

Nosivost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature

Davor Grandić, Dubravka Bjegović, Jure Radić

Ključne riječi

korozija armature,
nosivost, prionivost,
raspucavanje betona,
trajnost,
širina pukotina,
uporabljivost

Key words

steel corrosion,
bearing capacity,
adhesion,
concrete cracking,
durability,
crack width,
serviceability

Mots clés

corrosion,
capacité portante,
adhérence,
fissuration du béton,
durée de vie,
largeur des fissures,
possibilité d'utilisation

Schlüsselworte:

Bewehrungskorrosion,
Tragfähigkeit,
Haftfähigkeit,
Betonrissbildung,
Dauerhaftigkeit,
Rissbreite,
Nutzbarkeit

D. Grandić, D. Bjegović, J. Radić

Pregledni rad

Nosivost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature

Za ocjenu utjecaja korozije armature na nosivost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija potrebno je poznavati razmjere štetnih učinaka korozije. Prikazane su metode za ocjenu nosivosti i uporabljivost elemenata i konstrukcija oštećenih korozijom armature predložene na temelju najnovijih istraživanja u okviru istraživačkih projekata Europske unije koji su u tijeku. Predlaže se nastavak istraživanja u kojima bi doprinos trebali dati i hrvatski stručnjaci i znanstvenici.

D. Grandić, D. Bjegović, J. Radić

Subject review

Bearing capacity and serviceability of reinforced-concrete structures affected by steel corrosion

The extent of harmful corrosive action should be known so as to enable proper evaluation of influence the steel corrosion exerts on the bearing capacity and serviceability of reinforced-concrete structures. Methods based on latest research conducted in the scope of European Union research projects, and focusing on the bearing capacity and usability of elements and structures affected by steel corrosion, are presented. Authors propose continuation of the research effort in which Croatian experts and scientists should also take part.

D. Grandić, D. Bjegović, J. Radić

Ouvrage synthèse

Capacité portante et possibilité d'usage des constructions en béton armé endommagées par la corrosion de l'armature

Pour évaluer les effets de la corrosion de l'armature sur la capacité portante et la possibilité d'utilisation des constructions en béton armé, il est nécessaire de connaître l'étendue des effets nocifs de la corrosion. On présente les méthodes de l'évaluation de la capacité portante et de la possibilité d'usage des éléments et des constructions endommagées par la corrosion de l'armature, proposées selon les recherches les plus récentes menées dans le cadre des projets d'études en cours de l'Union européenne. L'on propose de poursuivre les recherches où les experts et les scientifiques croates devraient apporter leur contribution.

D. Grandić, D. Bjegović, J. Radić

Übersichtsarbeit

Tragfähigkeit und Nutzbarkeit durch Bewehrungskorrosion beschädigter Stahlbetonkonstruktionen

Für die Bewertung des Einflusses der Bewehrungskorrosion auf die Tragfähigkeit und Nutzbarkeit von Stahlbetonkonstruktionen muss man die Größenverhältnisse der schädlichen Einflüsse der Korrosion kennen. Dargestellt sind Methoden für die Bewertung der Tragfähigkeit und Nutzbarkeit durch Bewehrungskorrosion beschädigter Elemente und Konstruktionen, vorgeschlagen auf Grund der neuesten Forschungen im Rahmen der laufenden wissenschaftlichen Projekte der Europaunion. Man schlägt vor die Forschungen weiter zu führen, wobei auch kroatische Fachleute und Wissenschaftler beitragen sollten.

Autori: **Davor Grandić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Jure Radić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26

1 Uvod

Prema europskim prednormama za djelovanja na konstrukcije, ENV 1991 (*Eurocode 1*) [1], granična stanja nosivosti su ona koja se dovode u svezu sa slomom ili nekim drugim načinom otkazivanja konstrukcije. Granična stanja nosivosti, prema tome, uključuju:

- gubitak ravnoteže konstrukcije ili nekog njezina dijela koji se smatra krutim tijelom,
- otkazivanje konstrukcije zbog velikih deformacija, pretvaranje konstrukcije ili nekog njezina dijela u mehanizam, pucanje, gubitak stabilnosti konstrukcije ili nekog njezina dijela,
- propadanje zbog zamora ili drugih učinaka ovisnih o vremenu.

Granična stanja uporabljivosti odgovaraju uvjetima izvan kojih utvrđeni zahtjevi prema konstrukciji ili nekom njezinu dijelu nisu više zadovoljeni. Granična stanja koja treba uzeti u obzir uključuju:

- deformacije i pomake koji utječu na izgled ili uporabu konstrukcije ili su uzrok štete na završnim radovima ili nenosivim elementima,
- titranja koja izazivaju nelagodu ljudi, štete na konstrukciji ili gradivu, ili ograničava njezino funkcioniranje,
- štete (uključujući pukotine) koje kvare izgled, smanjuju trajnost ili ometaju funkcioniranje konstrukcije, uočljive štete prouzročene zamorom ili nekim drugim čimbenicima ovisnim o vremenu.

Prema europskim prednormama za dizajn armiranobetonskih konstrukcija ENV 1992 (*Eurocode 2*) [2], pri dokazu graničnih stanja uporabljivosti potrebno je dokazati da su naprezanja, širine pukotina i deformacije armiranobetonskih elemenata manji od graničnih vrijednosti.

Graničnim stanjem naprezanja ograničava se prekomjerno naprezanje betona i čelika kako plastično deformiranje čelika i raspucavanje betona izazvano visokim naponima ne bi ugrozilo trajnost i uporabljivost općenito.

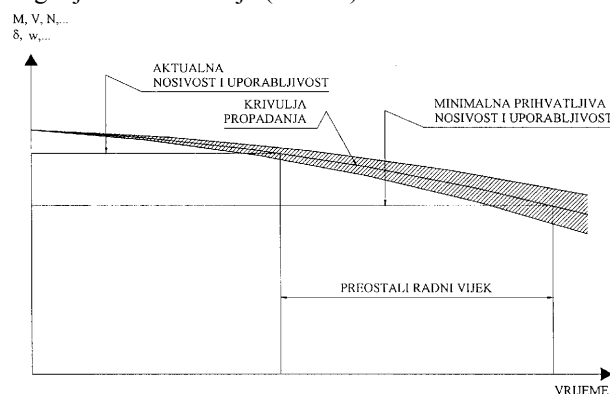
Granično stanje širine pukotina uvodi se da bi se spriječile štetne posljedice na trajnost konstrukcije, prvenstveno zbog korozije čelika.

