

Primljen / Received: 13.6.2014.

Ispravljen / Corrected: 25.8.2014.

Prihvaćen / Accepted: 19.9.2014.

Dostupno online / Available online: 10.10.2014.

Utjecaj parametara umjetnih akcelorograma na seizmički odziv konstrukcija

Autori:



Doktorand, mr.sc. **Mladen Ćosić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
mladen.cosic@ymail.com



Prof.emeritus dr.sc. **Radomir Folić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Novom Sadu
Fakultet tehničkih znanosti
folic@uns.ac.rs



Mr.sc. **Boris Folić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Strojarski fakultet
Centar za inovacije
boris.folic@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

Mladen Ćosić, Radomir Folić, Boris Folić

Utjecaj parametara umjetnih akcelorograma na seizmički odziv konstrukcija

U radu je proučen utjecaj promjene parametara umjetnih akcelorograma na seizmičke karakteristike konstrukcija. Pri tome su analizirani seizmički odziv i seizmičko oštećenje. Nelinearni odziv sustava je određivan inkrementalnom dinamičkom analizom (IDA), dok je analiza oštećenja sustava razmatrana na osnovi indeksa oštećenja. Istraživanjem je utvrđeno da je za kreiranje umjetnih akcelorograma potreban znatan broj ciklusa kojim se poboljšava usklađenost spektra odziva zapisa u odnosu na spektar odziva prema EN 1998-1, a što je mjereno na osnovi odstupanja krivulja spektralnih ubrzanja u funkciji duktilnosti sustava.

Ključne riječi:

umjetni akcelorogrami, svojstva konstrukcije, IDA analiza, analiza oštećenja

Original scientific paper

Mladen Ćosić, Radomir Folić, Boris Folić

Seismic performances of the structures at variation of artificial accelerograms

The impact of changes to artificial-accelorogram parameters on the seismic performance of structures is examined in this paper. The seismic response and seismic damage are analysed in this respect. Nonlinear response of the system is determined by the incremental dynamic analysis (IDA), while the damage analysis of the system is considered using the damage index. The study has shown that generation of artificial accelerograms requires a considerable number of cycles, which improves the correspondence between the range of recorded response spectra and the range of the response spectra according to EN 1998-1, which is measured based on deviation of spectral acceleration curves as a function of the ductility of the system.

Key words:

artificial accelerograms, performances of structures, IDA analysis, damage analysis

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Mladen Ćosić, Radomir Folić, Boris Folić

Einfluss von Parametern künstlicher Akzelerogramme auf das seismische Verhalten von Konstruktionen

In dieser Arbeit wird der Einfluss verschiedener Parameter künstlicher Akzelerogramme auf seismische Struktureigenschaften untersucht. Dazu sind Analysen der seismischen Antwort und Schadensanalysen durchgeführt worden. Die nichtlineare Antwort des Systems ist durch inkrementelle dynamische Analysen ermittelt, während die Schadensanalyse auf der Berechnung eines Schadensindex beruht. Die Untersuchungen zeigen, dass für die Generierung künstlicher Akzelerogramme eine bedeutende Anzahl von Zyklen erforderlich ist, die zur Verbesserung der Übereinstimmung des Antwortspektrums mit dem nach EN 1998-1 führen. Entsprechende Abweichungen sind mittels von der Duktilität abhängiger Beschleunigungsspektren bemessen.

Schlüsselwörter:

künstliche Akzelerogramme, Struktureigenschaften, IDA Analyse, Schadensanalyse

1. Uvod

Pri projektiranju građevinskih konstrukcija na djelovanje potresa primjenjuju se odgovarajući propisi, a za ulazna seizmička djelovanja uvode se spektri odziva ili akceleroگرامи. Pri tome, spektri odziva imaju širu primjenu u praktičnim inženjerskim proračunima, a korištenje akceleroگرامа je znatno rjeđe. Međutim, ako se proračun konstrukcije zasniva na nelinearnoj dinamičkoj analizi (NDA), tada se moraju koristiti akceleroگرامи. Zabilježeni i dodatno obrađeni zapisi prirodnog pomicanja tla, odnosno akceleroگرامи potresa koji su se dogodili u prošlosti, mogu se preuzimati iz nekoliko postojećih baza potresa. Primjena NDA analize je vezana uz projektiranje novih građevina koje su od posebne važnosti, kao što su mostovi, visoke zgrade, velike dvorane, dok je primjena IDA analize više u kontekstu procjene karakteristika (performansi) konstrukcija pri nelinearnom ponašanju i kod procjene stanja postojećih građevina. U tom smislu odluku o izboru akceleroگرامа prirodnih potresa ili umjetnih akceleroگرامа treba donositi ovisno o tome raspolaže li se za projektnu lokaciju prikladnom bazom akceleroگرامа prirodnih potresa. Ako se ne raspolaže takvom bazom akceleroگرامа, tada treba razmotriti mogućnost korištenja drugih akceleroگرامа prirodnih potresa koji mogu biti zamjenjujući (adekvatni) ili ih treba učiniti kompatibilnim (*spectral matching*), odnosno prilagoditi prema spektru odziva iz propisa. Druga opcija je da se generiraju umjetni ili sintetički akceleroگرامи, tako da njihovi spektri budu prilagođeni spektru odziva iz propisa. Ne raspolaže li se adekvatnom bazom akceleroگرامа prirodnih potresa, tada se, ako nije dostupan adekvatni broj akceleroگرامа prirodnih potresa i da se bolje razmotri nelinearni odziva konstrukcije, mogu uzeti u obzir i generirani umjetni ili sintetički akceleroگرامи. Metode kojima se kreiraju, odnosno generiraju odgovarajući umjetni akceleroگرامи, jesu:

- metode koje se zasnivaju na modifikaciji postojećih akceleroگرامа,
- metode u vremenskom području: filtrirani bijeli šum, *Kanai-Tajimijev* filter, autoregresivno prosječno kretanje (ARMA),
- metode u frekvencijskom području.

