

Primljen / Received: 23.1.2021.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2020.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2020.

Dostupno online / Available online: 10.2.2023.

# Učinci oštećenja stupova na pouzdanost armiranobetonskih okvirnih nosača

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Kernou Nassim**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Abderrahmane Mira Bejaia, Alžir  
Tehnološki fakultet  
Odjel za građevinarstvo  
Laboratorij za graditeljstvo i arhitekturu (LGCA)  
[nassim.kernou@univ-bejaia.dz](mailto:nassim.kernou@univ-bejaia.dz)  
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Messaoudene Lydia**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Abderrahmane Mira Bejaia, Alžir  
Tehnološki fakultet  
Odjel za građevinarstvo  
Laboratorij za graditeljstvo i arhitekturu (LGCA)  
[lydia.messaoudene@univ-bejaia.dz](mailto:lydia.messaoudene@univ-bejaia.dz)



Izv.prof.dr.sc. **Lyacine Bennacer**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište Ahmed Draia - Adrar, Alžir  
Laboratorij za energiju, okoliš i informacijski sustav (LEESI)  
[lyacine.bennacer@univ-adrar.edu.dz](mailto:lyacine.bennacer@univ-adrar.edu.dz)

Prethodno priopćenje

**Kernou Nassim, Messaoudene Lydia, Lyacine Bennacer**

## Učinci oštećenja stupova na pouzdanost armiranobetonskih okvirnih nosača

Pouzdanost i ponašanje stupova armiranobetonskih okvirnih nosača ovise o mnogim čimbenicima. U radu je opisana parametarska analiza pouzdanosti stupa u nelinearnom području za kritična područja oštećenja armiranobetonskih stupova, pri čemu je u obzir uzeta mehanička varijabilnost. U ovom radu predložena je adaptivna metoda za procjenu pouzdanosti stupova s obzirom na stanja oštećenja. Metoda je neizravno uparivanje odzivne površine i nelinearnoga modela konačnih elemenata. Glavni je cilj ovog istraživanja pružiti građevinskim inženjerima model za optimalno i robustno oblikovanje stupova. Rezultati studije pokazuju da je pouzdanost stupova okvirnih nosača usko povezana s dobrom kvalitetom materijala (čelik, beton) i vrstom primijenjenog opterećenja. Njihova pouzdanost opada s povećanjem opterećenja i nanesenoga pomaka, a raste s povećanjem tlačne čvrstoće i granice razvlačenja čelika. U predloženom pristupu uzimaju se u obzir nesigurnosti povezane s konstrukcijskim modelima i proučava se njihov utjecaj na pouzdanost konstrukcije pomoću analize osjetljivosti, a sve s ciljem ostvarivanja bolje oblikovanosti i posljedično boljega ponašanja stupova pod različitim parametrima.

### Ključne riječi:

nesigurnosti, pouzdanost, probabilističke metode, oštećenje, stup, nosač

Research Paper

**Kernou Nassim, Messaoudene Lydia, Lyacine Bennacer**

## Effects of column damage on the reliability of reinforced concrete portal frames

The reliability and behaviour of columns belonging to portal-reinforced concrete frames depend on many factors. This paper presents a parametric study of a reliability column in a non-linear domain, considering mechanical variability and targeting damaged areas of the reinforced concrete columns. In this study, an adaptive method for assessing the reliability of columns with respect to damage states is proposed. The method is an indirect coupling of the response surface and finite element model in the non-linear domain. The main goal of this study was to provide a structural engineer with a modelling approach for optimal and robust column design. The results of the present study show that the reliability of columns belonging to portal frames is closely related to the quality of the constituent materials (steel and concrete) and the type of load applied. The reliability of this type of column also decreases with increasing load and applied displacement and increases with increasing compressive strength and yield strength of the steel. The uncertainties associated with the structural models are considered, with their impact on structure reliability studied using a sensitivity analysis, which allows the proposed approach to make the best possible decision for a better design and, therefore, good behaviour under different parameters.

### Key words:

uncertainties, reliability, probabilistic methods, damage, column, portal

## 1. Uvod

Građevinski objekti izloženi su neizbježnim rizicima kao što su potresi, a što dovodi do oslabljenja i mogućega sloma nosivih elemenata, između ostaloga i stupova. Ako razina opterećenja dostigne razinu koja uzrokuje oštećenja, armiranobetonski stupovi automatski pokazuju nelinearno ponašanje. Projektiranje armiranobetonskih stupova je element istraživanja koji je posljednjih godina dobio veliku pozornost. Radi boljšega opisa ponašanja elemenata okvirnih nosača, provedeno je nekoliko eksperimentalnih [1-4] i numeričkih istraživanja [5-11].

Alfarah i sur. [10] predstavili su novu metodologiju za izračunavanje promjena varijabli oštećenja na dva okvirna nosača. Dobiveni rezultati uspoređeni su s pojednostavljenim modelima koji se često koriste u potresnom inženjerstvu.

Haji i sur. [12] proveli su eksperimentalno istraživanje o utjecaju ojačanja pomoću polimera armiranih vlaknima (engl. *Fiber Reinforced Polymer* - FRP) sustava. Problem gubitka nosivosti kod takvih stupova i dalje je relevantan jer ne zadovoljavaju postojeće zahtjeve pravila projektiranja, a pokazuju i vrlo specifičan način sloma tijekom nedavnih seizmičkih aktivnosti.

Nelinearne analize betonskih stupova ne primjenjuju se samo za poboljšanje razumijevanja ponašanja konstrukcije, već su i korisne i za procjenu razine pouzdanosti. Probabilistički pristup nelinearnoj analizi stoga je od velikog praktičnoga interesa za građevinske inženjere. Uzimanje u obzir nesigurnosti u mehaničkom modeliranju konstrukcija nužan je uvjet za projektiranje njihove pouzdanosti na optimalan i trajan način. Učinak nesigurnosti mora se procijeniti kako bi se odredila pouzdanost konstrukcijskog sustava, kao što navode Morio i sur. [13]. Glavni problem u analizi pouzdanosti konstrukcija je uzimanje u obzir nesigurnosti u fazi oštećenja primjenom unaprijed definirane funkcije graničnoga stanja. Ta se funkcija dobiva metodom odzivne površine (RSM), točnije prilagođavanjem površine različitim kombinacijama skupa varijabli [14, 15]. Upravo s tim ciljem različiti istraživači [16-22] već nekoliko godina razvijaju metode pouzdanosti za proučavanje ponašanja konstrukcijskih elemenata. Ondje gdje je analiza pouzdanosti konstrukcije od interesa, mogu se koristiti nelinearni modeli za jasno predstavljanje stanja oštećenosti konstrukcijskih elemenata. Ove metode omogućuju proučavanje pouzdanosti konstrukcija i utjecaj varijabilnosti proračunskih varijabli na njihovo ponašanje [19].

Kako bi istraživanja pouzdanosti bila učinkovita i iskoristiva, metode uparivanja mehanike i pouzdanosti moraju uzeti u obzir poteškoće u rješavanju problema (velik broj slučajnih varijabli, nelinearno ponašanje, itd.) koje imaju više ili manje posljedica [20, 21].

Molkens i sur. [20] opisali su ponašanje statičkoga sustava okvirnih nosača na temelju analitičkoga pristupa pouzdanosti s dominantnim načinima sloma. Metode pouzdanosti konstrukcija značajno su razvijene posljednjih godina i smatraju se korisnim alatom za učinkovitu procjenu sigurnosti konstrukcija složenoga oblika (Gordini i sur. [23]).

Cilje istraživanja ocijeniti pouzdanost stupova armiranobetonskih okvirnih nosača probabilističkom nelinearnom dinamičkom analizom, uzimajući u obzir kriterij kolapsa. U ovom radu, predložena je ciljana analiza pouzdanosti stupova (bazne i nodalne zone), te je pomoću analize osjetljivosti uspostavljen odnos između indeksa strukturne pouzdanosti i faktora oštećenja. Analiza pouzdanosti stupova okvirnih nosača može se primjenjivati kao alat za donošenje odluka prilikom pregleda i sanacija.