Graničnim stanjima širine pukotina i raspucavanja na posredan se način osigurava trajnost konstrukcije (uz druge mjere predviđene propisima), odnosno da konstrukcija bude upotrebljiva za namijenjenu svrhu u njezinu računskom radnom vijeku, koji je za pojedine vrste konstrukcija definiran u ENV 1991.

Valja uočiti da osiguravajući trajnost konstrukcije osiguravamo njezinu uporabljivost (pukotine koje kvare izgled ili ometaju funkcioniranje konstrukcije, trajne de-

formacije i sl.), ali utječemo i na njezinu nosivost u radnom vijeku konstrukcije koja može biti ugrožena propadanjem.

U ovom će radu biti riječi o tome kako propadanje armiranobetonskih elemenata prouzročeno korozijom armature utječe na njihovu nosivost i uporabljivost, odnosno o metodama za ocjenu preostale nosivosti i uporabljivosti postojećih konstruktivnih elemenata na kojima je korozija već u većoj ili manjoj mjeri uznapredovala. Takva ocjena osim za odluke o popravcima postojećih konstrukcija, uz primjereni algoritam prognoze korozije može poslužiti za točnije, neposredno određivanje radnog vijeka konstrukcije (slika 1.).



Slika 1. Krivulja propadanja konstrukcije

U nastavku se izlaže metodologija i postupci ocjene nosivosti i uporabljivosti elemenata koji se temelje na istraživanjima u okviru istraživačkih projekata Europske unije što se provode radi izrade uputa za ocjenu preostalog radnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija. Podaci o dostignutim rezultatima, zaključcima i prijedlozima preuzeti su iz literature [3, 4 i 5].

2 Svrha ocjene konstrukcija oštećenih korozijom

Ocjena stanja oštećenih konstrukcija provodi se poradi određivanja preostale razine sigurnosti i uporabljivosti te preostalog radnog vijeka konstrukcije u smislu prethodno definiranog minimuma sigurnosti i uporabljivosti.

Najvažnije je odrediti kada i kako je potrebno intervenirati da se sačuva nosivost i uporabljivost konstrukcije. U tu svrhu nužno je imati na raspolaganju metode za određivanje svojstava konstrukcije u ovisnosti o vremenu.

Jednom kada je proces korozije započeo, nosivost i uporabljivost konstrukcije je načeta. Posljedice korozije armature očituju se u tome da dolazi do:

- smanjenja presjeka i duktilnosti armature,
- raspucavanja i cijepanja zaštitnog sloja betona jer zbog ekspanzivnog djelovanja hrđe dolazi do prekoračena vlačne čvrstoće betona u okolici armaturnih šipki
- smanjivanja prionjivosti između čelika i betona.

Brzina korozije može se smatrati ključnom veličinom koja omogućuje vezu između degradacije građiva i ponašanja konstrukcije.

Pri ocjeni stanja postojećih konstrukcija predlažu se [3] dvije razine pristupa: preliminarna i detaljna ocjena konstrukcije. Preliminarna služi kvalitativnom opisu konstrukcije s pomoću empirijskih postupaka, dok detaljna ocjena treba omogućiti temeljitije spoznaje o promatranjnoj konstrukciji i potvrdi preliminarnog postupka.

3 Preliminarna ocjena

Preliminarna ocjena konstrukcije temelji se na empirijskom postupku koji omogućuje klasifikaciju konstrukcije s pomoću različitih indeksa:

Indeks korozije daje predodžbu o napredovanju oštećenja armature zbog korozije. Taj indeks povezan je s brzinom korozije I_{corr} i tipom korozije.

Indeks konstrukcije uzima u obzir osjetljivost konstrukcije na koroziju. Taj je parametar funkcija detalja armiranja i konstruktivnog ponašanja elemenata (elementi opterećeni savijanjem ili tlačnom uzdužnom silom). Na taj se način procjenjuje važnost svojstava promatranog elementa za posljedice nastale zbog korozije za konstrukciju u cjelini.

Indeks posljedica sloma znači da važnost elemenata može biti klasificirana kao malena ili kao značajna ako postoji opasnost po život, od ozljeda ili ozbiljnih oštećenja.

Indeks statičke neodređenosti nužno je odrediti stoga što pri statički određenom elementu konstrukcije zbog lokalnog sloma presjeka dolazi do kolapsa elementa u cjelini, dok je pri statički neodređenim konstrukcijama zbog mogućnosti preraspodjele utjecaja smanjena opasnost od sloma konstrukcije.

Ova četiri indeksa, opisujući svaki element promatrane konstrukcije, omogućuju određivanje ukupnog kvalitativnog čimbenika, tzv. *početne ocjene ugroženosti konstrukcije* koja može biti stupnjevana kao zanemariva, srednja, velika i vrlo velika.

Vizualnim pregledom konstrukcije dolazi se do ocjene razine oštećenja koja se klasificira prema tablici 1.

Tablica 1. Klasifikacija oštećenja

Razina oštećenja	Opis
Zanemariva	nema vidljivih oštećenja, samo zanemarivi tragovi korozije
Niska	otkrivena samo manja oštećenja (širina pukotina manja od 0,3 mm)
Srednja	pukotine šire od 0,3 mm ili pukotine duž uzdužne i poprečne armature
Visoka	sveobuhvatno raspucavanje i cijepanje

Kao rezultat preliminarne ocjene oštećene konstrukcije i njezine trenutne razine oštećenja, inženjer bi trebao biti u mogućnosti odrediti je li potrebno dalje istraživanje i ako je to potrebno, odrediti na koji način koristiti i održavati konstrukciju kako bi se opasnost od sloma svela na minimum i sačuvala pouzdanost konstrukcije.

U tablici 2. navedeni su intervali vremena (godine) u kojima se preporučuje intervencija na preliminarno ocjenjenim konstrukcijama.

Tablica 2. Intervali vremena u kojima se preporučuje intervencija

Razina oštećenja	Početna ocjena ugroženosti			
	Zanemariva	Srednja	Velika	Vrlo velika
Zanemariva	> 10	6 – 10	4 - 6	-
Mala	6 – 10	4 – 6	2 - 4	1 – 2
Srednja	4 – 6	2 – 4	1 - 2	1 – 2
Visoka	-	1 – 2	0 - 1	0 – 1

Za konstrukcije kod kojih je vrijeme u kojem je potrebno intervenirati veće od 4 godine, preporučuje se načiniti ponovnu ocjenu stanja konstrukcije nakon tog vremena.