Modifikacija postojećih akceleroگرامа zasniva se na smanjenju koraka vremena akceleroگرامа, pri čemu se mijenja frekvencijski sastav zapisa. Spektar odziva modificiranog akceleroگرامа korigira se približavajući se projektnom (ciljnom) spektru odziva. Druga opcija je da se modificirani spektar odziva sastavi iz dva ili više spektara odziva, približavajući se tako projektnom spektru odziva i preko amplituda spektralnog ubrzanja i preko frekvencije. Metode u vremenskoj domeni zasnivaju se na propuštanju bijelog šuma ili akceleroگرامа kroz filtre, mijenjajući amplitude i/ili frekvencijski sastav. Primjenom *Kanai-Tajimijeva* filtra varira se intenzitet gibanja tla u tijeku vremena, ali se ne mijenja frekvencijski sastav. U slučaju stvarnih potresa, promjena je frekvencije u tijeku vremena, između ostalog, posljedica prolaska longitudinalnih,

transverzalnih i površinskih valova. Najčešće korištena metoda korekcije u vremenskoj domeni je ARMA metoda, gdje se jedan ili više realnih akceleroگرامа koristi za generiranje više stotina sličnih akceleracija umjetnih akceleroگرامа, koje su u statistički prihvatljivim granicama.

Metode u frekvencijskom području se zasnivaju na diskretnim ili brzim *Fourierovim* transformacijama, pri čemu postoji mogućnost da se akceleroگرام rastavi na njegov *Fourierov* amplitudni spektar i spektar faznog kuta. Primjenom funkcije slučajnih brojeva za spektar faznog kuta, rekonvolucijom se generira novi akceleroگرام sličnog frekvencijskog sastava, ali različitih vremenskih karakteristika. Na taj se način spektar odziva generiranog akceleroگرامа može uskladiti (eng. *spectral matching*) prema projektnom spektru odziva. Od prethodno razmatranih metoda najviše se primjenjuju i dodatno razvijaju metode u vremenskom i frekvencijskom području.

Generiranje kretanja tla kao nestacionarnog procesa s vremenski promjenljivim intenzitetom i frekvencijskim udjelom moguće je provesti kao:

- model nestacionarnog slučajnog procesa s funkcijama modulacije vremena i frekvencije [1],
- model stohastičkog procesa koji se zasniva na intenzitetu, modulaciji frekvencije i funkcije spektralne gustoće snage [2],
- model autoregresivnog vremenski promjenljivog prosječnog kretanja [3],
- model neuronskih mreža [4],
- model transformacije valičima [5].

Umjetni akceleroگرامи generirani prema nekom od prethodno definiranih postupaka imaju široku primjenu u analizi konstrukcija na djelovanje potresa. U radu [6] prikazan je seizmički odziv konstrukcija određen NDA analizom, pri čemu su korišteni umjetni akceleroگرامи generirani primjenom metode razlika u fazama implementirane u računalni program NCUARTEQ za 1D i 2D model tla. U radu [7] razmatrani su aspekti selekcije kompatibilnih umjetnih akceleroگرامа za NDA analizu armiranobetonskih (AB) zgrada. Umjetni akceleroگرامи su generirani modifikacijom realnih akceleroگرامа, primjenom diskretne transformacije valičima, tako da su njihovi spektri odziva kompatibilni s projektnim spektrom. U radu [8] prikazane su procedure za skaliranje i kreiranje umjetnih akceleroگرامа, čiji su spektri odziva kompatibilni sa spektrima odziva prema propisima. Akceleroگرامи su generirani primjenom računalnih programa SIMQKE, TARCTHS i RSPMatch.

Generiranje umjetnih akceleroگرامа transformacijom valičima, koji se zasnivaju na postojećim akceleroگرامima, prikazano je u radu [9]. U radu [10] je prikazana komparativna NDA analiza za prirodne, kompatibilne, umjetne, prirodne usklađene, kao umjetne i prirodne skalirane akceleroگرامе. Istraživanje je provedeno na sustavu s jednim stupnjem slobode (SDOF) različitih perioda titranja uzimajući u obzir histerezno ponašanje za uvjete djelovanja potresa. Studija analize promjenljivosti maksimalnog odziva konstrukcija s elastoplastičnim ponašanjem i izloženim djelovanjem umjetnih akceleroگرامа prikazana

je u radu [11]. U radu [12] je primijenjeno nekoliko procedura kreiranja kompatibilnih akceleroograma za NDA analizu SDOF sustava: neskalinani akceleroogrami realnih potresa, skalirani akceleroogrami, dodatno skalirani akceleroogrami, akceleroogrami korigirani primjenom teorije valića, nestacionarni umjetni generirani akceleroogrami i stacionarni umjetni generirani akceleroogrami.

Procedure koje se provode nad prirodnim i umjetnim akceleroogramima su: selekcija, formatiranje, konvertiranje, skaliranje, kalkulacija, procesiranje, kompatibilizacija, normalizacija, filtriranje, generiranje i transformacija. Određene procedure su međusobno kompatibilne ili komplementarne, a određene su međusobno nezavisne. S druge strane, nije uvijek potrebno provoditi sve ove procedure pri seizmičkim proračunima konstrukcija. Kod akceleroograma prirodno zabilježenih potresa, procedura selekcije (odabira) provodi se u dva nivoa: preko baza akceleroograma koje su dostupne na internetu i naknadnom detaljnijom selekcijom prema novim kriterijima. Kod umjetnih akceleroograma proces je selekcije reduciran jer se ti akceleroogrami generiraju na osnovi unaprijed postavljenih kriterija, tako da se u samoj fazi generiranja odlučuje i o selekciji parametara budućeg umjetnog akceleroograma.

U ovom radu razmatrani su učinci varijacije parametara umjetnih akceleroograma na seizmičke karakteristike konstrukcija određene IDA analizom. Istraživanje je provedeno na sustavu s jednim stupnjem slobode (SDOF) uz korištenje elastičnog spektra odziva prema EN 1998-1. Sustav je razmatran s elastoplastičnim histereznim ponašanjem uzimajući u obzir da je nelinearna krutost pozitivna i negativna. U analizi su razmatrane po dvije grupe, svaka po deset umjetnih akceleroograma s po tri trajanja i po dvije različite krutosti u nelinearnoj domeni. Za svaku IDA analizu provedeno je po 30 nelinearnih dinamičkih analiza, što je ukupno 3600 NDA analiza. Za ocjenu karakteristika sustava analizirani su seizmički odzivi i seizmičko oštećenje. Cilj je rada da se kroz analizu rezultata pokaže:

- važnost izbora (selekcija) pojedinih parametara umjetnih akceleroograma,
- utjecaj varijacije parametara umjetnih akceleroograma,
- utjecaj parametara umjetnih akceleroograma na seizmički odziv konstrukcija,
- da se dopuni i detaljnije odredi strategija za generiranje umjetnih akceleroograma, a u skladu s EN 1998-1 propisima.