## 2. Metodologija

### 2.1. Teorija oštećenja

Na temelju teorije oštećenja u postelastičnom području ponašanja betona, interna varijabla  $D$  (skalar ili tenzor) zauzima vrijednosti od nule (0) (neoštećeni materijal) do vrijednosti (1) (materijal potpuno oštećen). Na primjer, u slučaju skalara:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \quad (1)$$

gdje je:

$E$  - Youngov modul materijala u početnome stanju

$\bar{E}$  - Youngov modul oštećenoga materijala.

Razvoj varijable  $D$  određuje se deduktivno iz mjerenja varijacije modula od početnoga stanja materijala koji se smatra netaknutim, do pojave efektivnih naprezanja u oštećenju, kao što su prvotno predložili Chaboche i sur. [24].

Degradirani odziv betona karakteriziraju dvije neovisne jednoosne varijable oštećenja, vlačno oštećenje  $D_t$  i tlačno oštećenje  $D_c$ :

$$0 \leq D_t \leq 1 \text{ i } 0 \leq D_c \leq 1 \quad (2)$$

### 2.2. Osnovna teorija pouzdanosti konstrukcija

U topološkoj optimizaciji temeljenoj na pouzdanosti pretpostavlja se da ograničena funkcija stanja koja odgovara načinu sloma konstrukcijskoga elementa sadrži  $m$  osnovnih stohastičkih varijabli  $X_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Te varijable korištene su za određivanje granice razvlačenja i opterećenja. Za konstrukcijske elemente, funkcija nosivosti dana je izrazom (3):

$$G(x) = R - S \quad (3)$$

gdje je:

$R$  - otpor konstrukcije

$S$  - naneseo naprezanje.

U fizičkom prostoru koji čine  $R$  i  $S$ , funkcija graničnoga stanja dijeli prostor u tri područja:  $G(R, S) < 0$  područje sloma,  $G(R, S) = 0$  granično stanje i  $G(R, S) > 0$  sigurno područje.

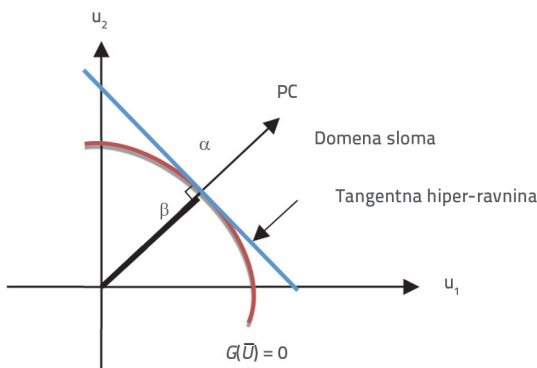
U ovom je radu primjenjena metoda pouzdanosti prvoga reda (engl. *First Order Reliability Method - FORM*) i metoda pouzdanosti drugoga reda (engl. *Second Order Reliability Method - SORM*).

**a) FORM metoda**

Ova se metoda temelji na procjeni funkcije graničnoga stanja pomoću hiperravnine u proračunskoj točki PC (slika 1.) [25]. U standardiziranom prostoru vjerojatnost sloma zapisana je na sljedeći način:

$$P_f = \int_{g(\bar{x}) \leq 0} f_{\bar{x}}(\bar{x}) d\bar{x} \tag{4}$$

pri čemu je  $f_{\bar{x}}(\bar{x})$  funkcija gustoće od  $\bar{X}$ . Vjerojatnost sloma je definirana pomoću  $P_f = \Phi(-\beta)$ , gdje je  $\Phi$  standardna normalna kumulativna funkcija.



Slika 1. Aproximacija tangentnom hiperravninom – metoda FORM [25]

**b) SORM metoda**

Metoda SORM [26] sastoji se od aproksimacije funkcije graničnoga stanja pomoću homogene ili nehomogene kvadratne forme u predviđenoj točki PC. Ova se vjerojatnost korigira kako bi se bolje uzela u obzir zakrivljenost graničnoga stanja (slika 2.). Vjerojatnost sloma procjenjuje se izrazom (5):

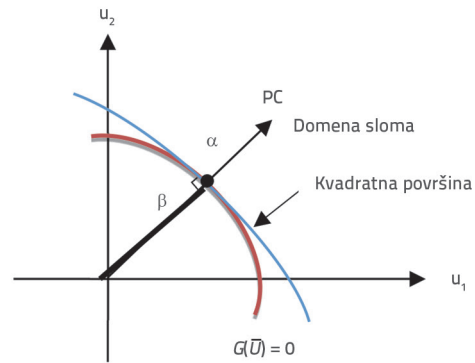
$$P_f = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{1 + \beta k_i}} \tag{5}$$

Indeks pouzdanosti izračunava se kao najkraća udaljenost između ishodišta i površine sloma, gdje je  $\bar{u}$  - prostor.

$$\beta = \min_{g(\bar{u})=0} \left( \sum_{i=1}^m u_i^2 \right)^{1/2} \tag{6}$$

Indeks pouzdanosti  $\beta$  za sustav serije može se definirati kao:

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f) \tag{7}$$



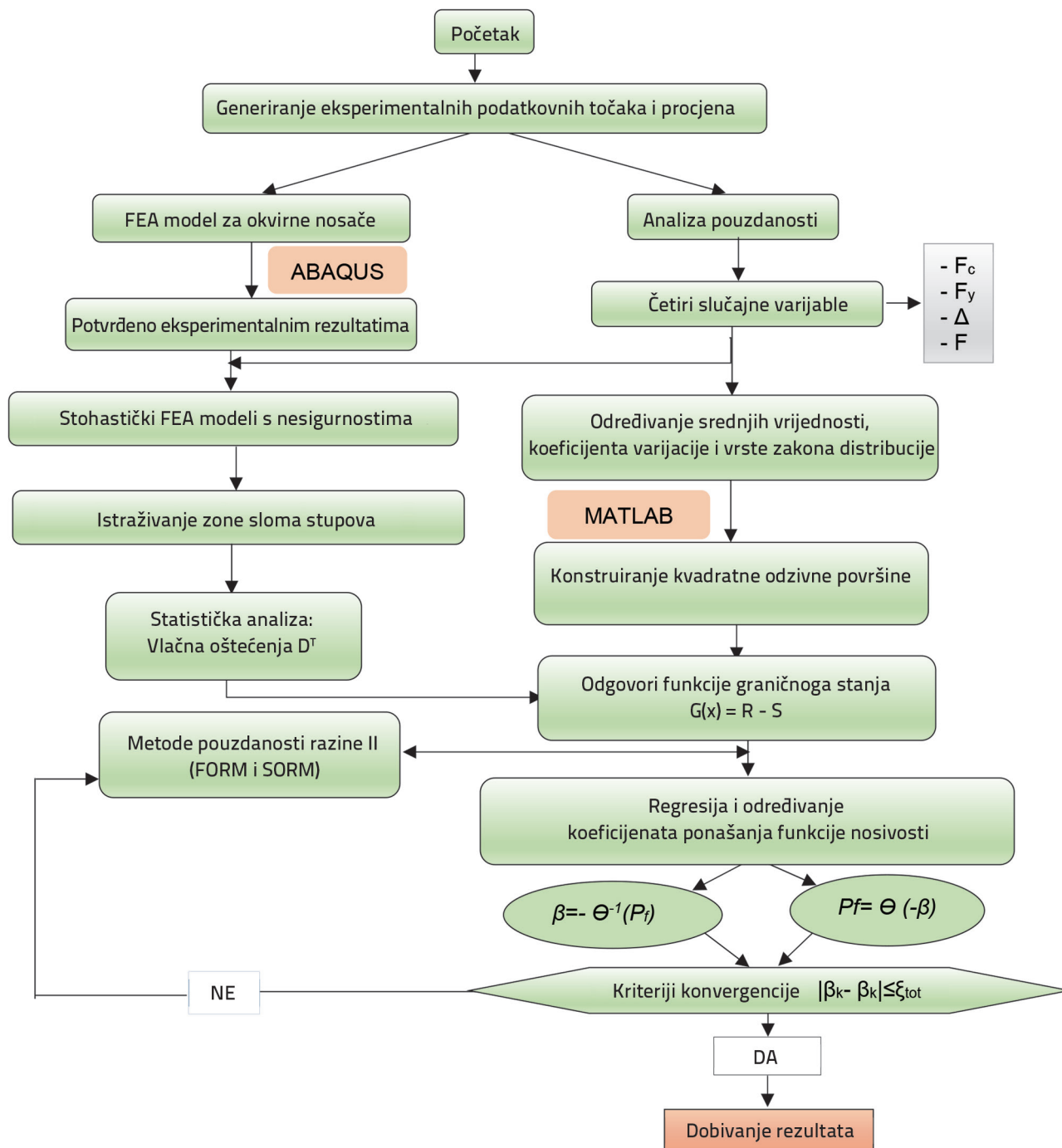
Slika 2. Aproximacija tangentnom hiperravninom – metoda SORM [26]

