

UDK 624.042/043:691.87+699.81

Priljeno 8. 12. 2009.

# Proračunski dijagram naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu

Davor Grandić, Dubravka Bjegović, Zorislav Sorić

## Ključne riječi

korozija armature, nosivost i uporabljivost konstrukcije, mehanička svojstva, brzina korozije, proračunski dijagrami

## Key words

corrosion of reinforcing-steel bars, bearing capacity and serviceability of a structure, mechanical properties, corrosion rate, experimental diagrams

## Mots clés

corrosion des barres d'acier, capacité portante et fonctionnalité d'une structure, propriétés mécaniques, taux de corrosion, diagramme expérimental

## Ключевые слова

коррозия арматуры, несущая способность и употребляемость конструкции, механические свойства, скорость коррозии, расчётные диаграммы

## Schlüsselworte

Bewehrungskorrosion, Tragfähigkeit und Nutzbarkeit der Konstruktion, mechanische Eigenschaften, Korrosionsgeschwindigkeit, Berechnungsdiagramm

D. Grandić, D. Bjegović, Z. Sorić

Izvorni znanstveni rad

## Proračunski dijagram naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu

Smanjenje mehaničkih svojstva korodirane armature u odnosu na nekorodirani čelik za armiranje bitno utječe na preostalu nosivost i uporabljivost armiranobetonskih konstrukcija. Temeljem provedenog vlastitog eksperimentalnog rada predlažu se izrazi za određivanje mehaničkih svojstva korodirane armature u ovisnosti o stanju korodiranosti armature i proračunski dijagram naprezanje-deformacija korodirane armature za proračun preostale nosivosti armiranobetonskih konstrukcija.

D. Grandić, D. Bjegović, Z. Sorić

Original scientific paper

## Experimental stress-strain diagram of corroded reinforcing-steel bars

When compared to the non-corroded reinforcing steel, the corroded bars and deterioration of their mechanical properties, exert a considerable impact on the residual bearing capacity and serviceability of reinforced-concrete structures. Original expressions are proposed for defining mechanical properties of corroded reinforcement, as related to the level of corrosion. An experimental stress-strain diagram of corroded reinforcing-steel bars, useful in the analysis of residual bearing capacity of reinforced concrete structures, is also proposed.

D. Grandić, D. Bjegović, Z. Sorić

Ouvrage scientifique original

## Le diagramme expérimental contrainte-déformation pour barres d'acier corrodées

En comparaison avec les barres d'acier non-corrodées, les barres corrodées et la détérioration des propriétés mécaniques causée par ces barres, influencent de manière considérable la capacité portante résiduelle et la fonctionnalité des structures en béton armé. Les expressions originales, visant à définir les propriétés mécaniques des barres corrodées en fonction du niveau de corrosion, sont proposées. Le diagramme expérimental contrainte-déformation pour barres d'acier corrodées, utile dans l'analyse de la capacité portante résiduelle des structures en béton armé, est également proposé.

Д. Грандич, Д. Бегович, З. Сориц

Оригинальная научная работа

## Расчётная диаграмма напряжение-деформация для корродированной арматуры

Снижение механических свойств корродированной арматуры по сравнению с некорродированной сталью для армирования значительно влияет на оставшуюся несущую способность и употребляемость железобетонных конструкций. На основании проведённой собственной экспериментальной работы предлагаются выражения для определения механических свойств корродированной арматуры, в зависимости от состояния корродированности арматуры, и расчётная диаграмма напряжение-деформация корродированной арматуры для расчёта оставшейся несущей способности железобетонных конструкций.

D. Grandić, D. Bjegović, Z. Sorić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Berechnungsdiagramm Spannung - Verformung für korrodierte Bewehrung

Die Minderung der mechanischen Eigenschaften der korrodierten Bewehrung im Verhältnis zu nicht korrodiertem Stahl hat wesentlichen Einfluss auf die übrig gebliebene Tragfähigkeit und Nutzbarkeit der Stahlbetonkonstruktionen. Auf Grund der durchgeführten eigenen experimentalen Arbeit sind Gleichungen für die Festlegung der mechanischen Eigenschaften der korrodierten Bewehrung abhängig von deren Zustand vorgeschlagen, sowie auch ein Berechnungsdiagramm Spannung - Verformung der korrodierten Bewehrung für die Berechnung der übrig gebliebenen Tragfähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen.

Autori: Dr. sc. **Davor Grandić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Rijeci Građevinski fakultet, V. C. Emina 5, Rijeka; prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Zorislav Sorić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb

## 1 Uvod

Mehanička svojstva korodirane armature koja su značajna za preostalu nosivost i uporabljivost konstrukcija jesu: granica popuštanja, čvrstoća, krutost i duktilnost. U slučaju lokalizirane korozije armature, smanjenjem ploštine presjeka korodirane armature nisu određena sva bitna mehanička svojstva korodirane armature koja utječu na preostalu nosivost i uporabljivost betonskih konstrukcija s prisutnom korozijom čelične armature. Rezultati provedenih istraživanja pokazali su da čvrstoća i granica popuštanja korodirane armature ostaju gotovo nepromijenjeni bez obzira na dostignuti gubitak mase ili smanjenje presjeka armature [1, 2] ako se ove veličine određuju kao omjer vlačne sile pri ispitivanju uzoraka korodirane armature i preostale ploštine njihova presjeka. Smanjenje krutosti korodirane armature kao i njezine duktilnost ne ovise samo o smanjenju ploštine presjeka armature, već i o prirodi korozije (lokalizirana točkasta ili homogena korozija), te o obliku, veličini i rasporedu (topografiji) korozijskih oštećenja uzduž armaturnih šipki, a također i o vrsti čelika za armiranje, to jest radi li se o armaturi od toplo valjanog ili hladno obrađenog čelika za armiranje [2, 3, 4, 5]. Izraz „krutost“, kao mehaničko svojstvo, upotrebljava se kod korodirane armature za razliku od „modula elastičnosti“ koji se rabi za nekorodiranu armaturu.

Cairns i dr. predložili su empirijske izraze [2] za mehanička svojstva korodirane armature, ali krutost korodirane armature u navedenom istraživanju nije razmatrana. Empirijski koeficijenti koji se u njima rabe međusobno se jako razlikuju, jer su dobiveni na temelju istraživanja raznih autora, a ispitivanja su se uglavnom provodila na armaturi kod koje je korozija ubrzana s pomoću vanjskog izvora istosmjernje struje.

Na temelju istraživanja provedenih u radu [6] dani su izrazi za karakteristične vrijednosti preostalih mehaničkih svojstava s odgovarajućim fraktilama vjerojatnosti, što u citiranom istraživanju Cairnsa i dr. [2] nije bio slučaj. U okviru eksperimentalnog istraživanja [6], korozija armature ugrađene u armiranobetonske uzorke greda i ploča potaknuta je kloridima i ubrzana izmjenom suhih i vlažnih perioda u klima-komori, u kojoj su uzorci za eksperimenta bili smješteni, čime je simuliran prirodni proces korozije armature prema *EN 1992-1-1* [9]. Na taj je način izazvana lokalizirana korozija armature, što odgovara stvarnoj prirodi korozije armature u betonskim konstrukcijama koje se nalaze u kloridnom okolišu.