Za konstrukcije kod kojih se vrijeme intervencije kreće između 1 i 4 godine valja u tom vremenu načiniti detaljnu ocjenu konstrukcije pod vodstvom specijalista.

Za konstrukcije kod kojih je vrijeme intervencije kraće od 1 godine, najvjerojatnije će biti potrebna sanacija (popravak) konstrukcije. Za izradu takvog projekta sanacije u većini slučajeva potrebna je detaljna ocjena stanja konstrukcije.

Za usporedbu se u tablici 3. prikazuje klasifikacija razine oštećenja armiranobetonskih konstrukcija kakvu je predložio Europski komitet za beton (CEB) [6]. Kao što se vidi, u tom prijedlogu ocjene razine oštećenja pojavljuje se pet umjesto četiri razine oštećenja predloženih u opisanom postupku preliminarne ocjene konstrukcija, koje se ne mogu utvrditi samo vizualnim pregledom (utvrđivanje smanjenja presjeka armature i gubitka veze između armature i betona). Predložena klasifikacija oštećenja, prema tomu, sadrži elemente preliminarne i detaljne ocjene konstrukcije. Nedostatak joj je što ne uzima u obzir različita svojstva i važnost elemenata konstrukcije s pomoću različitih indeksa (indeksi korozije, konstrukcije, posljedica sloma i indeks statičke neodređenosti).

Ako je razina oštećenja C ili D, potreban je hitan popravak i rekonstrukcija konstrukcija. Pri razini oštećenja A ili B, preporučuje se započeti popravak, a ako se to ne uradi, preporučuje se provoditi korozijsko promatranje (monitoring).

Tablica 3. Klasifikacija oštećenja prema CEB-u

	Razine oštećenja				
	A	B	C	D	E
Promjene u boji	hrđa postoji	kao u A	kao u A	kao u A	kao u A
Pukotine	malo uzdužnih	uzdužne, malo poprečnih	opsežne, duge	kao u C	kao u C
Ljuštenje	–	malo	intenzivno	armatura gubi vezu s betonom	kao u D
Smanjenje presjeka armature	–	–5%	–10%	–25%	pop. arm. (vilice) izgubila presjek. Glavna djelomično još postoji
Odlamanje	–	–	–	vjerojatno	prisutno

4 Detaljna ocjena

Glavni cilj detaljne ocjene konstrukcije jest odrediti aktualnu razinu sigurnosti konstrukcije s većom pouzdanošću od one koja je rezultat preliminarnе ocjene. Za sada nedostaju prikladni modeli za određivanje nosivosti konstrukcije u cjelini. Međutim, postoji dovoljno informacija dobivenih istraživanjima koje omogućuju procjenu ponašanja elemenata oštećenih korozijom (grede, ploče i stupovi).

Metodologija detaljne ocjene konstrukcija temelji se na metodi graničnih stanja kakva se standardno primjenjuje pri dizajnu novih konstrukcija prema ENV 1992. Detaljna ocjena konstrukcije provodi se u tri koraka:

- određivanje opterećenja koje djeluje na promatranu konstrukciju
- određivanje učinaka propadanja konstrukcije
- provjera nosivosti i uporabljivosti promatrane konstrukcije.

4.1 Određivanje opterećenja

Stalno opterećenje trebalo bi točno odrediti izračunom vlastite težine nosivih i nenosivih elemenata iz njihovih geometrijskih izmjera. Promjenjivo opterećenje valja odrediti ovisno o budućim namjenama konstrukcije ili primijeniti ono iz faze projektiranja ako se namjena neće mijenjati.

4.2 Određivanje učinaka propadanja konstrukcije

Štetni učinak korozije armature ogleda se u smanjenju presjeka armature i njezine duktilnosti, pucanju zaštitnog sloja betona uslijed ekspanzije hrđe i gubitkom prionjivosti između betona i čelika. Ključni parametar koji povezuje koroziju i učinke propadanja je penetracija korozije u poprečni presjek armature.

Penetracija korozije u armaturu može se proračunati iz brzine korozije izmjerene linearnom polarizacijom i primjenom Faradayeva zakona:

$$x = 0,0115I_{corr}t, \quad (1)$$

gdje je x penetracija korozije u mm, t je vrijeme u godinama proteklo od početka korozije, a I_{corr} prosječna vrijednost brzine korozije u $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ u vremenu t .

Brzina korozije odnosno *gustoća korozijske struje* može se shvaćati kao mjera količine armature koja je korodirala, jer se I_{corr} s pomoću Faradayeva zakona može transformirati u smanjenje presjeka po godini ($1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \approx 11,5 \mu\text{m}/\text{godišnje}$).

Tablica 4. Brzine korozije i vlažna razdoblja w_t za klase izloženosti prema ENV 206

Klase izloženosti		I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (srednja vrijednost)	w_t
0	nema rizika od korozije	0,00	0,00
Karbonatizacija (potpuno karbonatizirano)			
XC1	suho	0,00	0,00
XC2	vlažno – rijetko suho (nezaklonjeno)	0,40	1,00
XC3	umjerena vlažnost (zaklonjeno)	0,20	0,50
XC4	naizmjenice vlažno-suho (nezaklonjeno)	0,50	0,75
Korozija potaknuta kloridima			
XD1	vlažno – rijetko suho	0,40	1,00
XD2	naizmjenice vlažno-suho	3,00	0,75
XS1	vjetrom nošena morska voda	3,00	0,50
XS2	uronjeno u morsku vodu	ne očekuje se korozija osim u slučaju lošeg betona ili malog zaštitnog sloja	
XS3	zona plime i oseke	7,00	1,00

Za mjerenje korozije armature u armiranobetonskim konstrukcijama rabi se uređaj *Gecor 6* koji se temelji na tehnici linearne polarizacije, tj. polarizacijskog otpora [7].

U nedostatku podataka brzina korozije može se uzeti prema klasama izloženosti u skladu s europskim normama za beton ENV 206 na način kako to predlaže C. Andrade [8], a prikazano je u tablici 4. Vlažno razdoblje w_t jest vlažno vrijeme po godini, a predstavlja vrijeme aktivne korozije.