**2.3. Algoritam uparivanja mehanike i pouzdanosti**

Numerička simulacija fizikalnih pojava postala je prijeko potrebna u mnogim područjima suvremene znanosti. Općenito, ovi modeli daju predvidive rezultate samo ako su ulazni parametri dobro procijenjeni. U većini slučajeva ulazne je parametre teško izmjeriti ili su intrinzično varijabilni od jednog sustava do drugog. Zbog toga je nužno opisati i sistematizirati te nesigurnosti te proučiti njihov utjecaj na mehaničko ponašanje. Da bi se to postiglo, probabilistička mehanika razvila je niz metoda koje olakšavaju procijeniti vjerojatnost da opterećenje premaši čvrstoću konstrukcije, osobito za slučaj kada se koristi rješenje konačnih elemenata (komunikacija ili dijalog između proračunskog koda konačnih elemenata i algoritma pouzdanosti). Uparivanje mehanike i pouzdanosti zahtijeva podatke koji se tiču modela pouzdanosti (slučajne varijable, zakoni distribucije, koeficijent varijacije i parametri algoritma razlučivanja pouzdanosti) i numeričkoga modela za izračun funkcije nosivosti. Model izrađen metodom konačnih elemenata povezan je sa sučeljem koje omogućuje njegovo pokretanje pomoću algoritma pouzdanosti. Drugim riječima, algoritam šalje skup parametara modelu, a zauzvrat prima determinističku procjenu odgovarajuće funkcije nosivosti i njenih gradijenata. U ovom istraživanju je korišteno uparivanje s kodom konačnih elemenata ABAQUS [27] i MATLAB [28]. Metoda odabrana za postizanje uparivanja je neizravno uparivanje pomoću odzivne površine [29]. Dijagram toka uparivanja mehanike i pouzdanosti (ABAQUS-MATLAB) prikazan je na slici 3.

**2.4. Validacija modela analize**

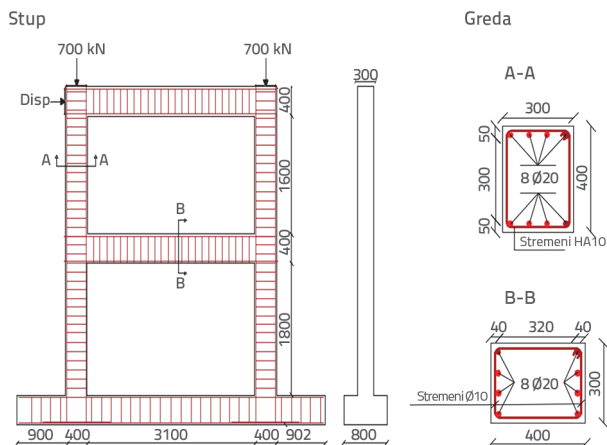
Ovo ispitivanje ocjenjuje nosivost i ponašanje stupova jednokatnih i dvokatnih armiranobetonskih okvira izloženih horizontalnom pomaku. Kako bi se usporedili rezultati, odlučeno je da se koriste eksperimentalni i numerički rezultati



Slika 3. Dijagram toka uparivanja mehanike i pouzdanosti (ABAQUS-MATLAB)

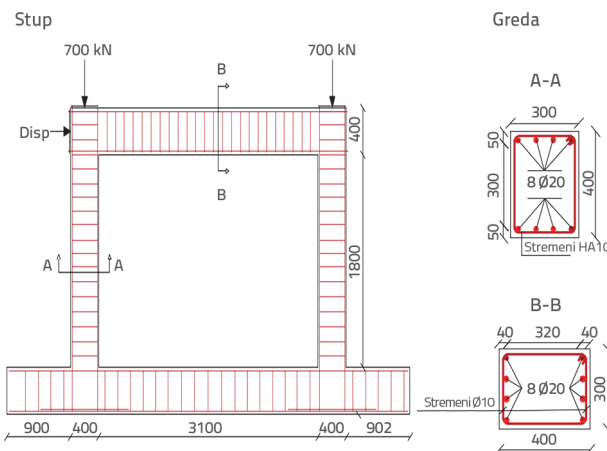
istraživača Faleira i sur. [1], Valipoura i sur. [7], Vukića i sur. [8], Del Vecchia i sur. [9] i Alfaraha i sur. [10]. Slika 4. prikazuje geometriju i ojačanje eksperimentalnoga modela dvokatnoga okvirnog nosača u mm. Slike 4.a i 4.b prikazuju prednji i bočni pogled na ispitani okvir. Slike 4.c i 4.d prikazuju presjeka stupova odnosno grede. Stupovi i grede imaju isti presjek b x h

= 300 x 400 mm. Svi elementi okvira na sličan su način ojačani s donje i gornje strane s četiri Ø20 šipke promijenjenoga oblika te Ø10 ojačanjem pomoću zatvorenih stremena na razmaku od 125 mm u svrhu posmične armature. Kao što je prikazano na slici 4., na vrhu oba stupa djeluje konstantna vertikalna sila od 700 kN te konstantan pomak na lijevi vrh okvira [10].



Slika 4. Geometrijski prikaz dvokatnoga nosača, presjeka, detalja armature i opterećenja [10]

Geometrija i armatura jednokatnoga nosača visine 2,2 m, predloženoga u ovom istraživanju, prikazana je na slici 5.



Slika 5. Geometrijski prikaz jednokatnoga nosača, presjeka, detalja armature i opterećenja

Mehanički parametri korištenih materijala prikazani su u tablici 1. prema Alfarahu i sur. [10].

Tablica 1. Mehanički parametri materijala: beton i čelik

Parametri	$F_c$ [MPa]	$F_t$ [MPa]	$E$ [MPa]	$\nu$
<b>Materijal</b>				
<b>Beton</b>	30	2,912	26000	0,2
<b>Čelik</b>	$F_v$ [MPa]	$F_u$ [MPa]	$E_s$ [MPa]	$\nu$
Ø20	418	596	192500	0,3
Ø10	454	640	200000	0,3

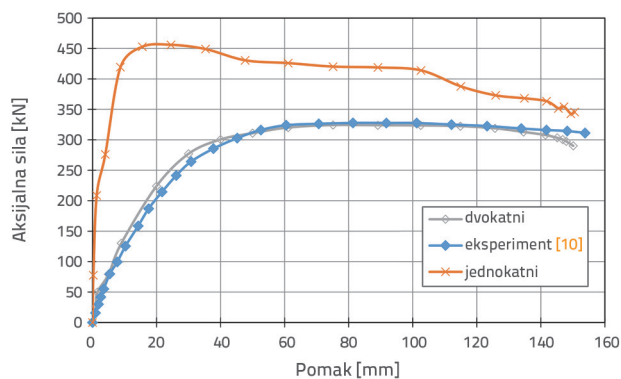
### 2.5. Modeliranje analize konačnih elemenata