2. Generiranje umjetnih akceleroograma

Procedura generiranja umjetnih akceleroograma provedena je primjenom programa SIMQKE [13], pri čemu se akceleroogram u konačnoj formi može prikazati superpozicijom sinusnih funkcija prema [14]:

$$a(t) = I(t) \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

gdje je $I(t)$ anvelopa amplituda generiranog akceleroograma, A_i amplituda, ω_i kutna frekvencija, φ_i fazni kut i -te sinusoide

koji se generira funkcijom slučajnog broja u intervalu 0 do 2π s ravnomjerno raspodijeljenom vjerojatnošću. Amplituda A_i je u korelaciji s funkcijom spektralne gustoće $G(\omega)$ kretanja tla, a koja je u korelaciji sa spektralnim ubrzanjem definiranim prema projektnom spektru odziva. Takva procedura kreiranja akceleroograma veoma je povoljna jer se za projektni spektar odziva može kreirati reprezentativni akceleroogram. Također, tako stvoren akceleroogram je skaliran i kompatibilan prema danom projektnom spektru odziva. Umjetni akceleroogrami generirani prema prethodno opisanoj proceduri su stacionarni u vremenu s obzirom na frekvencijski sastav, a nestacionarni s obzirom na amplitudu kretanja, tako da su u generalnom smislu nepotpuno-nestacionarni umjetni akceleroogrami.

Za potrebe istraživanja, prezentiranog u ovom radu, korišten je projektni elastični spektar odziva prema EN 1998-1 (EC 8) [15] tip 1 i tip tla B, pri čemu je projektno ubrzanje tla $a_g = 0,3 g$, koeficijent tla $S = 1,2$, koeficijent prigušenja $\xi = 5\%$ i odgovarajući periodi titranja $T_B = 0,15 s$, $T_C = 0,5 s$ i $T_D = 2,0 s$. Elastični spektar odziva prema propisima i spektri odziva generiranih umjetnih akceleroograma su razvijeni do perioda titranja $T_{max} = 4 s$. Primjenom ovako definiranog elastičnog spektra odziva prema EC 8 mogu se generirati umjetni akceleroogrami za površinske magnitude $M_s > 5,5$. Interval perioda vibracija koji treba razmatrati pri generiranju umjetnih akceleroograma je od $0,2T_1$ do $2T_1$, pri čemu je T_1 period titranja prvog svojstvenog oblika konstrukcije. Za potrebe ovog istraživanja razmatrana je cjelokupna domena perioda titranja. Radi što bolje simulacije i prezentacije umjetnih akceleroograma, korištena je trapezna anvelopa s vremenom početka i završetka stacionarnog područja $t_{s,i} = 2 s$, odnosno $t_{s,f} = 12 s$. Preporuke su EC 8 da vrijeme trajanja stacionarnog dijela akceleroograma bude minimalno 10 s. Parametarska analiza je izvršena za ukupno vrijeme trajanja akceleroograma t_{acc} i broj ciklusa (iteracija) kojim se poboljšava usklađenost spektra odziva generiranog akceleroograma N_{it} . Ukupno vrijeme trajanja akceleroograma je razmatrano kao $t_{acc} = 20 s$, $t_{acc} = 40 s$ i $t_{acc} = 60 s$, dok je broj ciklusa kojim se poboljšava usklađenost spektra odziva generiranog akceleroograma razmatran kao $N_{it} = 1$ i $N_{it} = 20$. Broj N_{it} ima velik utjecaj na generiranje umjetnih akceleroograma, s obzirom na to što se povećanjem toga broja znatno utječe na frekvencijski sastav akceleroograma. S druge strane, povećanjem broja ciklusa dobiva se nešto veći broj lokalnih ekstrema (pikova) akceleracija, čije vrijednosti teže apsolutnoj vrijednosti maksimalne akceleracije. Akceleroogrami su zapisani koristeći interval $\Delta t = 0,01 s$, tako da je odgovarajuća frekvencija zapisa $f_s = 100 Hz$. Korišteni su različiti brojevi za iniciranje generiranja slučajnih brojeva radi postizanja veće razlike u konačnoj formi akceleroograma. Generirani umjetni akceleroogrami su dodatno obrađeni primjenom tehnike za korekciju nulte linije i filtriranjem visokopropusnim *Butterworth* filtrom propuštajući frekvencije $f > 0,2 Hz$. Nedostaci koji su mogući kod ovako generiranih umjetnih akceleroograma jesu pojava velikog broja ciklusa jakog kretanja tla i evidentno visoka količina energije. Za svaku grupu je generirano po deset umjetnih akceleroograma, tako da je ukupno generirano 60 akceleroograma.

