju oštećenja konstrukcijskog elementa. Za najugroženije konstrukcijske elemente predviđena je zamjena zaštitnog sloja betonom C60/75 armiranim čeličnim vlaknima i povećanje njegove debljine te nanošenje zaštitnog premaza na armaturu, uvođenje migrirajućih inhibitora korozije te polimer-cementni i polimerni površinski premaz.

Mjerna mjesta korištena u okviru ovog istraživanja nalaze se na gornjoj plohi luka, u blizini pete luka na otoku Pagu (oznake: Pa1 i Pa2, slika 3.).

3.3. Most mladosti

Most mladosti, sagrađen 1974., najstariji je među mostovima odabranim za ovo istraživanje. Most je dug 1188 m te podijeljen u tri dilatacije. Gornji ustroj glavnog mosta (središnja dilatacija) spregnuta je konstrukcija, a sjeverni i južni pristupni vijadukti imaju rebrasti poprečni presjek od predgotovljenih nosača [49]. Tijekom zadnjeg vizualnog pregleda zaključeno je da je konstrukcijsko i funkcionalno stanje mosta ugroženo [50]. Znakovi korozije armature su prisutni na svim konstrukcijskim elementima kao posljedica slijedećih utjecaja: nepostojanje hidroizolacije na armiranobetonskoj ploči koja je izložena solima za odleđivanje; otkazivanje sustava odvodnje, posebno unutar čeličnih omotača betonskih stupova; oprema mostova poput prijelaznih naprava i ležajeva pokazuje ozbiljna oštećenja; loša kvaliteta i nedovoljna debljina zaštitnog sloja betona. Istočni dio sjevernog prilaznog vijadukta saniran je 2010., a sanacija zapadnog dijela južnog vijadukta planirana je u bližoj budućnosti. Mjerna mjesta na ovom mostu uključuju (slika 3.): dno zapadnog rebrastog nosača na jugozapadnom prilaznom vijaduktu (oznake: M11, M12) i sjeverni zid upornjaka sjevernog prilaznog vijadukta (oznake: M13, M14).

3.4. Jadranski most

Jadranski most je sagrađen 1981. kao prvi suvremeni most od prednapetog betona u glavnom gradu Hrvatske. Sastoji se od: glavnog mosta (središnja dilatacija) sa sedam raspona te sjevernog i južnog prilaznog vijadukta s jednim odnosno četiri raspona. Većina gornjeg ustroja izvedena je od predgotovljenih nosača duljine 39 m, AB ploče i AB poprečnih nosača. Najdulji raspon iznad rijeke sastoji se od 39 m dugih predgotovljenih nosača i 12 m dugih sandučastih konzola iznad stupova [49]. Tijekom zadnjeg glavnog pregleda uočena su različita oštećenja i nedostaci: izmjerene vrijednosti klorida u betonu na razini armature iznad kritične vrijednosti; raspucavanje betona i odvajanje zaštitnog sloja uslijed korozije armature na glavnim nosačima, stupovima i upornjacima; oštećena i dotrajala oprema mosta. Zaključeno je da je nosivost mosta smanjena [51]. Mjerna mjesta za ovaj most uključuju (slika 3.): stup (oznaka: Ja1), zid upornjaka (oznaka: Ja2), krilo upornjaka (oznaka: Ja3); glavni prednapeti nosač (oznake: Ja4-Ja6) i donja ploča (oznaka: Ja7).

3.5. Domovinski most

Domovinski most, sagrađen 2006., najnoviji je prijelaz preko rijeke Save u Zagrebu. Gornji ustroj je vanjsko prednapeti betonski sandučasti nosač. Na svakom od četiri devijatora koristi se osam parova vanjskih natega [49]. Određeni problemi su zabilježeni tijekom izvedbe mosta, uključujući nezadovoljavanje betonskih uzoraka na tlačnu čvrstoću, pukotine u betonu nakon uklanjanja oplate, pa je trebalo dodatno prednapeti sandučasti nosač kao mjeru njegove sanacije tijekom izvedbe. Dodatne sanacije su izvedene 2012. kao posljedica neadekvatnog rješenja odvodnje

u okolini sidrišta natega, što je uzrokovalo procjeđivanje vode oko sidara u unutrašnjost sanduka [52]. Izvedena je nova hidroizolacija i betonski sloj za nagib, međutim, isti problemi i dalje su prisutni. Zaključak zadnjeg vizualnog pregleda bio je taj da je konstrukcija općenito u dobrom stanju, s izuzetkom manjeg raspucavanja betona u okolini sidrenih greda i devijatora natega. Vidljivi znakovi korozije armature nisu zabilježeni. Mjerna mjesta uključuju elemente gdje je zabilježeno raspucavanje betona: unutarnja ploha sjeveroistočnog devijatora (oznaka: Do1) i dvije lokacije na sidrenom okviru unutar sanduka nosača (oznake: Do2, Do3).

3.6. Most Žeinci

Most Žeinci je armiranobetonski most sagrađen 1913. te je daleko najstarija razmatrana konstrukcija. Smješten je u kontinentalnoj klimi i prevodi lokalnu cestu uz ograničenje težine vozila do 8 tona i brzine do 10 km/h.

Podaci o projektu, izvedbi i održavanju vrlo su ograničeni, pa je čak i osnovna geometrija mosta određena mjerenjem na terenu. Rasponski se sklop sastoji od dva AB uzdužna nosača i sedamnaest poprečnih nosača, povrh kojih je AB ploča, a koji je bočno ovješten na dva lučna nosača preko osam AB vješaljki sa svake strane. U podgledu rasponskog sklopa uočena su velika područja izložene i korodirale armature.

Vješaljka 3 (gledano od zapada) na južnoj strani mosta odabrana je kao mjerno mjesto (oznaka: Že1).

4. Nerazorna ispitivanja na betonskim mostovima

Koroziju armature i ostala oštećenja u betonskoj konstrukciji potrebno je utvrditi u ranoj fazi kako bi se odredio optimalan plan održavanja s ciljem smanjenja troškova i složenosti radova sanacije te bolje kontrole progresivnog dotrajavanja konstrukcije. Dostupna nerazorna ispitivanja za procjenu trajnosti betonskih konstrukcija i njenih mehaničkih svojstava uključuju sljedeće metode: akustične (mehaničke: potezanje lanca, metoda impuls-odjek; i ultrazvučne: brzina ultrazvučnog pulsa, akustična emisija), elektromagnetske (georadar), elektrokemijske (polučelijasti potencijal, električna otpornost, otpornost polarizacije, metoda galvanostatičkog pulsa, elektrokemijski šum), termalne (infracrvena termografija) i digitalno mapiranje (3D optička evaluacija, daljinska kamera, korelacija digitalne mape) [39, 53-58].

Za razliku od razornih metoda ispitivanja, nerazorne metode se mogu primijeniti nekoliko puta tijekom uporabnog vijeka građevine, na većem broju konstrukcijskih elemenata, i na većim površinama, kako bi se detektirala mjesta s nedostacima, stupanj razine oštećenja, i kako bi se kvantificirala izmjerena svojstva. Međutim, svaka nerazorna metoda ovisi o brojnim parametrima (npr. sastav betona, nehomogenost betona, količina vode, itd.). Rezultati ocjene stanja mosta dobiveni nerazornim ispitivanjem ovise o uvjetima okoliša, utjecajima

ljudskih pogrešaka i interpretaciji podataka [56, 59]. Kako bi se ostvarila veća objektivnost rezultata, preporučuje se kombinirati nekoliko nerazornih metoda tijekom ocjenjivanja stanja konstrukcije, pogotovo onih koje ne ovise o istim parametrima [59]. Oštećenja i nedostaci konstrukcije koji su otkriveni nerazornim ispitivanjem mogu se dodatno ocijeniti polurazornim i razornim ispitivanjima, naročito ako postoji potreba za povećanim održavanjem kako bi se usporilo i lokaliziralo propadanje konstrukcije.

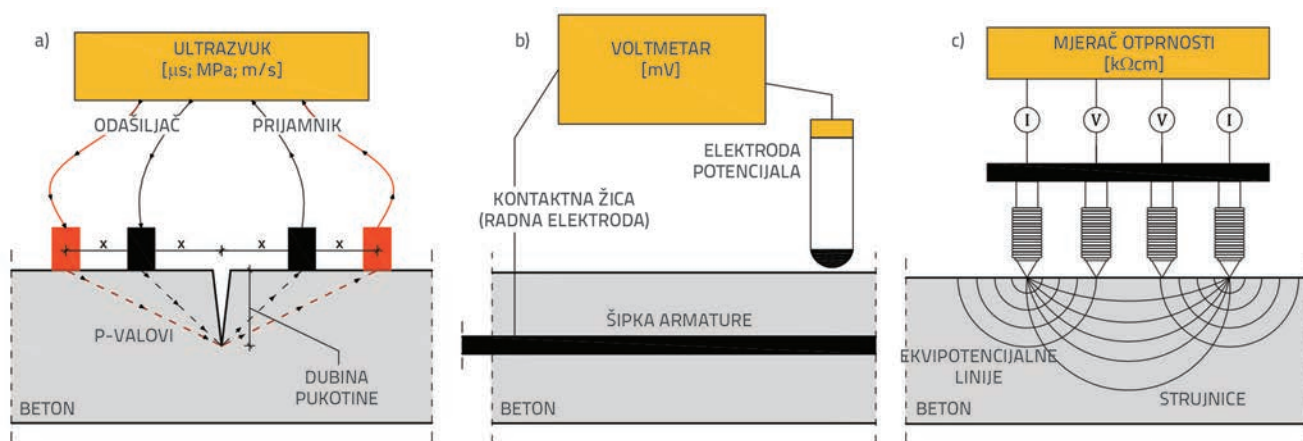
Prvi cilj ovog istraživanja je potvrda predložene metodologije, kada se vizualni pregledi kombiniraju s jednostavnim nerazornim metodama radi ranijeg otkrivanja oštećenja i/ili točnije ocijene stanja konstrukcije u odnosu na slučajeve kada se vizualni pregled obavlja bez nerazornog ispitivanja. Nakon prikupljanja, analiziranja i interpretacije rezultata nerazornih ispitivanja, zaključci se uspoređuju s rezultatima nezavisno provedenih dodatnih razornih ispitivanja, npr. određivanje udjela klorida u betonu i dubina karbonatizacije te vizualni pregled stanja armature nakon uklanjanja zaštitnog sloja betona. Drugi cilj je stvaranje baze podataka o postojećim konstrukcijama u stvarnim uvjetima okoliša koji će služiti kao ulazni podaci za numeričke modele pomoću kojih će se računalno simulirati daljnje propadanje konstrukcija te odrediti preostali uporabni vijek konstrukcije na osnovi mjerodavnih, direktno izmjerenih parametara mosta.

4.1. Odabrane nerazorne metode ispitivanja

U okviru ovog istraživanja nerazorne metode ispitivanja su odabrane na osnovi dostupnosti među izvršiteljima vizualnih pregleda mostova. Naime, isplativije i vremenski učinkovitije nerazorne metode mogu se lakše implementirati kao standardni dio glavnog vizualnog pregleda kako bi se osigurala pouzdanija ocjena stanja mosta. Nadalje, izmjereni parametri se mogu koristiti u kalibraciji numeričkog modela i simulaciji propadanja konstrukcije tijekom preostalog uporabnog vijeka [7, 26, 27].

Ovisno o vremenu i kvaliteti izvedbe, izvedena debljina zaštitnog sloja betona može se znatno razlikovati od projektnih vrijednosti koje zahtijevaju propisi [60]. Kako kvaliteta građenja, izvedena debljina zaštitnog sloja i oštećenja betona imaju značajan utjecaj na trajnost konstrukcije [61], mjerenje zaštitnog sloja, određivanje ujednačenosti kvalitete betona, otkrivanje i mjerenje oštećenja i pukotina u betonu provedeni su primjenom različitih nerazornih metoda koje će biti ovdje opisane.