Primjena nelinearnih modela ponašanja još uvijek je relativno rijetka u industriji. Numerički modeli mogu poboljšati opis

ponašanja konstrukcijskih elemenata ili njihovih dijelova. Numeričke simulacije temeljene na kodu konačnih elemenata ABAQUS (2012) provedene su na nosačima pod monotonim horizontalnim opterećenjem seizmičkoga tipa. Rezultati simulacija potvrđeni su njihovim pridodavanjem rezultatima simulacija koje su testirali [1, 7-10]. U ovom radu, ponašanje betona simulirano je pomoću modela plastičnosti oštećenja betona (engl. *Concrete Damaged Plasticity*) [7], integrirano u kod konačnih elemenata ABAQUS [22]. Radi se o uparenome modelu (plastičnost, oštećenje) temeljenom na oštećenjima, uključujući nepovratne deformacije, a uglavnom je namijenjen općoj analizi betonskih konstrukcija pod cikličnim i/ili dinamičkim opterećenjem. Kada govorimo o čeliku, dolazi do elastično-plastičnoga ponašanja s očvršćivanjem u vlaku i tlaku. Ovi su modeli posebno prikladni za reprodukciju oblika sloma uzrokovanih rastezanjem i drobljenjem [10]. Integrirano kontaktno područje korišteno je za beton i čelik, gdje je veličina mreže odabrana prema Alfarahu i sur. [10], za beton 100 mm, a za čelik 25 mm. Ugrađivanje je naznačeno na bazi nosača.

### 2.6. Usporedna studija mehaničkoga ponašanja stupova

Napravljena je usporedno ispitivanje mehaničkoga ponašanja dvaju okvira (na jedan i dva kata) u smislu nosivosti. Slika 6. prikazuje eksperimentalne rezultate ucrtane zajedno s numeričkim rezultatima dobivenima za oba okvira. Krivulje su vrlo blizu jedna drugoj. Vrijednost maksimalne sile dobivene eksperimentalnim istraživanjem iznosi 332 kN [1, 7-10], a za simulirani okvir iznosi 324 kN s horizontalnim pomakom od 150 mm. Dobiveni rezultati bliski su eksperimentalnima, što potvrđuje kalibraciju modela. Za predloženi okvir od jednoga kata, povećanje sile na 456 kN u usporedbi s dvokatnim okvirom pokazuje dobru čvrstoću potonjega.



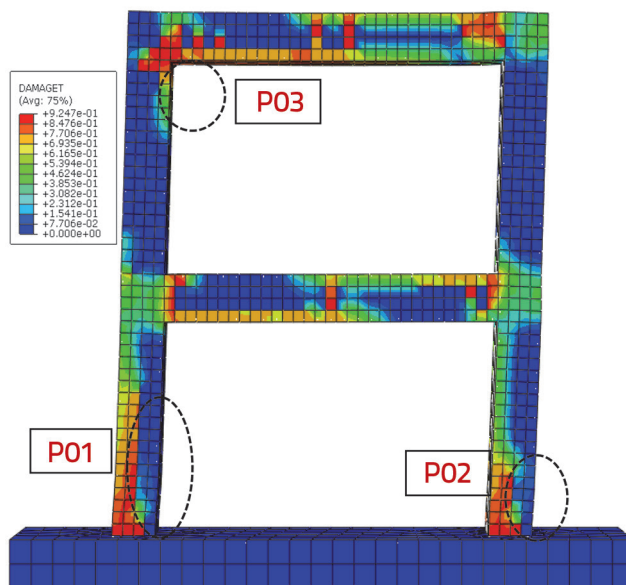
Slika 6. Aksijalna sila i pomak triju vrsta okvira

Prema eksperimentalnom ispitivanju Faleira i sur. [1], prve pukotine od savijanja uočene su pri 52,5 kN u gredi prvog kata na sjevernoj donjoj strani i na južnoj gornjoj strani. Pri opterećenju od 145 kN došlo je do pucanja od savijanja u podnožju stupova, a otkriveno je i prvo smicanje mreže u gredi prvog kata.

Prvo popuštanje dogodilo se u donjoj zoni armature na sjevernoj strani grede na prvom katu pri opterećenju od 264 kN. Međutim, u gornjoj zoni armature na južnom kraju grede došlo je do popuštanja nakon opterećenja većega od 287 kN. Popuštanje u podnožju oba stupa i zgloba na oba kraja grede prvoga kata pojavilo se kako se opterećenje približavalo 323 kN. Ubrzo nakon toga, pri opterećenju od 329 kN, vidljivo je drobljenje betona i pojava zgloba u podnožju stupova. Okvir je izdržao krajnje bočno opterećenje od 332 kN pri bočnom pomaku od približno 150 mm.

## 2.7. Distribucija vlačnih oštećenja

Distribucija vlačnih oštećenja na jednokatnim i dvokatnim okvirima prikazana je na slikama 7. i 8. Crvena boja predstavlja maksimalna, a plava minimalna oštećenja. Može se uočiti da je raspodjela maksimalnih oštećenja stupova koncentrirana u tri označene točke na slikama 7. i 8. Ovo usporedno ispitivanje ograničeno je na tri odabrane točke u kritičnim zonama stupova P01 (baza lijevoga stupa), P02 (baza desnoga stupa) i



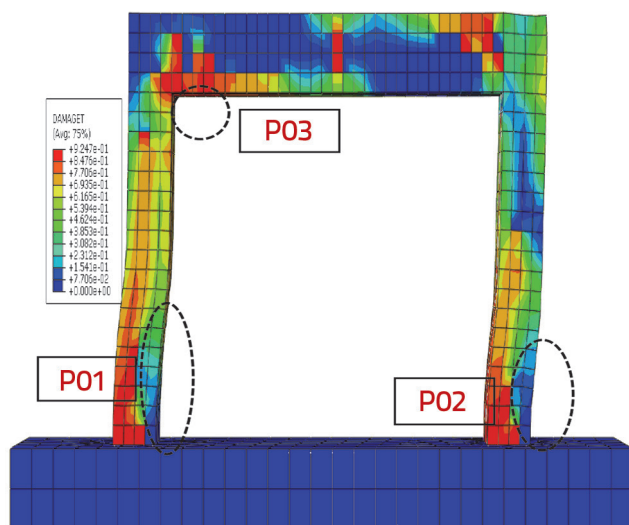
Slika 7. Oštećen dvokatni okvir

Tablica 2. Rezultati simulacije konačnih elemenata

Uzorak	$F_c$ [MPa]	$F_v$ [MPa]	$\Delta$ [mm]	F [kN]	Dvokatni okvir			Jednokatni okvir		
					P01	P02	P03	P01	P02	P03
01	30	418	150	700	0,914	0,826	0,779	0,8793	0,837	0,5575
02	30	427	148	705	0,907	0,846	0,801	0,879	0,823	0,62
03	30	409	153	698	0,9017	0,868	0,773	0,878	0,85	0,619
04	30	436	155	696	0,9002	0,889	0,865	0,88	0,884	0,635
05	30	418	150	705	0,912	0,848	0,803	0,877	0,858	0,618
06	28,5	427	155	700	0,9019	0,900	0,775	0,874	0,827	0,626
07	28,5	409	148	698	0,883	0,9013	0,78	0,872	0,864	0,695
08	28,5	436	153	696	0,903	0,865	0,803	0,873	0,847	0,624
09	28,5	418	155	705	0,89	0,886	0,9247	0,87	0,792	0,583
10	28,5	427	150	698	0,88	0,924	0,916	0,875	0,811	0,713
11	31,5	409	155	700	0,9014	0,849	0,76	0,885	0,851	0,631
12	31,5	436	148	705	0,89	0,863	0,884	0,884	0,902	0,574
13	31,5	418	153	700	0,909	0,919	0,796	0,881	0,887	0,614
14	31,5	427	153	696	0,906	0,852	0,794	0,883	0,897	0,627
15	31,5	409	150	698	0,908	0,87	0,777	0,882	0,815	0,612
16	33	418	148	700	0,898	0,924	0,782	0,891	0,884	0,595
17	33	427	155	705	0,904	0,925	0,768	0,89	0,914	0,588
18	33	436	150	700	0,903	0,888	0,87	0,887	0,917	0,579
19	33	436	148	696	0,901	0,923	0,848	0,885	0,912	0,63
20	33	407	153	698	0,912	0,894	0,881	0,886	0,895	0,624
21	28,5	418	150	700	0,897	0,881	0,787	0,871	0,852	0,6
22	31,5	418	150	705	0,913	0,908	0,781	0,88	0,902	0,606
23	33	418	148	696	0,902	0,916	0,8	0,885	0,835	0,602
24	30	418	155	705	0,888	0,854	0,793	0,877	0,839	0,566
25	33	436	155	705	0,9	0,924	0,801	0,888	0,91	0,543



P03 (baza gornjeg lijevog stupa), a prema Alfarahu i sur. [10], najveća vrijednost vlačnog oštećenja je 0,9247.