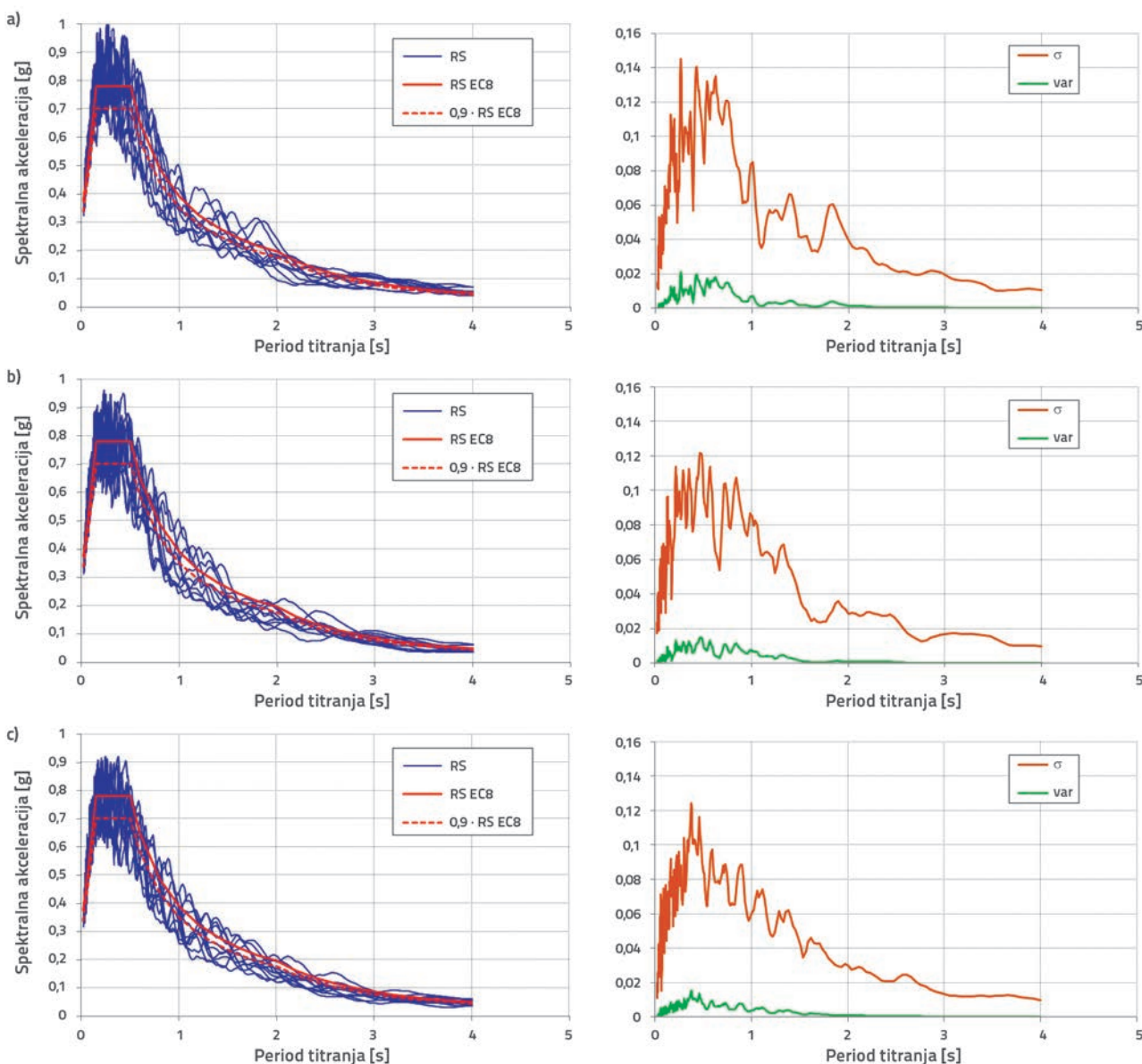
Na lijevoj strani slike 1. prikazani su spektri odziva generiranih umjetnih akcelorograma za $N_{it} = 1$, elastični spektar odziva prema EC 8 i reducirani elastični spektar odziva prema EC 8 za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s. Reduciran elastični spektar odziva prema EC 8 je određen množenjem spektralne akceleracije s 0,9 (90% $S_{a,i}$). S obzirom na to da je pri generiranju umjetnih akcelorograma korišteno $N_{it} = 1$ iteracija, to postoji i odgovarajuće odstupanje njihovih spektara odziva u odnosu na elastični spektar odziva prema EC 8. Najveće odstupanje je u području konstantnog ubrzanja, a također značajno je i u području velikog utjecaja brzine, dok se odstupanje smanjuje pri povećanju perioda titranja. Na desnoj strani slike 1. su prikazane standardne devijacije σ spektara odziva [16]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (S_{a,i} - S_{a,m})^2}{n-1}} \tag{2}$$

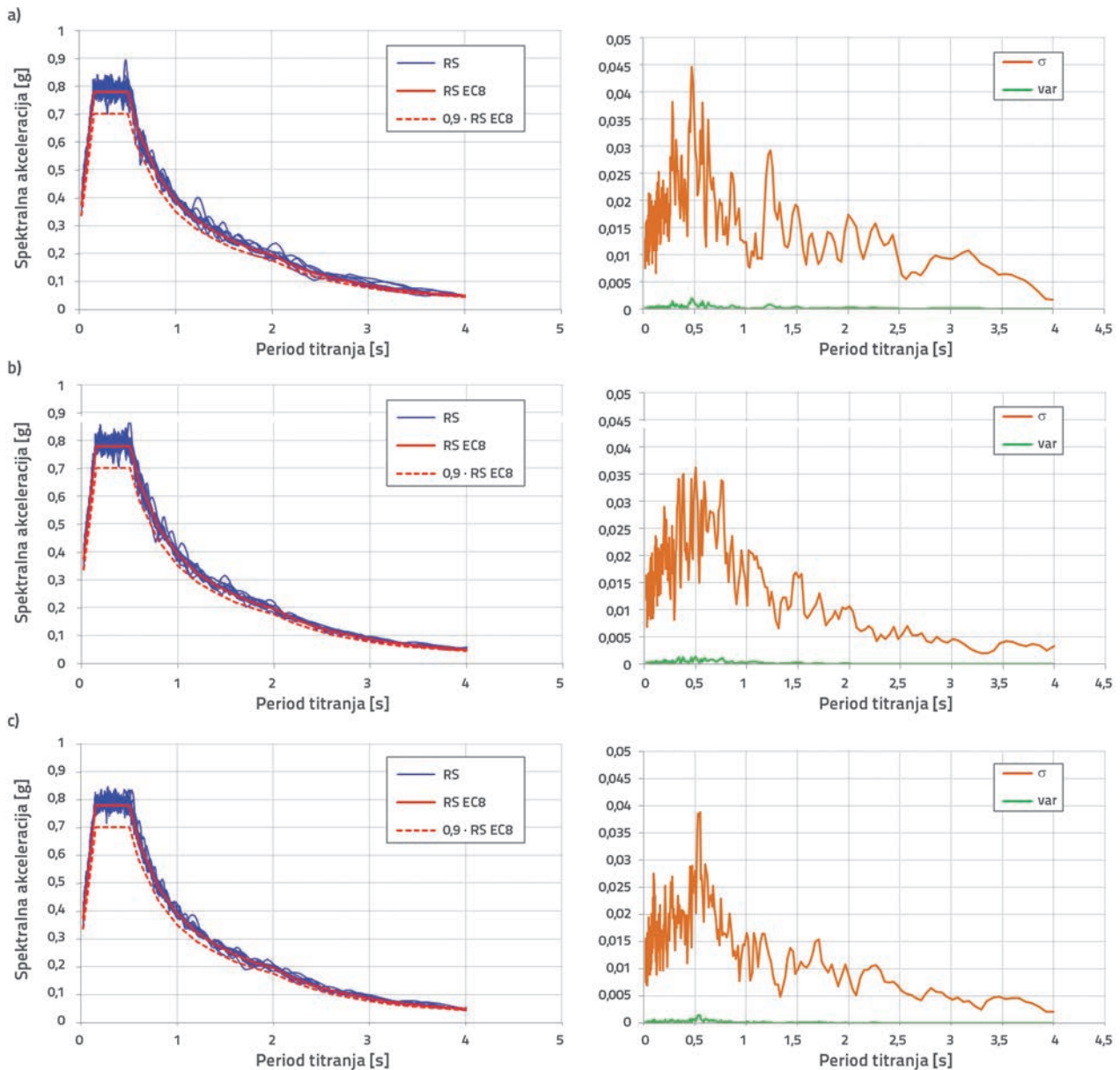
i varijanca spektara odziva generiranih umjetnih akcelorograma var:

$$\text{var} = \frac{\sum (S_{a,i} - S_{a,m})^2}{n-1} \tag{3}$$

gdje je $S_{a,i}$ i -ta spektralna akceleracija, $S_{a,m}$ srednja vrijednost spektralnih akceleracija, n ukupan broj spektralnih akceleracija koji se razmatra. Navedenu konstataciju o odstupanjima spektralnih akceleracija potvrđuje promjena standardne devijacije, gdje je do vrijednosti od $0 < T < 2$ s značajno odstupanje, a smanjuje se povećanjem perioda titranja za $T > 2$ s.



Slika 1. Spektri odziva generiranih umjetnih akcelorograma za $N_{it} = 1$, elastični spektar odziva prema EC 8, reducirani elastični spektar odziva prema EC 8, odgovarajuća standardna devijacija σ i varijanca var: a) $t_{acc} = 20$ s; b) $t_{acc} = 40$ s; c) $t_{acc} = 60$ s



Slika 2. Spektri odziva generiranih umjetnih akceleroograma za $N_{it} = 20$, elastični spekter odziva prema EC 8, reduciran elastični spekter odziva prema EC 8, odgovarajuća standardna devijacija σ i varijanca var : a) $t_{acc} = 20$ s; b) $t_{acc} = 40$ s; c) $t_{acc} = 60$ s

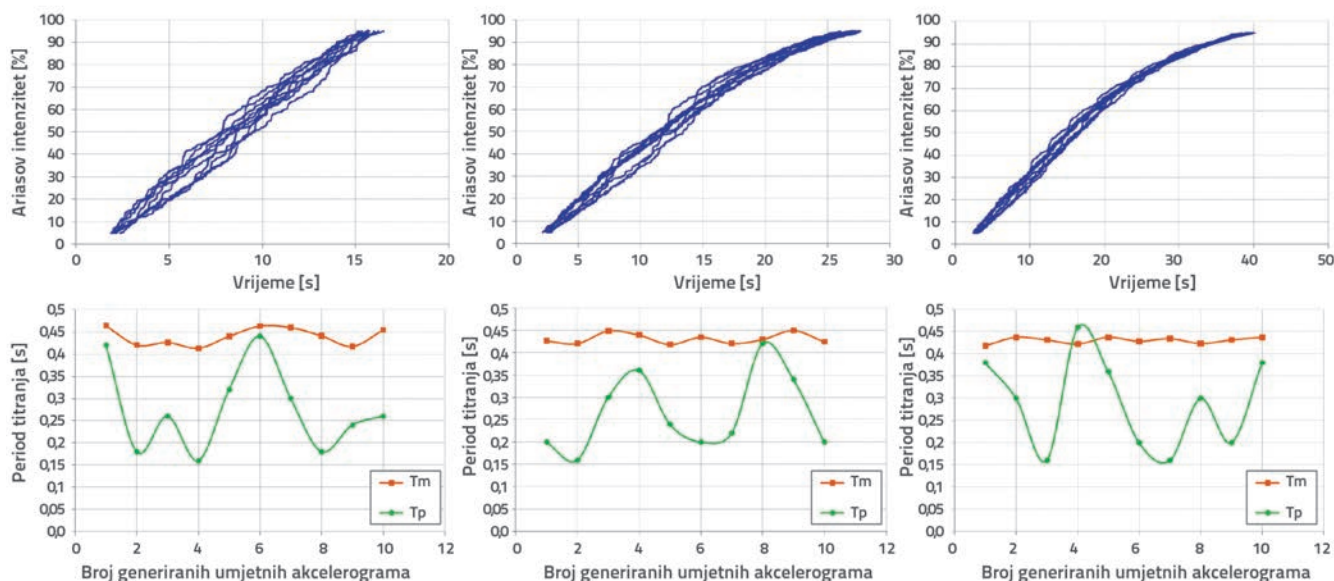
Također, statistički parametar varijanca upućuje na smanjenje odstupanja u području viših perioda titranja.

Na lijevoj strani slike 2. prikazani su spektri odziva generiranih umjetnih akceleroograma za $N_{it} = 20$, elastični spekter odziva prema EC 8 i reduciran elastični spekter odziva prema EC 8 za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s, dok su na desnoj strani slike 2. prikazane standardne devijacije σ i varijance var . S obzirom na to da je pri generiranju umjetnih akceleroograma korišteno $N_{it} = 20$ iteracija, to je znatno bolja usklađenost elastičnog spektra odziva prema EC 8 elastičnim spektrima odziva generiranih umjetnih akceleroograma.

