

Razlike u procjeni pouzdanosti uobičajenih i iznimnih konstrukcija

Boris Androić, Darko Dujmović, Ivan Lukačević

Ključne riječi

pouzdanost, procjena pouzdanosti, razlike u procjeni, uobičajene konstrukcije, iznimne konstrukcije, parcijalni koeficijent

Key words

reliability, analysis of reliability, differences in analysis, normal structures, exceptional structures, partial factors

Mots clés

fiabilité, analyse de fiabilité, différences dans l'analyse, structures normales, structures exceptionnelles, facteurs partiels

Ключевые слова

надежность, оценка надежности, различия в оценке, стандартные конструкции, нестандартные конструкции, парциальные факторы

Schlüsselworte

Zuverlässigkeit, Abschätzung der Zuverlässigkeit, Unterschiede bei der Abschätzung, übliche Konstruktionen, besondere Konstruktionen, partielle Faktoren

B. Androić, D. Dujmović, I. Lukačević

Pregledni rad

Razlike u procjeni pouzdanosti uobičajenih i iznimnih konstrukcija

Prikazana je i obrazložena podjela na uobičajene i iznimne konstrukcije sa stajališta razlikovanja pouzdanosti. Zbog činjenice da kod procjene pouzdanosti iznimnih konstrukcija nema dovoljno iskustva i za njih ne vrijede važeće norme detaljnije su u razmatranju obuhvaćene neke kategorije takvih konstrukcija. Na temelju razlikovanja pouzdanosti uobičajenih i iznimnih konstrukcija, provedena je analiza tih dviju kategorija konstrukcija razmatranih na razini parcijalnih koeficijenata.

B. Androić, D. Dujmović, I. Lukačević

Subject review

Differences in estimating reliability of normal and exceptional structures

The division of structures into normal and exceptional ones is presented and explained from the standpoint of their differences in reliability. As estimation of reliability of exceptional structure is hindered by insufficient experience, and by the fact that they can not be measured against applicable standards, this analysis also focuses on individual categories of such structures. Based on differentiation between reliability of normal and exceptional structures, these two categories of structures are analyzed at the level of partial factors.

B. Androić, D. Dujmović, I. Lukačević

Ouvrage de syntaxe

Différences dans l'estimation de fiabilité de structures normales et exceptionnelles

La répartition des structures en des structures normales et exceptionnelles est présentée et expliquée de point de vue de leur différences en fiabilité. Comme l'estimation de fiabilité des structures exceptionnelles est rendue difficile par le manque d'expérience, et par le fait que les standards usuels ne peuvent pas être appliqués dans leur étude, la présente analyse porte également sur les catégories individuelles de ces structures. En se basant sur la différenciation de fiabilité des structures normales et exceptionnelles, ces deux catégories de structures sont analysées au niveau des facteurs partiels.

Б.Андроич, Д. Дуймович, И. Лукачевич

Обзорная работа

Различия в оценке стандартных и нестандартных конструкций

Приведено обоснованное деление на стандартные и нестандартные конструкции с точки зрения различной надежности. В связи с отсутствием достаточного опыта в оценке надежности нестандартных конструкций, а также нераспространения на данные конструкции действующих норм, подробно рассмотрены некоторые категории таких конструкций. На основании различной надежности стандартных и нестандартных конструкций проведен анализ этих двух категорий конструкций, рассматриваемых на уровне парциальных факторов.

B. Androić, D. Dujmović, I. Lukačević

Übersichtsarbeit

Unterschiede in der Abschätzung der Zuverlässigkeit der üblichen und besonderen Konstruktionen

Dargestellt und begründet ist die Aufteilung der Konstruktionen auf übliche und besondere vom Standpunkt der Unterscheidung der Zuverlässigkeit. Wegen der Tatsache dass bei der Abschätzung der Zuverlässigkeit besonderer Konstruktionen nicht genügend Erfahrungen vorliegen und dass für sie die gültigen Normen nicht gelten sind in der Betrachtung einige Kategorien solcher Konstruktionen detailliert umfasst. Auf Grund der Unterscheidung der Zuverlässigkeit der üblichen und besonderen Konstruktionen ist die Analyse dieser beiden Konstruktionskategorien durchgeführt, betrachtet durch die Werte der partialen Faktoren.

Autori: Prof. dr. sc. **Boris Androić**, dipl. ing. građ., IA Projektiranje d.o.o., Zagreb; prof. dr. sc. **Darko Dujmović**, dipl. ing. građ.; **Ivan Lukačević**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Temeljni koncepti i postupci ocjene pouzdanosti konstrukcija detaljno su obuhvaćeni u vodećoj europskoj normi za konstrukcije EN 1990 [1] i međunarodnoj normi ISO 2394 [2]. Dodatna objašnjenja i podloge koncepta pouzdanosti dane su u dokumentu koji je izdao *Joint Committee of Structural Safety* (JCSS) [3]. S obzirom da je europska norma usvojena kao nacionalna, potrebno je posebno upozoriti na normu HRN EN 1990. Prema toj se normi osnovni princip određivanja parcijalnih koeficijenata γ_i i koeficijenata za promjenjiva djelovanja ψ_i temelji na postupku kalibracije postojećih građevina. Pri tome je potrebno spomenuti da je provedena kalibracija konstrukcija iz različitih zemalja Europe, koje su bile izgrađene prema različitim nacionalnim propisima i normama. Dakle, dobiveni rezultati kalibracije, koji su poslužili za izradu europske norme, dobiveni su iz skupa „europskih konstrukcija“. Očito jest da je tako uprosječeno iskustvo dovelo do situacije da su u europskoj normi EN 1990 uvedena brojna pojednostavljenja, kako bi ta norma mogla obuhvatiti većinu različitih uobičajenih konstrukcija. Iz tog razloga u EN 1990 dana je i druga mogućnost određivanja razine pouzdanosti koja se temelji na pokusima. Dobiveni statistički podaci iz tih pokusa mogu onda poslužiti za provedbu dokaza s pomoću probabilističkih metoda. Dakle, radi se o konstrukcijama za koje ne postoji dugogodišnje iskustvo ili su izgrađene u novije vrijeme. Prvo opisana kategorija konstrukcija može se nazvati uobičajenim konstrukcijama, dok se u drugu kategoriju mogu svrstati konstrukcije koje su iznimne. Za takve iznimne konstrukcije potrebne su preporuke koje se razlikuju od onih za uobičajene, a koje, nažalost, još uvijek nisu na raspolaganju konstruktorima.

Međutim, takve se iznimne konstrukcije u svijetu ili kod nas već grade ili su u fazi projektiranja, kao što su na primjer mostovi velikih raspona ili visoke zgrade. Zato je bitno vidjeti i shvatiti koja su pojednostavnjenja uvedena u EN 1990, kako bi se vidjela razlika određivanja razine pouzdanosti između iznimnih i uobičajenih konstrukcija. Budući da su konstrukcije za koje nema iskustva

i za koje ne vrijede važeće norme svrstane u kategoriju iznimnih konstrukcija, potrebno je detaljnije obrazložiti kategorije takvih konstrukcija.