Slika 8. Oštećen jednokatni okvir

### 3. Rezultati, rasprava i analize

#### 3.1. Analiza pouzdanosti

Kako bi se napravila analiza pouzdanosti stupova jednokatnoga i dvokatnoga okvira, provedeno je nekoliko simulacija. U ovom radu razmatrane su četiri slučajne varijable. Provedeno je dvadeset i pet simulacija kako bi se izradio smanjeni centrirani kompozitni model ( $2^4 + 2 \times 4 + 1 = 25$ ). Slučajne varijable probabilističkog modela su tlačna čvrstoća betona  $F_c$  (28,5, 30, 31,5 i 33 MPa), granica razvlačenja čelika  $F_y$  (409, 418, 427 i 436 MPa), horizontalni pomak  $\Delta$  (148, 150, 153 i 155 mm) i aksijalna sila  $F$  (696, 698, 700 i 705 kN).

Tablica 3. Statističke karakteristike slučajnih varijabli

Varijable	Raspodjela	Srednja vrijednost	COV	Literatura
$F_c$	Normalno	30,75 [MPa]	0,19	Jiang i sur. [16]
$F_y$	Log-normalno	422,5 [MPa]	0,045	Thai i sur. [30]
$\Delta$	Normalno	151,5 [mm]	0,1	Rahman i sur. [31]
$F$	Gumbel	699,5 [kN]	0,25	Beck i sur. [32]

Tablica 4. Rezultati analize pouzdanosti

Metoda	Pouzdanost	Dvokatni okvir			Jednokatni okvir		
		P01	P02	P03	P01	P02	P03
FORM	$\beta$	0,92	1,603	2,944	1,664	1,889	3,641
	$\rho_f$	0,46	5,44E-02	1,62E-03	4,81E-02	2,95E-02	1,36E-04
SORM	$\beta$	0,975	1,477	2,963	1,662	1,924	3,668
	$\rho_f$	0,16	6,99E-02	1,52E-03	4,82E-02	2,72E-02	1,22E-04

Dvadeset i pet simulacijskih modela modelirani su pomoću ABAQUS (2012). Cilj je dobivanje različitih vrijednosti vlačnog oštećenja  $D_T$  za tri točke odabranoga okvira koje su potom uspoređene s maksimalnom vrijednošću oštećenja (1). Tablica 2. prikazuje rezultate dobivene simulacijama za svaku točku ova dva tipa okvira.

Tablica 2. pokazuje da su vrijednosti vlačnoga oštećenja  $D_T$  točke P01 (baza lijevog stupa) veće u usporedbi s ostalim točkama P02 i P03, što potvrđuje velike pukotine označene u točki P01 prema Alfarahu i sur. [10].

Srednja vrijednost i parametri koeficijenta varijacije (COV) slučajnih varijabli (tlačna čvrstoća betona  $F_c$ , granica razvlačenja čelika  $F_y$ , horizontalni pomak i aksijalna sila  $F$ ) preuzeti su iz literature [22, 34, 35] i prikazani su u tablici 3.

#### 3.1.1. Formulacija funkcije graničnoga stanja $G(x)$

Funkcija graničnoga stanja korištena u ovom istraživanju definirana je prema izrazu (8):

$$G(x) = 1 - D_T(F_c, F_y, \Delta, F) \quad (8)$$

gdje je  $D_T(F_c, F_y, \Delta, F)$  funkcija odziva dobivena kvadratnom regresijom numeričkih rezultata konačnih elemenata dobivenih pomoću MATLAB-a.

#### 3.1.2. Indeks pouzdanosti i vjerojatnost sloma

Rezultati indeksa pouzdanosti i vjerojatnosti sloma triju točaka stupova koji pripadaju dvjema vrstama okvira sažeti su u tablici 4. Indeks pouzdanosti  $\beta$  i vjerojatnost sloma  $\rho_f$  izračunani metodama FORM i SORM vrlo su slični za svako ispitivanje.

Za tri oštećena stupa dvokatnog nosača vrijednost indeksa pouzdanosti varirala je od 0,92 do 2,944 metodom FORM i od 0,975 do 2,963 metodom SORM. Za tri oštećena stupa

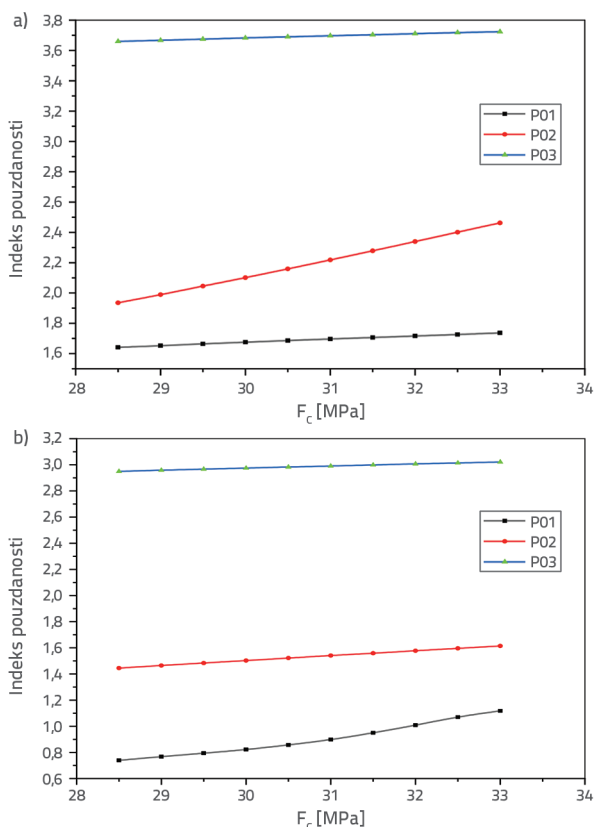
jednokatnoga nosača vrijednost indeksa pouzdanosti varirala je od 1,664 do 3,641 metodom FORM i od 1,662 do 2,963 metodom SORM. Vjerojatnost sloma smanjuje se povećanjem indeksa pouzdanosti svake točke. Rezultati pokazuju da je vrijednost indeksa pouzdanosti P01 (baza lijevog stupa) manja u usporedbi s drugim točkama stupova za dvije vrste nosača, što je, uz pomoć velikih pukotina označenih u točki P01 [10], potvrdilo rezultate tablice 4. Suprotno tome, indeks pouzdanosti točke P02 je viši, što pokazuje pouzdanost potonjega.

### 3.2. Utjecaj slučajne varijable na pouzdanost stupova

Kako bi se procijenio utjecaj slučajnih varijabli na pouzdanost stupova, provodi se parametarsko istraživanje. Stoga su provedena različita ispitivanja koja uključuju slučajne varijable i očuvanje vrijednosti ostalih varijabli. U tom kontekstu prikazane su dvije studije slučaja.

#### 3.2.1. Tlačna čvrstoća betona ( $F_c$ )

Analiza ponašanja stupova, koji pripadaju dvjema vrstama okvira, pod utjecajem tlačne čvrstoće betona ilustrirana je na slici 9.