U slučaju lokalizirane korozije armature, kakvu uzrokuje kloridi u betonu, oblik, veličina i raspored korozijskih oštećenja nepravilni su i nejednoliko raspoređeni uzduž armaturnih šipki. Istražnim radovima koji bi se provo-

dili pri ocjeni stanja postojećih konstrukcija izloženih korozivnim uvjetima okoliša nije moguće načiniti detaljnu topografiju korozijskih oštećenja uzduž armaturnih šipki oštećenih lokaliziranom korozijom. Zbog toga je pri proračunu preostale nosivosti betonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature potrebno raspolagati prikladnim proračunskim dijagramima naprezanje-deformacija korodirane armature, koji su funkcija neke dovoljno pouzdane nazivne veličine što je u dobroj korelaciji sa stvarnim stanjem korodiranosti armature. Za nazivnu veličinu kojom se definira stanje korodiranosti armature odabrano je korozijsko smanjenje promjera armature  $\Delta\phi(P_{corr})$ , dobiveno iz dubine korozije armature  $P_{corr}$  određene iz rezultata mjerenja brzine korozije, jer je u dobroj korelaciji s eksperimentalno utvrđenim smanjenjem ploštine presjeka utvrđenom na uzorcima korodirane armature izvađenim iz armiranobetonskih uzoraka greda i ploča [6]. Dubina korozije  $P_{corr}$  jest dubina do koje je prodrla korozija u odnosu na izvornu površinu nekorodirane šipke armature. Određuje se iz izmjerenih vrijednosti brzine korozije u promatranom razdoblju, a predstavlja srednju dubinu korozije u mjernom području senzora uređaja za mjerenje parametara korozije armature (uređaj Galva Pulse<sup>®</sup>).

Proračunski su dijagrami naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu koji se u ovome radu izlažu eksperimentalno određeni na temelju ispitivanja uzoraka korodirane armature izvađenih iz uzoraka greda i ploča što su tijekom provedbe eksperimentalnog istraživanja [6] bili izloženi koroziji armature i dugotrajnom opterećenju. Za proračun graničnih stanja u projektiranju novih armiranobetonskih konstrukcija prema Eurokodu 2 [7] rabe se karakteristične veličine granice popuštanja, omjera vlačne čvrstoće i granice popuštanja te deformacije pri najvećem naprezanju (oznake su redom:  $f_{yk}$ ,  $(f_t/f_y)_k$  i  $\epsilon_{uk}$ ). Prema Eurokodu 2 dopušteno je pri proračunu rabiti srednju vrijednost modula elastičnosti  $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$ . Granica popuštanja kao osnovno svojstvo čelika za armiranje koje se primjenjuje pri proračunu armiranobetonskih konstrukcije treba zadovoljiti najstroži kriterij za određivanje karakteristične veličine na temelju rezultata ispitivanja u okviru kontrole proizvodnje. Tako se prema Eurokodu 2 [7] i prema normi HRN EN 10080 [13] karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje određuje kao fraktila s 5 %-tnom vjerojatnošću da neće biti podbačena, to jest kao 5 %-tna fraktila. Ostale se karakteristične vrijednosti čelika za armiranje, to jest  $(f_t/f_y)_k$  i  $\epsilon_{uk}$ , određuju s manjom strogošću, to jest kao 10 %-tna fraktila.

Ako se ocjena preostale nosivosti armiranobetonskih konstrukcija proračunski provodi uz uporabu karakterističnih svojstava degradiranog materijala definiranih kao karakteristične statističke veličine s jednakim fraktilama

kao i kod novih konstrukcija, takva ocjena bit će objektivna i usporediva s projektiranom nosivošću konstrukcije, konstrukcijskog sustava ili nekog promatranog elementa. Ako se vjerojatnost opterećenja smatra nepromjenljivim u vremenu, mogu se rabiti nazivne ili karakteristične vrijednosti opterećenja prema projektiranoj namjeni konstrukcije.

Kod kloridima inicirane lokalizirane korozije čak i pri znatnijoj korodiranosti armature ne dolazi do većeg oštećenja betona, pogotovo u slučaju prisutnosti poprečne armature (spona), što je čest slučaj [6 i 8]. Ako se uz to pretpostavi konstantna tlačna čvrstoća betona u vremenu, što je obično na strani sigurnosti, preostala nosivost konstrukcijskih elemenata i sustava bit će funkcija stanja korodiranosti armature. Kada je korozija armature potaknuta kloridima, tragovi korozije armature na površini konstrukcijskih elemenata pojavljuju se mjestimično ili čak nisu vidljivi usprkos znatnoj korodiranosti armature. Ocjeni preostale nosivosti takve konstrukcije treba pristupiti uzimajući u obzir prirodu lokalizirane korozije, kako ne bi došlo do krivih procjena koje mogu biti opasne za nosivost i stabilnost konstrukcije. Zato je važno ocjenjivati preostalu nosivost i tada kada vanjski pokazatelji korozije armature na površini konstrukcije još nisu jako uočljivi.

Utjecaj stanja korodiranosti armature na nosivost elemenata provjeren je s pomoću rezultata eksperimentalnog istraživanja provedenog u okviru rada [6], to jest na temelju ispitivanja ponašanja do sloma uzoraka greda i ploča prethodno izloženih ubrzanom koroziji armature u klima-komori.

## 2 Kratak opis eksperimentalnog istraživanja

Ovdje se ne navode sve pojedinosti vrlo opsežnog eksperimentalnog istraživanja [6, 9], već se ukratko navode samo značajke istraživanja koje se odnose na mehanička svojstva korodirane armature. Provedeno je eksperimentalno istraživanje na uzorcima armiranobetonskih greda i ploča opterećenih konstantnim dugotrajnim opterećenjem i istovremeno izloženi ubrzanom ciklusima vlaženja prskanjem slanom vodom (otopina natrijeva klorida)

i sušenja kojima je potaknuta i ubrzana korozija čelične armature ugrađene u ispitne uzorke. Uzorci su navedenim ciklusima bili izloženi u klima-komori, s pomoću koje su postignuti i kontrolirani korozivni uvjeti okoliša.

Odabrani su uzorci greda i ploča. Grede su dimenzija presjeka 8x12 cm, duljine 200 cm, armirane s dvije šipke promjera 8 mm u vlačnom području i s dvije šipke promjera 6 mm u tlačnom području poprečnog presjeka te sa sponama promjera 6 mm na razmaku 8 cm. Zaštitni sloj betona do armature (spona) iznosi 1,0 cm (slika 1.). Uzorci ploča su dimenzija presjeka 50x8 cm, duljine 200 cm, armirani u vlačnom području presjeka s 4 šipke glavne (uzdužne) armature promjera 6 mm. Poprečnu armaturu ploča čine šipke promjera 6 mm postavljene na razmaku od 20 cm. Zaštitni sloj betona do glavne armature iznosi 1,0 cm.

Šipke nazivnog promjera 6 mm su od profiliranog hladno obrađenoga rebrastog čelika za armiranje, dok su one nazivnog promjera 8 mm od tople valjanoga rebrastog čelika za armiranje. Srednja vrijednost granica popuštanja dobivena ispitivanjem toplo valjanog čelika iznosi 589 N/mm<sup>2</sup>, a za hladno obrađeni čelik 573 N/mm<sup>2</sup>. Uzorci greda i ploča izrađeni su od betona čija srednja tlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem na kockama s bridom duljine 150 mm iznosi 35,2 N/mm<sup>2</sup>.