2 Kategorije iznimnih konstrukcija

Uobičajeno je da se iznimne konstrukcije povezuju s konstrukcijama koje trebaju ispuniti potpuno nove zahtjeve, neuobičajenih su dimenzija, inovativnih statičkih sustava, građene od novih materijala itd.

U skladu s gore navedenom definicijom, iznimne konstrukcije uključuju sve konstrukcije koje izlaze iz okvira norma za projektiranje. Kada se radi kategorizacija takvih građevina potrebno ih je podijeliti u dvije kategorije, tj. na konstrukcije koje će se tek graditi i izgrađene konstrukcije koje su iz nekog razloga podvrgnute ocjeni pouzdanosti. Za iznimne konstrukcije koje će se tek graditi, u ovome će se radu proračunati parcijalni koeficijenti za razred pouzdanosti RC3. Međutim, za izgrađene konstrukcije koje se mogu svrstati u iznimne potrebno je provesti kalibraciju da bi se procijenila njihova razina pouzdanosti.

Postojeće konstrukcije koje pripadaju kategoriji iznimnih konstrukcija projektirane su prema potpuno zastarjelim normama, izložene su nepredviđenom stupnju propadanja, pretrpjele su slučajnu štetu - oštećenje, bile su izložene ekstremnim opterećenjima ili utjecajima okoline, izložene su promjenama uporabnih uvjeta, neočekivano su isključene iz operativnog sustava.

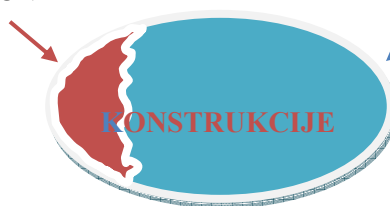
Na slici 1. prikazana je podjela konstrukcija na uobičajene i iznimne.

U kategoriju iznimnih konstrukcija mogu se, na primjer, svrstati one konstrukcije koje su:

- iznimnih raspona ili visina,
- inovativnoga statičkog sustava,
- građene od novih materijala,
- ispunjavaju popuno novu uporabnu funkciju,
- izložene su neuobičajenim utjecajima okoliša,
- izložene su vrlo nepovoljnim kombinacijama djelovanja.

NEMA NORMI ZA PRORAČUN
(„Izuzetne“ konstrukcije)

Izuzetni rasponi ili visine
Inovativni statički sustav
Novi materijali
Nove namjene
Novi načini održavanja



NORME ZA PRORAČUN
(„Uobičajene“ konstrukcije)

Uobičajeni rasponi ili visine
Standardni statički sustavi
Dobro poznati materijali (klasični)
Standardne namjene
Poznati načini održavanja

Slika 1. Podjela konstrukcija na uobičajene i iznimne

a) *Konstrukcije iznimnih raspona ili visina*

Dobar primjer konstrukcija izuzetnih raspona su mostovi raspona većih od 200 m. Naime teorija pouzdanosti dana u europskoj normi (EN) može se primijeniti samo za mostove raspona manjih od 200 m te se postavlja pitanje kako proračunskim postupkom dokazati pouzdanost mostova velikih raspona. Postupak dokaza pouzdanosti mostova velikih raspona nije isti kao postupak za male raspona jer ne vrijedi zakon proporcionalnosti zbog učinka veličine (engl. *size effect*).

Taj se učinak može objasniti tako da se povećanjem raspona povećava udio stalnog djelovanja i na taj način smanjuje udio prometnog tj. promjenjivog djelovanja, uvažavajući karakteristike primijenjenog materijala. Tako, na primjer, ako se poveća raspon glavnog užeta visećeg mosta, a u istom omjeru i njegov promjer, zbog povećanja vlastite težine užeta smanjuje se njegova pouzdanost [4].

Ove činjenice nam pokazuju da parcijalni koeficijenti γ_i i koeficijenti promjenjivih djelovanja ψ_i ne mogu biti isti kao i kod mostova manjih raspona. Zaključujemo da ne možemo usvojiti te koeficijente iz norme, nego je potrebno probablističkim postupkom provesti kalibraciju za svaki pojedini slučaj postojećih mostova velikih raspona. Za nove mostove velikih raspona potrebno je povećati parcijalne koeficijente γ_i tako da se oni svrstaju u RC3.



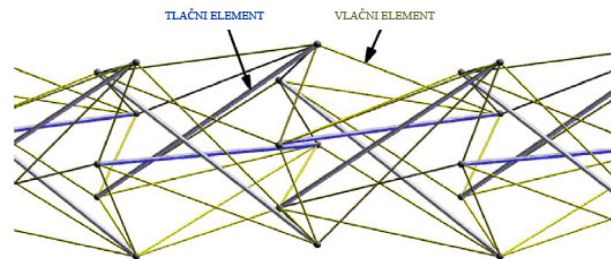
Slika 2. Idejni projekt mosta preko Messine $L = 3300$ m

b) *Konstrukcije inovativnoga statičkog sustava*

U skupinu izuzetnih konstrukcija inovativnoga statičkog sustava mogu se svrstati, na primjer, *tensegrity*¹ konstrukcije, koje predstavljaju potpuno nove vlačno - tlačne konstrukcijske sustave. Sile prednapinjanja u *tensegrity* konstrukcijama uravnotežuju se unutar svakog elementa. Dugo su se vremena principi prednapinjanja upotreb-

¹ Riječ *tensegrity* je složenica od engl. *tensional integrity* (vlačna cjelovitost). Odnosi se na konstrukcije čija se cjelovitost zasniva na sinergiji uravnoteženih vlačnih i tlačnih komponenti.

ljavali isključivo na betonskim konstrukcijama. Napretkom znanosti i tehnologije, prednapinjanje se počinje primjenjivati i kod drugih građevnih materijala poput čelika i drva. Kod *tensegrity* konstrukcija pojavljuju se uz inovativni statički sustav i problemi s velikim pomacima čvorova. Norma s uvjetima za granično stanje uporabljivosti ne obuhvaća te vrijednosti te nas na taj način opet vodi izvan svojih okvira.



Slika 3. Dio *tensegrity* konstrukcije

c) *Konstrukcije građene od novih materijala*

Iznimne konstrukcije građene od novih materijala ili inovativne kombinacije materijala vrlo su zanimljiva kategorija. Klasični materijali ispituju se normiranim, propisanim postupcima, dakle njihovu pouzdanost procjenjujemo slučajnim veličinama koje su definirane svojim srednjim vrijednostima i koeficijentima varijacije. Primjerice kod klasičnih materijala točno znamo koje veličine treba mjeriti - granicu proporcionalnosti čelika i čvrstoću, a statističkom obradom dolazi se do navedenih statističkih parametara potrebnih za analizu pouzdanosti. Problematika je novih materijala što se ponašanje elemenata (konstrukcije) izrađene od njih ne može pretpostaviti na temelju prethodnih ispitivanja na malim uzorcima. Dakle, kod novih materijala slučajne je veličine koje utječu na pouzdanost potrebno ispitati na cijelim konstrukcijama ili gotovim elementima. Primjer konstrukcije od novih materijala prikazan je na slici 4.