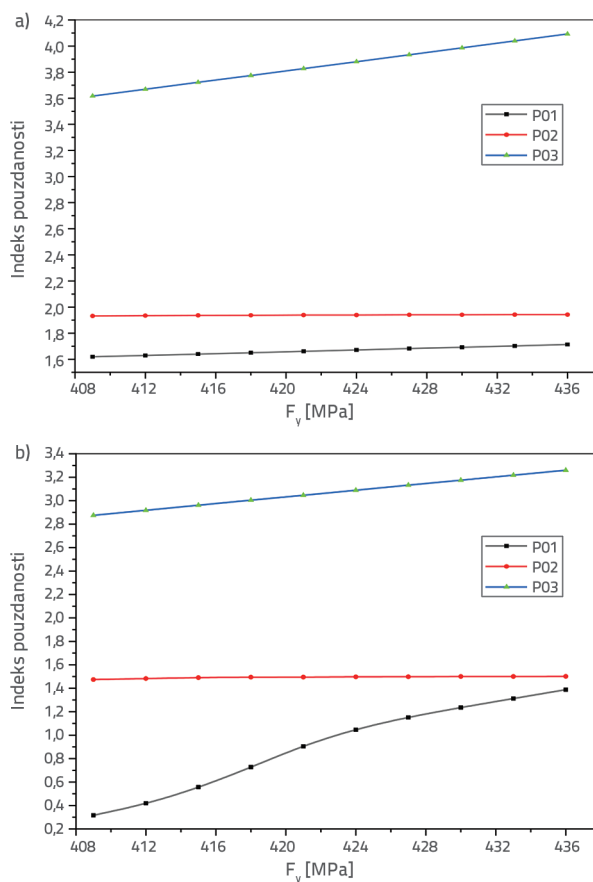
Slika 9. Utjecaj tlačne čvrstoće betona: a) jednokatni okvir; b) dvokatni okvir

Rezultati pokazuju da indeks pouzdanosti raste s povećanjem varijable tlačne čvrstoće betona ( $F_c$ ) za dvije vrste okvirnih

nosača. Za jednokatne stupove okvira, slika 9.a, prikazuje vrijednost indeksa pouzdanosti koji varira od 1,641 do 1,736 za točku P01, od 1,935 do 2,462 za točku P02 i za točku P03 od 3,66 do 3,724. Za točke stupova koje pripadaju dvokatnom okviru, slika 9.b prikazuje vrijednost indeksa pouzdanosti koji varira od 0,7393 do 1,118 za točku P01, od 1,445 do 1,614 za točku P02 i za točku P03 od 2,95 do 3,022.

#### 3.2.2. Granica razvlačenja čelika

Prema rezultatima na slici 10. indeks pouzdanosti raste s povećanjem slučajne varijable granice razvlačenja čelika za točke P01 i P03 za dvije vrste okvirnih nosača. Za točku P03 vrijednosti indeksa pouzdanosti su identične te jednake iznosu od 1,9 odnosno 1,5 (slike 10.a i 10.b).



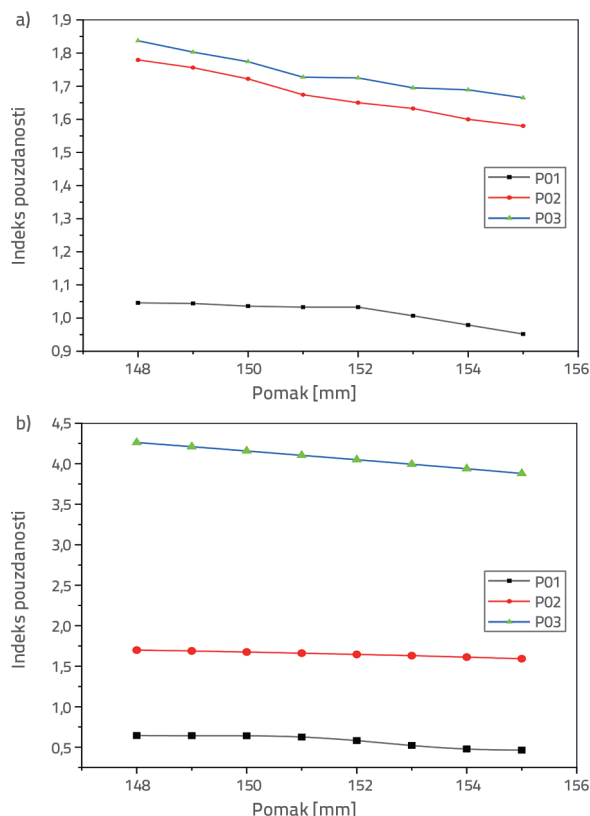
Slika 10. Utjecaj granice razvlačenja čelika: a) jednokatni okvir; b) dvokatni okvir

#### 3.2.3. Horizontalni pomak

Rezultati prikazani na slici 11.a pokazuju blagi pad vrijednosti indeksa pouzdanosti s povećanjem primijenjenoga pomaka za sve točke (P01, P02, P03) stupova jednokatnih okvira. Za dvije točke P02 i P03 vrijednosti indeksa pouzdanosti su jednake. Prema rezultatima na slici 11.b, vrijednosti indeksa pouzdanosti



opadaju s povećanjem primijenjenog pomaka za točke P01 i P03 stupova dvokatnih nosača, a za P03 vrijednosti su identične.



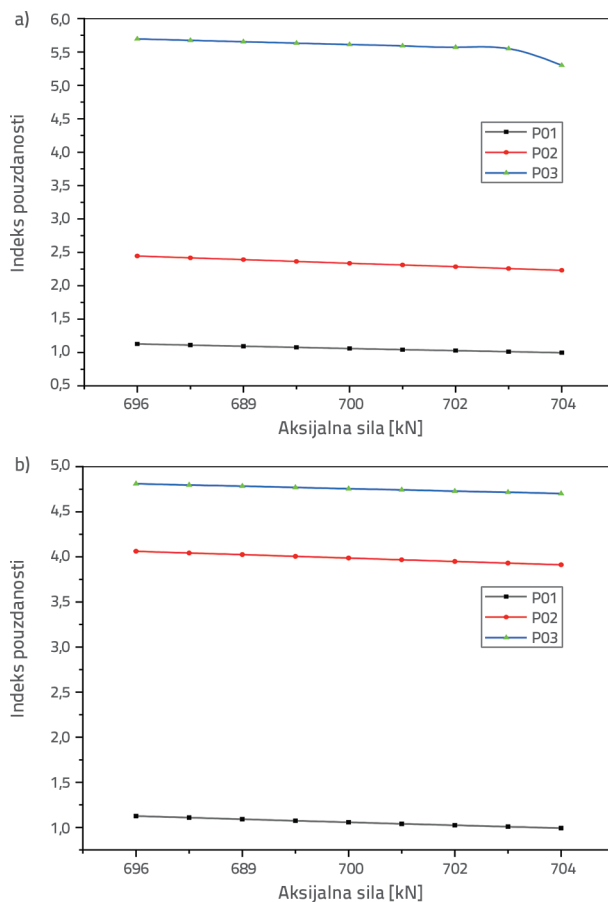
Slika 11. Učinak horizontalnog pomaka: a) jednokatni okvir; b) dvokatni okvir

### 3.2.3. Aksijalna sila

Varijacija indeksa pouzdanosti kao funkcije aksijalne sile nanijete na vrh stupova sažeta je na slici 12. Blago smanjenje vrijednosti indeksa pouzdanosti kao funkcije povećanja primijenjenih aksijalnih sila za sve točke (P01, P02, P03) dva tipa okvira prikazano je na slici 12.

Rezultati na slikama 9. do 12. pružaju važne informacije. Vrijednosti indeksa pouzdanosti za tri točke stupova jednokatnoga nosača više su u usporedbi s onima za dvokatni nosač, što upućuje na pouzdanost stupova jednokatnoga nosača. Minimalne vrijednosti indeksa pouzdanosti u ovom usporednom ispitivanju promatrane su u dvije varijable, točnije horizontalnom pomaku ( $\Delta$ ) i aksijalnoj sili ( $F$ ) [33] u točki P01 (baza lijevog stupa) [10], koja pokazuje utjecaj i važnost tih varijabli.