4.2.1 Redukcija površine presjeka armature

U ovisnosti o uzroku korozije, korozija čelika za armiranje i njezin utjecaj na presjek armature vrlo su različiti. Homogena penetracija korozije svojstvena je karbonatizaciji dok kloridi uzrokuju lokaliziranu koroziju poznatu kao točkasta korozija koja je uzrok znatnom smanjenju presjeka armature.

Preostali promjer armature računa se po izrazu [3]:

$$\phi = \phi_0 - \alpha x, \quad (2)$$

gdje je α koeficijent ovisan o vrsti korozije. Kod homogene korozije α se kreće do 2, a kod lokalizirane može biti do 10.

Smanjenje presjeka armature može se također odrediti (uz obvezno poznavanje starosti konstrukcije, trenutka depasivizacije zaštitnog sloja armature te intenziteta korozije dobivenog eksperimentalnim putem) prema postupku danom u [9-11].

4.2.2 Raspucavanje zaštitnog sloja betona

Posljedica raspucavanja zaštitnog sloja uslijed korozije armature je smanjenje sudjelovanja betona u nosivosti presjeka, kao i štetne pojave na vanjskoj površini betona.

Rezultati eksperimenata pokazuju da vrijeme potrebno za pojavu pukotina ponajviše ovisi o odnosu debljine zaštitnog sloja betona i promjera armature i o kakvoći betona. Osim toga, širina pukotina ovisi i o položaju armature u elementu (na površini ili na dnu) i brzini korozije, iako ja taj utjecaj zanemariv za uobičajene brzine korozije koje su između 0,1-0,2 i 1-2 $\mu A/cm^2$.

Na temelju rezultata pokusa načinjeni su empirijski izrazi za ocjenu pukotinskog stanja konstrukcija koji daju srednje i karakteristične vrijednosti širine pukotina:

$$w = 0,05 + \beta [x - x_0], \quad (3)$$

gdje je w proračunana širina pukotine u mm, x je penetracija korozije u mikronima, x_0 je penetracija korozije u mikronima koja se podudara s početkom pojave pukotina i β je koeficijent koji ovisi o položaju šipke. U tablici 5. dane su vrijednosti koeficijenta β .

Tablica 5. Vrijednosti koeficijenta β

	Prema pravcima regresije		Karakteristične vrijednosti	
	šipke u gornjoj zoni	šipke u donjoj zoni	šipke u gornjoj zoni	šipke u donjoj zoni
β	0,0086	0,0104	0,01	0,0125

Penetracija korozije x_0 određuje se prema izrazu prikazanom u tablici 6.

Tablica 6. Vrijednosti x_0

	Prema pravcima regresije	Karakteristične vrijednosti
$x_0 = a + b_1 \cdot c/\phi + b_2 \cdot f_{c,sp}$		
a	74,5	83,8
b_1	7,3	74,8
b_2	-17,4	-22,6

Veličina c/ϕ jest odnos zaštitnog sloja betona i promjera šipke armature, $f_{c,sp}$ je vlačna čvrstoća cijepanja betona u MPa.

Valja istaknuti da su spomenuti izrazi dobiveni na osnovi pokusa pri kojima je vlažnost bila konstantna sve vrijeme trajanja procesa korozije. Za promjenjive uvjete vlažnosti mogu se očekivati veće vrijednosti širina pukotina.

4.2.3 Smanjivanje prionjivosti između betona i armature

Prionjivost između betona i armature omogućuje sidrenje krajeva armature i zajednički rad betona i armature (monolitnost) uzduž šipki armature. Gubitak prionjivosti uslijed korozije armature događa se zbog raspucavanja betona koji obavlja šipke uzdužne armature i zbog korozije poprečne armature (vilica). Posljedica toga može biti slom nosača zbog gubitka sidrenja armature i zajedničkog rada čelika i betona uzduž nosača.

Pokusima su dobivene vrijednosti prionjivosti koje se mogu rabiti pri projektiranju i ocjeni armiranobetonskih konstrukcija. Pokazano je da ni kvaliteta betona, ni odnos debljine zaštitnog sloja betona i promjera armature ne utječu na preostalu čvrstoću prionjivosti ako je zaštitni sloj betona popucao poradi korozije armature. Tablica 7. prikazuje predložene izraze za čvrstoću prionjivosti u kojima je x penetracija korozije u mm ($0,05 \leq x \leq 1,0$ mm).

Ako je početna površina presjeka vilica (spona) na dužini sidrenja bila manja od minimalne prema EN 1992 ($\rho = 0,25$), ili je bila odabrana veća, a zbog korozije je postala manja od minimalne, vrijednost preostale čvrstoće prionjivosti nalazi se između vrijednosti dobivenih prema izrazima danim u tablici 7. za sidrenje s vilicama

Tablica 7. Čvrstoće prionjivosti u MPa

	Uzorci	
	sa sponama	bez spona
Pravac regresije	$5,25 - 2,72 x$	$3,00 - 4,76 x$
Karakteristične vrijednosti	$4,75 - 4,64 x$	$2,50 - 6,62 x$

i bez njih. U tom slučaju predlaže se koristiti se izrazom za određivanje čvrstoće prionjivosti iz tablice 8. Tim izrazima dobivaju se čvrstoće prionjivosti uzimajući u obzir preostalu površinu presjeka vilica na duljini sidrenja. Izrazi su primjenjivi za vrijednosti penetracije korozije između 0,05 i 1,1 mm i za koeficijente armiranja poprečnom armaturom manje od minimalnih ($\rho \leq 0,25$); ϕ je promjer glavne armature u mm; ϕ_w je promjer vilica (mm), a n je broj vilica na duljini sidrenja; α je koeficijent ovisan o tipu korozije vilica.