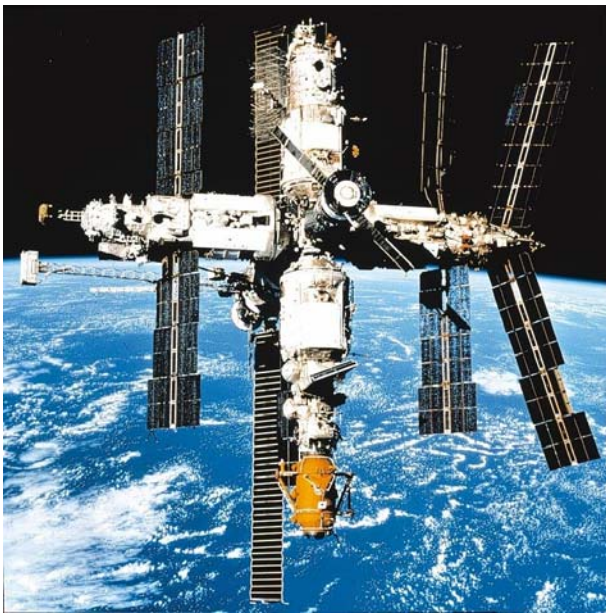
Slika 4. Rebro grednog mosta izvedeno kombinacijom ugljičnih vlakana i laganog betona

d) *Konstrukcije koje ispunjavaju potpuno novu uporabnu funkciju*

U novije se vrijeme razvijaju konstrukcije koje ispunjavaju potpuno drukčiju funkciju od one tradicionalne. Neki od tih tipova konstrukcija moraju zadovoljiti potpuno nove uporabne uvjete ili se uklopiti u uvjete koji vladaju u svemiru. Na slikama 5. i 6. prikazane su konstrukcije koje moraju zadovoljiti potpuno novu uporabnu funkciju.



Slika 5. CERN-ov laboratorij



Slika 6. Konstrukcije u svemiru (MIR)

e) *Konstrukcije izložene neuobičajenim utjecajima okoline*

S razvojem znanosti i tehnologije razvijaju se različiti tipovi konstrukcija. Neki od tih tipova konstrukcija moraju zadovoljiti potpuno nove uporabne uvjete, ekstremne utjecaje okoliša, neuobičajena opterećenja. Isto tako razvojem novih tipova konstrukcija razvijaju se i nove metode građenja i održavanja. S obzirom na to, te činjenicu da za te konstrukcije ne postoji dovoljno iskustva,

možemo ih svrstati u izuzetne konstrukcije. Na slici 7. prikazan je tip takvih izuzetnih konstrukcija.



Slika 7. Konstrukcije za vjetroelektrane

f) *Konstrukcije izložene vrlo nepovoljnim kombinacijama djelovanja*

Tipičan primjer konstrukcija s ekstremnim posljedicama u slučaju otkazivanja su konstrukcije za eksploataciju plina ili nafte (slika 8.). Te su konstrukcije izložene vrlo nepovoljnim atmosferskim uvjetima koji povećavaju opasnost od pojave korozije. Istodobno te su konstrukcije podložne zamoru materijala. Svaka od navedenih opasnosti predstavlja veliku mogućnost otkazivanja. Međutim, ako se uzme u obzir da dolazi do kombinacije tih dviju pojava, opasnost otkazivanja znatno se povećava [5].



Slika 8. Konstrukcija u moru (Offshore konstrukcija)

3 Razredi konstrukcija s obzirom na posljedice otkazivanja

Pouzdanost se može definirati kao sposobnost konstrukcije ili konstrukcijskog elementa da zadovolji određene zahtjeve, uključujući proračunski životni vijek za koji je proračunana pouzdanost. Pri tome valja imati na umu da se pouzdanost izražava probabilističkim izričajima te da pokriva sigurnost, uporabljivost i trajnost (slika 9.).



Slika 9. Definicija pouzdanosti

Osim definicije dane na slici 9. pouzdanost se može definirati i numeričkim izričajem. Kod analize pouzdanosti konstrukcije bitna su dva pojma. To su vjerojatnost otkazivanja P_f i vjerojatnost da neće doći do otkazivanja P_s . Vjerojatnost P_f komplementarna je vrijednosti P_s tako da vrijedi:

$$P_f + P_s = 1 \quad (1)$$

Ako se pouzdanošću može smatrati vjerojatnost da konstrukcija neće otkazati, vrijedi:

$$P_s = 1 - P_f \quad (2)$$

Prema tome, u izrazu (2) može se smatrati da je vrijednost P_s zapravo pouzdanost konstrukcije. Međutim, u inženjerskim zadacima obično se traži vrijednost vjerojatnosti otkazivanja P_f .

Ako razmotrimo tipove konstrukcija s obzirom na njihovo značenje i posljedice otkazivanja u svrhu diferencijacije pouzdanosti, razlikuju se tri razreda posljedica:

- CC3 - velike posljedice (stadioni, koncertne dvorane itd.),
- CC2 - srednje posljedice (zgrade za stanovanje, uredi itd.),
- CC1 - male posljedice (staklenici, skladišta itd.).

Jedan od načina podjela konstrukcija u razrede prema posljedicama otkazivanja može se temeljiti i na određivanju parametra ρ koji prema [3] iznosi:

$$\rho = \frac{\text{ukupna cijena koštanja konstrukcije}}{\text{cijena izgradnje}}$$

U gornjem izrazu u ukupnu cijenu koštanja konstrukcije, treba npr., uračunati cijenu izgradnje zbrojenu s cijenom zbog otkazivanja. Za vrijednosti parametara ρ koje prelaze vrijednosti 10 posljedice otkazivanja su ekstremno velike, tako da je potrebna detaljna analiza rizik - dobit. Međutim, može se napomenuti da takve konstrukcije ne bi trebalo graditi.

S obzirom na parametar ρ , razredi posljedica jesu:

- CC3 - velike posljedice $\rightarrow \rho < 5$ do 10,
- CC2 - srednje posljedice $\rightarrow \rho \approx 2$ do 5,
- CC1 - male posljedice $\rightarrow \rho < 2$.

Ako se dokazuje pouzdanost konstrukcije na najvišoj razini vrijedi:

$$P_{f,rač.} \leq P_{norm.} \quad (3)$$

gdje je:

$P_{f,rač.}$ - vjerojatnost otkazivanja koja je za neku konstrukciju izračunata

$P_{norm.}$ - vjerojatnost otkazivanja koja je za određeni razred posljedica otkazivanja konstrukcija normirana.

Niža razina dokaza pouzdanosti koja je operativnija u praksi provodi se s pomoću operativne vrijednosti vjerojatnosti otkazivanja P_f koja se naziva indeks pouzdanosti β i obrnuto je proporcionalna vjerojatnosti otkazivanja. Dokaz pouzdanosti u tom slučaju glasi:

$$\beta_{rač.} \geq \beta_{zaht.} \quad (4)$$

gdje je:

$\beta_{rač.}$ - indeks pouzdanosti koji je za neku konstrukciju proračunan

$\beta_{zaht.}$ - indeks pouzdanosti koji je za određeni razred posljedica otkazivanja konstrukcija normiran.

Normirane vrijednosti indeksa pouzdanosti prema [1] i [3] dane su u tablicama 1. i 2. Europska norma za konstrukcije usvojila je vrijednosti iz tablice 1.