Prema dobivenim vrijednostima indeksa pouzdanosti na slici 10., varijabla pomaka ima isti utjecaj na točke P02 i P03 jednokatnog stupa nosača. Istraživanje utjecaja slučajne varijable na pouzdanost stupova potvrđuje rezultate prikazane u tablici 2. i rezultate istraživača Alfaraha i sur. [10].



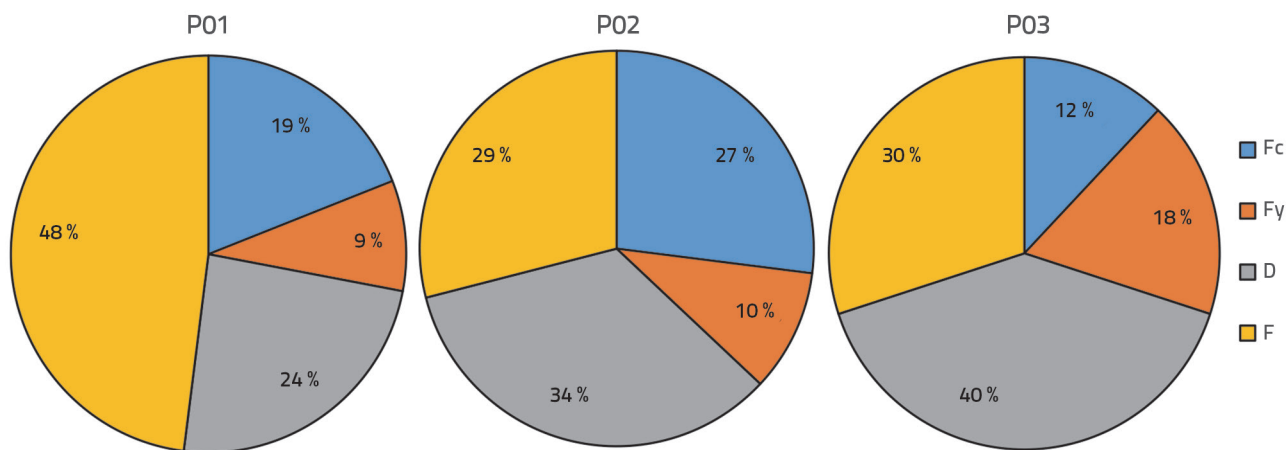
Slika 12. Učinak horizontalnog pomaka: a) jednokatni okvir; b) dvokatni okvir

### 3.3. Analiza osjetljivosti

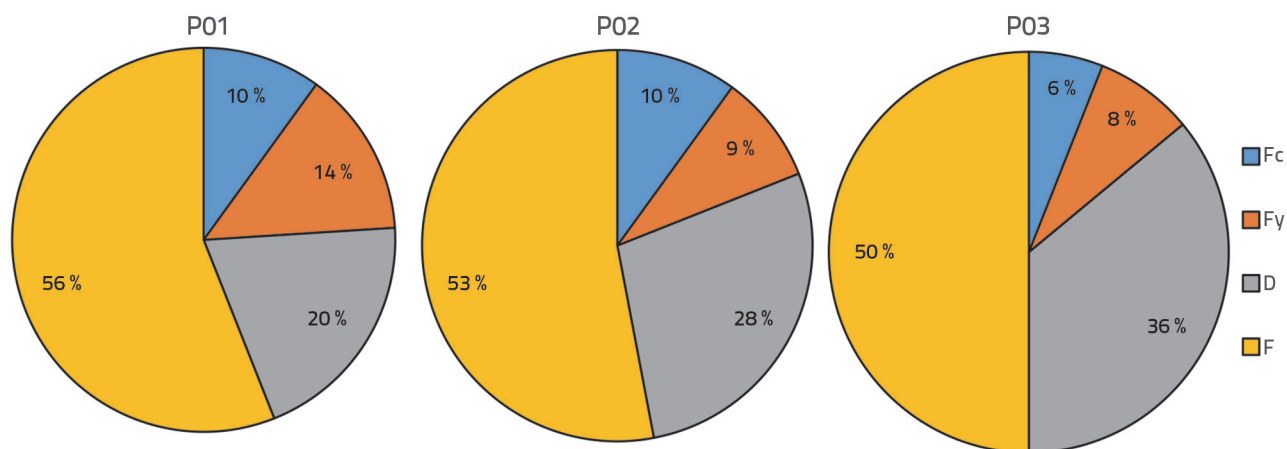
Analiza osjetljivosti važan je korak u određivanju kvalitete dobivenih rezultata. Cilj je ovog ispitivanja, u slučaju većega broja varijabli, utvrditi najvažnije varijable kako bi se one bolje kontrolirale u fazi donošenja odluka [19]. Osjetljivost slučajnih varijabli stupova jednokatnih i dvokatnih okvira prikazana je na slikama 13. i 14.

Rezultati na slici 12. za jednokatni okvir pokazuju da su parametri koji najviše utječu na ponašanje stupova: aksijalna sila s kojom su stupovi opterećeni u postotku od 48 % za točku P01, 28 % za P02 i 30 % za P03 i horizontalni pomak ( $\Delta$ ) s postotkom od 24 % za točku P01, 34 % za P02 i 40 % za P03. Međutim, osjetljivost parametara, tlačna čvrstoća betona i granica razvlačenja čelika također imaju svoju ulogu u sigurnosti.

Prema rezultatima za dvokatni okvir dobivenima na slici 13., postoci varijable aksijalne sile vrlo su visoki, točnije 56 % na P01, te pomak ( $\Delta$ ) s postotkom od 36 % označen u točki P03. Ipak, može se reći da svi parametri utječu na optimalno ponašanje stupova koji pripadaju okvirima s različitim brojem katova. Rezultati na slikama 13. i 14. potvrđuju rezultate dobivene u istraživanju utjecaja slučajnih varijabli na pouzdanost stupova.



Slika 13. Osjetljivost parametara za jednokatni okvir



Slika 14. Osjetljivost parametara za dvokatni okvir

#### 4. Zaključak

Predloženim se modelom proučava utjecaj određenih parametara na pouzdanost različitih točaka oštećenih stupova koji pripadaju nosačima s različitim brojem katova izloženih horizontalnom pomaku. Model mehanike i pouzdanosti (ABAQUS-MATLAB) primijenjen je za procjenu pouzdanosti stupova u području oštećenja. Ovaj se pristup pokazao primjerenim za analizu nosivosti stupova okvira s različitim brojem katova (jednokatnih i dvokatnih). Rezultati dobiveni ovim usporednim ispitivanjem pouzdanosti najoštećenijih točaka stupova jednokatnoga i dvokatnoga nosača uslijed horizontalnoga pomaka rezultirali su s nekoliko važnih zaključaka danih u nastavku.

Jednokatni okvir pokazuje veliku otpornost u usporedbi s dvokatnim nosačem pod istim pomakom s dobikom na čvrstoći od približno 41%.

Analiza pouzdanosti odredila je i usporedila evoluciju indeksa pouzdanosti oštećenih točaka na stupovima okvira s različitim brojem katova s obzirom na varijabilnost nekih parametara, materijalnu štetu i nanoseno opterećenje.

Istraživanje utjecaja slučajnih varijabli na pouzdanost stupova i analiza osjetljivosti otkrilo je da su najvažniji parametri koji utječu na ponašanje stupova aksijalna sila i horizontalni pomak okvira nosača, bez zanemarivanja doprinosa ostalih parametara. Mehaničko ispitivanje AB okvira potvrđeno je analizom pouzdanosti upotrebom uparivanja mehanike i pouzdanosti, a u svrhu predstavljanja alata koji bi projektantima koji se bave varijabilnošću mehaničkih i geometrijskih parametara konstrukcijskih elemenata pružio podršku u donošenju odluka. Nadalje, kao smjernica budućim istraživačima i u svrhu veće fleksibilnosti u donošenju odluka, dovoljno je primijeniti predloženi pristup uz multivarijantnu parametarsku studiju. Ovaj je pristup posebno prikladan za moguću implementaciju geometrijskih i materijalnih nelinearnosti uz različite analize (statičke, dinamičke, nelinearne), uzimajući u obzir nesigurnosti koje proizlaze iz materijalnih i geometrijskih karakteristika. U budućnosti je potrebno provesti dodatna istraživanja kako bi se omogućilo bolje razumijevanje pouzdanosti nosivih elemenata:

- istražiti učinak međudjelovanja betona i čelika
- razviti metodu pouzdanosti za AB okvir
- detaljnije analizirati pouzdanosti AB spojeva grede i stupa.