Odstupanje spektra odziva generiranih umjetnih akceleroograma je najveće u području konstantnog ubrzanja, ali je sada znatno manje,

u odnosu na prethodne slučajeve generiranih akceleroograma za $N_{it} = 1$. Tako generirani umjetni akceleroograma su kompatibilni sa spektrom odziva prema propisu. Provjera kompatibilnosti je izvršena smanjenjem odnosno povećanjem spektralnih ubrzanja elastičnog spektra odziva za 10 %, a zatim su analizirane vršne vrijednosti spektra odziva umjetnih akceleroograma u odnosu na raspon između smanjenog i povećanog elastičnog spektra odziva. Dobiveni su zadovoljavajući rezultati. Standardna devijacija za $N_{it} = 20$ je smanjena nekoliko puta, i to:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{N_{it}=1} / \sigma_{N_{it}=20} &= 3,22 & t_{acc} &= 20 \text{ s} \\
 \sigma_{N_{it}=1} / \sigma_{N_{it}=20} &= 3,33 & t_{acc} &= 40 \text{ s} \\
 \sigma_{N_{it}=1} / \sigma_{N_{it}=20} &= 3,21 & t_{acc} &= 60 \text{ s}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$



Slika 3. Dijagrami vremena značajnog trajanja za Ariasov intenzitet u intervalu od 5% do 95% vremena trajanja generiranih umjetnih akceleroograma za $N_{it} = 1$ i odgovarajući prosječan period T_m i dominantan period T_p : a) $t_{acc} = 20$ s; b) $t_{acc} = 40$ s; c) $t_{acc} = 60$ s

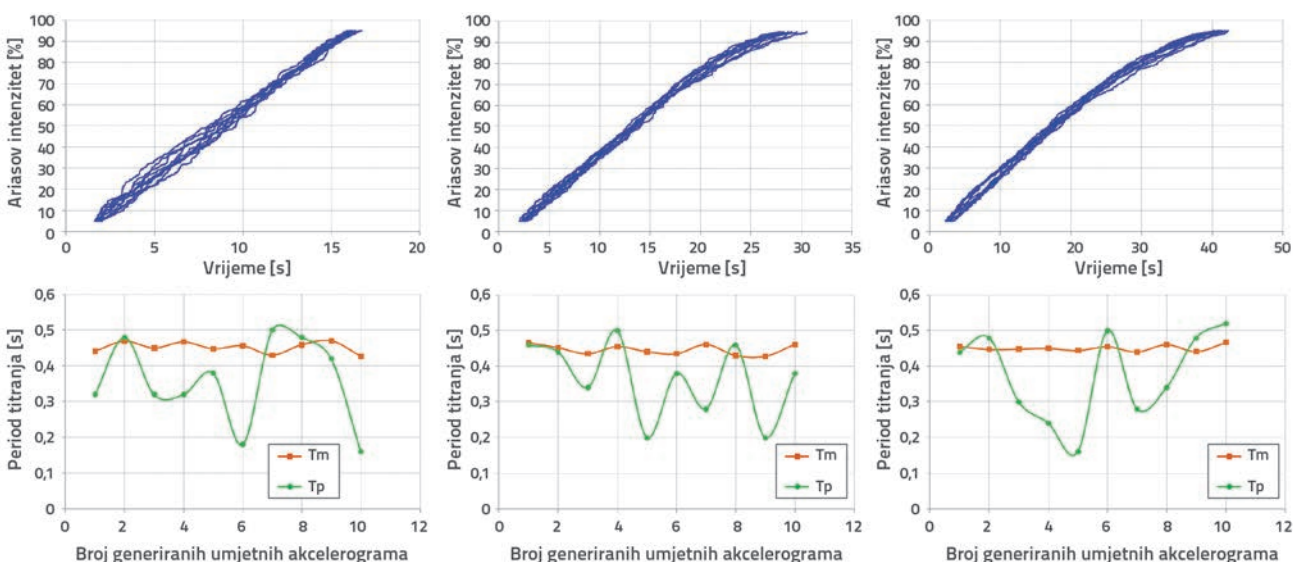
Na slici 3. su prikazani dijagrami vremena značajnog trajanja umjetnih akceleroograma za $N_{it}=1$ i odgovarajući prosječan T_m i predomnantan T_p period za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s. Na apscisi su prikazane vrijednosti broja generiranih umjetnih akceleroograma (uzorak) n . Vrijeme značajnog trajanja je razmatrano za Ariasov intenzitet [17]:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{acc}} [a(t)]^2 dt \tag{5}$$

u intervalu od 5% do 95% vremena trajanja generiranih umjetnih akceleroograma. Prosječan period T_m je parametar za procjenu frekencijskog sastava [18]:

$$T_m = \frac{\sum C_i^2 / f_i}{C_i^2} \tag{6}$$

gdje je C_i Fourierova amplituda, f_i frekvencije u intervalu 0,25-20 Hz diskretne Fourier-ove transformacije. Dominantan period T_p je period koji odgovara maksimalnom spektralnom ubrzanju na spektru odziva pri pet postotnom prigušenju. Na slici 4. su prikazani dijagrami vremena značajnog trajanja umjetnih akceleroograma za $N_{it} = 20$ i odgovarajući prosječan T_m i dominantan T_p period za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s. Usporedbom vremena značajnog trajanja umjetnih akceleroograma za $N_{it} = 1$ i $N_{it} = 20$ može se ustanoviti evidentna



Slika 4. Dijagrami vremena značajnog trajanja za Ariasov intenzitet u intervalu od 5% do 95% vremena trajanja generiranih umjetnih akceleroograma za $N_{it} = 20$ i odgovarajući prosječan period T_m i dominantan period T_p : a) $t_{acc} = 20$ s; b) $t_{acc} = 40$ s; c) $t_{acc} = 60$ s

razlika u ovim vremenima. Kod umjetnih akcelorograma sa $N_{it} = 20$ ostvareno je veće vrijeme značajnog trajanja, a također i manja disipacija međuvrijednosti. Ovo je direktna posljedica razlike u diskretnim vrijednostima akceleracija koje su dobivene generiranjem umjetnih akcelorograma i značajnije odstupanje kod $N_{it} = 1$. Odstupanja u prosječnim periodima T_m kod obje grupe umjetnih akcelorograma i za različito ukupno vrijeme trajanja akcelorograma t_{acc} minimalna su. Vrijednosti dominantnih perioda T_p za $N_{it} = 1$ su manje od prosječnog perioda T_m , izuzev jednog slučaja, dok kod $N_{it} = 20$ postoji veći broj diskretnih vrijednosti dominantnog perioda T_p koje su veće od prosječnog perioda T_m i to za sva vremena trajanja generiranih umjetnih akcelorograma.