Elektrokemijske metode su najprikladnije za nerazorna ispitivanja kad se ocjenjuje korozije armature u betonskoj konstrukciji. Među njima, izabrane su metode mjerenja polučelijastog potencijala i površinske električne otpornosti betona, jer one pružaju mogućnost procjene vjerojatnosti korozije s prihvatljivom točnošću (tablica 3.) [53, 62, 63]. Njihovi rezultati se mogu koristiti u numeričkim modelima za predviđanje uporabnog vijeka, a potrebni uređaji su pristupačniji u inženjerskoj praksi u odnosu na uređaje za mjerenje gustoće struje ili polarizacijske otpornosti [26].



Slika 4. Grafički prikaz odabranih nerazornih metoda: a) ultrazvučno ispitivanje dubine pukotina, b) mjerenje polučeljskog potencijala, c) električna otpornost betona - princip Wennerove sonde (preuzeto iz [53] i prilagođeno)

Ispitivanja na mostovima u okviru ovog istraživanja uključuju: traženje pozicije armature, mjerenje promjera šipke armature i debljine zaštitnog sloja betona, uočavanje pukotina, određivanje geometrije i uzroka pukotine, određivanje tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti betona, mjerenje polučeljustog potencijala i električne otpornosti betona. Načela određivanja dubine pukotine pomoću ultrazvuka, mjerenje polučeljustog potencijala te električne otpornosti prikazani su na slici 4.

Tablica 3. Vjerojatnost aktivne korozije [53, 62, 63]

| Razina korozije | Visoka | Srednja | Mala | Zanemariva |
|--|--------|--------------|-----------|------------|
| Polučeljusti potencijal [mV] (referentna elektroda: Cu/CuSO ₄) | < -350 | -200 do -350 | > -200 | - |
| Električna otpornost [kΩcm] | < 10 | 10 do 50 | 50 do 100 | >100 |

4.1.1. Tragač armature

U okviru ovog istraživanja, tragač armature se koristi tijekom ispitivanja na mostovima za dvije namjene [64]:

- kako bi se utvrdila pozicija armature u okviru preliminarne radnje koja prethodi nekom drugom ispitivanju u kojem je potrebno izbjegavati armaturu ili njenu pojavu uzeti u obzir (u ovom slučaju to je mjerenje ultrazvučne brzine pulsa i mjerenje električnog potencijala betona)
- kako bi se istražila armatura betonskih elemenata za koje nisu dostupni podaci, ili se podaci trebaju provjeriti, uključujući terensko određivanje debljine zaštitnog sloja betona i promjera šipke armature.

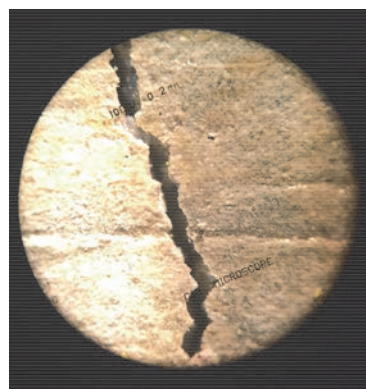
Uređaj koristi indukcijsku tehnologiju elektromagnetskog pulsa: zavojnice u sondi se periodično pune strujnim pulsovima tako generirajući magnetsko polje i, kako se vrtložne struje proizvode na površini bilo kojeg elektroprovodljivog materijala

u magnetskom polju, stvara se magnetsko polje suprotnog smjera, što rezultira promjenom voltaže koja se koristi u mjerenju [65].

Uređaj ima točnost mjerenja u skladu sa BS 1881: Dio 204 [64] i određivanje promjera šipke je ograničeno na maksimalni zaštitni sloj od približno 63 mm. Izmjerene vrijednosti zahtijevaju korekciju ako postoji više slojeva armature, mjesta preklapanja armature ili zavarenih mreža. Određene vrijednosti promjera šipke se potvrđuju pregledom projektne dokumentacije mosta, provjerom odlomljenih dijelova zaštitnog sloja, i/ili mjerenjima promjera izloženih šipki u blizini mjernog mjesta, a za neka je mjerna mjesta provedeno ispitivanje georadarom.

4.1.2. Optički mikroskop

Optički mikroskop visoke kvalitete služi za mjerenje širine pukotine u betonu. Uređaj se postavlja s osvijetljenim objektivom u os pukotine, a fokusiranje betonske površine se dobiva okretanjem prstena. Mjerna skala se tada okreće kako bi se poravnala okomito na pukotinu, što tada dopušta očitavanje širine pukotine. Koristeći kameru mobitela može se fotografirati pukotina kroz objektiv i dobiti točnije očitavanje (slika 5.).



Slika 5. Mjerenje širine pukotine kroz optički mikroskop na Domovinskom most (Do2)

Tablica 4. Red veličine uobičajenih vrijednosti polučelijastih potencijala čelika u betonu mjerenih korištenjem Cu/CuSO₄ referentne elektrode [74]

| Uvjeti u kojima se nalazi beton | Polučelijasti potencijal [mV] | |
|---|-------------------------------|-----------------------|
| | Minimalna vrijednost | Maksimalna vrijednost |
| Beton saturiran vodom bez O ₂ | -1000 | -900 |
| Mokar, kloridima zagađen beton | -600 | -400 |
| Vlažan beton bez klorida | -200 | +100 |
| Vlažan karbonatiziran beton | -400 | +100 |
| Suh karbonatiziran / nekarbonatiziran beton | 0 | +200 |

4.1.3. Sklerometar

Sklerometar (Schmidtov čekić) služi za procjenu ujednačenosti čvrstoće betona i otkrivanje potencijalnih mjesta slabije kvalitete [66-69]. Uređaj mjeri brzinu udara, v_d , i brzinu odskoka, v_R , neposredno prije i poslije udara, dajući osnovni parametar - vrijednost odskoka, Q :

$$Q = 100 \cdot \sqrt{\frac{E_R}{E_0}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\frac{m \cdot v_R^2}{2}}{\frac{m \cdot v_0^2}{2}}} = \frac{v_R}{v_0} \quad (1)$$

gdje je m masa sklerometra, E_0 i E_R su kinetička energija udarne igle neposredno prije i poslije udara.

Za temelj stupa S2 na Masleničkom mostu pronađena je korelacijska funkcija između vrijednosti odskoka, Q , i laboratorijski određene tlačne čvrstoće na četiri uzorka betonskih jezgri. Te su jezgre uzete na istom mjernom mjestu kako bi se izračunala karakteristična čvrstoća betona, f_{ck} [N/mm²], uzimajući u obzir specifični sastav betona i strukturu agregata [66, 67]:

$$f_{ck} = 0.000153Q^3 - 0.021193Q^2 + 1.739453Q + 0.000235 \quad (2)$$

gdje je Q izmjerena vrijednost odskoka.

Za ostala mjerna mjesta, gdje definiranje korelacijske funkcije nije bilo moguće zbog nedovoljnog broja laboratorijski određenih tlačnih čvrstoća betonskih uzoraka uzetih na odgovarajućem mjernom mjestu, korištena je 10-postotna krivulja, što znači da je 90 % uzoraka iznad krivulje i samo 10 % ispod krivulje. U ovim slučajevima, mjerenja su rađena kako bi se kvalitativno ocijenila ujednačenost kvalitete i čvrstoće betona te kako bi se otkrila potencijalna mjesta lošije kvalitete betona.

4.1.4. Ultrazvučna brzina pulsa

Ultrazvukom se koristi za određivanje homogenosti betona, prisutnosti šupljina i pukotina, kvalitete betona, dubine pukotine i modula elastičnosti, na način da šalje ultrazvučne valove i mjeri brzinu prodora ultrazvučnog vala u materijalu [70]. Zbog naravi područja primjene, pozicija 54 kHz sonde je uvijek postavljena

za indirektnu (površinsku) transmisiju. Indirektno postavljanje sonde, simetrično u odnosu na os pukotine, omogućuje proračun dubine pukotine, c_d , pretpostavljajući da je pukotina okomita na površinu elementa (slika 4.a) [70]:

$$c_d = x \cdot \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (3)$$

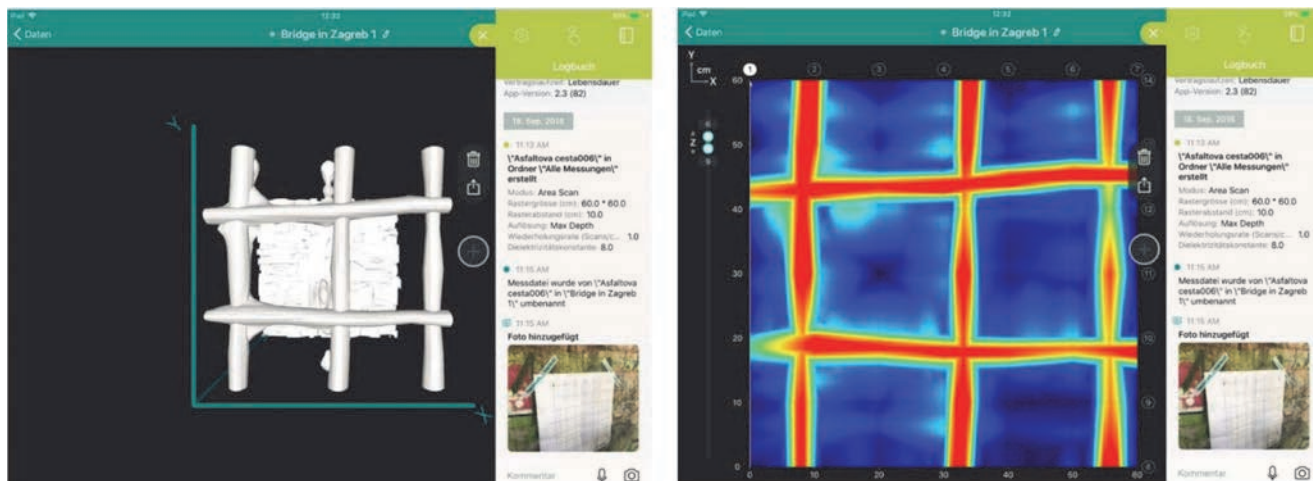
gdje je x [mm] udaljenost između sonde i osi pukotine, a T_1 i T_2 su izmjerena vremena puta zvuka povrhu pukotine za dvije različite pozicije sonde (slika 4.a).

Ovo je preporučena metoda za ultrazvučno mjerenje pukotina u normi HRN EN 12504-4:2004 [71], i ako su zadovoljene početne pretpostavke, većina rezultata je unutar 15 % u odnosu na stvarnu vrijednost debljine pukotine [72].

4.1.5. Polučelijasti potencijal

Mjerenje potencijala otvorenog kruga jedna je od najčešće primijenjenih metoda za ocjenu korozije armature u postojećim AB konstrukcijama (slika 4.b) [73]. Najčešće korištena norma za tu metodu, ASTM C876-09 [62], opisuje standardiziranu metodu ispitivanja korozijskog potencijala čelika za armiranje bez premaza, i vrednovanje rezultata (tablica 3.). Norma navodi ograničenje metode na čelik za armiranje bez premaza i u električnom strujnom krugu te naglašava da se rezultati dobiveni tom metodom ispitivanja ne smiju uzimati u obzir za određivanje konstrukcijskih svojstava čelika ili armiranobetonskog elementa. Često je za donošenje odluke o korozijskoj aktivnosti ubetoniranog čelika i njenog utjecaja na uporabni vijek konstrukcije, uz mjerenje korozijskog potencijala potrebno koristiti i druge podatke, npr. udio klorida, dubinu karbonatizacije, zaključke ispitivanja odvajanja zaštitnog sloja, rezultate brzine korozije i uvjete izloženosti. Glavni utjecaj na polučelijasti potencijal imaju: vlaga, debljina zaštitnog sloja betona, električna otpornost betona, temperatura i količina kisika na armaturi. Kod pripreme elektrode važno je osigurati:

- da je otopina kojom se puni elektroda saturirana
- da je elektroda ispunjena što je više moguće, minimumom zraka u odjeljku, tako da je otopina u kontaktu s drvenim čepom čak i kad se mjeri u smjeru prema gore.