Programom eksperimenta predviđena su tri stupnja korozije armature nakon čijeg su se približnog dostizanja ispitivali uzorci greda i ploča do sloma (tablica 1.). Za svaki stupanj korozije predviđena je serija od četiri uzorka armiranobetonskih greda i ploča. Programom eksperimenta predviđena su i četiri kontrolna uzorka greda i ploča bez izlaganja koroziji armature. Nakon dostizanja pojedinih stupnjeva korozije armature, iz jednog uzorka greda i ploča iz svake serije izvađena je armatura zbog provedbe detaljnog pregleda, mjerenja i ispitivanja. Po jedan kontrolni uzorak grede i ploče (koji nisu bili tretirani ubrzanom korozijom) ispitani su 28 dana nakon betoniranja radi usporedbe i praćenja pojava pri ispitivanju uzoraka koji su bili izloženi koroziji armature. U tablici 1. je sa  $P_{corr}$  označena srednja dubina korozije armature, to jest dubina do koje je prodrla korozija armature u od-

Tablica 1. Broj uzoraka greda i ploča \*

Stupanj korozije	0. Kontrolni uzorci (nisu izloženi koroziji)	I. $P_{corr} = 0,05$ mm	II. $P_{corr} > 0,1$ mm	III. $P_{corr} > 0,2$ mm
Broj uzoraka	1 uzorak starosti 28 dana ispitivan do sloma	po 1 uzorak u klima-komori za ispitivanje stanja armature i prodora klorida		
	3 uzorka opterećena u laboratorijskim uvjetima ( $20 \pm 2$ °C, RH = 65 %) na kojima su mjereni progibi do završetka eksperimenta, a zatim su ispitani do sloma	po 3 uzorka u klima-komori izloženi djelovanju: <ul style="list-style-type: none"> <li>• dugotrajnoga statičkog opterećenja</li> <li>• ciklusima prskanja kloridnom otopinom i sušenja (koroziji armature), a nakon dostizanja odgovarajućeg stupnja korozije (I., II., III.) ispitani su do sloma</li> </ul>		

\* Isti broj ispitnih uzoraka predviđen je za grede i za ploče (ukupno 16 greda i 16 ploča)

nosu na izvornu površinu nekorodirane šipke armature. Rabi se srednja vrijednost dubine korozije jer je korozija armature potaknuta kloridima lokalizirana, to jest nejednoliko je raspodijeljena po površini armature.

U klima-komori uzorci greda i ploča postavljeni su unutar čeličnih okvira i tamo izloženi dugotrajnom opterećenju. Opterećenje je na uzorcima ploča i greda uzrokovalo pukotine približne širine od 0,1 mm. Uzorci su bili izlagani ciklusima prskanja kloridnom otopinom i sušenja. Pukotine su ubrzale vrijeme pojave korozije i sam korozijski proces. U tijeku izlaganja ubrzanoj koroziji u klima-komori, na armiranobetonskim uzorcima greda i ploča periodično su mjereni parametri korozije armature (brzina korozije, polučelijski potencijal i električna otpornost). U početku izlaganja uzoraka ubrzanoj koroziji, parametri korozije mjereni su jedanput tjedno, nakon toga jednom u dva tjedna (dva puta), zatim jednom svaka tri tjedna i na kraju jedanput mjesečno. Za mjerenja je upotrijebljen uređaj Galva Pulse<sup>®</sup> rad kojega se temelji na galvanostatičkom impulsnom postupku [6, 18].

### 3 Statističko vrednovanje rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava korodirane armature

Vlačna čvrstoća, granica popuštanja i parametar krutosti korodirane armature dobiveni su na temelju ispitivanja i određeni su u odnosu na izvornu ploštinu presjeka nekorodiranog čelika za armiranje [14]. Za svaki dostignuti stupanj korozije vlačno ispitivanje ponašanja korodirane armature povedeno je na tri uzorka armature izvađene iz ploče, tj. grede. Na temelju tih rezultata proračunane su srednje vrijednosti i procijenjene su karakteristične vrijednosti preostalih mehaničkih svojstava korodirane armature za sva tri dostignuta stupnja korozije prema izrazu:

$$X_k = m_x - k_n \cdot s_x \quad (1)$$

gdje je:

$X_k$  - karakteristična vrijednost preostalog mehaničkog svojstva korodirane armature

$m_x$  - srednja vrijednost promatrane veličine (rezultata ispitivanja)

$s_x$  - standardna devijacija promatrane veličine

$k_n$  - koeficijent fraktile i funkcije razdiobe vjerojatnosti.

Standardna se devijacija procjenjuje iz uzorka (s više ispitivnih uzoraka, to jest numeričkih rezultata ispitivanja) s pomoću izraza:

$$s_x = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_x)^2, \quad (2)$$

gdje je:

$n$  - ukupni broj rezultata ispitivanja,

$x_i$  - pojedinačni rezultat ispitivanja.

Ako se usvoji pretpostavka da su rezultati svojstava čelika za armiranje raspodijeljeni prema normalnoj ili Gaussovoj razdiobi, što je preporuka normi niza HRN EN 10080-1 do 6 [13], te u nedostatku prethodnog poznavanja srednje vrijednosti i standardne devijacije, to jest ako se ona određuje iz promatranog uzorka prema izrazu (2), tada su koeficijenti fraktile i razdiobe vjerojatnosti  $k_n$  za tri odnosno četiri rezultata ispitivanja te za 5 %-tnu i 10 %-tnu fraktilu određeni prema [10, 11] iznose:

$$k_n = 3,37 \text{ za } 5 \% \text{-tnu fraktilu i za tri rezultata ispitivanja } (n = 3)$$

$$k_n = 2,63 \text{ za } 5 \% \text{-tnu fraktilu i za četiri rezultata ispitivanja } (n = 4)$$

$$k_n = 2,18 \text{ za } 10 \% \text{-tnu fraktilu i za tri rezultata ispitivanja } (n = 3)$$

$$k_n = 1,83 \text{ za } 10 \% \text{-tnu fraktilu i za četiri rezultata ispitivanja } (n = 4).$$

Kao i kod nekorodiranog čelika za armiranje (prema normi HRN EN 10080) [13], karakteristične vrijednosti mehaničkih svojstava korodirane armature određuju se na temelju rezultata ispitivanja kao fraktile sa sljedećim vrijednostima:

- karakteristična granica popuštanja korodirane armature  $f_{yk,corr}$  kao 5 %-tna fraktila,
- omjer vlačne čvrstoće i granice popuštanja korodirane armature  $(f_{u,corr}/f_{y,corr})_k$  kao karakteristična vrijednost s 10 %-tnom fraktitom
- karakteristična deformacija korodirane armature pri najvećem naprezanju  $\epsilon_{uk}$  kao 10 %-tna fraktila.

Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti nekorodiranog čelika za armiranje, odnosno parametar krutosti korodirane armature određuju se kao srednje vrijednosti rezultata ispitivanja uzoraka armature.

Svakom pojedinom stupnju korozije armature za koji je na uzorcima korodirane armature provedeno vlačno ispitivanje pridružena je odgovarajuća veličina korozijskog smanjenja promjera armature  $\Delta\phi(P_{corr})$  određenog iz rezultata mjerenja brzine korozije u proteklom razdoblju [6, 14, 17, 18] prema izrazima:

$$P_{corr} = \int_0^{\tau} 11,6 \cdot i_{corr}(t) dt = 11,6 \cdot \int_0^{\tau} i_{corr}(t) dt \quad (3)$$

$$\phi = 12,74 \cdot \sqrt{m_0 - 0,00785(\phi_{nom} P_{corr} - P_{corr}^2)\pi}, \quad (4)$$

$$\Delta\phi(P_{corr}) = \frac{(\phi - \phi_0)}{\phi_0} \cdot 100, \quad (5)$$

gdje je:

$P_{corr}$  - srednja dubina korozije u mjernom području senzora, odnosno dubina korozije proračunana na temelju rezultata mjerenja brzine korozije armature u razdoblju u kojem se promatra napredovanje korozije armature prema izrazu (mm)

$i_{corr}(t)$  - brzina korozije  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  dobivena periodičnim mjerenjima na armiranobetonskim uzorcima

$t$  - vrijeme trajanja korozije armature u godinama

$\tau$  - promatrani trenutak vremena u kojem se proračunava srednja dubina korozije  $P_{corr}$

$m_0$  - duljinska masa nekorodirane armature ili početna duljinska masa ( $\text{g}/\text{mm}$ )

0,00785 - gustoća čelika ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )

$\phi_{nom}$  - nazivni promjer nekorodiranog čelika za armiranje (mm)

$\Delta\phi(P_{corr})$  - smanjenje promjera korodiranih šipki armature u odnosu na izvorni promjer nekorodiranog čelika za armiranje (%)

$\phi_0$  - izvorni promjer nekorodiranog čelika za armiranje u milimetrima.