Tablica 1. Normirane minimalne vrijednosti indeksa pouzdanosti β za granično stanje nosivosti prema [1]

Razred pouzdanosti (RC)	Minimalne vrijednosti indeksa pouzdanosti β	
	za 1 godinu	za 50 godina
RC 3	5,2	4,3
RC 2	4,7	3,8
RC 1	4,2	3,3

Tablica 2. Preporučeni indeksi pouzdanosti β za granično stanje nosivosti i vremensko razdoblje od 1 godine [3]

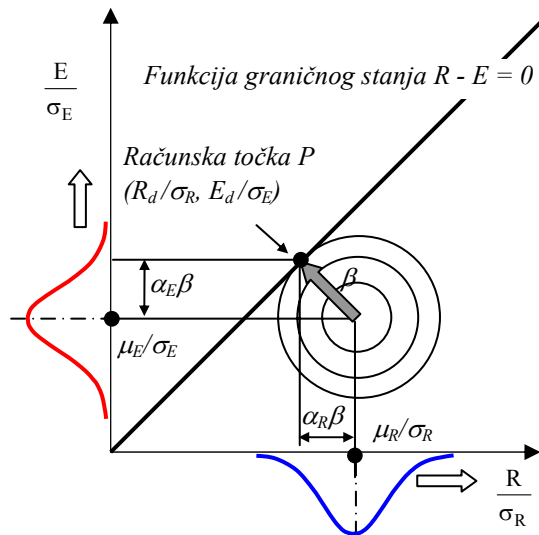
Troškovi pouzdanosti	Posljedice otkazivanja		
	male	srednje	velike
Veliki	$\beta = 3,1$ ($P_f \approx 10^{-3}$)	$\beta = 3,3$ ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-4}$)	$\beta = 3,7$ ($P_f \approx 10^{-4}$)
Srednji	$\beta = 3,7$ ($P_f \approx 10^{-4}$)	$\beta = 4,2$ ($P_f \approx 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$)
Mali	$\beta = 4,2$ ($P_f \approx 10^{-5}$)	$\beta = 4,4$ ($P_f \approx 5 \cdot 10^{-5}$)	$\beta = 4,7$ ($P_f \approx 10^{-6}$)

Treba napomenuti da EN 1990 za sve tipove konstrukcija predviđa razred pouzdanosti RC2 i vrijeme uporabe od 50 godina. To se odnosi na „uobičajene“ konstrukcije, jer su za indeks pouzdanosti $\beta = 3,8$ (granično stanje nosivosti) u normi preporučeni parcijalni koeficijenti za otpornost i djelovanja. Kod iznimnih konstrukcija koje su svrstane u RC3 uzima se indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$, tako da se onda postavlja pitanje koje vrijednosti parcijalnih koeficijenata uzeti pri proračunu jer oni u normi nisu definirani [6], [7] i [8].

4. Proračunska točka kod funkcije graničnog stanja

Operativna primjena dokaza pouzdanosti kod eurokoda temelji se na metodi parcijalnih koeficijenata. Pri tome se primjenjuju teorijske podloge inženjerstva pouzdanosti za određivanje parcijalnih koeficijenata γ_i , koeficijenata redukcije ψ_i , pravila za kombinacije djelovanja itd. Na slici 10. prikazana je funkcija graničnog stanja

$R - E = 0$ dvjema slučajnim veličinama, a to su učinak djelovanja E i otpornost R .



Slika 10. Teorijske podloge inženjerstva pouzdanosti za određivanje proračunske točke

Granica otkazivanja prikazana je pravcem $R - E = 0$ ako su standardne devijacije varijabla R i E iste veličine, tako da vrijedi $\sigma_R = \sigma_E$, gdje je σ_R standardna devijacija otpornosti, a σ_E standardna devijacija učinka djelovanja. Važno je uočiti da se pouzdana zona nalazi ispod granice otkazivanja (nepoželjan uvjet). Kod dokaza pouzdanosti konstrukcije teorijski svaka se točka na pravcu granice otkazivanja $R - E = 0$ može smatrati kritičnom. Međutim, za dokaz pouzdanosti usvaja se točka u kojoj je najveća vjerojatnost otkazivanja. Ta točka ima koordinate $P (R_d, E_d)$, te se u teoriji pouzdanosti naziva proračunska točka (engl. *design point*). Koordinate proračunske točke mogu se napisati u sljedećem obliku:

$$R_d = \mu_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R \tag{5}$$

$$E_d = \mu_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E \tag{6}$$

U izrazima (5) i (6) je:

μ_R - srednja vrijednost otpornosti

μ_E - srednja vrijednost djelovanja.

Vrijednosti težinskih faktora baznih varijabli R i E označene su sa α_E i α_R . Te vrijednosti pokazuju utjecaj baznih varijabli na vjerojatnost otkazivanja, a mogu se napisati u obliku:

$$\alpha_E = -\sigma_E \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_R^2}} \tag{7}$$

$$\alpha_R = +\sigma_R \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_R^2}} \tag{8}$$

U EN 1990 usvojeno je pojednostavnjenje, tako da se α_E i α_R usvajaju kao globalne veličine za sve funkcije graničnog stanja s vrijednostima:

$$\alpha_E = -0,7$$

$$\alpha_R = 0,8.$$

Ovo pojednostavnjenje vrijedi samo unutar granica $0,16 < \sigma_E/\sigma_R < 7,6$.

Dakle postoje situacije kada usvojeno pojednostavnjenje u EN 1990 ne vrijedi, pa se postavlja pitanje jesu li to također iznimne konstrukcije [9].

5. Parcijalni koeficijenti za uobičajene konstrukcije

5.1 Parcijalni koeficijenti za otpornost

Prema [1] i [2] parcijalni koeficijent za otpornost γ_R definira se kako slijedi:

$$\gamma_R = \frac{R_k}{R_d} \tag{9}$$

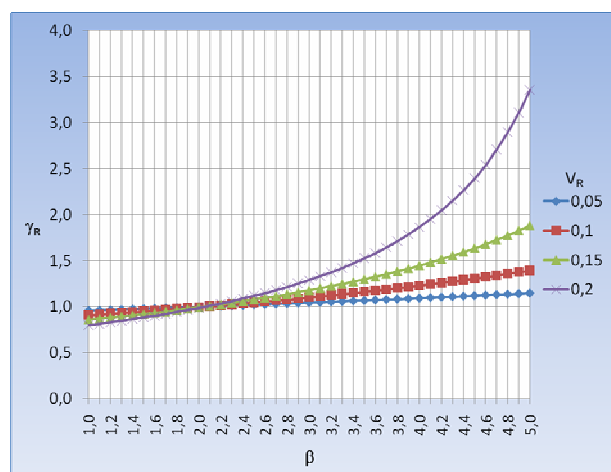
Ako se uvrste u izraz (9) vrijednosti karakteristične otpornosti R_k i proračunske vrijednosti otpornosti R_d te se funkcija gustoće vjerojatnosti f_R usvoji kao normalna raspodjela, dobiva se parcijalni koeficijent za otpornost:

$$\gamma_R = \frac{\mu_R (1 - 1,645 \cdot V_R)}{\mu_R (1 - \alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} \tag{10}$$