Slika 6. Snimka GPR-om na ML3: 3D prikaz (lijevo) i prikaz vremenskog isječka (desno)

Preporučuje se nacrtati mrežu na površini. Grublje mreže se preporučuju za prve procjene, a finije za sumnjiva područja. Čak i za grublje mreže mjerenje polja potencijala daje dobre rezultate za kloridnu koroziju. Koroziju uslijed karbonatizacije karakterizira stvaranje manjih makroelemenata pa ju je moguće odrediti samo koristeći vrlo finu mrežu, ako uopće.

Red veličine uobičajenih vrijednosti (samo za informaciju) polučelijastih potencijala čelika u betonu mjerenih korištenjem Cu/CuSO_4 referentne elektrode prema RILEM TC 154-EMC [74] dani su u tablici 4., a najčešće korišteni kriteriji prema ASTM C 876 u tablici 3.

4.1.6. Električna otpornost betona

Površinska električna otpornost betona je jedan od ključnih pokazatelja ponašanja s obzirom na trajnost, za ocjenu korozije armature u betonu. Pruža dodatnu informaciju o trenutnom stanju materijala i konstrukcije, ali također omogućuje predviđanje preostalog uporabnog vijeka konstrukcija [75-79]. Uređaj za ispitivanje se temelji na principu Wennerove sonde s alfa-konfiguracijom pri kojoj su četiri elektrode u kontaktu s betonskom površinom (slika 4.c). Slaba struja I (A) pušta se između dvije vanjske sonde, mjeri se razlika potencijala ΔV (V) između dvije unutarnje sonde te se električna otpornost ρ (Ωm) dobiva iz:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

gdje je $a = 0,05$ m udaljenost između dvije sonde. Najvažniji čimbenik za pouzdano mjerenje je dobra veza između betonske površine i elektroda, pa betonska površina prije mjerenja treba biti glatka i očišćena od bilo kakvih premaza i nečistoća. Konačno, kako se električna struja prenosi ionima u pornoj tekućini, za uspješno mjerenje površina mora biti mokra [80,81]. Wennerova sonda se tijekom mjerenja postavi dijagonalno u odnosu na mrežu armature te se izvrši 6 do 12 mjerenja u svakom polju mreže, ovisno o veličini područja mjerenja (veći broj pojedinačnih mjerenja u svakom polju izvodi se kada je ukupno područje na

kojem se provodi mjerenje manje). Ispitivanje otpornosti na mostu ovisi o mnoštvu čimbenika: sastavu betona, udjelu vode, poroznosti, udjelu klorida, uvjetima okoliša, temperaturi itd. Ipak, ovo jednostavno nerazorno ispitivanje omogućuje ocjenu trenutnog i budućeg stanja korozije armature u fazama inicijacije i propagacije jer je obrnuto proporcionalno difuzivnosti klorida i brzini korozije izraženoj kao gustoća struje [75, 82]. Stoga, u okviru ovog istraživanja jedan od ciljeva je i kvalitativno ocijeniti raspone vrijednosti koji se mogu dobiti na postojećim konstrukcijama.

4.1.7. Georadar (GPR)

Georadar (eng. *Ground Penetrating Radar* - GPR) služi za određivanje položaja šipki u zidu upornjaka Mosta mladosti (mjerno mjesto ML3). Princip mjerenja uređaja je GPR s kontinuiranim valom i promjenom frekvencije u koracima. Ispitivanjem je dobiven prvi sloj šipki (slika 6.), a nije se uspjelo odrediti debljinu zida i drugi sloj šipki vjerojatno zato jer je debljina zida veća od mjernog područja uređaja (70 cm). Raspored uočenih šipki vrlo dobro odgovara rezultatima dobivenim tragačem armature, uz znatno kraće vrijeme potrebno za pripremu ispitivanja, samo ispitivanje, ali i izradu izvještaja jer su mogući prikazi vremenskih isječaka u realnom vremenu.

4.2. Metodologija nerazornih ispitivanja

Priprema za ispitivanje započela je skupljanjem i pregledavanjem dostupne projektne dokumentacije i dokumentacije o održavanju svakog mosta, sažeto prikazanih u 3. poglavlju. Tijekom preliminarnog vizualnog pregleda određena su mjerna mjesta na kojima će se provoditi ispitivanja. Nerazorno ispitivanje započinje čišćenjem površine betona i pronalaženjem mreže armature nakon kojih slijedi mjerenje debljine zaštitnog sloja betona i promjera šipki armature. Širina pukotina je mjerena karticama za usporedbu i optičkim mikroskopom, a ultrazvučnim su uređajem određeni dubina pukotine i dinamički modul elastičnosti. Vizualnim pregledom i prekućavanjem

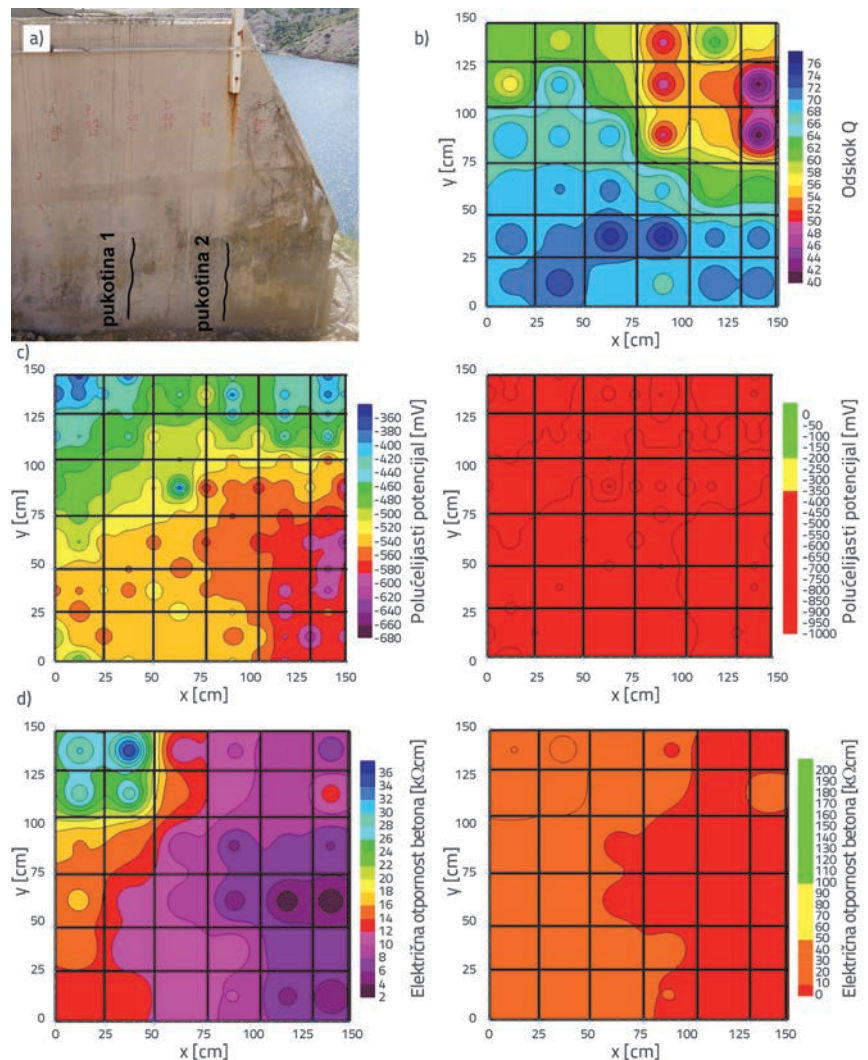
čekićem utvrđeni su uzorci raspucavanja i područja odvajanja zaštitnog sloja, tj. područja znatno oštećenog betona uslijed korozije armature. Čvrstoća betona određena je sklerometrom. Na kraju, nakon vlaženja površine betona, mjereni su polučelijasti potencijali i električna otpornost betona.

Na nekim mjernim mjestima nisu provedena ispitivanja polučelijastog potencijala i otpornosti betona zbog prisutnosti površinskih premaza betona. Veza na armaturu, potrebna za mjerenje polučelijastog potencijala, nije bila moguća na svim mjernim mjestima zbog ograničenja koja je postavio vlasnik mosta (ako je debljina zaštitnog sloja relativno velika, konstrukcija u dobrom stanju ili nedavno popravljena). Kako bi se ostvarili ciljevi istraživanja, ta su ograničenja prevladana dodavanjem dovoljnog broja mjernih mjesta na šest mostova. Mjesta na kojima se nisu mogla izvršiti mjerenja označena su znakom "/" u tablici 5.

5. Rezultati i rasprava

Cjelokupni rezultati ispitivanja provedenih na ukupno 18 mjernih mjesta prikazani su u tablici 5. Na većini mjernih mjesta (Ja1-7, Do2-3, MI1-4, Ma1) nalazi se barem jedna pukotina te okolni neraspucani beton. Na devijatoru Domovinskog mosta (Do1) te na vješaljki Mosta Žeinci (Že1) beton je ravnomjerno raspucan, a na Paškom mostu (Pa1-2) nisu uočene pukotine na površini betona. Razlozi nastanka pukotina su sljedeći: korozija armature (Ja2-3, Ja5, Ja7, Ma1), skupljanje betona (Do1), preopterećenje (MI1-2), slijeganje (MI3), proces smrzavanja-odmrzavanja (Že1), lokalne koncentracije naprezanja zbog prednapete armature (Ja4, Ja6) te sidrenje zatega (Do2-3).

Izmjerene vrijednosti detaljno su prikazane za samo tri lokacije (Ma1, MI4 te Ja2) zbog ograničenja duljine ovog rada. Konturni prikazi izmjerenog polučelijastog potencijala, električne otpornosti betona, vrijednosti odskoka (Q) sklerometra te fotografija mjernog mjesta na temelju stupa S2 Masleničkog mosta prikazani su na slici 7. Konturni prikazi polučelijastog potencijala te električne otpornosti betona izmjerene na sjevernom upornjaku pristupnog vijadukta Mosta mladosti (MI4) te na zidu južnog upornjaka Jadranskog mosta (Ja2) prikazane su na slikama 8. i 9. Svi konturni prikazi polučelijastog potencijala i



Slika 7. Mjerno mjesto na temelju stupa S2 Masleničkog mosta (Ma1): a) fotografija; b) konturni prikaz izmjerenih vrijednosti odskoka; c) konturni prikaz izmjerenih polučelijastih potencijala s intervalima legende od 20 mV (lijevo) i primjenom norme ASTM C876-91 za granične vrijednosti (desno); d) konturni prikaz izmjerene električne otpornosti s intervalima legende od 2 kΩcm (lijevo) i primjenom RILEM-ovih preporuka za granične vrijednosti (desno)

električne otpornosti betona dani su na dva načina:

- s malim intervalima izolija kako bi se prikazale razlike u gradijentima na svakom mjernom mjestu
- korištenjem preporučenih graničnih vrijednosti danima u tablici 3. norma ASTM C876-91 za polučelijasti potencijal te Rilemove preporučene vrijednosti za električnu otpornost betona; kako bi se stanje mjernih mjesta predstavilo na intuitivniji način.