U praktičnim analizama preostali promjer korodirane armature unutar mjernog područja senzora može se proračunati s pomoću izraza [6, 18, 19]:

$$\phi = \phi_0 - 2P_{corr} \quad (6)$$

Za mehanička je svojstva u ovisnosti o korozijskom smanjenju promjera armature  $\Delta\phi(P_{corr})$  provedena regresijska analiza [6]. Na slikama 1. do 10. prikazuju se dijagrami srednjih i karakterističnih vrijednosti mehaničkih svojstava za toplo valjanu i hladno obrađenu korodiranu rebrastu armaturu. Značenja oznaka na dijagramima (slike 1. do 10.) jesu:

$E_{s,corr}$  - parametar krutosti korodirane armature (za razliku od modula elastičnosti koji se rabi za nekorodiranu armaturu) ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$f_{ym,corr}$  - srednja vrijednost granice popuštanja korodirane armature ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$f_{yk,corr}$  - karakteristična vrijednost granice popuštanja korodirane armature ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$f_{tm,corr}$  - srednja vrijednost vlačne čvrstoće korodirane armature ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\epsilon_{um,corr}$  - srednja vrijednost deformacije korodirane armature pri najvećem naprežanju (%)

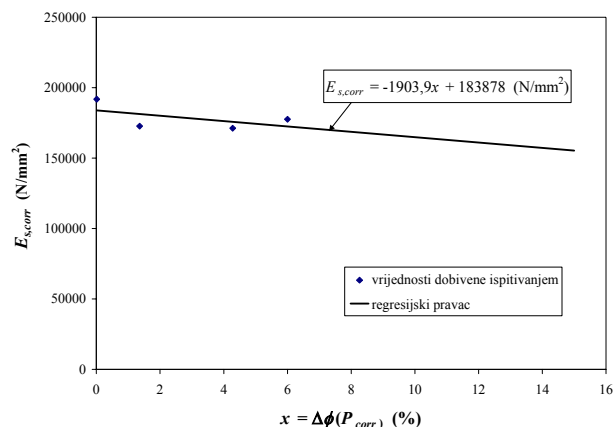
$\epsilon_{uk,corr}$  - karakteristična vrijednost deformacije korodirane armature pri najvećem naprežanju (%)

$(f_{t,corr}/f_{y,corr})_m$  - srednja vrijednost omjera vlačne čvrstoće i granice popuštanja korodirane armature

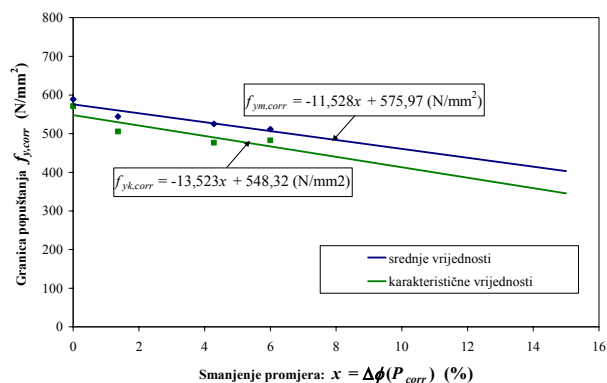
$(f_{t,corr}/f_{y,corr})_k$  - karakteristična vrijednost omjera vlačne čvrstoće i granice popuštanja korodirane armature.

### 3.1 Toplo valjana rebrasta armatura

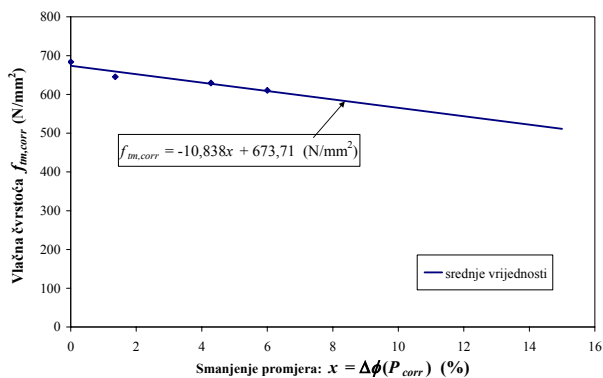
U nastavku su dijagrami srednjih i karakterističnih vrijednosti mehaničkih svojstava toplo valjane korodirane rebraste armature koji su rezultat eksperimentalnih ispitivanja na uzorcima ploča i greda što su bili armirani toplo valjanom armaturom [6].



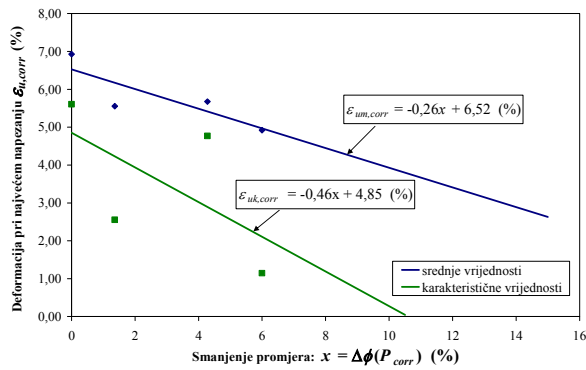
Slika 1. Parametar krutosti ( $E_{s,corr}$ ) vruće valjane armature uzoraka, nakon tretiranja ubrzanom korozijom, u ovisnosti o smanjenju promjera  $\Delta\phi(P_{corr})$  [6]



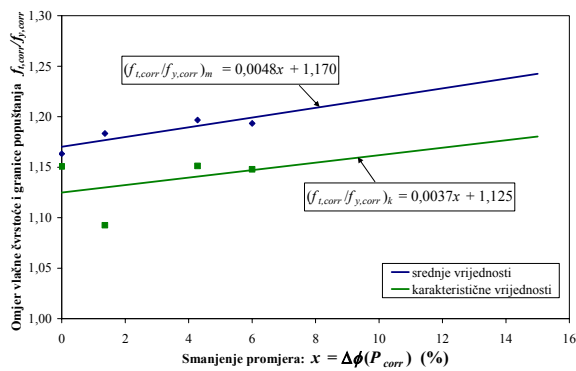
Slika 2. Ovisnost granice popuštanja korodirane toplo valjane rebraste armature o smanjenju promjera [6]



Slika 3. Ovisnost vlačne čvrstoće korodirane toplo valjane rebraste armature o smanjenju promjera [6]



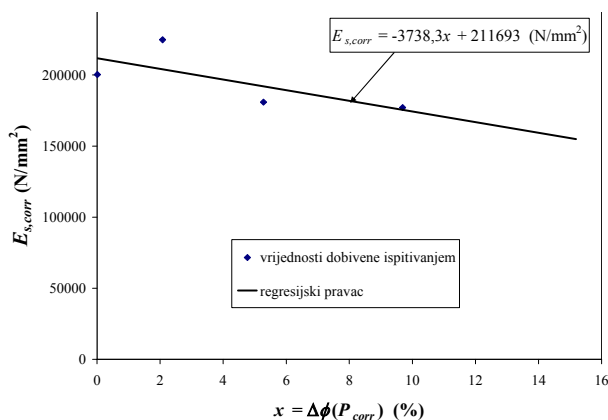
Slika 4. Ovisnost deformacije pri najvećem naprezanju korodirane toplu valjane rebraste armature o smanjenju promjera [6]