Ako u izraz (9) uvrstimo vrijednosti karakteristične otpornosti R_k i proračunske vrijednosti otpornosti R_d , uz pretpostavku da je funkcija gustoće vjerojatnosti f_R usvojena kao lognormalna raspodjela, dobiva se:

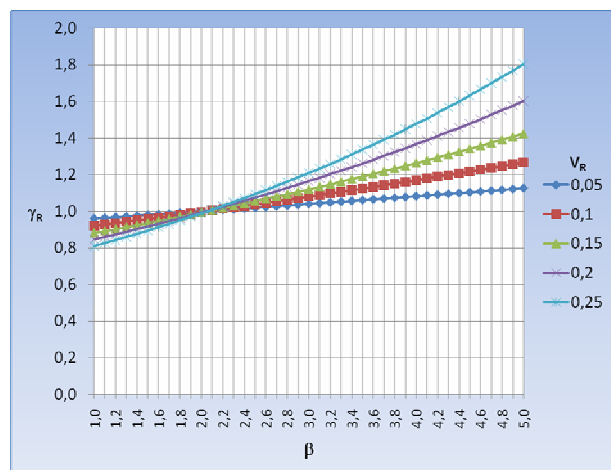
$$\gamma_R = \frac{\mu_R \cdot \exp(-1,645 \cdot V_R)}{\mu_R \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} \tag{11}$$

Dakle, može se zaključiti da parcijalni koeficijent za otpornost γ_R ovisi o koeficijentu varijacije V_R , težinskom faktoru α_R , indeksu pouzdanosti β i usvojenoj funkciji gustoće f_R . Ako je $\alpha_R = 0,8$, onda se ovisnost γ_R i β za različite koeficijente varijacije V_R i normalnu funkciju gustoće f_R može vidjeti na slici 11.



Slika 11. Ovisnost γ_R i β za različite V_R ako je otpornost R normalno raspodijeljena

Na slici 12. prikazana je ovisnost parcijalnog faktora otpornosti γ_R o koeficijentu varijacije V_R , indeksu pouzdanosti β za funkcije gustoće f_R koja je lognormalno raspodijeljena.



Slika 12. Ovisnost γ_R i β za različite V_R ako je otpornost R lognormalno raspodijeljena

U slučaju pretpostavke da se usvoji normalna funkcija gustoće vjerojatnosti otpornosti te da ona bolje aproksimira histogram u odnosu na lognormalnu funkciju gustoće otpornosti, postavlja se pitanje odabira mjerodavne funkcije gustoće. S obzirom da se otpornost promatra kao bazna varijabla koja ne može poprimiti negativne vrijednosti, za daljnja razmatranja otpornosti usvojiti će se lognormalna funkcija gustoće vjerojatnosti. U nastav-

ku će se proračunati neke vrijednosti parcijalnih koeficijenata otpornosti koji su usvojeni u eurokodu.

a) Parcijalni koeficijent za konstrukcijski čelik

Za usvojene vrijednosti: $\beta = 3,8$, $\alpha_R = 0,80$ i $V_R = 0,03$, parcijalni je faktor γ_M :

$$\gamma_M = \frac{\exp(-1,645 \cdot V_R)}{\exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} = \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,03)}{\exp(-0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,03)} \cong 1,0$$

Ova proračunana vrijednost γ_M usvojena je u EN 1993-1-1.

b) Parcijalni koeficijent za armaturu

Za usvojene vrijednosti: $\beta = 3,8$, $\alpha_R = 0,80$ i $V_R = 0,08$, parcijalni je koeficijent γ_a :

$$\gamma_a = \frac{\exp(-1,645 \cdot V_R)}{\exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} = \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,08)}{\exp(-0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,08)} \cong 1,15$$

Ova proračunana vrijednost γ_a usvojena je u EN 1992-1-1.

c) Parcijalni koeficijent za beton

Za usvojene vrijednosti: $\beta = 3,8$, $\alpha_R = 0,80$ i $V_R = 0,2$, parcijalni je koeficijent γ_c :

$$\gamma_c = \eta \cdot \frac{\exp(-1,645 \cdot V_R)}{\exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} = 1,15 \cdot \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,2)}{\exp(-0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,2)} = 1,15 \cdot 1,32 \cong 1,50$$

η - uzima u obzir razliku između rezultata dobivenog na probnom uzorku i onog na konstrukciji.

Ova proračunana vrijednost γ_c usvojena je u EN 1992-1-1.

5.2. Parcijalni koeficijenti za djelovanja

Ovdje se daju proračuni nekih parcijalnih koeficijenata za djelovanja koji su usvojeni u eurokodu.

a) Parcijalni koeficijent za stalno djelovanje

Parcijalni koeficijent za stalno djelovanje γ_G dobiva se prema izrazu:

$$\gamma_G = \frac{G_d}{G_k} \quad (12)$$

U izrazu (12) jest:

G_d - računaska vrijednost stalnog djelovanja

G_k - karakteristična vrijednost stalnog djelovanja.

Obično se usvaja da je karakteristična vrijednost stalnog djelovanja G_k jednaka srednjoj vrijednosti μ_G , tako da vrijedi:

$$\gamma_G = \frac{\mu_G (1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_G)}{\mu_G} \quad (13)$$

U izrazu (13) jest:

μ_G - srednja vrijednost stalnog djelovanja
 V_G - koeficijent varijacije stalnog djelovanja
 α_E - težinski faktor na strani djelovanja
 β - normirani indeks pouzdanosti.

Izraz (13) može se napisati u obliku:

$$\gamma_G = (1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_G) \quad (14)$$

Ako se pri određivanju koeficijenta varijacije V_G uzmu u obzir netočnosti modela djelovanja, onda se koeficijent varijacije V_G dobiva prema izrazu:

$$V_G = \sqrt{V_g^2 + V_{Ed}^2} \quad (15)$$

U izrazu (15) jest:

V_g - koeficijent varijacije stalnog djelovanja
 V_{Ed} - koeficijent varijacije modela računskog učinka stalnog djelovanja.

Ako se usvoji da je $V_g = 0,10$ i $V_{Ed} = 0,10$, prema izrazu (15) dobiva se vrijednost:

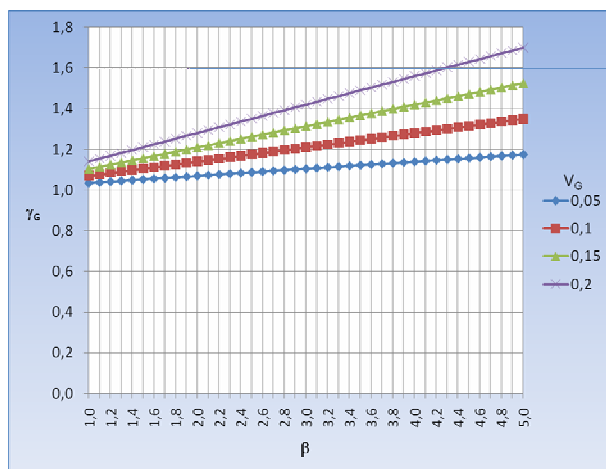
$$V_G = \sqrt{0,10^2 + 0,10^2} = 0,14.$$

Parcijalni je koeficijent γ_G za uobičajene konstrukcije prema izrazu (14) i:

$$\gamma_G = (1 + 0,7 \cdot 3,8 \cdot 0,14) = 1,37 \cong 1,35.$$

Ova proračunana vrijednost γ_G usvojena je u EN 1990.