Tablica 8. Čvrstoće prionjivosti u MPa

	Prema pravcima regresije	Karakteristične vrijednosti
f_b	$8,25 + m (1,10 + x)$	$10,04 + m (1,14 + x)$
m	$-4,76 + 2,04 (\rho/0,25)$	$-6,62 + 1,98 (\rho/0,25)$
ρ	$n [(\phi_w - \alpha x)/\phi]^2$	$n [(\phi_w - \alpha x)/\phi]^2$

Ovi izrazi mogu se primijeniti, a također i oni prikazani u tablici 7., za određivanje prionjivosti duž šipke (izvan duljine sidrenja). U tom slučaju je $n = 200/s$, a s je razmak vilica u milimetrima. S druge strane, dobro je poznato da djelovanje poprečnog tlaka na šipke povoljno djeluje na sidrenje armature, što je uzeto u obzir u ENV 1992 pri proračunu računске čvrstoće prionjivosti. Izraz za procjenu preostale čvrstoće prionjivosti vrijedi za vlačne šipke, a sličan je onom danom u ENV 1992:

$$f_b = (4,75 - 4,64x)/(1 - 0,08p), \quad (4)$$

gdje je f_b prionjivost u MPa, x je dubina penetracije u mm, a p je vanjski tlak na duljini sidrenja u MPa. Taj se izraz može upotrijebiti u zoni ležajeva, neovisno o količini vilica i njihova stupnja korozije.

U okviru istih istraživanja, također je utvrđena veza između prionjivosti i širine pukotina. Na temelju pokusa utvrđeno je da ne postoji razlika između prionjivosti šipki smještenih na površini ili na dnu betonskog elementa, niti različite količine poprečne armature (vilica) veće od minimalne propisane u ENV 1992 koje rezultiraju značajnim razlikama rezultata. U tablici 9. dani su izrazi za prionjivost ovisno o širini pukotina za slučaj s vilicama i bez njih u području sidrenja. Izrazi za slučaj postojanja vilica u području sidrenja mogu se uporabiti samo u slučaju kada je predviđena najmanja količina vilica prema ENV 1992.

Tablica 9. Čvrstoće prionjivosti u MPa

	Uzorci	
	s vilicama	bez vilica
Pravac regresije:	$5,18 - 0,52 w$	$3,19 - 1,06 w$
Karakteristične vrijednosti:	$4,66 - 0,95 w$	$2,47 - 1,58 w$

5 Provjera nosivosti i uporabljivosti konstrukcija

5.1 Analiza sustava

Učinci djelovanja na konstrukciju mogu se odrediti elastičnom analizom uzimajući u obzir ispucalost betonskog presjeka.

Iako linearna analiza (proračun po linearnoj teoriji elastičnosti) ne može simulirati stvarno ponašanje armirano-betonskih konstrukcija u graničnom stanju sloma, ona ipak vodi sigurnom dizajnu konstrukcija. To je stoga što su predviđene rezne sile u ravnoteži s vanjskim opterećenjem. Ako je nosivost presjeka veća ili jednaka od tih reznih sila, tada prema statičkom teoremu teorije plastičnosti neće doći do sloma konstrukcije pri manjem opterećenju.

Proračunu po linearnoj teoriji s ograničenom preraspodjelom valja pristupiti s oprezom zbog redukcije duktilnosti čelika za armiranje nastale kao posljedica korozije.

5.2 Parcijalni koeficijenti sigurnosti

Uporaba koeficijenata sigurnosti uvjetovana je potencijalnim odstupanjima karakterističnih vrijednosti opterećenja i čvrstoća gradiva.

Unatoč tomu, kada se proračunava postojeća konstrukcija na raspolaganju je više informacija o konstrukciji te na temelju toga neki autori predlažu smanjivanje parcijalnih koeficijenata sigurnosti za djelovanja. Tako se npr. predlaže da se koeficijent sigurnosti za stalna djelovanja smanji s 1,35, koliko iznosi za nove konstrukcije na 1,15 za glavne nosive elemente odnosno 1,10 za sporedne nosive elemente kod postojećih konstrukcija. Za promjenjivo djelovanje, ovisno o kombinaciji promjenjivih djelovanja i značenju konstrukcijskih elemenata, predlaže se smanjivanje sa 1,50 na 1,20 do 1,40.

Autori rada [3] ipak navode da redukcija koeficijenata sigurnosti treba biti temeljena na iskustvu i prosudbama inženjera.

5.3 Granično stanje nosivosti

Cilj je graničnog stanja nosivosti da konstrukcija može prihvatiti opterećenje koje na nju djeluje. Ta se situacija opisuje sa sljedećom nejednadžbom:

$$R_d \leq S_d, \quad (5)$$

gdje je R_d računaska nosivost presjeka, a S_d je računaska rezna sila (utjecaj); obje su veličine dobivene primjenom parcijalnih koeficijenata sigurnosti za djelovanja (opterećenja) i za gradiva.

Pri proračunu graničnih stanja nosivosti valja uzeti u obzir učinke korozije jer smanjenje presjeka armature i ispucanost betona štetno djeluju na nosivost, a smanjenjem prionjivosti narušava se zajednički rad betona i armature.

5.3.1 Granični moment savijanja

Konzervativna vrijednost graničnog momenta savijanja može se odrediti konvencionalnom proračunskog modela, koji se uobičajeno rabi za proračun neoštećenih (novih) armiranobetonskih presjeka, uzevši pri tome u obzir reducirani presjek armature i betona bez sudjelovanja zaštitnog sloja betona u tlačnoj zoni (oštećenje betona zbog korozije tlačnih šipki).

Dalja istraživanja su ipak nužna da bi se pronašao točniji način za ocjenu učinaka promjena u betonu nastalih zbog korozije čelika za armiranje. Za sada nema modela za prognoziranje cijepanja ili raslojavanja betona stoga što je taj fenomen uvjetovan složenim međudjelovanjima korozije, uvjetima opterećenja i detaljima armiranja koji dosad nisu dovoljno objašnjeni.

Autori rada [3] navodi kratku raspravu o tome da li i koliki učinak na ponašanje greda ima gubitak prionjivosti između armature i betona uz uvjet da su krajevi šipki uzdužne armature adekvatno usidreni u području ležajeva. U nastavku slijede osnovni naglasci.

Prema istraživanjima koja je proveo Cairns i drugi na neoštećenim gredama armiranim šipkama bez prionjivosti, s koeficijentom armiranja vlačnom armaturom 1,5 do 2,0%, podvrgnutim djelovanju momenta savijanja s poprečnom silom, uočene su tri glavne posljedice gubitka zajedničkog rada (monolitne veze) betona i armature:

- smanjenje nosivosti,
- redukcija duktilnosti uz ublažavanje nagiba $P-\delta$ krivulje u početnim koracima nanošenja opterećenja i redukcijom udjela onog dijela deformacije u graničnoj (ukupnoj) deformaciji koji se događa pošto je dostignuta granica tečenja armature
- povećanje tlačnog napona u betonu u području najvećih momenata savijanja.