Međusobni odnos vrijednosti polučelijastog potencijala i električne otpornosti betona prikazan je na slici 10. za sva mjerna mjesta. Smeđe mrlje na betonu i/ili otpadanje zaštitnog sloja, kao očiti pokazatelji korozije armature, primijećeni su samo na šest mjernih mjesta (Ja3, Ja5, MI1, Že1, Pa1, Pa2), na kojima izmjerene

Tablica 5. Sažeti prikaz rezultata nerazornih ispitivanja

| Mjerno mjesto | Vrijednosti | Poprečna / vertikalna armatura | | Uzdužna / horizontalna armatura | | Polučeljski potencijal [mV] | Električna otpornost [kΩcm] | Tlačna čvrstoća [MPa] | | Pukotine | | |
|---|-------------|--------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------|----------------|----------------------|---------------------------|
| | | Zaštitni sloj [mm] | Promjer [mm] | Zaštitni sloj [mm] | Promjer [mm] | | | Sklerometar | | Širina [mm] | Dubina [mm] | Duljina [mm] |
| Ja1 Jadranski most stup S7 | min | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Zaštitni sloj | / | Q-vrijednost | / | 0,25 | 75 ; 126 | 2*300 mm rub stupa |
| | max | | | | | | | Q st. devijacija | | | | |
| | sr. vrijed. | | | | | | | f _{ck} (sklerometar) | | | | |
| | st. dev. | | | | | | | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Ja2 Jadranski most Zid upornjaka U4 | min | 34 | 18 | 52 | 28 | -434 | 6,3 | Q-vrijednost | 39,2-65,1 | 1,2 | 52 (cc) | 1000 |
| | max | 56 | 27 | 52 | 28 | -126 | 39,1 | Q st. devijacija | 3-9,7 | | | |
| | sr. vrijed. | 43,21 | 23,75 | 52 | 28 | -291,51 | 16,54 | f _{ck} (sklerometar) | 18-63 | | | |
| | st. dev. | 6,12 | | - | | 71,9 | 6,33 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Ja3 Jadranski most Kriilo upornjaka U4 | min | 32 | 11 | Samo pozicija | Samo pozicija | -390 | 20,3 | Q-vrijednost | 57-58,5 | 0,5 - 1,05 | 30 ; 118 | 750 mm |
| | max | 47 | 17 | | | -73 | 44,4 | Q st. devijacija | 4,3-5,4 | | | |
| | sr. vrijed. | 40,75 | 13,50 | | | -250,17 | 30,91 | f _{ck} (sklerometar) | 44-46 | | | |
| | st. dev. | 6,34 | | | | 87,0 | 6,58 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Ja4 Jadranski most Nosaa N6 sa strane | min | 37 | 11 | Samo pozicija | Samo pozicija | Zaštitni sloj | 156 | Q-vrijednost | 71,6 | 0,15 - 0,20 | 37 ; 105 ; 160 | 650 |
| | max | 65 | 18 | | | | 1530 | Q st. devijacija | 2,0 | | | |
| | sr. vrijed. | 49,40 | 14 | | | | 973,1 | f _{ck} (sklerometar) | 86,0 | | | |
| | st. dev. | 10,62 | | | | | 473,01 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Ja5 Jadranski most Dno nosaa N6 | min | Samo pozicija | Samo pozicija | 33 | 18 | -215 | 16,1 | Q-vrijednost | 70,7 | 0,078 | 131 | 300 (širina pojasnice) |
| | max | | | 40 | 23 | -50 | 388 | Q st. devijacija | 1,6 | | | |
| | sr. vrijed. | | | 36,40 | 21,00 | -85,64 | 132,3 | f _{ck} (sklerometar) | 82,5 | | | |
| | st. dev. | | | 2,70 | | 30,88 | 117,36 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Ja6 Jadranski most Pojasnica nosaa N6 | min | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Nema kontakta | 548 | Q-vrijednost | 70,2 | 0,08 | 210 ; 203 | 280 |
| | max | | | | | | 760 | Q st. devijacija | 3,7 | | | |
| | sr. vrijed. | | | | | | 662,5 | f _{ck} (sklerometar) | 80,5 | | | |
| | st. dev. | | | | | | 64,08 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Ja7 Jadranski most Donja ploaa nosaa N6 | min | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Nema kontakta | / | Q-vrijednost | / | 0,15 | 9 ; 102 | 110 |
| | max | | | | | | | Q st. devijacija | | | | |
| | sr. vrijed. | | | | | | | f _{ck} (sklerometar) | | | | |
| | st. dev. | | | | | | | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Do1 (15 °C) Domovinski most Devijator S9 sa strane | min | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | -65 | 49,3 | Q-vrijednost | 56-79 | 0,05 - 0,06 | 25 | 25 |
| | max | | | | | -18,66 | 61,4 | Q st. devijacija | 2,2-4,8 | | | |
| | sr. vrijed. | | | | | -47,69 | 55,62 | f _{ck} (sklerometar) | 72-94 | | | |
| | st. dev. | | | | | 18,70 | 4,08 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Do1 (20 °C) Domovinski most Devijator S9 sa strane | min | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | Samo pozicija | -70,25 | 53,92 | Q-vrijednost | 56-79 | 0,05 - 0,06 | 25 | 25 |
| | max | | | | | -18 | 99,17 | Q st. devijacija | 2,2-4,8 | | | |
| | sr. vrijed. | | | | | -44,67 | 75,18 | f _{ck} (sklerometar) | 72-94 | | | |
| | st. dev. | | | | | 15,96 | 12,39 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Do2 Domovinski most Sidreni okvir Z5 1 | min | 46 | 20 | 40 | 22 | Nema kontakta | 172,5 | Q-vrijednost | / | 0,2 | 133 ; 116 | 1320 |
| | max | 62 | 35 | 44 | 26 | | 238 | Q st. devijacija | | | | |
| | sr. vrijed. | 51,40 | 27,80 | 41,50 | 24,00 | | 207,35 | f _{ck} (sklerometar) | | | | |
| | st. dev. | 5,68 | | 1,52 | | | 46,19 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Do3 Domovinski most Sidreni okvir Z5 2 | min | 46 | 20 | 40 | 22 | Nema kontakta | 58,8 | Q-vrijednost | / | 0,2 | 125 ; 32 | 1105 |
| | max | 62 | 35 | 44 | 26 | | 80,8 | Q st. devijacija | | | | |
| | sr. vrijed. | 51,40 | 27,80 | 41,50 | 24,00 | | 69,19 | f _{ck} (sklerometar) | | | | |
| | st. dev. | 5,68 | | 1,52 | | | 7,38 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| MI1 Most Mladosti Dno nosaa 1 | min | Samo pozicija | Samo pozicija | 20 | 19 | -400 | 6,9 | Q-vrijednost | 65,3-71,5 | 0,45 | 46 | 400 |
| | max | | | 40 | 28 | -211 | 77,5 | Q st. devijacija | 3,2-4,5 | | | |
| | sr. vrijed. | | | 30,00 | 23,50 | -308,65 | 34,04 | f _{ck} (sklerometar) | 63,5-85,5 | | | |
| | st. dev. | | | 14,14 | | 46,56 | 16,92 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| MI2 Most Mladosti Dno nosaa 2 | min | 22 | 10 | 44 | 21 | -144 | 14,1 | Q-vrijednost | 72,5-73,8 | 0,55 | 142 ; 255 | 400 |
| | max | 28 | 22 | 44 | 21 | -53 | 40,6 | Q st. devijacija | 2,3-2,8 | | | |
| | sr. vrijed. | 24,50 | 13,25 | 44,00 | 21,00 | -98,6 | 25,09 | f _{ck} (sklerometar) | 90-95,5 | | | |
| | st. dev. | 2,65 | | - | | 31,73 | 9,18 | f _{ck} (vađeni uzorci) | | | | |

Tablica 5. Sažeti prikaz rezultata nerazornih ispitivanja - nastavak

| Mjerno mjesto | Vrijednosti | Poprečna / vertikalna armatura | | Uzdužna / horizontalna armatura | | Polu-čelijski potencijal [mV] | Električna otpornost [kΩcm] | Tlačna čvrstoća [MPa] | | Pukotine | | |
|--|-------------|---|---------------|---------------------------------|---------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------------|
| | | Zaštitni sloj [mm] | Promjer [mm] | Zaštitni sloj [mm] | Promjer [mm] | | | Sklerometar | | Širina [mm] | Dubina [mm] | Duljina [mm] |
| MI3 Most Mladosti Zid upornjaka 1 | min | Samo pozicija | Samo pozicija | 58 | 16 | -492 | 12,3 | Q-vrijednost | 58,1-69,2 | 3 - 3,5 | 700 | visina upornjaka, cca. 4500 |
| | max | | | 59 | 17 | -331 | 111,5 | Q st. devijacija | 2,8-7,1 | | | |
| | sr. vrijed. | | | 58,33 | 16,33 | -439,7 | 46,03 | f_{ck} (sklerometar) | 49-76,5 | | | |
| | st. dev. | | | 0,58 | | 33,59 | 25,49 | f_{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| MI4 Most Mladosti Zid upornjaka 2 | min | 40 | 18 | 37,5 | 13 | -549 | 14,2 | Q-vrijednost | 53,3-67,8 | / | / | / |
| | max | 50 | 25 | 50 | 16 | -333 | 444 | Q st. devijacija | 4,1-9 | | | |
| | sr. vrijed. | 44,86 | 20,36 | 41,73 | 14,00 | -441,44 | 68,13 | f_{ck} (sklerometar) | 39,5-72 | | | |
| | st. dev. | 2,93 | | 3,65 | | 48,88 | 40,78 | f_{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Že1 Most Žeinci Vješaljka 3 | min | 37 | 19 | Samo pozicija | Samo pozicija | -209 | 8,2 | Q-vrijednost | 66,5 - 67,4 | 1,4 | 81 ; 104 | 300 |
| | max | 40 | 30 | | | -55 | 40,31 | Q st. devijacija | 3,5 - 6,1 | | | |
| | sr. vrijed. | 38,00 | 25,33 | | | -135,47 | 23,07 | f_{ck} (sklerometar) | 68-70,5 | | | |
| | st. dev. | 1,73 | | | | 35,6 | 7,04 | f_{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Ma1 Most Maslenica Temelj stupa S2 | min | 40 | 19 | Samo pozicija | Samo pozicija | -657 | 2,10 | Q-vrijednost | 41,5-76,1 | 0,08 - 0,1 | 308 | 730 |
| | max | 48 | 20 | | | -371 | 48,20 | Q st. devijacija | 2,6-37 | | | |
| | sr. vrijed. | 44,14 | 19,43 | | | -521,76 | 11,33 | f_{ck} (sklerometar) | 46,6-77,1 | | | |
| | st. dev. | 3,01 | 0,51 | | | 69,73 | 7,79 | f_{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Pa1 Paški most Luk 1 | min | 40 mm morta ojačanog armaturnom mrežom Ø 4,2 / 100x100 mm | | | | -331 | 6,90 | Q-vrijednost | 14-32,5 | Otpadanje sloja morta | | |
| | max | | | | | -70 | 77,8 | Q st. devijacija | 8,4-12 | | | |
| | sr. vrijed. | | | | | -252,39 | 41,2 | f_{ck} (sklerometar) | 14-32,5 | | | |
| | st. dev. | | | | | 52,46 | 24,72 | f_{ck} (vađeni uzorci) | | | | |
| Pa2 Paški most Luk 2 | min | 40 mm morta ojačanog armaturnom mrežom Ø 4,2 / 100x100 mm | | | | -410 | 1,30 | Q-vrijednost | 41,5-48,4 | Otpadanje sloja morta | | |
| | max | | | | | -203 | 41,4 | Q st. devijacija | 11,2-12,4 | | | |
| | sr. vrijed. | | | | | -295,89 | 14,2 | f_{ck} (sklerometar) | 20,5-28,5 | | | |
| | st. dev. | | | | | 46,28 | 10,03 | f_{ck} (vađeni uzorci) | | | | |

vrijednosti polučelijastog potencijala i električne otpornosti betona upozoravaju na umjeren i/ili visoki rizik od korozije (tablica 5., slika 10.). Vrijednosti električne otpornosti betona manje od 15 kΩcm te polučelijastog potencijala ispod -400 mV, izmjerene na četiri mjerna mjesta (Ja2, MI3, MI4, Ma1), upozoravaju na visoki rizik od pojave korozije, unatoč izostanku vidljivih tragova korozije armature na površini betona (tablica 5., slika 10.). Ovi rezultati dokazuju tvrdnju da se nerazornim ispitivanjima potencijalna oštećenja mogu utvrditi ranije u odnosu na vizualne preglede. Nadalje, ako su oštećenja već vidljiva, nerazornim ispitivanjima moguće je mnogo preciznije utvrditi stanje konstrukcije. Naprimjer, nekoliko pukotina i djelomična promjena boje na površini betona utvrđeni su vizualnim pregledom na temelju stupa S2 na Mostu Maslenica (slika 7.a). Međutim, rezultati nerazornih ispitivanja (slika 7.c i 7.d) pokazuju iznimno niske vrijednosti električne otpornosti betona i vrlo negativne polučelijaste potencijale s visokim gradijentima. Ovakva kombinacija rezultata, kao što je i vidljivo na slici 10., upozorava na visok udio klorida u betonu te na aktivnu koroziju visokog intenziteta odnosno s većom gustoćom struje (slika 7.). Na tom je mjernom mjestu izmjereni udio klorida u betonu koji na razini armature premašuje kritičnu vrijednost, čime se potvrđuje zaključak dobiven na temelju nerazornih ispitivanja [42].