Na slici 13. prikazane su ovisnosti parcijalnog koeficijenta γ_G i indeksa pouzdanosti β za različite koeficijente varijacije stalnog djelovanja V_G . Na slici se može vidjeti da za vrijednost indeksa pouzdanosti $\beta = 3,8$ i koeficijenta varijacije $V_G = 0,14$ parcijalni koeficijent γ_G iznosi približno 1,35, što odgovara izračunatoj vrijednosti prema izrazu (14).



Slika 13. Ovisnost γ_G i β za različite V_G ako je djelovanje G normalno raspodijeljeno

b) Parcijalni koeficijent za promjenjivo djelovanje

Parcijalni koeficijent za promjenjivo djelovanje γ_Q dobiva se prema izrazu:

$$\gamma_Q = \frac{Q_d}{Q_k} \quad (16)$$

U izrazu (16) jest:

Q_d - računski vrijednost promjenjivog djelovanja
 Q_k - karakteristična vrijednost promjenjivog djelovanja.

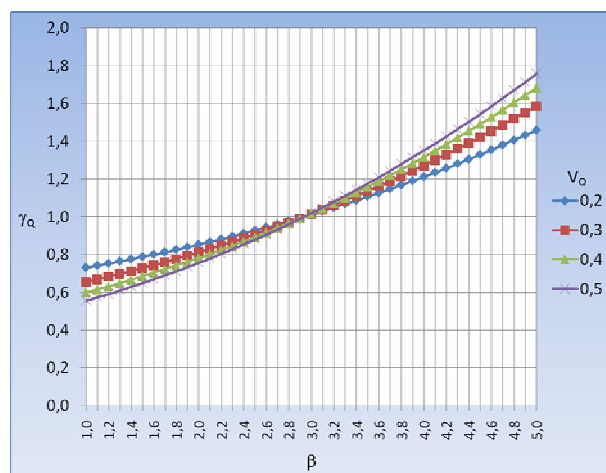
Ako se funkcija gustoće vjerojatnosti promjenjivog djelovanja f_Q usvoji kao Gumbelova raspodjela i s 98 %-o fraktinom, dobiva se vrijednost parcijalnog koeficijenta za promjenjivo djelovanje prema sljedećem izrazu:

$$\gamma_Q = \frac{\mu_Q (1 - V_Q (0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\phi(-\alpha_E \cdot \beta))))))}{\mu_Q (1 - V_Q (0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,98))))} \quad (17)$$

U izrazu (17) jest:

μ_Q - srednja vrijednost promjenjivog djelovanja
 V_Q - koeficijent varijacije promjenjivog djelovanja
 ϕ - standardna normalna funkcija gustoće vjerojatnosti
 α_E - težinski faktor za djelovanje
 β - normirani indeks pouzdanosti.

Na slici 14. prikazane su ovisnosti parcijalnog koeficijenta γ_Q i indeksa pouzdanosti β za različite vrijednosti koeficijenta varijacije promjenjivog djelovanja V_Q .



Slika 14. Ovisnost γ_Q i β za različite V_Q ako je promjenjivo djelovanje Q raspodijeljeno prema Gumbelu

Na slici 14. vidi se da je za vrijednost $V_Q = 0,5$ parcijalni koeficijent promjenjivog djelovanja $\gamma_Q = 1,3$. Međutim vrijednost V_Q može biti i veća od 0,5, a neka druga funkcija gustoće vjerojatnosti f_Q može bolje aproksimirati histogram promjenjivog djelovanja. To je razlog da

je u EN 1990 usvojena konstantna vrijednost $\gamma_Q = 1,50$ [10], [11] i [12].

6 Parcijalni faktori iz aspekta iznimnih konstrukcija

6.1 Općenito

Analiziraju se parcijalni koeficijenti iz aspekta iznimnih konstrukcija na temelju činjenice da EN 1990 daje tri razreda pouzdanosti. Razred pouzdanosti RC3 odnosi na konstrukcije kojih su posljedice otkazivanja velike. Na temelju toga takve konstrukcije možemo svrstati u kategoriju iznimnih konstrukcija.

Prethodno je rečeno da EN 1990 daje vrijednosti parcijalnih koeficijenata na temelju normiranog indeksa pouzdanosti $\beta = 3,8$ koja odgovara razredu pouzdanosti RC2 i vremenu uporabe 50 godina (tablica 1.). Krenemo li od postavke da konstrukcijski element pripada razredu pouzdanosti RC3, normirani je indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$ (tablica 1.).

6.2. Parcijalni koeficijenti za otpornost

Usvaja se lognormalna raspodjela za otpornost kao i u prethodnom slučaju. Također su usvojene iste vrijednosti težinskih faktora i koeficijenata varijacije kao i za uobičajene konstrukcije. Uz ove pretpostavke proračunate su vrijednosti parcijalnih koeficijenata otpornosti za razred pouzdanosti RC3 s indeksom pouzdanosti $\beta = 4,3$. Ovako proračunani parcijalni koeficijenti nisu dani u europskim normama.

a) Parcijalni koeficijent za konstrukcijski čelik

Za usvojene vrijednosti: $\beta = 4,3$, $\alpha_R = 0,80$ i $V_R = 0,03$, parcijalni je koeficijent γ_M :

$$\gamma_M = \frac{\exp(-1,645 \cdot V_R)}{\exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} = \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,03)}{\exp(-0,8 \cdot 4,3 \cdot 0,03)} \cong 1,0$$

b) Parcijalni koeficijent za armaturu

Za usvojene vrijednosti: $\beta = 4,3$, $\alpha_R = 0,80$ i $V_R = 0,08$, parcijalni je koeficijent γ_a :

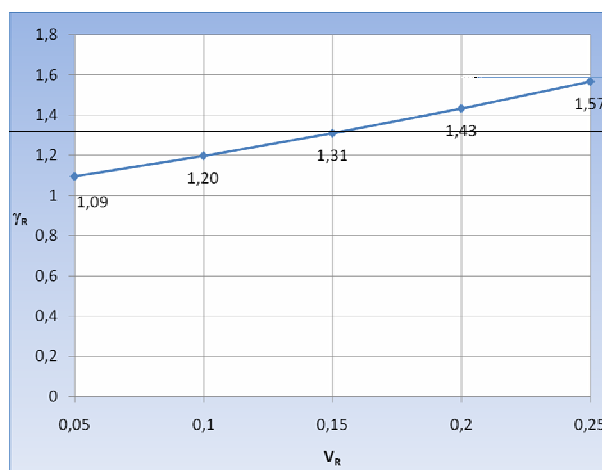
$$\gamma_a = \frac{\exp(-1,645 \cdot V_R)}{\exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} = \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,08)}{\exp(-0,8 \cdot 4,3 \cdot 0,08)} \cong 1,15$$

c) Parcijalni koeficijent za beton

Za usvojene vrijednosti: $\beta = 4,3$, $\alpha_R = 0,80$ i $V_R = 0,2$, parcijalni je koeficijent γ_c :

$$\begin{aligned} \gamma_c &= \eta \cdot \frac{\exp(-1,645 \cdot V_R)}{\exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R)} \\ &= 1,15 \cdot \frac{\exp(-1,645 \cdot 0,2)}{\exp(-0,8 \cdot 4,3 \cdot 0,2)} = 1,15 \cdot 1,43 = 1,65 \end{aligned}$$

Na slici 15. prikazani su parcijalni koeficijenti za otpornost ako se usvoji indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$ (za RC3) u ovisnosti koeficijenta varijacije otpornosti V_R .