Međutim, rezultati istraživanja koji su objavljeni u radu [4] ne podudaraju se s izloženim učincima. Tvrdi se da te pojave nije moguće dovesti u relevantnu vezu s gubitkom prionjivosti kada su krajevi šipki adekvatno usidreni u području ležajeva i osigurani poprečnom armaturom.

Smanjenje nosivosti i duktilnosti objašnjava se redukcijom presjeka armature i raspucavanjem zaštitnog sloja betona u tlačnoj zoni.

S druge strane, u radu [3] navodi se da mnoga istraživanja provedena na pločama pokazuju da slabljenje prionjivosti treba biti uzeto u obzir pri proračunu nosivosti.

5.3.2 Granična poprečna sila

Grede armirane na način da imaju jednaku sigurnost od sloma poprečnom silom i od sloma momentom savijanja pri ispitivanjima se obično lome zbog savijanja stoga što su izrazi za dimenzioniranje na poprečnu silu puno konzervativniji od onih za moment savijanja. Unatoč tome, postoji više čimbenika koji mogu dovesti do preranog sloma korodiranih greda djelovanjem poprečne sile, kao što su:

- točkasta korozija vilica,
- beton se u tlačnoj zoni može raslojiti ili rascijepiti uslijed kombiniranog učinka korozije vilica i tlačne armature i posmičnih napona.

5.3.3 Granična uzdužna sila

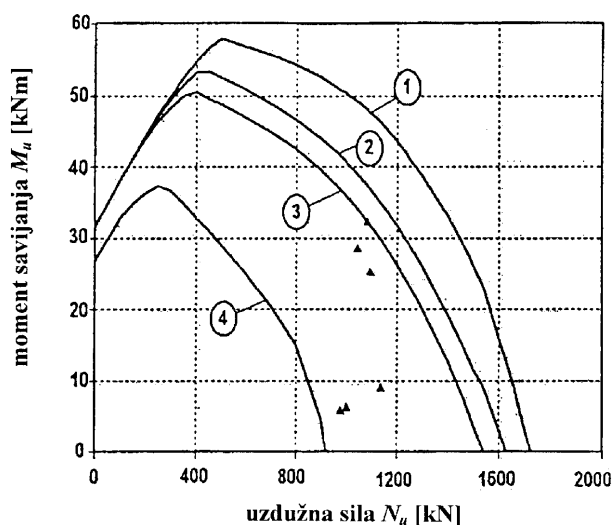
Tri su glavna čimbenika koji utječu na ponašanje korodiranih tlačnih elemenata, a to su:

- oštećenje betonskog presjeka
- prerano izvijanje armature i
- povećanje ekscentriciteta zbog nesimetričnog oštećenja betonskog presjeka.

Pokusima prikazanim u radu [5] utvrđeno je povećanje ekscentriciteta uzoraka stupova zbog korozije. Korozija je ciljano potaknuta s jedne strane ispitanih uzoraka. Eksperimentalno je utvrđeno da takvo povećanje ekscentriciteta ne prekoračuje udaljenost između površine betona i osi uzdužne armature (mehanički zaštitni sloj betona).

U slučaju da zbog utjecaja korozije neke vilice (jedna do dvije za redom) više ne obuhvaćaju glavne uzdužne šipke armature, nosivost tlačnih šipki će zbog izvijanja biti manja od polovice nosivosti pri dostignutoj granici tečenja.

Slika 2. prikazuje N_u-M_u krivulje (dijagrame interakcije) izračunane za stupove oštećene korozijom. Dok su krivulje 1, 2 i 3 određene za neoštećeni betonski presjek, krivulja 4 odnosi se na oštećeni betonski presjek bez zaštitnog sloja betona na sve četiri strane presjeka stupa. Krivulje su određene za smanjeni presjek armature. Na poslijetku, krivulje 2 i 3 određene su uzevši u obzir da zbog korozije nedostaju dvije ili tri uzastopne vilice.



Slika 5. Eksperimentalne i izračunane vrijednosti (N_u , M_u) za stupove oštećene korozijom

5.4 Granična stanja uporabljivosti

Dva glavna čimbenika koja treba uzeti u obzir pri izučavanju graničnih stanja uporabljivosti greda oštećenih korozijom su odnos opterećenja i progiba i raspucavanje betona.

5.4.1 Odnos opterećenja i progiba

Rezultati istraživanja pokazuju da korozija utječe na deformacije elemenata opterećenih savijanjem. Do povećanja progiba dolazi poradi redukcije presjeka armature i betona i gubitka prionjivosti betona i čelika.

Progibi se mogu odrediti prema standardnom postupku predloženom u ENV1992, uz uzimanje u obzir smanjenja presjeka čelika, smanjenja betonskog presjeka zbog odvajanja zaštitnog sloja betona u tlačnoj zoni, a veličina koeficijenta kojim se uzima u obzir prionjivost armature i betona odabire se između predloženih veličina za rebrasti i glatki armaturni čelik (u slučaju da je uporabljen rebrasti čelik).

5.4.2 Raspucavanje betona

Dvije su glavne vrste pukotina koje valja uzeti u obzir pri ocjeni konstrukcija oštećenih korozijom:

- pukotine uzrokovane korozijom čelika za armiranje i
- pukotine okomite na vlačnu armaturu uzrokovane djelovanjem vanjskog opterećenja.

Kako korozija također može prouzročiti pukotine okomite na glavnu armaturu (paralelno s vilicama), katkad je teško uočiti razliku između pukotina uzrokovanih korozijom i onih uzrokovanih djelovanjem vanjskog opterećenja. Što se tiče pukotina uzrokovanih opterećenjem, pokusi izvođeni u okviru projekta Europske unije BE 4062

[12] pokazali su dovoljnu podudarnost sa širinama pukotina dobivenih izrazom za širinu pukotina danim u ENV-1992 uzimajući pri tom u obzir da se vrijednost koeficijenta kojim se uzima u obzir prionjivost armature i betona nalazi između predloženih vrijednosti za glatku i za rebrastu armaturu.