## LITERATURA

- [1] Faleiro, J., Oller, S., Barbat, A.H.: Plastic-damage analysis of reinforced concrete frames, *Engineering Computations*, 27 (2010) 1, pp. 57–83, <https://doi.org/10.1108/02644401011008522>
- [2] Zhou, Z., Cao, W., Liu, Y., Li, J.: Seismic behaviour of composite shear wall with steel reinforced concrete frame and embedded perforated-steel plate, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 5, pp. 383–392, <https://doi.org/10.14256/JCE.2770.2019>
- [3] Stepinac, L., Galić, J., Vukić, H., Haiman, M.: Overview of research on fire effects in RC elements and assessment of RC structures after fire, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 5, pp. 509–522, <https://doi.org/10.14256/JCE.3196.2021>
- [4] Yiğit, A., Erdil, B., Akkaya, I.: A simplified fundamental period equation for RC buildings, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 5, pp. 483–497, <https://doi.org/10.14256/JCE.3080.2020>
- [5] Čokić, M., Folić, R.: Fragility and robustness analysis of a multistorey RC building, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 1, pp. 27–44, <https://doi.org/10.14256/JCE.3036.2020>
- [6] Dhehbiya, G., Salah, K.: Effects and dynamic behaviour of soil - framed structure interaction, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 1, pp. 9–20, <https://doi.org/10.14256/JCE.2301.2017>
- [7] Valipour, H.R., Foster, S.J.: A total secant flexibility-based formulation for frame elements with physical and geometrical nonlinearities, *Finite Elements in Analysis and Design*, 46 (2010) 3, pp. 288–297, <https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.11.002>
- [8] Miha, J., Boštjan, B., Adnan, I.: Embedded discontinuity finite element formulation for failure analysis of planar reinforced concrete beams and frames, *Engineering Structures*, 50 (2013), pp. 115–125, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.028>
- [9] Del Vecchio, C., Kwon, O.S., Di Sarno, L., Prota, A.: Accuracy of nonlinear static procedures for the seismic assessment of shear critical structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44 (2015) 10, pp. 1581–1600, <https://doi.org/10.1002/eqe.2540>
- [10] Alfarah, B., López-Almansa, F., Oller, S.: New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures, *Engineering Structures*, 132 (2017), pp. 70–86, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.022>
- [11] Sawada, K.: Seismic Response Analyses of RC Portal Frames with Large Deformable Elastic Braces, Seismic Resistant Structures, 6 (2018) 5, pp. 880–886. Paper DOI 10.2495/CMEM-V6-N5-880-886
- [12] Haji, M., Naderpour, H., Kheyroddin, A.: Experimental study on influence of proposed FRP-strengthening techniques on RC circular short columns considering different types of damage index, *Composite Structures*, 209 (2019), pp. 112–128, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.088>
- [13] Morio, J., Balesdent, M.: Introduction to Rare Event Probability Estimation, Estimation of Rare Event Probabilities in Complex Aerospace and Other Systems, Elsevier, 2016. eBook ISBN: 9780081001110
- [14] Miranda, J.: Structural reliability analysis with implicit limit state functions, Instituto Superior Tecnico, university of Lisbon, Portugal, 2013. Corpus ID 53687539
- [15] Bozorgnia, Y., Bertero, V.V.: Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering, CRC Press, 2004, <https://doi.org/10.1201/9780203486245>
- [16] Jiang, Y., Yang, W.: An approach based on theorem of total probability for reliability analysis of RC columns with random eccentricity, *Structural safety*, 41 (2013), pp. 37–46, <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2012.11.001>
- [17] Wang, C., Zhang, H., Li, Q.: Moment-based evaluation of structural reliability, *Reliability Engineering and System Safety*, 181 (2019), pp. 38–45, <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.09.006>
- [18] Cardoso, F.S., Zhang, H., Rasmussen, K.J., Yan, S.: Reliability calibrations for the design of cold-formed steel portal frames by advanced analysis, *Engineering Structures*, 182 (2019), pp. 164–171, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.054>
- [19] Kernou, N., Bouafia, Y., Khalil, B.: Reliability and punching shear resistance of slabs in non-linear domain, *Građevinar*, 67 (2015) 11, pp. 1051–1062, <https://doi.org/10.14256/JCE.1295.2015>
- [20] Molkens, T., Rossi, B.: Linear elastic mode-based reliability approach for single-bay portal frames, *Structures*, 34 (2021), pp. 2205–2217, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.113>
- [21] Ghosn, M., Frangopol, D.M., Allister, T.P., et al.: Reliability-based performance indicators for structural members, *Journal of Structural Engineering*, 142 (2016) 9, F4016002. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001546
- [22] Arangio, S.: Reliability based approach for structural design and assessment: performance criteria and indicators in current European codes and guidelines, *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*, 1 (2012) 1, pp. 64–91. DOI: 10.1504/IJLCP.2012.051281
- [23] Gordini, M., Habibi, M.R., Tavana, M.H., Tahamouli, R.M., Amiri, M.: Reliability analysis of space structures using monte-carlo simulation method, *In Structures*, 14 (2018), pp. 209–219, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.011>
- [24] Lemaître, J., Chaboche, J.L., Benallal, A., Desmorat, R.: *Mécanique des matériaux solides-3e éd*, Dunod, 2020, <https://www.dunod.com/sciences-techniques/mecanique-materiaux-solides-0>
- [25] Madsen, H.O., Krenk, S., Lind, N.C.: *Methods of structural safety*, Courier Corporation, 2006. ISBN-13-978-0486445977
- [26] Breitung, K.: Asymptotic approximations for multinormal integrals, *Journal of Engineering Mechanics*, 110 (1984) 3, pp. 357–366, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1984\)110:3\(357\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1984)110:3(357))
- [27] ABAQUS/Standard Version 6.12 User's Manuals, ABAQUS. Providence, R. 2012.
- [28] Messaoudene, L., Kernou, N.: Reliability Analysis and Comparative Study of Ordinary Concrete and High Performance Concrete Filled with Steel Tube under Axial Compression, *Journal of Engineering Research in Africa*, 61 (2022), pp. 245–261, <https://doi.org/10.4028/p-9h1zq6>
- [29] Lemaire, M., Chateaufneuf, A., Mitteau, J.C.: *Fiabilité des structures : couplage mécano-fiabiliste statique*, Hermès Science Publications, 2005. ISBN 2746210576, 9782746210578
- [30] Thai, H.T., Thai, S., Ngo, T., Uy, B., Kang, W.H., Hicks, S.J.: Reliability considerations of modern design codes for CFST columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 177 (2021), pp. 106482, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106482>
- [31] Rahman, S., Xu, H.: A meshless method for computational stochastic mechanics, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 61 (2005), pp. 41–58, <https://doi.org/10.1080/15502280590888649>
- [32] André T. Beck, Walter L.A. de Oliveira, Silvana De Nardim, Ana L.H.C. ElDebs: Reliability-based evaluation of design code provisions for circular concrete-filled steel columns, *Engineering Structures*, 31 (2009) 10, pp. 2299–2308, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.05.004>
- [33] Jebur, H.Q., Al-Zaidee, S.R.: Non-deterministic approach for reliability evaluation of steel portal frame, *Civil Engineering Journal*, 5 (2019) 8, pp. 1684–97. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2019-03091363>