Slika 15. Ovisnost parcijalnih koeficijenata za otpornost i koeficijenata varijacije otpornosti za indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$

6.3 Parcijalni koeficijenti za djelovanja

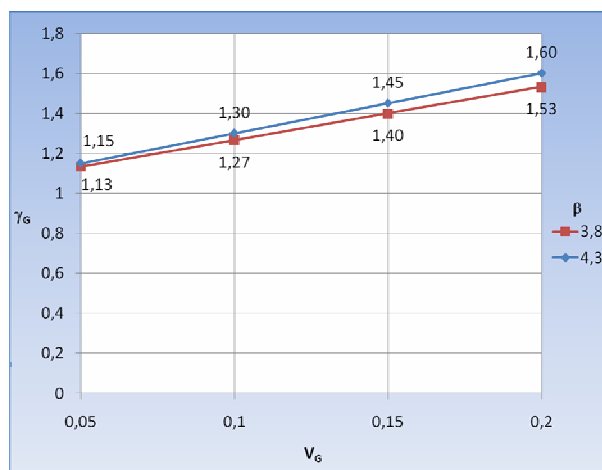
a) Parcijalni koeficijent za stalno djelovanje

$$\gamma_G = (1 - \alpha_E \cdot \beta \cdot V_G)$$

Ako se usvoje vrijednosti $\beta = 4,3$, $V_G = 0,14$ i $\alpha_E = 0,7$, parcijalni je koeficijent γ_G za iznimne konstrukcije prema izrazu (14):

$$\gamma_G = (1 + 0,7 \cdot 4,3 \cdot 0,14) = 1,42$$

Na slici 16. prikazana je ovisnost parcijalnog koeficijenta za stalno djelovanje γ_G i koeficijenta varijacije V_G za stalno djelovanja za indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$ (RC3) i indeks pouzdanosti $\beta = 3,8$ (RC2).

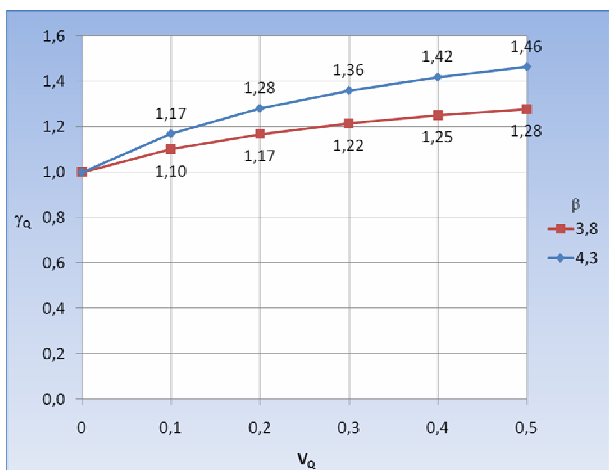


Slika 16. Ovisnost parcijalnih koeficijenata za stalna djelovanja o koeficijentima varijacije za indekse pouzdanosti $\beta = 3,8$ i $\beta = 4,3$ uz normalnu raspodjelu

b) Parcijalni koeficijent za promjenjivo djelovanje

$$\gamma_Q = \frac{\mu_Q (1 - V_Q (0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\phi(-\alpha_E \cdot \beta))))))}{\mu_Q (1 - V_Q (0,45 + 0,78 \ln(-\ln(0,98))))}$$

Za određivanje parcijalnog koeficijenta za promjenjivo djelovanje usvajaju se sljedeće vrijednosti $\beta = 4,3$, $V_Q = 0,5$ i $\alpha_E = 0,7$. Na slici 17. prikazana je ovisnost parcijalnog koeficijenta za promjenjivo djelovanje γ_Q i koeficijenta varijacije V_Q za promjenjivo djelovanje za indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$ (RC3) i indeks pouzdanosti $\beta = 3,8$ (RC2).



Slika 17. Ovisnost parcijalnih koeficijenta za promjenjivo djelovanje o koeficijentima varijacije za indekse pouzdanosti $\beta = 4,3$ (RC3) i $\beta = 3,8$ (RC2)

Proračunani koeficijenti promjenjivog djelovanja za indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$ (RC3) nisu sadržani u normi EN 1990 [10], [11] i [12].

7 Diskusija rezultata

Kod analize parcijalnih koeficijenata za uobičajene konstrukcije prikazan je proračunski postupak dobivanja tih koeficijenata za otpornost nekih materijala te parcijalnih faktora za stalna i promjenjiva djelovanja koji su sadržani u EN 1990. Ovi su faktori proračunani na temelju koeficijenata varijacije koji su usvojeni za proračun tih koeficijenata. Također je za proračun usvojen normirani indeks pouzdanosti $\beta = 3,8$ (RC2) i globalni težinski faktori α_R i α_E .

Analiza parcijalnih koeficijenata za iznimne konstrukcije napravljena je za indeks pouzdanosti $\beta = 4,3$ (RC3) uz uzimanje u obzir istih koeficijenata varijacije kao i kod uobičajenih konstrukcija. Pri proračunu usvojeno je pojednostavnjenje, isto kao i kod uobičajenih konstrukcija, tako da su usvojeni globalni težinski faktori. Važno je napomenuti da u literaturi postoje različite preporuke vrijednosti koeficijenata varijacije koje se temelje na pojedinim ispitivanjima. Budući da o vrijednostima koeficijenta varijacije kod djelovanja i otpornosti bitno ovise proračunani parcijalni faktori, nije moguće proračunati jedinstvene parcijalne koeficijente tako da oni kod različitih autora ne daju iste vrijednosti.

Usporedbom vrijednosti parcijalnih koeficijenata za uobičajene i iznimne konstrukcije na strani otpornosti može se vidjeti da su razlike u vrijednostima vrlo male. U slučaju usporedbe vrijednosti parcijalnih koeficijenata za djelovanja vidi se da su razlike znatnije. To je i razlog da pri diferencijaciji pouzdanosti s obzirom na parcijalne koeficijente djelovanja norma EN 1990 propisuje faktore K_{FI} kojima se korigiraju parcijalni koeficijenti za djelovanja u obliku diferencijacije pouzdanosti. Popravni faktori K_{FI} navedeni su u tablici 3.

Tablica 3. K_{FI} faktori za djelovanja [1]

Faktori K_{FI} za djelovanja	Razred pouzdanosti		
	RC1	RC2	RC3
K_{FI}	0,9	1,0	1,1

Ako se parcijalni koeficijenti za djelovanja proračunani za uobičajene konstrukcije (RC2) pomnože s popravnim faktorom K_{FI} dobivaju se sljedeće vrijednosti:

Stalno djelovanje

$$\gamma_G = 1,35 \cdot 1,1 = 1,49$$

Proračunana vrijednost parcijalnog koeficijenta za stalno djelovanje za izuzetne konstrukcije s pomoću popravnog faktora K_{FI} veća je u odnosu na proračunanu vrijednost prema izrazu (14) $\gamma_G = 1,42$.