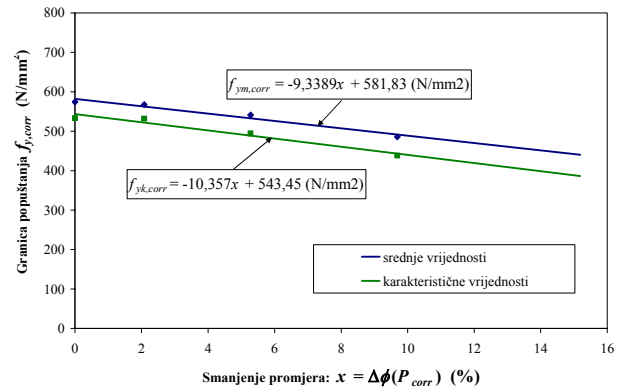
Slika 5. Ovisnost omjera vlačne čvrstoće i granice popuštanja korodirane toplu valjane rebraste armature o smanjenju promjera [6]

### 3.2 Hladno obrađena rebrasta armatura

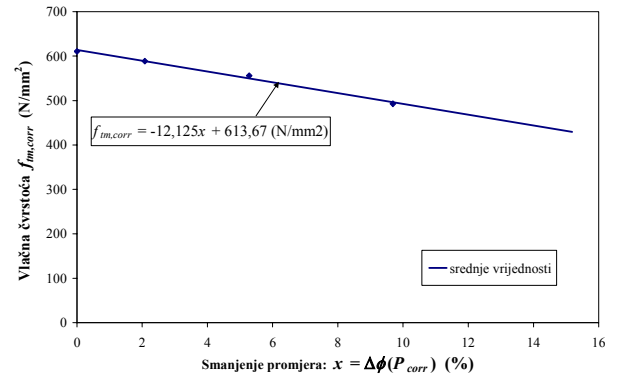
U nastavku su dijagrami srednjih i karakterističnih vrijednosti mehaničkih svojstava hladno obrađene korodirane rebraste armature koji su rezultat eksperimentalnih ispitivanja na uzorcima ploča i greda što su bili armirani hladno obrađenom armaturom [6].



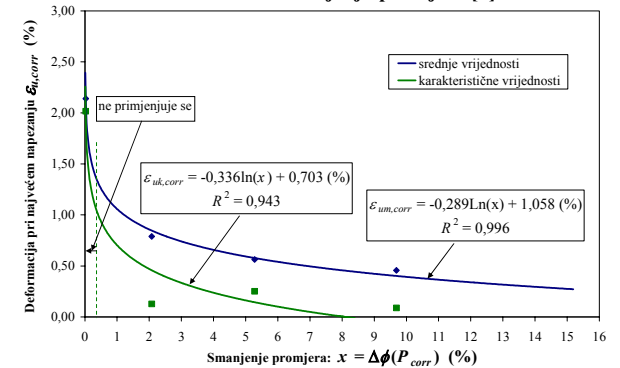
Slika 6. Parametar krutosti ( $E_{s,corr}$ ) hladno obrađene armature uzoraka, nakon tretiranja ubrzanom korozijom, u ovisnosti o smanjenju promjera  $\Delta\phi(P_{corr})$  [6]



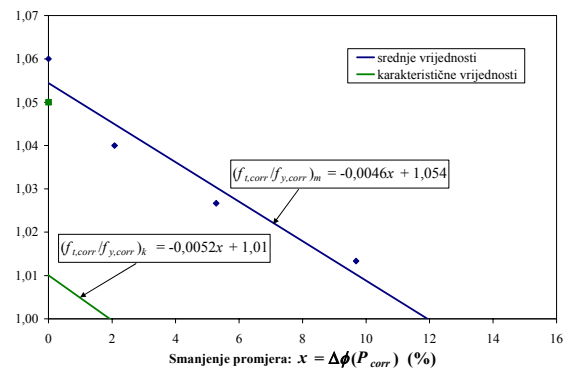
Slika 7. Ovisnost granice popuštanja korodirane hladno obrađene rebraste armature o smanjenju promjera [6]



Slika 8. Ovisnost vlačne čvrstoće korodirane hladno obrađene rebraste armature o smanjenju promjera [6]



Slika 9. Ovisnost deformacije pri najvećem naprezanju korodirane hladno obrađene rebraste armature o smanjenju promjera



Slika 10. Ovisnost omjera vlačne čvrstoće i granice popuštanja korodirane hladno obrađene rebraste armature o smanjenju promjera [6]

#### 4 Proračunski dijagram naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu

Proračunski dijagram naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu koji se predlaže u ovoj točki temelji se na proračunskom dijagramu naprezanje-deformacija prema EN 1991-1-1 [7], tako da se u njega uvrste karakteristične vrijednosti preostalih mehaničkih svojstava korodirane armature, prikazane u točki 3. i odgovarajući parcijalni koeficijent sigurnosti za korodiranu armaturu  $\gamma_{s,corr}$ .

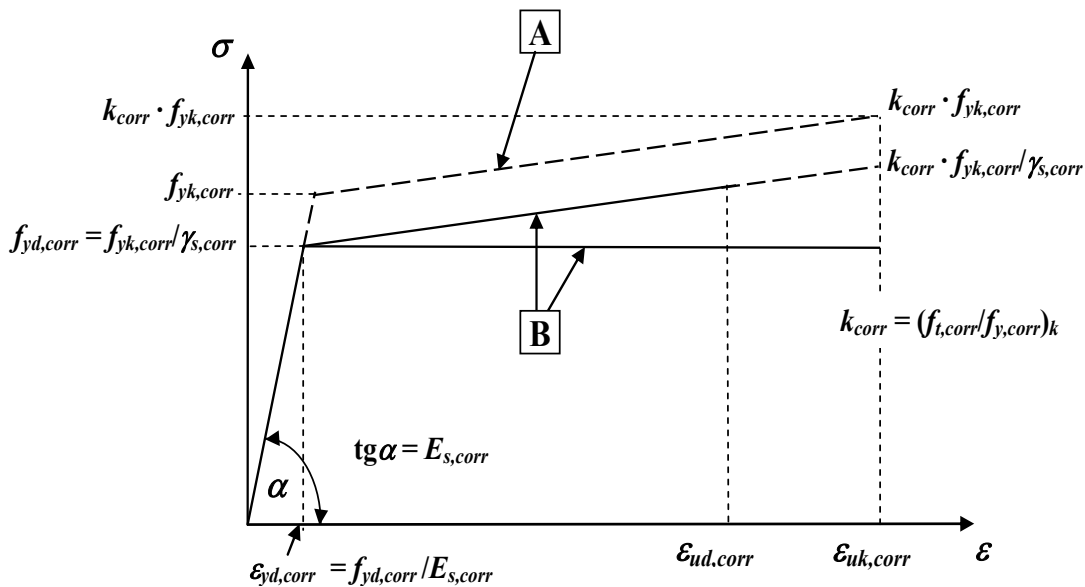
Na temelju rezultata istraživanja provedenih u radu [6] predlaže se proračunski dijagram naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu kao funkcija stanja korodiranosti armature (smanjenja promjera armature). Proračunski dijagram naprezanje-deformacija koji se ovdje predlaže namijenjen je za primjenu pri proračunskoj ocjeni preostale nosivosti armiranobetonskih konstrukcija oštećenih korozijom armature.

$\epsilon_{yd,corr}$  - deformacija na proračunskoj granici popuštanja korodirane armature ( $\epsilon_{yd,corr} = f_{yd,corr} / E_{s,corr}$ )

$\epsilon_{ud,corr}$  - najveća proračunska deformacija korodirane armature kod primjene proračunskog dijagrama s nagnutom gornjom crtom.

Značenje ostalih veličina koje se rabe u ovim dijagramima dano je u točki 3. (karakteristične vrijednosti mehaničkih svojstava korodirane armature).