3. Analiza seizmičkih karakteristika

Karakteristike bilinearnog elastoplastičnog SDOF sustava s histereznim modelom ponašanja razmatrane su primjenom analize seizmičkog odziva i analize seizmičkog oštećenja. Kod analize seizmičkog odziva primijenjena je inkrementalna dinamička analiza (IDA), a odziva sustava je razmatran u području nosivosti.

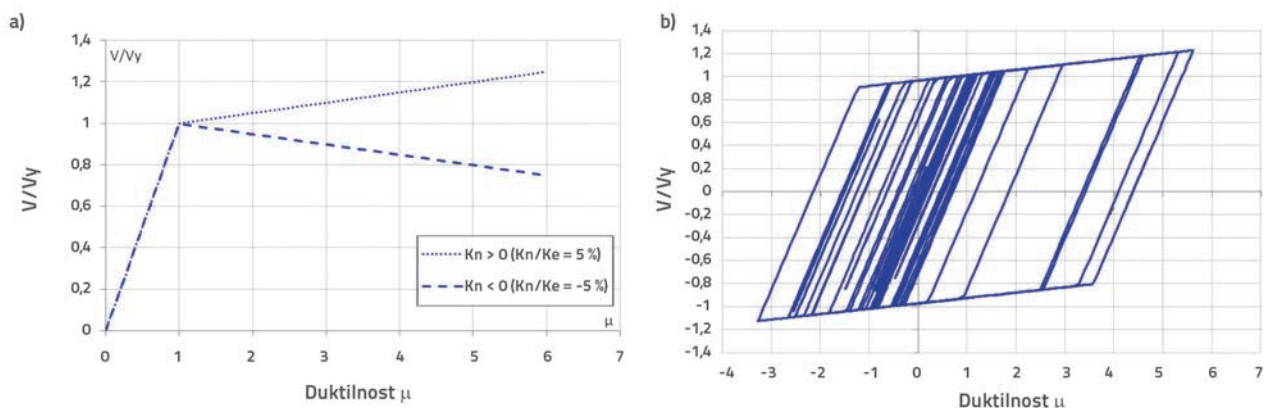
Na slici 5.a su prikazani elastoplastični modeli s pozitivnom $K_n > 0$ ($K_n / K_e = 5\%$) i negativnom $K_n < 0$ ($K_n / K_e = -5\%$) nelinearnom krutosti, pri čemu je K_e elastična krutost, dok je na slici 5.b prikazan odgovarajući histereznim model za $K_n > 0$. U prezentaciji bilinearnog elastoplastičnog modela ponašanja korištene su relativne koordinate, tako da je na apscisi prikazana duktilnost μ , dok je na ordinati sila V reducirana silom na granici tečenja V_y . Za domenu linearno elastičnog ponašanja vrijedi $0 < \mu \leq 1$ i $0 < V / V_y \leq 1$, a za domenu nelinearnog ponašanja važi $1 < \mu \leq 6$ i $V / V_y > 0$. Vrijednost maksimalne raspoložive duktilnosti je ograničena na $\mu_{max} = 6$, tako da se za sustav podrazumijeva da ima mogućnost razvoja duktilnosti visoke klase (DCH). Period titranja sustava je $T = 1$ s, dok je masa m na sustavu određena iz trivijalnog izraza za period vibracija SDOF sustava $\omega^2 = K_e / m$.

IDA algoritam je proveden uzastopnim skaliranjem akcelorograma po maksimalnom ubrzanju tla (PGA), a pri tom je praćen nelinearan odziva konstrukcije. Prethodno su akcelorogrami ponovno

skalirani na početno PGA_0 i određen je prirast faktora skaliranja ΔF_s tako da se sustav pri IDA analizi može dovesti u stanje otkazivanja. Za svaku pojedinačnu IDA analizu je provedeno po 30 nelinearnih dinamičkih analiza (NDA). S obzirom na to da su se razmatrale po dvije grupe umjetnih akcelorograma ($N_{it} = 1$ i $N_{it} = 20$) sa po tri različita trajanja akcelorograma ($t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s), po dvije različite krutosti u nelinearnom području ($K_n > 0$ i $K_n < 0$) i za svaku grupu po deset umjetnih akcelorograma, to je ukupan broj provedenih NDA analiza 3600. U analizi je nelinearni odziv sustava razmatran varijacijom parametara umjetnih akcelorograma i parametra konstrukcije.

Za svaku NDA analizu, pri nivou skaliranja umjetnog akcelorograma PGA_f razmatran je odziv sustava na osnovi pomaka u vremenu. Zatim je određen maksimalni pomak $D_{max,i}$ za dano PGA_f tako da su dobiveni diskretni uređeni parovi ($D_{max,i} / PGA_f$). Prikaz odziva sustava iz IDA analize i analize karakteristika moguća je s različitim inženjerskim parametrima odziva (eng. *Engineering Demand Parameters* - EDP) i mjerama intenziteta (IM). Uobičajeno je da se odnos EDP-IM prezentira preko $IDR_{max} - S_o(T, 5\%)$, gdje je IDR_{max} maksimalni međukatni pomak, a $S_o(T, 5\%)$ spektralno ubrzanje za prvi vlastiti oblik pri razini prigušenja od 5% [19]. S obzirom na to da se ovo istraživanje zasniva na SDOF sustavu, to je za EDP parametar korištena duktilnost μ , a za IM mjeru $S_o(T, 5\%) / S_{o,y}(T, 5\%)$, gdje je $S_{o,y}(T, 5\%)$ spektralno ubrzanje na granici tečenja. Normalizacija za EDP je izvršena preko $\mu_i = D_{max,i} / D_y$ gdje je D_y pomak na granici tečenja, dok je normalizacija za IM izvršena preko $S_o(T, 5\%) / S_{o,y}(T, 5\%)$ u odnosu na PGA_f . Na taj način dobiveni su diskretni uređeni parovi ($\mu_f, S_o(T, 5\%) / S_{o,y}(T, 5\%)$) interpolirani dijelovima polinoma nižeg stupnja (*spline*), a u konačnoj formi konstruirana je IDA krivulja $S_o / S_{o,y}(\mu)$. Na slici 6. su prikazane $S_o / S_{o,y}(\mu)$ krivulje određene IDA analizom sustava s krutošću $K_n > 0$ ($K_n / K_e = 5\%$) za $N_{it} = 1$, $N_{it} = 20$ i to za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s, $t_{acc} = 60$ s, dok su na slici 7 prikazane te krivulje određene IDA analizom sustava s krutošću $K_n < 0$ ($K_n / K_e = 5\%$) za $N_{it} = 1$, $N_{it} = 20$ i to za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s, $t_{acc} = 60$ s. Također, prikazane su i krivulje statistički određene za srednju vrijednost $S_o / S_{o,y}(\mu)_{mr}$ srednju vrijednost +/- standardna devijacija σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum ((S_o / S_{o,y})_i - (S_o / S_{o,y})_m)^2}{n - 1}} \quad (7)$$