Promjenjivo djelovanje

$$\gamma_Q = 1,50 \cdot 1,1 = 1,65$$

Proračunana vrijednost parcijalnog koeficijenta za promjenjiva djelovanja za izuzetne konstrukcije s pomoću popravnog faktora K_{FI} veća je u odnosu na proračunanu vrijednost prema izrazu (17) $\gamma_G = 1,46$.

Proračun parcijalnih koeficijenata promjenjiva djelovanja za iznimne konstrukcije proveden je dvama postupcima. Prvi se postupak temelji na proračunu parcijalnih koeficijenata prema izrazima koji su sadržani u EN 1990 uz određena pojednostavnjenja. Drugi se postupak sastoji u množenju parcijalnih koeficijenata na strani djelovanja s popravnim faktorima K_{FI} . S obzirom na određivanje parcijalnih koeficijenata prema egzaktnoj probablističkoj teoriji oba su postupka približna i temeljena na određenim pojednostavnjenjima. Može se uočiti da su vrijednosti parcijalnih koeficijenata za djelovanje dobivene drugim postupkom veće, što se može obrazložiti činjenicom da se pri pojednostavnjenom postupku trebaju pokriti nesavršenosti proračunskih modela i nepreciznosti proračunskog postupka.

U tablici 4. su normirane vrijednosti parcijalnih koeficijenata otpornosti za razred pouzdanosti RC2 (uobičajene konstrukcije) i proračunane vrijednosti parcijalnih koeficijenata otpornosti za razred pouzdanosti RC3 (iznimne konstrukcije).

Tablica 4. Usporedba parcijalnih koeficijenata za otpornost za razrede pouzdanosti RC2 i RC 3

Parcijalni koeficijenti za otpornost γ_i	RC2	RC3
Konstruktivski čelik	1,00	1,05
Armatura	1,15	1,15
Beton	1,50	1,65

U tablici 5. nalazi se usporedba normiranih vrijednosti parcijalnih koeficijenata za stalna i promjenjiva djelovanja za razred pouzdanosti RC2 (uobičajene konstrukcije) i proračunane vrijednosti parcijalnih koeficijenata za stalna i promjenjiva djelovanja za razred pouzdanosti RC3 (izuzetne konstrukcije), i to za oba provedena postupka.

Tablica 5. Usporedba parcijalnih koeficijenata za stalno i promjenjivo djelovanje i razrede pouzdanosti RC2 i RC 3

Parcijalni koeficijenti za djelovanja γ_i	RC2	RC3 (postupak 1)	RC3 (postupak 2)
Stalno djelovanje	1,35	1,42	1,49
Promjenjivo djelovanje	1,50	1,46	1,65

8 Zaključak

Postupak proračuna uobičajenih konstrukcija temelji se na normiranoj metodi parcijalnih koeficijenata koji su sadržani u vodećoj europskoj normi za konstrukcije EN 1990. Ta metoda temelji se na pojednostavnjenom postupku egzaktno probabilističke teorije pouzdanosti. Uobičajene konstrukcije, bez obzira na materijal i statički sustav, svrstane su u razred pouzdanosti 2 (RC2).

LITERATURA

- [1] European Committee for Standardization (CEN): *EN 1990:2002, Eurocode 0: Basis of structural design*, Final draft, Brussels, April 2002
- [2] ISO 2394:1998 General principles on reliability for structures
- [3] Joint Committee of Structural Safety (JCSS): *Probabilistic Model Code, Part I – Basis of Design*, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2001.
- [4] Androić, B.; Čaušević, M.; Dujmović, D.; Džeba, I.; Markulak, D.; Peroš, B.: *Čelični i spregnuti mostovi*, I.A. Projektiranje, Zagreb, 2006.
- [5] Faber, M. H.; Kübler, O.; Fontana, M.; Knobloch, M.: *Failure Consequences and Reliability Acceptance Criteria for Exceptional Building Structures*, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2004.
- [6] Androić, B.; Dujmović, D.; Džeba, I.: *Inženjerstvo pouzdanosti 1*, I.A. Projektiranje, Zagreb, 2006.
- [7] Androić, B.; Dujmović, D.; Džeba, I.: *Metalne konstrukcije 4*, I.A. Projektiranje, Zagreb, 2005.
- [8] Bhattacharya, B.; Basau, R.; Ma, K-T: *Developing target reliability for novel structures: the case of the Mobile Offshore Base*, Marine Structures 14 (2001) 37-58
- [9] Leonardo da Vinci Pilot Project: *Handbook 2; Reliability Backgrounds*, Prague, 2005.
- [10] Schneider, J.: *Introduction to Safety and Reliability of Structures*, IABSE, Structural Engineering Documents 5, Zurich 1997.
- [11] Thoft - Christensen, P.; Baker, M.: *Structural Reliability and its Applications*; Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- [12] Grünberg, J.: *Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau*, Beuth, Berlin, 2004.

Nasuprot tim konstrukcijama u praksi se susrećemo s konstrukcijama koje se mogu svrstati u razred pouzdanosti 3 (RC3) koje su svrstane u kategoriju iznimnih konstrukcija. Norma EN1990 daje vrijednost indeksa pouzdanosti za taj razred konstrukcija. Međutim, metoda dokaza pouzdanosti koja se temelji na parcijalnim koeficijentima nije primjenjiva jer nisu predloženi odgovarajući parcijalni koeficijenti. Problem je u činjenici da se takve konstrukcije projektiraju te se postavlja pitanje kojim se parcijalnim koeficijentima za takve konstrukcije valja koristiti. U radu su proračunani neki karakteristični parcijalni koeficijenti za djelovanja i otpornost, te je utvrđeno da se oni razlikuju od onih predloženih za uobičajene konstrukcije. Analiza u ovome radu pokazuje da se kod konstrukcija razreda pouzdanosti 3 (RC3) zahtijeva manja vjerojatnost otkazivanja, što se očituje u normiranoj većoj vrijednosti indeksa pouzdanosti, kao i većih vrijednosti parcijalnih koeficijenata.

Prema tome, ako se ne provodi egzaktna analiza pouzdanosti koja se temelji na probabilističkim metodama preporučuje se za proračun iznimnih konstrukcija primjena većih parcijalnih koeficijenata od onih određenih za uobičajene konstrukcije. Proračunane vrijednosti parcijalnih koeficijenata u ovome radu mogu poslužiti za preliminarnu analizu kod dokaza pouzdanosti konstrukcija. Međutim, za konačni proračun iznimne konstrukcije potrebno je prikupiti podatke o statističkim vrijednostima svih baznih varijabli koje utječu na pouzdanost te tako provesti proračunski postupak koji se temelji na razini 3, tj. na egzaktnoj probabilističkoj teoriji. Pri tome treba napomenuti da ta teorija daje pouzdane podatke u onoj mjeri u kojoj su dobiveni statistički podaci vjerodostojni.