U slučaju korištenja vodoravne gornje crte predlaže se kontrolirati deformaciju armature, tako da se njena najveća veličina ograniči na  $\epsilon_{uk,corr}$ . Za najveću proračunsku deformaciju toplo valjane korodirane armature pri korištenju proračunskog dijagrama s nagnutom gornjom crtom predlaže se  $\epsilon_{ud,corr} = 0,9 \epsilon_{uk,corr}$ . Proračunska deformacija na ovaj način se određuje analogno predloženoj vrijednosti u Eurokodu 2 (EN 1992-1-1). U navedenoj



**A** karakteristični idealizirani dijagram

**B** proračunski dijagrami

Slika 11. Predloženi karakteristični idealizirani i proračunski dijagram naprezanje-deformacija korodiranog čelika za armiranje [6]

Karakteristični idealizirani i proračunski dijagram korodirane armature (slika 11.) opisani su sljedećim veličinama:

$f_{yd,corr}$  - proračunska granica popuštanja korodirane armature ( $f_{yd,corr} = f_{yk,corr} / \gamma_{s,corr}$ )

$\gamma_{s,corr}$  - parcijalni koeficijent sigurnosti za korodiranu armaturu

$k_{corr}$  - koeficijent nagiba nagnute gornje crte dijagrama naprezanje-deformacija korodiranog čelika za armiranje ( $k_{corr} = (f_{t,corr} / f_{y,corr}) * k$ )

normi se za korištenje nagnute gornje grane proračunskog dijagrama naprezanje-deformacija nekorodiranog čelika za armiranje predlaže najveća proračunska deformacija  $\epsilon_{ud} = 0,9 \epsilon_{uk}$ , gdje je  $\epsilon_{uk}$  karakteristična vrijednost deformacije nekorodiranog čelika za armiranje pri najvećem naprezanju. S pomoću ovih ograničenja proračunske deformacije armature uzimaju se u obzir moguća odstupanja stvarnih deformacija armature pri najvećem naprezanju od karakteristične vrijednosti ( $\epsilon_{uk}$ ), a time i nepouzdanosti korištenja ojačanja armature zbog nagnute gornje crte dijagrama. Deformacija pri najvećem

naprežanju korodirane hladno obrađene rebraste armature vrlo brzo se smanjuje s napredovanjem korozije. To se posebno odnosi na karakterističnu veličinu  $\varepsilon_{uk,corr}$  (slika 9.). Karakteristična vrijednost omjera vlačne čvrstoće i granice popuštanja hladno obrađene korodirane armature ( $f_{t,corr}/f_{y,corr}$ )<sub>k</sub> i za malu korodiranost armature dostiže vrijednost 1,0 (slika 10.). Zbog male deformacije  $\varepsilon_{uk,corr}$  i omjera ( $f_{t,corr}/f_{y,corr}$ )<sub>k</sub>, nagnuta gornja crta proračunskog dijagrama za korodiranu armaturu bila bi gotovo vodoravna i vrlo kratka. Stoga se za proračun nosivosti elemenata s hladno obrađenom armaturom predlaže koristiti isključivo proračunski dijagram s horizontalnom gornjom crtom.

#### 4.1 Toplo valjana rebrasta armatura

Primjenom regresijskih pravaca navedenih u točki 3.1 prikazanih na slikama 1. do 5. dobivaju se sljedeći izrazi za preostala mehanička svojstva u ovisnosti o stanju korodiranosti armature [6]:

$$E_{s,corr} = E_s [1 - 0,010\Delta\phi(P_{corr})], \quad (7)$$

$$f_{yk,corr} = f_{yk} [1 - 0,025\Delta\phi(P_{corr})], \quad (8)$$

$$\varepsilon_{uk,corr} = \varepsilon_{uk} [1 - 0,095\Delta\phi(P_{corr})], \quad (9)$$

$$\left( \frac{f_{t,corr}}{f_{y,corr}} \right)_k = \left( \frac{f_t}{f_y} \right)_k [1 + 0,003\Delta\phi(P_{corr})]. \quad (10)$$

Deformacija  $\varepsilon_{uk}$  i  $\varepsilon_{uk,corr}$  i korozijsko smanjenje promjera armature  $\Delta\phi(P_{corr})$  izražavaju se u postocima (%), a dimenzija parametra krutosti, granice popuštanja i vlačne čvrstoće korodirane armature u izrazima (7) do (10) je N/mm<sup>2</sup>.

Prema karakterističnim vrijednostima deformacija pri najvećem naprežanju prikazanim na slici 4. kod smanjena promjera  $\Delta\phi(P_{corr}) = 10$  %, karakteristična vrijednost deformacija toplo valjane korodirane armature pri najvećem naprežanju smanjuje se na veličinu deformacije približno jednaku deformaciji armature na početku granice popuštanja (oko 0,3 %). To znači da postoji neprihvatljiv rizik od potpuno krhkog ponašanja toplo valjane armature pri smanjenju promjera od 10 %, to jest smanjenja ploštine presjeka približno 20 %. Ovaj je zaključak u skladu s prijašnjim preporukama [15] da se smanjenje ploštine presjeka armature od 20 % smatra granicom uporabnog vijeka po kriteriju korodiranosti armature.

#### 4.2 Hladno obrađena rebrasta armatura

Primjenom regresijskih krivulja navedenih u točki 3.2 dobivaju se sljedeći izrazi za preostala mehanička svojstva u ovisnosti o stanju korodiranosti armature [6]:

$$E_{s,corr} = E_s [1 - 0,018\Delta\phi(P_{corr})], \quad (11)$$

$$f_{yk,corr} = f_{yk} (1 - 0,019\Delta\phi(P_{corr})), \quad (12)$$

$$\varepsilon_{uk,corr} = \varepsilon_{uk} [0,35 - 0,166 \ln \Delta\phi(P_{corr})], \quad (13)$$

$$\left( \frac{f_{t,corr}}{f_{y,corr}} \right)_k = \left( \frac{f_t}{f_y} \right)_k (1 - 0,005\Delta\phi(P_{corr})). \quad (14)$$

Deformacija  $\varepsilon_{uk}$  i  $\varepsilon_{uk,corr}$  i korozijsko smanjenje promjera armature  $\Delta\phi(P_{corr})$  izražavaju se u postocima (%), a dimenzija parametra krutosti  $E_{s,corr}$ , granice popuštanja  $f_{y,corr}$  i vlačne čvrstoće  $f_{tm,corr}$  u izrazima (11) do (14) je N/mm<sup>2</sup>.

Prema karakterističnim vrijednostima deformacija pri najvećem naprežanju prikazanim na slici 9. kod smanjena promjera  $\Delta\phi(P_{corr}) = 3$  %, karakteristična vrijednost deformacija korodirane hladno obrađene rebraste armature pri najvećem naprežanju smanjuje se na veličinu deformacije približno jednaku deformaciji armature na početku granice popuštanja (oko 0,3 %). Karakteristični omjer vlačne čvrstoće i granice popuštanja korodirane hladno obrađene armature jednak je jedinici ( $(f_{t,corr}/f_{y,corr})_k = 1,0$ ) već kod smanjenja promjera  $\Delta\phi(P_{corr}) = 2$  %, kao što se vidi na slici 10. Na temelju jednog i drugog parametra može se zaključiti da je rizik od potpuno krhkog ponašanja korodirane hladno obrađene rebraste armature neprihvatljivo velik pri smanjenju promjera od 2 do 3 %, to jest smanjenja ploštine presjeka od približno 5 do 6 %.

Najizraženija i najznačajnija razlika između korodirane toplo valjane i hladno obrađene rebraste armature upravo je u puno izraženijem smanjenju duktilnosti s napredovanjem korozije kod hladno obrađene armature u odnosu na toplo valjanu. To se vidi iz usporedbe dijagrama najvećih deformacija korodirane armature pri najvećem naprežanju na slikama 4. i 9. Pad omjera vlačne čvrstoće i granice popuštanja s napredovanjem korozije također je puno veći kod hladno obrađene nego kod toplo valjane armature (slike 5. i 10.).