Vrijednosti odskoka izmjerene sklerometrom na istom mjernom mjestu prikazane su na slici 7.b, međutim, nije zabilježena nikakva međusobna zavisnost čvrstoće betona i električne otpornosti odnosno polučelijastih potencijala. Slični rezultati, s visokim rizikom od korozije uzrokovane kloridima, odnosno s niskim vrijednostima električne otpornosti i polučelijastog potencijala, dobiveni su na nekim dijelovima luka Paškog mosta (slika 10., tablica 5.). Rezultati dodatnog razornog ispitivanja na mostu potvrđuju ove zaključke te su opsežni radovi sanacije mosta predviđeni u skoroj budućnosti.

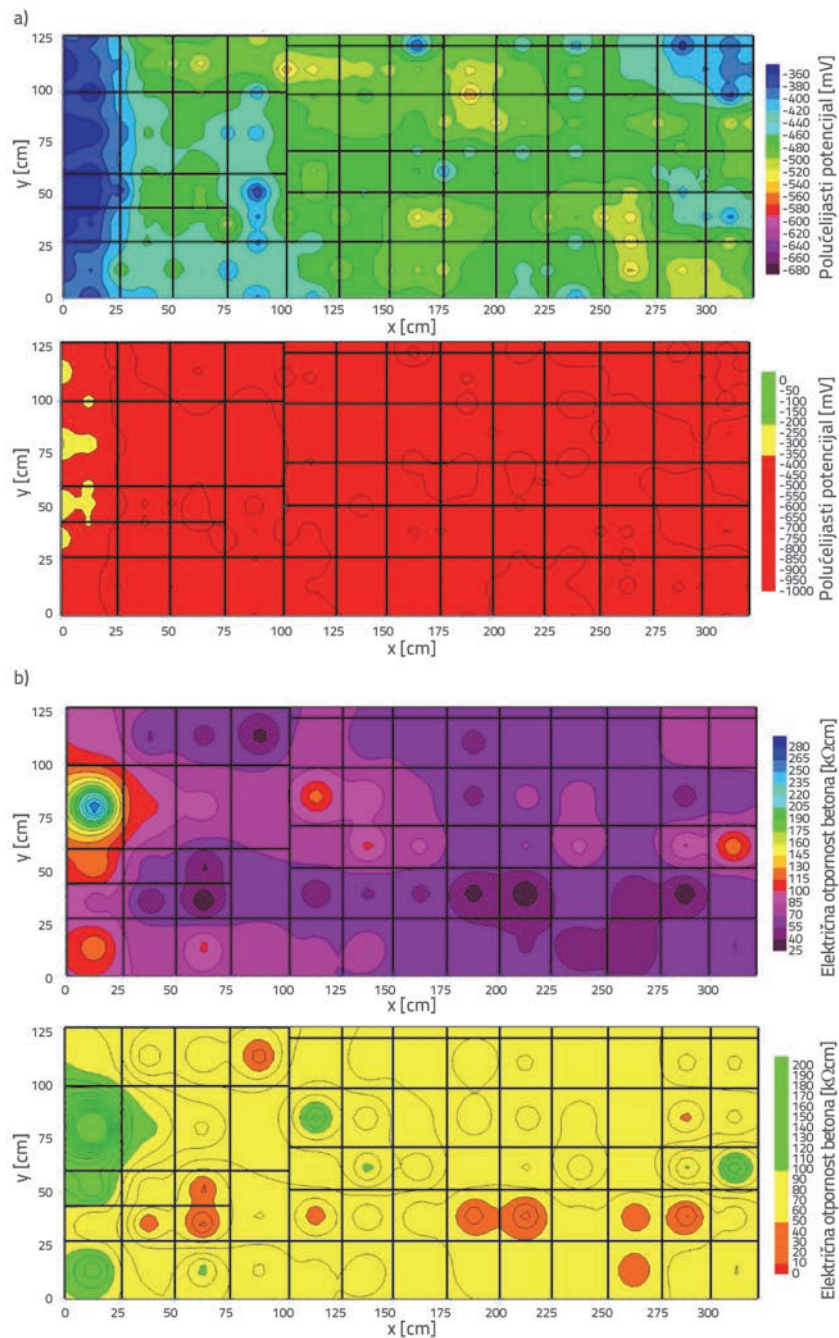
Na dijagonalno suprotnoj strani slike 10. (gornji desni dio), prikazane su visoke vrijednosti električne otpornosti i polučelijastih potencijala koje upućuju na mali odnosno zanemarivi rizik od korozije armature, a izmjerene su na dnu nosača na Jadranskom mostu (Ja5) te na devijatoru Domovinskog mosta (Do1).

Na dnu nosača Jadranskog mosta (Ja5) električna je otpornost betona relativno niska (16-30 kΩcm) tamo gdje je beton raspucao te gdje su vidljive smeđe mrlje uzrokovane korozijom armature (tablica 5., slika 10.). Međutim, električna otpornost zdravog (neraspucanog) betona udaljenog samo 80 cm otprilike je 20 puta veća (tablica 5., slika 10.). Relativno visoke vrijednosti na neraspucanom betonu posljedica su male vlažnosti

betona s obzirom na to da je površina premazana zaštitnim premazom. Iako su smeđe mrlje od korozije vidljive na površini raspucanog betona, vrijednosti izmjerenih polučelijastih potencijala su relativno visoke (0 do -200 mV), što vodi do zaključka da postoji mogućnost korozije armature koja sporo napreduje i za sada je ograničena na raspucani dio betona. Također, s obzirom na visoke vrijednosti potencijala, može se zaključiti da je korozija uglavnom uzrokovana karbonatizacijom.

Visoke vrijednosti i niski gradijenti polučelijastog potencijala na devijatoru Domovinskog mosta (Do1), kao najmlađe konstrukcije obuhvaćene ovim istraživanjem, upućuju na pasivno stanje armature (tablica 5., slika 10.). Usprkos tome, višestruke pukotine u betonu, uzrokovane plastičnim skupljanjem, u kojima se voda zadržava dugo vremena nakon oborina, uzrokuju smanjenje električne otpornosti betona, što omogućuje bržu propagaciju u budućnosti nakon depasivizacije armature. Mjerenja na devijatoru, Do1 (20°C) i Do1 (15°C), provedena su u različitim vremenskim uvjetima te potvrđuju ovisnost električne otpornosti betona i vanjske temperature: električna otpornost smanjuje se povećanjem temperature zraka (tablica 5., slika 10.).

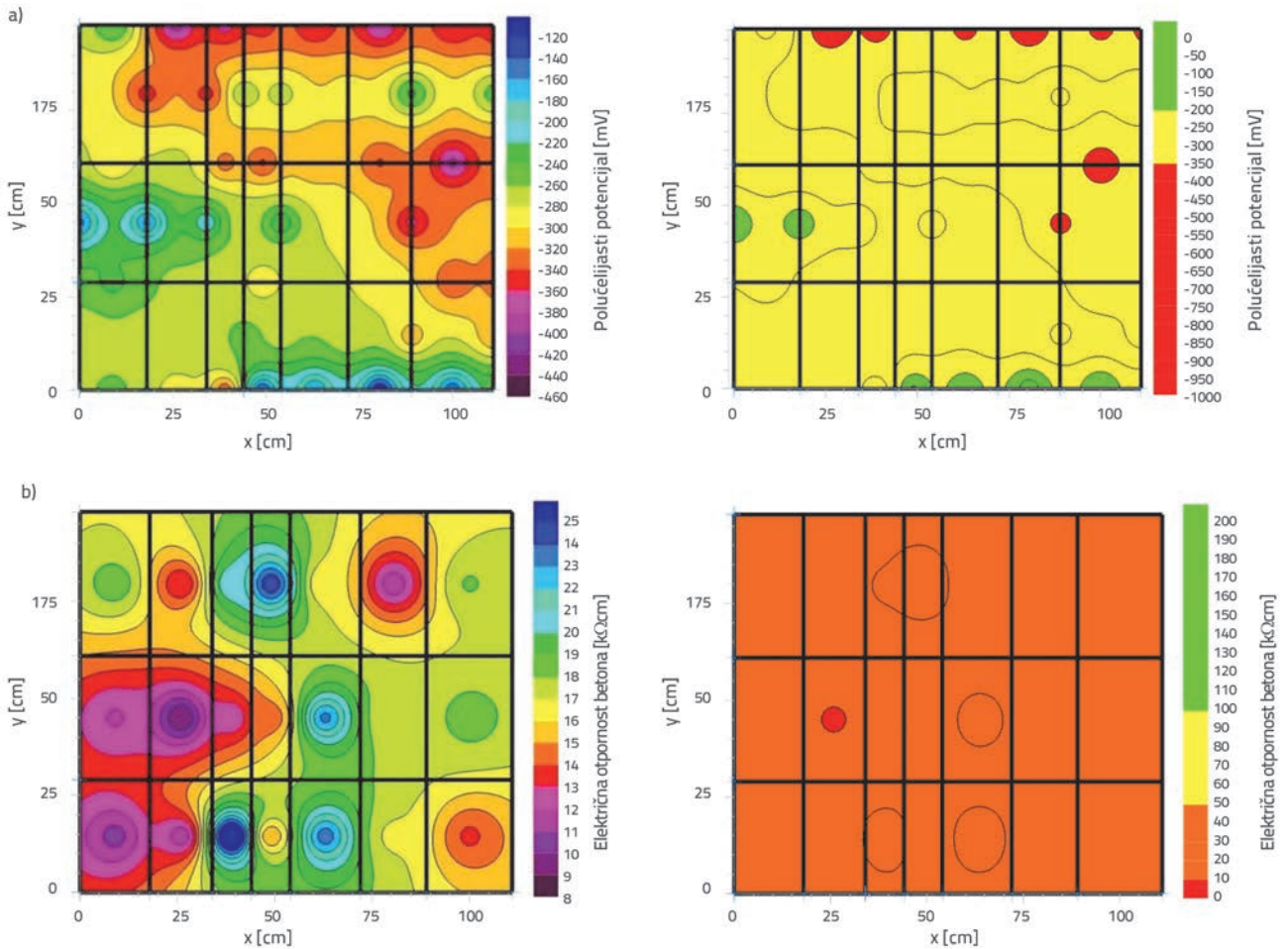
Visoke vrijednosti polučelijastog potencijala (tablica 5., slika 10.), izmjerene na vješaljki mosta Žeinci (Že1), upozoravaju na nizak rizik od korozije armature, međutim uslijed dugog uporabnog vijeka samog mosta, moguća je pojava korozije uzrokovane karbonatizacijom koja sporije propagira. U skladu s preporukama u tablici 4., dane vrijednosti polučelijastog potencijala pokazuju da nema prisutnosti klorida u betonu. Ovaj zaključak potvrđuju i činjenice da su nosivi elementi mosta Žeinci bili prekriveni slojem žbuke prije nerazornog testiranja, te da se most nalazi na dionici ceste niže kategorije gdje se koristi manja količina soli za odmrzavanje. Većina izmjerenih vrijednosti na Mostu mladosti i Jadranskom mostu upućuje na umjeren do visok rizik od korozije, sudeći po vrijednostima polučelijastog potencijala, dok vrijednosti električne otpornosti betona upućuju na nizak do umjeren rizik (tablica 5., slika 10.). Ovi rezultati posljedica su karbonatizacije