5.4.3 Vanjski izgled

Vanjski izgled betonske površine može se usvojiti kao dodatno granično stanje uporabljivosti. Njega ne narušavaju samo prije spomenute pukotine, već i mrlje od hrđe i odvajanje (odcjepljivanje) površinskog sloja betona. Razumljivo, prihvatljivi prag ovog graničnog stanja utvrdit će se prema zahtjevima vlasnika građevine, ovisno o čimbenicima kao što su vrsta konstrukcije, njezina funkcija ili njezina lokacija.

Pri određivanju minimalnih tehničkih zahtjeva u slučaju graničnih stanja uporabljivosti inženjer može biti fleksibilan. Međutim, valja upozoriti da smanjenjem razine tehničkih svojstava može biti ugrožena sigurnost konstrukcije. Primjer za to je, npr., kada po ljudima padaju odlomljeni komadi betona.

6 Osvrt na predloženi postupak, komentar i zaključak

6.1 Osvrt

Predloženi postupak temelji se na istraživačkom projektu Europske unije na osnovu kojeg će se izraditi uputa za ocjenu preostalog radnog vijeka postojećih konstrukcija IN30902I COTECVET. Za postizavanje toga cilja potrebno je najprije odrediti preostalu (aktualnu) razinu sigurnosti i uporabljivosti konstrukcije. Ovdje su izložene metode za određivanje te aktualne (sadašnje ili trenutne) nosivosti i uporabljivosti. Predlaže se da se ta ocjena radi u dvije razine (faze), odnosno kao preliminarna (prethodna) i detaljna ocjena konstrukcije.

Preliminarna ocjena je empirijski postupak koji omogućuje prvu klasifikaciju konstrukcije s obzirom na njezina svojstva i donošenje odluke o tome koja su daljnja istraživanja potrebna.

Zadaća detaljne ocjene je dvostruka. Prvo, ona je vrlo značajan alat za kalibraciju i prilagođavanje parametara koji se rabe u preliminarnoj ocjeni. Zatim, ona je nužna u slučaju da je rezultat preliminarne ocjene takav da nameće potrebu temeljitije analize i istraživanja postojeće konstrukcije.

Detaljna ocjena temelji se na metodi graničnih stanja. Treba provjeriti granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti promatrane konstrukcije. Za postizavanje tog cilja valja odrediti opterećenja (djelovanja),

zatim degradaciju gradiva, odnosnu učinke propadanja konstrukcije i na poslijetku, na temelju tih podataka provjeriti nosivost i uporabljivost konstrukcije.

Za provjeru graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti mogu se rabiti standardni postupci koji vrijede za proračun novih konstrukcija, ako se pri tom uzmu u obzir učinci korozije na čelik, beton i njihovo međudjelovanje kao što su smanjenje presjeka armature, raspucavanje betona i gubitak prionjivosti između armature i betona.

6.2 Komentar

Budući da su istraživanja u tijeku, ovdje izneseni prijedlozi imaju preliminarni karakter. Ipak je potrebno osvrnuti se na neke tvrdnje izrečene na temelju tih istraživanja [3], navedene u prethodnim odjeljcima ovog rada, a koje se u nastavku navode zajedno s pripadajućim komentarom:

1. *Ni kakvoća betona, ni odnos debljine zaštitnog sloja betona i promjera armature ne utječu na veličinu preostale čvrstoće prionjivosti ako je zaštitni sloj betona popucao zbog korozije armature.*

Intuitivno se može zaključiti da je za visok stupanj korozije, kada čvrstoća prionjivosti postaje beznačajna, ova tvrdnja posve točna. Međutim, ako je stupanj korozije nizak, a prionjivost je korozijom ipak načeta, može se očekivati da je prionjivost ipak različita za različite klase betona, kao što je slučaj kod novih konstrukcija. Valjalo bi detaljnije ispitati slučajeve s manjom penetracijom korozije x i utvrditi izraze za preostalu prionjivost za korozijom oštećene armiranobetonske elemente koji bi uzimali u obzir i klasu (čvrstoću) betona.

Odnos debljine zaštitnog sloja betona i armature prema ENV 1992 treba biti takav da je zaštitni sloj debeo najmanje toliko koliki je promjer šipki armature. Ako su pokusi rađeni na uzorcima u koje su ugrađene tanke šipke armature, tada se doista može dogoditi da variranje debljine zaštitnog sloja nikad u tijeku pokusa nije dovelo do toga da bude tanji od armature. U tom se slučaju ne očekuje opažanje razlike prionjivosti poradi toga uzroka. Za bolje razumijevanje zaključka o utjecaju odnosa debljine zaštitnog sloja i promjera armature na prionjivost trebalo bi raspolagati s više podataka o provedenim pokusima.

2. *Na temelju pokusa utvrđeno je da ne postoji razlika između prionjivosti šipki smještenih na površini, ili na dnu betonskog elementa.*

Istraživanja provedena u prethodnom razdoblju, npr. G. Rehma [13], pokazuju da položaj šipki u armiranobetonskom elementu bitno utječe na prionjivost. Većina propisa, kao i ENV 1992 prihvaćaju tu činjenicu te stoga

propisuju dobre i loše uvjete prionjivosti. I ovdje bi trebalo raspolagati s više podataka o provedenim ispitivanjima, jer ako su uzorci greda bili niži od 25 cm, tada je armatura i u gornjoj i u donjoj zoni prema ENV 1992 bila u dobrim uvjetima prionjivosti i tom slučaju ne bi ni trebalo očekivati razliku rezultata ispitivanja prionjivosti. Za valorizaciju ovog pitanja trebalo bi ispitati uvjete prionjivosti kod greda oštećenih korozijom u ovisnosti o položaju armature na uzorcima raznih visina koje trebaju biti manje i veće od 25 cm.