Rezultati ispitivanja i analize preostalih mehaničkih svojstava hladno obrađene rebraste armature [6] navode na zaključak da bi hladno obrađenu armaturu (najčešće su od nje načinjene zavarene armature mreže) trebalo isključiti iz primjene u izvedbi armiranobetonskih konstrukcija u korozivno agresivnom okolišu.

#### 4.3 Povećanje parcijalnog koeficijenta sigurnosti za korodiranu armaturu

U proračunima armiranobetonskih konstrukcija prema Eurokodu 2 [10, 11] i drugim suvremenim normama primjenjuje se semiprobabilistički pristup (postupak dokazivanja pouzdanosti razine I), uporabom parcijalnih koeficijenata sigurnosti za djelovanja (opterećenja) i za parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala. Svojstva materijala, djelovanja i dimenzije predstavljaju bazne varijable u probabilističkom konceptu pouzdanosti konstrukcija.



Bez ulaženja u složenu problematiku probabilističkog pristupa, ovdje ćemo procijeniti moguća povećanja parcijalnog koeficijenta za samo jednu baznu varijablu, a to je granica popuštanja korodirane armature. Predlaže se povećanje parcijalnog koeficijenta sigurnosti u odnosu na isti koeficijent nekorodirane armature. Polazi se od pretpostavke da će korodirana armatura imati manje ujednačena mehanička svojstva od izvorne, nekorodirane armature. To dovodi do povećanja standardne devijacije, koje je već uzeto u obzir pri određivanju karakterističnih vrijednosti (točka 3.), a zbog toga i očekivana parcijalnog koeficijenta za korodiranu armaturu.

Za određivanje parcijalnih koeficijenata sigurnosti  $\gamma_R$  za otpornost primjenjuje se probabilistički pristup razine II., to jest primjenom indeksa pouzdanosti  $\beta$  [12]:

$$\gamma_R = \frac{1 - k_R \cdot V_R}{1 - \beta \cdot \alpha_R \cdot V_R}, \quad (15)$$

gdje je  $\gamma_R$  parcijalni koeficijent sigurnosti za neku baznu varijablu otpornosti, u ovom slučaju to je granica popuštanja armature, pa je  $\gamma_R = \gamma_s$ ,  $V_R$  je koeficijent varijacije promatrane bazne varijable otpornosti,  $\beta$  je indeks pouzdanosti,  $\alpha_R$  je koeficijent utjecaja pojedine slučajne varijable na  $\beta$ , a  $k_R$  je koeficijent koji ovisi o fraktilu i funkciji razdiobe vjerojatnosti promatrane bazne varijable otpornosti. Koeficijent varijacije  $V_R$  određuje se prema izrazu:

$$V_R = \frac{m_R}{\sigma_R}, \quad (16)$$

gdje je  $m_R$  srednja vrijednost, a  $\sigma_R$  je standardna devijacija. Prema tome, vidi se da je izraz u brojniku karakteristična vrijednost promatrane varijable (izraz (1)). Kad se standardna devijacija određuje iz uzorka, to jest iz ograničenog broja numeričkih rezultata, tada se označava oznakom  $s_x$  i proračunava se prema izrazu (2).

Ciljani indeks pouzdanosti predložen u ENV 1991 iznosi  $\beta = 3,8$ . U EN 1990 indeks pouzdanosti  $\beta = 3,8$  predlaže se za građevine svrstane u razred posljedica sloma CC2, to jest u razred pouzdanosti RC2. U tom razredu nalazi se najveći broj građevina. Ako se primjenjuje viši razred pouzdanosti, tada parcijalne koeficijente sigurnosti za djelovanja predviđenih normom EN 1990 treba pomnožiti s 1,1.

Kako se u eksperimentu redovito raspolaže ograničenim brojem numeričkih rezultata za predviđanje karakterističnih vrijednosti s nekim zadanim fraktilama vjerojatnosti rabi se standardna Bayesova formula predviđanja [16]:

$$X_k = m_x - t_v s_x \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right)}, \quad (17)$$

gdje je:

- $n$  - broj rezultata ispitivanja
- $m_x$  - srednja vrijednost rezultat ispitivanja
- $s_x$  - standardna devijacija rezultata ispitivanja,
- $\nu$  - broj stupnjeva slobode ( $\nu = n - 1$ )
- $t_\nu$  - vrijednost  $t$ -raspodjele vjerojatnosti za odabranu fraktilu.

Parcijalni koeficijent nekog svojstva ili otpornosti može se odrediti i uz poznavanje karakteristične i proračunske vrijednosti, a ako se traži parcijalni koeficijent materijala tada se on može odrediti s pomoću izraza:

$$\gamma_M = \frac{X_k}{X_d}, \quad (18)$$

gdje je  $X_k$  karakteristična vrijednost a  $X_d$  proračunska.

Ako se uzme da je  $\gamma_M = \gamma_R$ , iz izraza (15) vidi se da se proračunska vrijednost promatrane veličine može dobiti tako da se proračuna karakteristična vrijednost pomnoži s koeficijentom  $k_R = \alpha_R \beta$ . Prema EN 1990 i ENV 1991 preporučena vrijednost koeficijenta utjecaja za dominantne varijable otpornosti je  $\alpha_R = 0,8$ , tada je  $\alpha_R \beta = 0,8 \cdot 3,8 = 3,04$ . Ovako dobivena proračunska vrijednost ima, uz pretpostavku normalne raspodjele, 0,1 %-tnu fraktilu.

Opisani postupak dobivanja proračunske vrijednosti vrijedi u slučaju kad ima mnogo rezultata ispitivanja (više od 30), a u suprotnom vrijedi Bayesova formula predviđanja (17), a tražena fraktila je 0,1 %. U dodatku D normi ENV 1991-1 i EN 1990 na raspolaganju su tablice s proračunanim koeficijentima fraktila i funkcije razdiobe vjerojatnosti  $k_n$  prema Bayesovu postupku. Za određivanje karakteristične i proračunske vrijednosti rezultati se svrstavaju u skupine tako da prvu skupinu čine rezultati ispitivanja nekorodiranih uzoraka armature i uzoraka uzetih pri dostignutom prvom stupnju korozije, drugu skupinu čine uzorci prvog i drugog stupnja korozije, a treću skupinu uzoraka čine uzorci uzeti kod drugog i trećeg stupnja korozije. Na taj način u svakoj skupini ima najmanje šest rezultata ispitivanja armature. Ista podjela u skupine napravljena je i za uzorke greda i ploča. Kod njih je ocjenjivan moment savijanja pri početku popuštanja vlačne armature za koji je u radu [6] pokazana gotovo potpuna ovisnost o granici popuštanja armature. Tako u svakoj skupini ima po šest uzoraka greda ili ploča.

Za određivanje karakterističnih i proračunskih vrijednosti rabi se izraz (1), a koeficijenti fraktila i razdiobe vjerojatnosti  $k_n$  za šest odnosno sedam rezultata ispitivanja te za 5 %-tnu i 0,1 %-tnu fraktilu određeni prema [10,11] iznose:

$k_n = 2,18$  za 5 %-tnu fraktilu za određivanje proračunske vrijednosti iz šest rezultata ispitivanja ( $n = 6$ )

$k_n = 2,09$  za 5 %-tnu fraktilu za određivanje proračunske vrijednosti iz sedam rezultata ispitivanja ( $n = 6$ )

$k_n = 6,36$  za 0,1 %-tnu fraktilu za određivanje proračunske vrijednosti iz šest rezultata ispitivanja ( $n = 6$ )

$k_n = 5,72$  za 0,1 %-tnu fraktilu za određivanje proračunske vrijednosti iz sedam rezultata ispitivanja ( $n = 7$ ).