Slika 8. Mjerno mjesto na upornjaku sjevernog vijadukta Mosta mladosti (ML4): a) konturni prikaz izmjerenih polučelijastih potencijala s intervalima legende od 20 mV (gore) i primjenom norme ASTM C876-91 za granične vrijednosti (dolje); b) konturni prikaz izmjerene električne otpornosti s intervalima legende od 10 kΩcm (gore) i primjenom RILEM-ovih preporuka za granične vrijednosti (dolje)

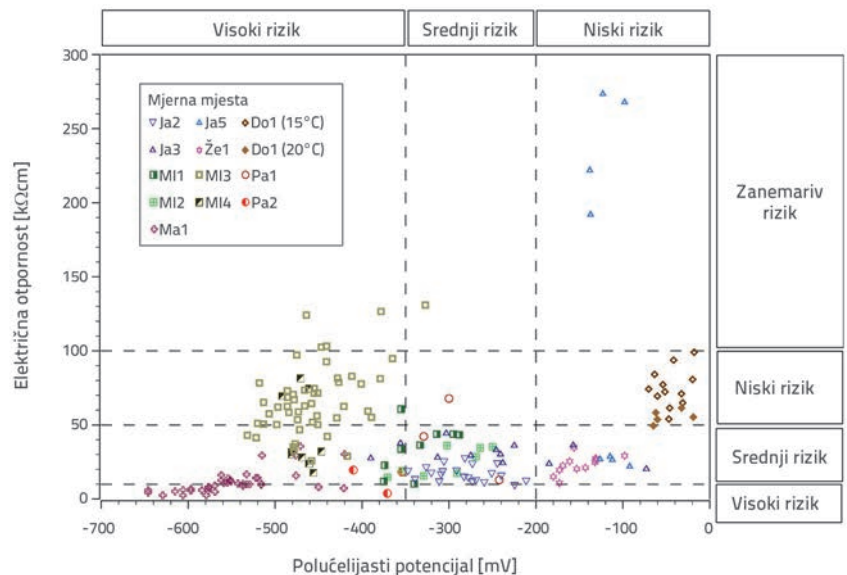
betona. Naime, uslijed gubitka koncentrirane alkalne otopine u porama, karbonatizirani beton pokazuje veću električnu otpornost [74].

Karbonatizacija betona na razini armature potvrđena je laboratorijskim ispitivanjem na uzorcima izvađenih s pripadajućih mjernih mjesta na ova dva mosta [50, 51], dok je aktivna korozija također potvrđena i vizualnim pregledom



Slika 9. Mjerno mjesto na zidu južnog upornjaka Jadranskog mosta (JA2): a) konturni prikaz izmjerenih polučelijastih potencijala s intervalima legende od 20 mV (lijevo) i primjenom norme ASTM C876-91 za granične vrijednosti (desno); b) konturni prikaz izmjerene električne otpornosti s intervalima legende od 1 kΩcm (lijevo) i primjenom RILEM-ovih preporuka za granične vrijednosti (desno)

armature nakon uklanjanja zaštitnog sloja na istim mjernim mjestima. Valja napomenuti da udio vlage u betonu može promijeniti vrijednost polučelijastog potencijala. Međutim, gradijenti potencijala i pozicije minimalnih potencijala ne ovise o promjeni udjela vode u betonu [74]. Stoga je korisno rezultate na mjernim mjestima predstaviti u obliku konturnih prikaza polučelijastih potencijala (slike 7.c, 8.a, 9.a). Najnegativnije vrijednosti polučelijastog potencijala ukazuju na anodu, područje aktivne korozije, dok najpozitivnije vrijednosti polučelijastog potencijala ukazuju na pasivno područje, dakle katodu. Najnegativniji polučelijasti potencijali izmjereni na Masleničkom mostu (slika 7.c, lijevo), s vrijednostima do -657 mV su prikazani u crvenoj i ljubičastoj boji, a najpozitivniji polučelijasti



Slika 10. Korelacija između polučelijastog potencijala i električne otpornosti za sva mjerna mjesta

potencijali, prikazani plavom bojom, dosežu vrijednosti do -371 mV. Na sjevernom upornjaku Mosta mladosti (slika 8.a, gore), najniže vrijednosti polučelijastog potencijala označene su žutom bojom, s najnižom vrijednosti od -594 mV, a najviše izmjerene vrijednosti, do -333 mV, označene su plavom bojom. Na južnom upornjaku Jadranskog mosta (slika 9.a, lijevo), najniže vrijednosti polučelijastog potencijala označene su crvenom i ljubičastom bojom, s najnižom vrijednosti od -434 mV, a najviše izmjerene vrijednosti, do -126 mV, označene su plavom bojom. Najveća razlika u izmjerenim vrijednostima polučelijastog potencijala zabilježena je na Masleničkom mostu, uz najnižu apsolutnu izmjerenu vrijednost električne otpornosti betona, te se može zaključiti da mjerno mjesto na temelju stupa S2 Masleničkog mosta ima najviši stupanj korozije (gustoća struje) i najveću brzinu propagacije, od svih mostova obuhvaćenih ovim ispitivanjem.

Na Masleničkom mostu (slika 7.), područja s najnižim vrijednostima polučelijastog potencijala poklapaju se s područjima najniže električne otpornosti betona (slika 7.c i 7.d, donji desni dio), što je tipično za koroziju uzrokovanu kloridom u betonu [74]. Djelomično preklapanje ekstremnih vrijednosti polučelijastog potencijala i električne otpornosti betona također je primijećeno i na upornjaku Mosta mladosti (slika 8.). Međutim, na upornjaku Jadranskog mosta, ova pojava nije zabilježena uslijed utjecaja karbonatizacije (slika 9.).

Vrijednosti polučelijastog potencijala i električne otpornosti betona, izmjerena na oba upornjaka (M14, Ja2), upućuju na umjeren rizik od korozije s nižim stupnjem korozije (gustoćom struje) u odnosu na Maslenički most. Uzrok korozije na oba upornjaka su kloridi, uslijed curenja oborinske vode s otopljenim solima za odmrzavanje kroz dotrajale prijelazne naprave, te karbonatizacija, čiji je utjecaj izraženiji na Jadranskom mostu.

Jedan od najvažnijih parametara o kojem ovisi korozija armature je zaštitni sloj betona, koji mora biti dostatne debljine i kvalitete. Izmjerene debljine zaštitnog sloja na promatranim mostovima (tablica 5.) općenito su manje u odnosu na preporučene vrijednosti sukladno razredima izloženosti okolišu, prema važećoj normi HRN EN 206:2013 [83]. Izmjerena debljina zaštitnog sloja na upornjacima Jadranskog mosta i mosta Mladosti (tablica 5.) je između 30 i 59 mm, dok su na nekim dijelovima krila upornjaka šipke armature izložene uslijed nedostatka zaštitnog sloja (ili njegove debljine od samo nekoliko mm). Nedovoljna debljina te nejednakost u izvedbi zaštitnog sloja utvrđena je također i na glavnim nosačima tih mostova, sa srednjim vrijednostima od 24,50 do 49,40 mm. Projektirane, nominalne debljine zaštitnog sloja za starije mostove iznose od 40 do 50 mm. Noviji mostovi, kao što su Maslenički i Domovinski most, projektirani su prema novim propisima u kojima se više pozornosti posvećuje projektiranju trajnosti te su zahtijevane debljine zaštitnog sloja veće. Međutim, zaštitni sloj na temelju stupa S2 Masleničkog mosta ima minimalnu projektiranu debljinu od 50 mm, dok stvarna izmjerena vrijednost iznosi od 40 do 48 mm.

Manje debljine zaštitnog sloja predstavljaju veći rizik za koroziju armature. Međutim, s obzirom na to da se promatrani mostovi razlikuju po vrsti konstrukcije, materijalu, utjecaju okoliša,

stanju, oštećenjima, starosti itd., točnija međuovisnost debljine zaštitnog sloja i polučelijastog potencijala odnosno električne otpornosti betona nije mogla biti utvrđena. Isto vrijedi i za izmjerene vrijednosti čvrstoće betona, pa se može općenito zaključiti da veća čvrstoća betona sama po sebi ne jamči niži rizik od korozije te time i dulju trajnost konstrukcije.

5.1. Primjena rezultata nerazornih ispitivanja u predviđanju uporabnog vijeka

Kako bi se primijenilo održivo gospodarenje mostovima, potrebno je odrediti dotrajavanje konstrukcije u budućnosti te preostali uporabni vijek korištenjem numeričkih modela. Iako su brojni numerički modeli za procjenu uporabnog vijeka na temelju korozije armature uzrokovane prodorom klorida razvijeni u posljednja četiri desetljeća, još uvijek postoji veliki prostor za napredak, primjerice [7, 29]: modeliranje utjecaja oštećenja (pukotina) na transportne i elektrokemijske procese; točnije određivanje međusobne zavisnosti parametara korozije i materijala, mehaničkih i konstrukcijskih parametara te uvjeta okoliša; modeliranje faze propagacije korozije armature, uključujući formiranje pukotina u betonu uslijed povećanja volumena korozijskih produkata; verifikacija i unaprijeđenje postojećih modela korištenjem podataka iz mjerenja na postojećim mostovima itd. Prikazani rezultati nerazornih ispitivanja upotrijebit će se za realističnu simulaciju procesa prije i poslije depasivizacije šipke armature u betonu korištenjem 3D kemo-higro-termo mehaničkog (KHTM) modela [82, 84-90]. 3D KHTM model je jedan od najopsežnijih modela za predviđanje uporabnog vijeka te uključuje: transportne procese u raspucanom i neraspucanom betonu, cikluse vlaženja i sušenja, proračun gustoće korozijske struje i raspodjelu električnog potencijala, transport korozijskih produkata (hrđe) u pukotine i pore betona, raspucavanje betona uzrokovano povećanjem volumena korozijskih produkata, itd. Parametri određeni nerazornim ispitivanjem (širina, duljina i dubina pukotina, zaštitni sloj betona, promjer šipke armature, električna otpornost betona te gradijent polučelijastog potencijala) predstavljaju ulazne podatke za kalibraciju i verifikaciju numeričkih modela za simuliranje dotrajavanja konstrukcije tijekom njenog preostalog uporabnog vijeka [7]. Oštećenja i pukotine u betonu nastali tijekom izvedbe i/ili korištenja mogu znatno ubrzati koroziju armature. Izmjerene širine pukotina (0,05 -3,5 mm) mogu znatno ubrzati prodor klorida, vode i kisika u betonu u odnosu na neraspucani beton iste kvalitete.

Dodatna varijabla ovisna o vremenu a koja utječe na trajnost konstrukcija je električna otpornost betona. Ona ovisi o više parametara, npr. poroznosti, vodocementnom omjeru, agregatu, njezi betona, prisutnosti vode i iona u betonu itd. Iako se nekolicina znanstvenika fokusirala na određivanje utjecaja raznih parametara na električnu otpornost betona, razvitek numeričkog modela otpornosti kao funkcije ovisne o najutjecajnijim parametrima još uvijek predstavlja velik izazov.