3. *Gubitak prionjivosti u srednjem dijelu šipki armature, između potrebnih duljina sidrenja, uz uvjet da su dobro usidrene u području ležajeva ne može se dovesti u relevantnu vezu sa smanjenjem nosivosti i duktilnosti.*

Ovdje valja naglasiti da prethodna tvrdnja može navesti na pogrešne zaključke. Naime, u praksi je uobičajeno, a i propisima je predviđeno, da se dio uzdužne armature može prekinuti i usidriti u polju, izvan područja ležajeva, počevši od mjesta gdje prema dijagramu vlačnih sila više nije potrebna. To znači da bi gubitak prionjivosti duž grede, izvan područja ležajeva, doveo do otkazivanja usidrenosti tako prekinutih šipki, što bi na poslijetku dovelo do sloma takve grede. J. Rodríguez i dr. [4] radili su pokuse na uzorcima greda kod kojih je sva armatura bila postavljena po cijeloj dužini uzoraka i preko ležajeva. I u tom slučaju, koji je u praksi razmjerno rijedak, formirao bi se u gredi tlačni luk, za koji bi, doduše, moment nosivosti bio gotovo isti kao i za gredu u kojoj postoji prionjivost, ali bi ovisno o strelici takvog luka i debljini njegova svoda moglo doći do sloma grede drobljenjem svoda luka ili zbog gubitka njegove stabilnosti. Uostalom, prema ENV 1992 pri proračunu nosivosti na poprečnu silu ograničuje se nosivost tlačnih štapova. Navedena tvrdnja praktično je neodrživa i stoga jer bi u tom slučaju iza ležaja trebalo usidriti cijelu najveću vlačnu silu u armaturi (onu koja vlada u području najvećih momenata savijanja), a dužina sidrenja armature na ležaju u praksi se određuje, zbog često ograničene širine ležaja, iz Mörschove rešetke za silu koja za slučaj prihvaćanja poprečne sile vilicama iznosi $F_s = 1/2 V_{sd}$.

4. *Kad se proračunava postojeća konstrukcija na raspolaganju je više informacija o konstrukciji, te se na temelju toga mogu smanjiti parcijalni koeficijenti sigurnosti za djelovanje.*

Tvrdnja je dvojbena, jer doista se može bolje procijeniti stalno, pa možda i promjenjivo djelovanje (korisno opterećenje) u budućem korištenju konstrukcije, nego što je to slučaj pri projektiranju novih konstrukcija, ali je otežana procjena kvalitete izvedbe na svim dijelovima konstrukcije kao i točnog položaja i količine armature, pa bi možda trebalo, uz redukciju parcijalnih koeficijenata sigurnosti za djelovanja, povećati parcijalne koeficijente sigurnosti za čvrstoće gradiva.

Osim navedenog, treba napomenuti da su svi pokusi rađeni na uzorcima s rebrastom armaturom. Kako je većina postojećih armiranobetonskih konstrukcija u nas, za koje treba ocijeniti njihovo postojeće stanje, odlučiti o nužnim intervencijama i procijeniti njihov preostali radni vijek armirana glatkom armaturom, bit će nužno obaviti istraživanja na temelju pokusa na uzorcima armiranim glatkom armaturom.

6.3 Zaključak

Da bi se napravile dobre upute za provođenje postupka ocjene svojstava konstrukcija oštećenih korozijom treba

nastaviti istraživanja. Dosadašnji rezultati mogu poslužiti samo kao smjernice za provjeru graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti konstrukcija oštećenih korozijom. Istraživanjima bi valjalo obuhvatiti veći broj mogućih slučajeva odnosa opterećenja, dimenzija i oblika armiranobetonskih elemenata, količine armature, detalja armiranja, debljina zaštitnog sloja i vrste i klase betona, kako bi se stvorio dovoljno širok skup podataka za određivanje potrebnih parametara potrebnih za izradu kvalitetnih uputa, odnosno norma za provođenje opisanog postupka. Istraživanja će se vjerojatno dalje nastaviti u okviru istraživačkih projekata Europske unije u koje bi trebalo uključiti i hrvatske stručnjake.

LITERATURA

- [1] ENV 1991-1: *Eurocode 1 - Basis of design and actions of structures - Part 1: Basic of design*, CEN, Brussels, 1994.
- [2] ENV 1992-2: *Eurocode 2 - Design of structures - Part 1-2: General rules - General rules for buildings*, CEN, Brussels, 1991.
- [3] Rodríguez, J., Ortega, L.M., Aragoncillo, J.: *Corrosion rate and structural performance*, Workshop MESINA, Madrid, 1999.
- [4] Rodríguez, J., Ortega, L.M., Casal, J., Díez, J.M.: *Assesing structural conditions of concrete structures with corroded reinforcement*, International Congress: Concrete in the Service of Mankind, Dundee, UK, 1996.
- [5] Rodríguez, J., Ortega, L.M., Casal, J.: *Load bearing capacity of concrete columns with corroded reinforcement*, 4th International Symposium on the Corrosion of Reinforcement in Concrete structures, Cambridge, 1996.
- [6] Andrade, C., Alonso, C., Gonzales, J.A.: *Approach to the calculation of residual life in corroding concrete reinforcements based on corrosion intensity values*, u: 9th European Congress of Corrosion, Utrecht, Neurtherlands, Oct. 1989.
- [7] Erić, Lj., Bjegović, D.: *Korozijski monitoring mjerenjem brzine korozije armature u armiranobetonskim konstrukcijama*, Ceste i mostovi 45 (1999) 3-4, 79.-84.
- [8] Andrade, C., Arteaga, A.: *Statistical Quantification of the propagation period*, Internal Report of Brite/Euram projekt BE95-1347 Duracrete, 1998.
- [9] Bjegović, D., Krstić, V., Mikulić, D., Radić, J., Čandrić, V.: *New Approach in the Ultimate Life Calculation for Cracked Concrete*, IABSE Symposium Extending the Lifespan of Structures, San Francisco, 73/2 (1995), 1259.-1264.
- [10] Krstić, V., Bjegović, D., Mikulić, D., Radić, J., Čandrić, V.: *Novi pristup proračunu vijeka trajanja raspucanih armiranobetonskih konstrukcija*, Treći radni sabor Graditelji u obnovi Hrvatske, Brijunski otoci 13.-15. X. 1994., 439.-446.
- [11] Mikulić, D., Pauše, Ž., Krstić, V., Bjegović, D.: *Primjena mutnih skupova pri proračunu koeficijenata sigurnosti graničnog stanja korozije armiranobetonskih konstrukcija*, Zbirka referata IV kongres DHGK Zamah graditeljstva – temelj razvitka Hrvatske, Cavtat, 23-25. 5. 1996, 379.-387.
- [12] BE 4062 *Manual for assessment of residual service life of reinforced concrete structures*, DG XII. C.E.C. (Internal Report), 1995.
- [13] Tomičić, I., *Betonske konstrukcije*, DHGK, Zagreb, 1996.