Parcijalni koeficijenti sigurnosti armature određuju se prema izrazu (18) kao  $\gamma_s = X_k/X_d$  za svaku skupinu rezultata ispitivanja, gdje su  $X_k$  i  $X_d$  karakteristične i proračunske vrijednosti granice popuštanja armature. Parcijalni koeficijenti za armaturu u ovisnosti o stanju korozije armature prikazani su na slici 11.

Prema rezultatima provedene analize pri ocjeni preostale nosivosti elemenata armiranih toplo valjanom rebrastom armaturom izloženih procesu korozije armature, predlaže se za određivanje proračunskog dijagrama korodirane armature primijeniti jedinstveni parcijalni koeficijent korodirane armature  $\gamma_{s,corr} = 1,25$ . Područje primjene je do 10 %-tnog smanjenja promjera, to jest 20 %-tnog smanjenja ploštine presjeka kada bi oštećenu armaturu trebalo zamijeniti zbog rizika od neduktilnog ponašanja.

U slučaju hladno obrađene rebraste armature ne predlaže se njezina uporaba pri smanjenju promjera kod kojeg bi prema provedenoj analizi bilo potrebno povećanje parcijalnog koeficijenta u odnosu na parcijalni koeficijent nekorodirane armature ( $\gamma_s = 1,15$ ) [7], jer se ne može dopustiti neko znatnije korozijom uzrokovano smanjenje granice popuštanja zato što je već i kod 2 %-tnog smanjenja promjera armature rizik od krhkog sloma armature neprihvatljivo velik.

## 5 Zaključak

U ovome radu prikazani su prijedlozi proračunskih dijagrama naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu. Dijagrami su dobiveni na temelju ispitivanja korodirane armature uzoraka greda i ploča u okviru provedenog eksperimenta.

Utvrđeno je da toplo valjani rebrasti čelik za armiranje pri smanjenju promjera šipke od 10 %, to jest smanjenju

ploštine presjeka od približno 20 % ima neprihvatljiv rizik od neduktilnog ponašanja, a kod hladno obrađenog čelika za armiranje neprihvatljiv rizik od krhkog ponašanja nastupa već kod 2 % do 3 % smanjenja promjera šipke (smanjenje ploštine presjeka armaturnih šipki približno je 5 %).

Na temelju rezultata ispitivanja uzoraka armature i uzoraka greda i ploča do sloma analizirano je moguće povećanje parcijalnog koeficijenta za korodiranu armaturu. Prema rezultatima provedene analize pri ocjeni preostale nosivosti elemenata armiranih toplo valjanom rebrastom armaturom izloženih procesu korozije armature, predlaže se za određivanje proračunskog dijagrama toplo valjane korodirane armature koristiti se jedinstvenim parcijalnim koeficijentom sigurnosti korodirane armature  $\gamma_{s,corr} = 1,25$ . Područje primjene je do 10 %-tnog smanjenja promjera zbog korozije, to jest približno 20 %-tnog smanjenja presjeka kada bi oštećenu armaturu po mogućnosti trebalo zamijeniti zbog rizika od neduktilnog ponašanja. U slučaju hladno obrađene rebraste armature ne može se dopustiti neko veće korozijom uzrokovano smanjenje promjera armature, a za vrlo malo smanjenje promjera nije potrebno povećanje parcijalnog koeficijenta sigurnosti za korodiranu armaturu u odnosu na parcijalni koeficijent koji se rabi kod nekorodiranog čelika za armiranje. Naime, već i kod 2 %-tnog smanjenja promjera armature rizik od krhkog sloma armature je neprihvatljivo velik. Predlaže se hladno obrađenu armaturu male duktilnosti isključiti iz primjene u izvedbi armiranobetonskih konstrukcija u korozivno agresivnom okolišu.

Za proračun preostale nosivosti armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata i sustava oštećenih korozijom armature pri savijanju predlaže se primijeniti proračunske dijagrame naprezanje-deformacija za korodiranu armaturu u kojima su preostala mehanička svojstva funkcija stanja korodiranosti armature. Kod lokalizirane (engl. *pitting*) korozije najčešće će biti dovoljno smanjenje nosivosti odrediti kao funkciju narušenih svojstava korodirane armature jer betonski će presjek ostati nepromijenjen, a u rjeđim slučajevima, kad to nije tako u proračunima, treba uzeti u obzir smanjeni betonski presjek.

## LITERATURA

- [1] Palsson, R.; Mirza, S.: *Mechanical Response of Corroded Steel Reinforcement of Abandoned Concrete Bridge*, ACI Structural Journal, 99 (2002) 2, 157-161.
- [2] Cairns, J.; Plizzari, G. A.; Du, Y.; Law, D. W.; Franzoni, C.: *Mechanical Properties of Corrosion-Damaged Reinforcement* ACI, Materials Journal, 102 (2005) 4, 256-264.
- [3] Du Y. G.; Clark L. A.; Shan, A. H. C.: *Effect of Corrosion on Ductility of Reinforcing Bars*, Magazine of Concrete Research, 57 (2005) 7, 407-419.
- [4] Apostolopoulos, C. A.; Michalopoulos, D.: *The Impact of Corrosion on the Mechanical Behavior of Steel Undergoing Plastic Deformation*, Materials and Corrosion, 58 (2007), 1, 5-12.
- [5] Maslehuddin, M.; Allam, I. M.; Al-Sulaimani, G. J.; Al-Mana, A. I.; Abduljavad, S. N.: *Effect of Rusting of Reinforcing Steel on Its Mechanical Properties and Bond with Concrete*, ACI Materials Journal, 87(1990) 5, 496-502.
- [6] Grandić, D.: *Proračunski postupci za ocjenu nosivosti i uporabljivosti betonskih konstrukcija oštećenih korozijom*

- armature, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2008.
- [7] EN 1992-1-1, Eurocode 2: *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, CEN, Brussels, 2004.
- [8] *Bond of reinforcement concrete*, State-of-art report prepared by Task Group *Bond Models*, Bulletin N° 10, fib, Lausanne, Switzerland, 2000.
- [9] Grandić, D.; Bjegović, D.: *Structural Deterioration due to Chloride-Induced Reinforcement Corrosion*, Supplementary Papers - Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada 2006, 173-188.
- [10] EN 1990, Eurocode: *Basis of structural design*, CEN, Brussels, 2002.
- [11] HRN ENV 1991-1, Eurokod 1: *Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije - 1. dio: Osnove projektiranja* (prema ENV 1991-1:1994), DZNM, Zagreb 2005.
- [12] Milčić, V.; Peroš, B.: *Uvod u teoriju sigurnosti nosivih konstrukcija*, Građevinski fakultet u Splitu, Split, 2003.
- [13] HRN EN 10080: Čelik za armiranje betona – Zavarljivi armaturni čelik - Općenito (prema europskoj normi EN 10080), HZN, Zagreb 2005.
- [14] Grandić, D.; Bjegović, D.; Sorić, Z.: *Mehanička svojstva korodirane armature*, Sabor hrvatskih graditelja, Cavtat, 2008.
- [15] Bjegović, D.: *Durability design for reinforced concrete structures*, sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete / V.M. Malhotra (ur.), ACI International, Grčka, Thessaloniki, 2003, 737-75.
- [16] *Probabilistic Assessment of Existing Structures*, A Publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS), France, 2001.
- [17] Grandić, D.; Bjegović, D.; Banić, D. I.: *Residual Structure Service Life Depending on Steel Corrosion Rate*, Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, Application of Codes, Design and Regulations, Dundee, Scotland, 2005, 195-202.
- [18] Klinghoffer, O.; Frølund, T.: *Rebar Corrosion Rate Measurements for Service Life Estimates*, ACI Fall Convention 2000, Toronto, Canada, Committee 365 “Practical Application of Service Life Models”.
- [19] Brite-Euram III “Smart Structures”, Contract No. BRPR-CT98-0751: *Integrated Monitoring Systems for Durability Assessment of Concrete Structures*, Project Report, September 2002.