S druge strane, postupak mjerenja električne otpornosti betona sve je popularnija metoda nerazornog ispitivanja, s obzirom na jednostavnost, brzinu i male troškove tijekom mjerenja. Samim time je izmjerena električna otpornost predstavlja važan ulazni podatak kod predviđanja preostalog uporabnog vijeka betonskih konstrukcija.

Iako se izmjereni polučelijasti potencijali ne mogu direktno usporediti s vrijednostima električnog potencijala u numeričkim modelima, veliki gradijenti i vrlo negativne vrijednosti polučelijastog potencijala izmjerene na stvarnim mostovima pružaju važne podatke kod modeliranja anode i katode u numeričkim modelima čija se pozicija i površina mora unaprijed pretpostaviti zbog postupka proračuna.

6. Zaključak

U ovom je radu dan pregled gospodarenja mostovima u Hrvatskoj te su opisani uzroci njihova propadanja. Glavni uzrok preuranjenog propadanja betonskih mostova je korozija armature. Mostovi izloženi morskom okolišu i/ili velikim količinama soli za odmrzavanje tijekom zimske sezone kao što su mostovi na autocestama u planinskim područjima posebno su osjetljivi na koroziju armature. Pukotine i razna oštećenja u betonu dodatno ubrzavaju propadanje mosta.

Ključna aktivnost u gospodarenju mostovima je vizualni pregled. Međutim, vizualnim pregledom moguće je uočiti koroziju armature tek u uznapredovanoj fazi kada su potrebni popravci konstrukcije i kada je prilika za optimalno održavanje mostova već izgubljena.

Stoga je predložen novi pristup proaktivnog održavanja, gdje se vizualni pregled kombinira s jednostavnim i učinkovitim nerazornim ispitivanjima. Predložene nerazorne metode demonstrirane su na šest reprezentativnih mostova (most Maslenica na autocesti, Paški most, most Žeinci, Jadranski most, Most mladosti i Domovinski most). Ispitivanja su provedena na ukupno 18 mjernih mjesta i pokazuju da svi konstrukcijski elementi mosta, primjerice nosači, devijatori, sidrišta zatega, upornjaci i stupovi, mogu biti osjetljivi na raspucavanje betona i koroziju armature.

Iako svaka nerazorna metoda ima ograničenja u pogledu točnosti mjerenja, nerazorna ispitivanja povećavaju objektivnost i preciznost rezultata vizualnog pregleda te omogućavaju

otkrivanje nevidljivih oštećenja, što je u okviru ovog istraživanja potvrđeno dodatnim neovisnim razornim ispitivanjima. S druge strane, ako je oštećenje već vidljivo, nerazornim se ispitivanjima može preciznije odrediti razina oštećenja.

Na temelju provedenih mjerenja, najveći stupanj korozije (gustoća struje) i najbrže propadanje konstrukcije očekivano se nalazi na temelju stupa S2 Masleničkog mosta i luku Paškog mosta. Oba su mosta izložena agresivnom morskom okolišu i na mjernim je mjestima potvrđena korozija izazvana kloridima. Najmlađi među studijima slučaja, Domovinski most, u najboljem je stanju, no preporučuje se popravak uočenih pukotina kako bi se osigurala trajnost konstrukcije i umanjio rizik od korozije u budućnosti. Stariji mostovi (most Žeinci, Most mladosti i Jadranski most) imaju umjeren rizik od korozije armature: iako je na mjerenim mjestima prisutna aktivna korozija armature, zbog utjecaja karbonatizacije betona, stupanj korozije je manji u odnosu na mostove na jadranskoj obali.

Za točnije određivanje napretka korozije armature u budućnosti potrebni su numerički modeli za predviđanje uporabnog vijeka. U okviru ovog projekta [91] koristit će se nedavno razvijeni 3D kemo-higro-termo mehanički model za realističnu simulaciju procesa korozije prije i nakon depasivizacije armature. Rezultati nerazornih ispitivanja na mostovima koristit će se za verifikaciju i unaprjeđenje numeričkih modela. Naposljetku, buduće stanje mostova tijekom uporabnog vijeka, predviđeno numeričkim modelom, može poslužiti kao važna osnova za optimalno održavanje mostova.

Zahvala

Ovo je istraživanje provedeno u okviru projekta UKF 04/17 "Utjecaj oštećenja betona na koroziju armature - računalna simulacija i ponašanje mostova tijekom uporabnog vijeka (CODEbridges)" koji je financirao Fond "Jedinstvo uz pomoć znanja". Autori zahvaljuju društvima za upravljanje, građenje i održavanje cesta na danim podacima o održavanju mostova i potpori tijekom istraživanja, a posebnu zahvalnost zaslužuju njihovi suradnici na projektu: Mladen Burić (Županijska uprava za ceste Krapinsko-zagorske županije), Stjepko Devald (Hrvatske autoceste), Sanjin-Velebit Pešut (Autocesta Rijeka-Zagreb), Danijel Tenžera (Hrvatske ceste) i Krunoslav Tepeš (Grad Zagreb).

LITERATURA

- [1] Tenžera, D., Puž, G., Radić, J.: Visual inspection in evaluation of bridge condition, *Građevinar*, 64 (2012) 9, pp. 717-726.
- [2] HRN EN 1990:2011 Eurocode: Basis of structural design - National Annex (EN 1990:2002+A1:2005/AC:2010), HZN, 2011.
- [3] Radić, J., Kučer, A., Medak, M., Kalafatić, I.: Stanje nadvoznjaka nad starijim dionicama hrvatskih autocesta, *Građevinar*, 59 (2007) 6, pp. 495-504.
- [4] Calvi, G. M., Moratti, M., O'Reilly, G. J., Scatarreggia, N., Malomo, D., Monteiro, R., Pinho, R.: Once upon a time in Italy: the tale of the Morandi bridge, Submitted to *Structural Engineering International*, 8664 (2018), <http://dx.doi.org/10.1080/10168664.2018.1558033>.
- [5] Madaj, A., Siekierski, W.: Determination of Defect Factors for a Road Bridge Made of Prestressed Concrete, *Structural Engineering International*, 27 (2017) 3, pp. 388-393, <http://dx.doi.org/10.2749/101686617X14881932436735>.

- [6] Tanner, P., Hingorani, R., Thomas, J. L. B., Cid, D. S.: Learning from incidents during bridge erection, IABSE Madrid Symposium: Engineering for Progress, Nature and People, 102 (2014), pp. 1047-1054, <http://dx.doi.org/10.2749/222137814814067275>.
- [7] Zerayohannes, G., Gebreyohannes, E., Zekaria-Abdullahi, A.: Investigation of the Cause of Failure of the Omo River Bridge, Structural Engineering International, 27 (2017) 3, pp. 418-421, <http://dx.doi.org/10.2749/101686617X14881937384729>.
- [8] Radić, J., Šavor, Z., Puž, G.: Extreme wind and salt influence on adriatic bridges, Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 13 (2003) 4, pp. 242-245, <http://dx.doi.org/10.2749/101686603777964487>.
- [9] Liu, Z., Guo, T., Pan, S., Liu, J.: Forensic Investigation on Cracking in Hanger-to-Girder Connections of Long-Span Suspension Bridges, Structural Engineering International, 27 (2017) 3, pp. 344-352, <http://dx.doi.org/10.2749/101686617X14881937384963>.
- [10] Mandić Ivanković, A., Srbić, M., Franetović, M.: Performance of existing concrete arch bridges, in IABSE Conference - Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges Geneva, Switzerland, 2016, <http://dx.doi.org/10.2749/222137815818358268>.
- [11] Fargier Gabaldón, L.B.: Rehabilitation and Lessons Learned from the Collapse of Viaduct 1 Located on the Caracas-La-Guaira Highway in Venezuela, Structural Engineering International, 27 (2017) 3, pp. 380-387, <http://dx.doi.org/10.2749/101686617X14881937385007>.
- [12] Hwang, Y.C., Kim, S.J., Kim, H.K.: Report of an unexpected vortex-induced vibration in an actual suspension bridge, IABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges - Report, pp. 23-26, 2015.
- [13] Godart, B., Paris-est, U., Lacombe, J., Aubagnac, C.: Failures of external Tendons in Prestressed Concrete Bridges, Causes, Investigations, Remediation and Prevention, 2015.
- [14] Kušter Marić, M., Radić, J., Ožbolt, J., Balabanić, G.: Analysis on Durability of Reinforced Concrete Bridges in Maritime Environment, Annual 2015 of the Croatian Academy of Engineering, pp. 57-78, 2016.
- [15] Kušter Marić, M., Mandić Ivanković, A., Ožbolt, J.: Structural and climate performance indicators in service life prediction of concrete bridges in multi-hazard environment, in Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), pp. 1701-1707, Ghent, 2018.
- [16] Rodriguez, J., Ortega, L.M., Casal, J.: Load Carrying Capacity of Concrete Structures With, Construction and Building Materials, 11 (1997) 4, pp. 239-248, [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00043-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00043-3).
- [17] Du, Y.G., Clark, L.A., Chan, A.H.C.: Residual capacity of corroded reinforcing bars, Magazine of Concrete Research, 57 (2005) 3, pp. 135-147, <http://dx.doi.org/10.1680/mac.57.3.135.60482>.
- [18] Chan, H.C., Clark, L., Du, Y.G.: Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars, Magazine of Concrete Research, 57 (2005) 7, pp. 407-419, <http://dx.doi.org/10.1680/mac.2005.57.7.407>.
- [19] Cairns, J., Plizzari, G.A., Du, Y., Law, D.W., Franzoni, C.: Mechanical Properties of Corrosion-Damaged Reinforcement, 102 (2005), pp. 2005.
- [20] fib: Bond of reinforcement in concrete-State of art report. Prepared by fib Task Group Bond Models. fib Bulletin 10. Structural consequences of corrosion in reinforced concrete structures. 2000.
- [21] Tuutti, K.: Corrosion of steel in concrete: Tech. Report. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute., 1982.
- [22] Zandi Hanjari, K.: Structural Behaviour of Deteriorated Concrete Structures PhD thesis, Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology - Department of Civil and Environmental Engineering - Division of Structural Engineering, 2010.
- [23] Kurtis, K.E., Metita, K.A.: Critical review of deterioration of concrete due to corrosion of reinforcing steel, in Proceedings of 4th CANMET/ACI Int. Conference, 1 (1978), SP 170, Sydne.
- [24] Grandić, D., Bjegović, D., Radić, J.: Nosivost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature, Građevinar, 52 (2000) 3, pp. 153-162.
- [25] CEB: Structural consequences of corrosion in reinforced concrete structures, in Durable Concrete Structures CEB Bulletin, p. 183, 1992.
- [26] Kušter Marić, M., Ožbolt, J., Mandić Ivanković, A., Bleiziffer, J., Srbić, M., Skokandić, D., Hrelja, G., Mujkanović, N.: QUALITY SPECIFICATION FOR CONCRETE BRIDGES VULNERABLE TO REINFORCEMENT CORROSION, in eBook of the 3rd Workshop Meeting Cost Action TU1406, pp. 1-8, no. i, Wroclaw, 2018.
- [27] Kušter Marić, M., Bleiziffer, J., Vlašić, A., Ožbolt, J., Mandić Ivanković, A., Srbić, M., Skokandić, D., Hrelja Kovačević, G., Mujkanović, N., Devald, S., Tenžera, D., Tepoš, K., Burić, M., Lacković, L.: In-service performance of road concrete bridges - set up of case studies for novel pro-active maintenance methodology, in Proceedings of the 5th International Conference on Road and Rail Infrastructures - CETRA 2018, pp. 139-145, Zagreb: Department of Transportation Faculty of Civil Engineering, 2018.
- [28] Puž, G., Radić, J., Tenžera, D.: Predviđanje stanja mostova radi optimalizacije održavanja, GRADEVINAR, 65 (2013) 12, pp. 1079-1088.
- [29] Alexander, M., Beushausen, H.: Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures - review and critique, Cement and Concrete Research, 122 (2019), pp. 17-29, <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>.
- [30] Šavor, Z., Šavor, M., Srbić, M.: Krk bridge from inception to today, in CONSTRUCTION OF ARCH BRIDGES, pp. 377-395, Zagreb, 2009.
- [31] Bazant, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures - Theory, Journal of the Structural Division, 105 (1979) June, pp. 1137-1153.
- [32] Bazant, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures - Application, Journal of the structural division, 105 (1979) June, pp. 1155-1166, 1979.
- [33] Rosenberg, A., Hansson, C.M., Andrade, C.: Mechanism of corrosion of steel in concrete, Materials Science of Concrete, 1 (1989), pp. 285-313.
- [34] Wang, H.L., Dai, J.G., Sun, X.Y., Zhang, X.L.: Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration, Construction and Building Materials, 107 (2016), pp. 216-225.
- [35] Yup, S., Sung, B., Hwan, B.: Cement and Concrete Research Effect of crack width on chloride diffusion coef fi cients of concrete by steady-state migration tests., Cement and Concrete Research, 41 (2011) 1, pp. 9-19.
- [36] Djerbi, A., Bonnet, S., Khelidj, A., Baroghel-bouny, V.: Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete, Cement and Concrete Research. 38 (2008) 6, pp. 877-883.
- [37] Park, S.S., Kwon, S.J., Jung, S.H.: Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation, Construction and Building Materials, 29 (2012), pp. 183-192.

- [38] Bjegović, D., Serdar, M., Baričević, A., Rukavina, M.J.: Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 godina, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 12, pp. 1155-1164, <http://dx.doi.org/10.14256/GJE.1188.2014>.
- [39] Alani, A.M., Aboutalebi, M., Kilic, G.: Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges, NDT and E International, 61 (2014), pp. 80-94, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.10.001>.
- [40] Report on quality testing of concrete built-in Maslenica Bridge (Project: Durability of reinforced concrete structures in maritime environment - TABKIMO), Zagreb, 2007.
- [41] Stipanović, I., Bjegović, D., Mikulić, D., Serdar, M.: Time dependent changes of durability properties of concrete from Maslenica Bridge at the Adriatic coast, in Integral Service Life Modelling of Concrete Structures, pp. 87-95, Bagneux, 2007.
- [42] Maslenički most, Izvještaj s glavnog pregleda mosta, Institut IGH, d.d., Zagreb, 2011.
- [43] Bleiziffer, J., Mavar, K., Ille, M., Škarić Palič, S., Dimić Vuković, S., Balagija, A.: CONDITION ASSESSMENT OF THE MASLENICA HIGHWAY BRIDGE, in SUSTAINABLE ARCH BRIDGES, pp. 309-316, Zagreb, 2011.
- [44] Sanacija i zaštita betonske konstrukcije Masleničkog mosta, projekt sanacije, Institut IGH, d.d, Zagreb, 2014.
- [45] Marić, Z.: Pag Bridge, Ceste i mostovi, 34 (1988) 4, pp. 171-173.
- [46] Šavor, Z.; Mujkanović, N.; Hrelja, G.; Bleiziffer, J.: Reconstruction of the Pag bridge, in Proceedings of the 1st Chinese-Croatian Joint Colloquium on LONG ARCH BRIDGES, pp. 241-252, 2008.
- [47] Paški most na državnoj cesti D106, Izvještaj o istražnim radovima na AB konstrukciji mosta, Institut IGH, d.d., Zagreb, 2016.
- [48] Paški most na državnoj cesti D106, Projekt sanacije AB elemenata, Institut IGH d.d., Zagreb, 2017.
- [49] Radić, J., Vlašić, A., Puž, G., Kolić, D.: Zagreb Bridges, in Proceedings of Gold Parliament of CSSE, pp. 213-220, Zagreb: CSSE Secod, 2003.
- [50] Izvješće s glavnog šestogodišnjeg pregleda Mosta Mladosti, Institut IGH d.d., Zagreb, 2017.
- [51] Izvješće s glavnog šestogodišnjeg pregleda Jadranskog mosta, Geexpert-IGM d.o.o., Zagreb, 2017.
- [52] Izvješće s glavnog šestogodišnjeg pregleda Domovinskog mosta, Ascon Institut d.o.o., Zagreb, 2017.
- [53] Zaki, A., Chai, H.K., Aggelis, D.G., Alver, N.: Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete: A review and capability of acoustic emission technique, Sensors (Switzerland), 15 (2015) 8, pp. 19069-19101, <http://dx.doi.org/10.3390/s150819069>.
- [54] du Plooy, R., Villain, G., Palma Lopes, S., Ihamouten, A., Dérobert, X., Thauvin, B.: Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 48 (2015) 1-2, pp. 369-386, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0189-z>.
- [55] Garnier, V., Piwakowski, B., Abraham, O., Villain, G., Payan, C., Chaix, J.F.: Acoustic techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistency, Construction and Building Materials, 43 (2013), pp. 598-613, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.035>.
- [56] Omar, T., Nehdi, M.: Condition Assessment of Reinforced Concrete Bridges: Current Practice and Research Challenges, Infrastructures, 3 (2018) 3, pp. 36, <http://dx.doi.org/10.3390/infrastructures3030036>.
- [57] Hoła, J., Schabowicz, K.: State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures - anticipated development trends, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10 (2010) 3, pp. 5-18, [http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60133-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60133-2).
- [58] Sekulić, D., Bjegović, D., Mikulić, D.: Monitoring armaturnog čelika u betonu, Građevinar, 52 (2000), pp. 577-586.
- [59] Breyse, D., Klysz, G., Dérobert, X., Sirieix, C., Lataste, J.F.: How to combine several non-destructive techniques for a better assessment of concrete structures, Cement and Concrete Research, 38 (2008) 6, pp. 783-793, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.016>.
- [60] Eurocode: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, vol. BS En 1992. Brussels: European Committee for Standardization CEN, 2004.
- [61] Alexander, M.G., Ballim, Y., Stanish, K.: A framework for use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures, Materials and Structures, 41 (2008), pp. 921-936, <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-007-9295-0>.
- [62] ASTM C876 - 91(1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, American Society for Testing and Materials, 2008.
- [63] Legat, A.: Monitoring of steel corrosion in concrete by electrode arrays and electrical resistance probes, Electrochimica Acta, 52 (2007) 27, SPEC. ISS., pp. 7590-7598, <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.060>.
- [64] BS 1881-204: Testing Concrete - Part 204: Recommendations on the Use of Electromagnetic Covermeters, British Standards Institution (BSI), 2014.
- [65] Profometer Operating Instructions, Proceq, Schwerzenbach, 2017.
- [66] EN 13791:2007 Assessment of in-situ compressive strength in structures and pre-cast concrete components, 2007.
- [67] Proceq, S.A.: Operating Instructions - Operating Instructions SilverSchmidt & Hammerlink, Schwerzenbach, Switzerland, p. 30, 2017.
- [68] Aydin, A.: ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version, Springer, pp. 25-33, 2015.
- [69] Hobbs, B., Tchoketch Kebir, M.: Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings, Forensic Science International, 167 (2007) 2-3, pp. 167-172.
- [70] NDT James Instruments: V-C-400-V-Meter Mark IV - Operator's Manual, Chicago, p. 104, 2017.
- [71] EN 12504-4:2004 Testing concrete -- Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, 2004.
- [72] Pinto, R C.D.A., Medeiros, A., Padaratz, I.J., Andrade, P.B.: Use of Ultrasound to Estimate Depth of Surface Opening Cracks in Concrete Structures, Ndt.Net, 2010, Available: http://ndt.net/article/ndtnet/2010/10_Pinto.pdf.
- [73] Song, H.W.; Saraswathy, V.: Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review, International Journal of Electrochemical Science, 2 (2007) 1, pp. 1-28.
- [74] RILEM TC 154-EMC: Recommendations of RILEM TC 154-EMC: 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion'-Half-cell potential measurements-Potential mapping on reinforced concrete structures, Materials and Structures, 36 (2003) September, pp. 461-471, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02481526>.

- [75] Andrade, C.: Design and Evaluation of service life through concrete electrical resistivity, *Revista ALCONPAT*. 2018.
- [76] Garzon, A.J., Sanchez, J., Andrade, C., Rebolledo, N., Menéndez, E., Fullea, J.: Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars, *Cement and Concrete Composites*, 53 (2014), pp. 249-257, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.013>.
- [77] Reichling, K., Raupach, M., Klitzsch, N.: Determination of the distribution of electrical resistivity in reinforced concrete structures using electrical resistivity tomography, *Materials and Corrosion*, 66 (2015) 8, pp. 763-771, <http://dx.doi.org/10.1002/maco.201407763>.
- [78] Azarsa, P., Gupta, R.: Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, <http://dx.doi.org/10.1155/2017/8453095>.
- [79] Sengul, O.: Use of electrical resistivity as an indicator for durability, *Construction and Building Materials*, 73 (2014), pp. 434-441, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>.
- [80] Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M.: Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, 33 (2000) 10, pp. 603-611, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02480599>.
- [81] Proceq, S.A.: Resipod operating instructions, Schewerzenbach, Switzerland, 31. 2011.
- [82] Ožbolt, J., Balabanić, G., Kušter, M.: 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures, *Corrosion Science*, 53 (2011) 12, pp. 4166-4177, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.026>.
- [83] HRN EN 206:2013+A1:2016 Concrete - Specification, performance, production and conformity, Croatian Standards Institute. Zagreb, 2016.
- [84] Ožbolt, J., Oršanić, F., Balabanić, G.: Modeling pull-out resistance of corroded reinforcement in concrete: Coupled three-dimensional finite element model, *Cement and Concrete Composites*, 46 (2014), pp. 41-55, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.014>.
- [85] Ožbolt, J., Oršanić, F., Balabanić, G.: Modeling influence of hysteretic moisture behavior on distribution of chlorides in concrete, *Cement and Concrete Composites*, 67 (2016), pp. 73-84, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.01.004>.
- [86] Ožbolt, J., Oršanić, F., Balabanić, G.: Modeling corrosion-induced damage of reinforced concrete elements with multiple-arranged reinforcement bars, *Materials and Corrosion* 201508569, 5, pp. 542-552, <http://dx.doi.org/10.1002/maco.201508569>.
- [87] Ožbolt, J., Oršanić, F., Balabanić, G.: Modelling processes related to corrosion of reinforcement in concrete: coupled 3D finite element model, *Structure and Infrastructure Engineering*, 13 (2017) 1, pp. 135-146, <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2016.1198400>.
- [88] Ožbolt, J., Balabanić, G., Sola, E.: Determination of critical anodic and cathodic areas in corrosion processes of steel reinforcement in concrete, *Materials and Corrosion*, 68 (2017) 6, pp. 622-631, <http://dx.doi.org/10.1002/maco.201609295>.
- [89] Ožbolt, J., Balabanić, G., Periškić, G., Kušter, M.: Modelling the effect of damage on transport processes in concrete, 24 (2010), pp. 1638-1648, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.028>.
- [90] Ožbolt, J., Oršanić, F., Balabanić, G., Kušter, M.: Modeling damage in concrete caused by corrosion of reinforcement: Coupled 3D FE model, *International Journal of Fracture*, 178 (2012) 1-2, pp. 233-244, <http://dx.doi.org/10.1007/s10704-012-9774-3>.
- [91] CodeBRIDGES. Influence of concrete damage on reinforcement corrosion - computer simulation and in-service performance of bridges, <https://www.grad.unizg.hr/codebridges>, 2019.