Slika 5. a) Bilinearni elastoplastični modeli za $K_n > 0$ ($K_n / K_e = 5\%$) i $K_n < 0$ ($K_n / K_e = -5\%$); b) histereznim model za $K_n > 0$

gdje je $(S_o / S_{o,y})_m$ srednja vrijednost i krivulja normalne raspodjele [16] $S_o(T, 5\%) / S_{o,y}(T, 5\%)$:

$$f((S_o / S_{o,y})_i, (S_o / S_{o,y})_m, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{((S_o / S_{o,y})_i - (S_o / S_{o,y})_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

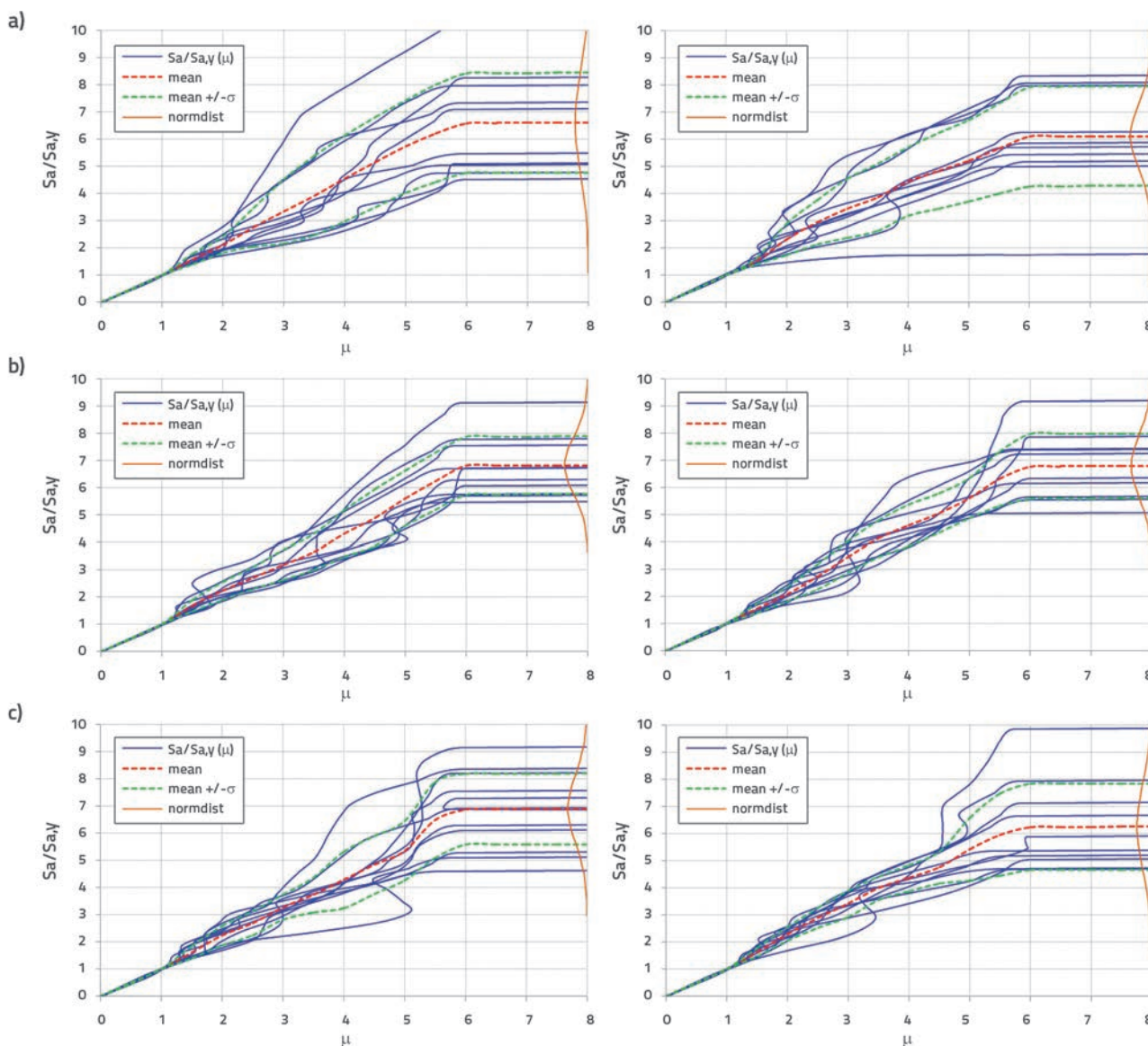
Analizom krivulja $S_o / S_{o,y}(\mu)$, koje su prikazane s ovako normaliziranim EDP-IM parametrima, mogu se definirati tri bitno različita područja:

- linearno elastično područje $0 < \mu \leq 1$ i $0 < S_o(T, 5\%) / S_{o,y}(T, 5\%) \leq 1$,
- nelinearno područje $1 < \mu \leq 6$ i $S_o(T, 5\%) / S_{o,y}(T, 5\%) > 1$,
- područje otkazivanja $\mu > 6$ i $S_o(T, 5\%) / S_{o,y}(T, 5\%) > 1$.

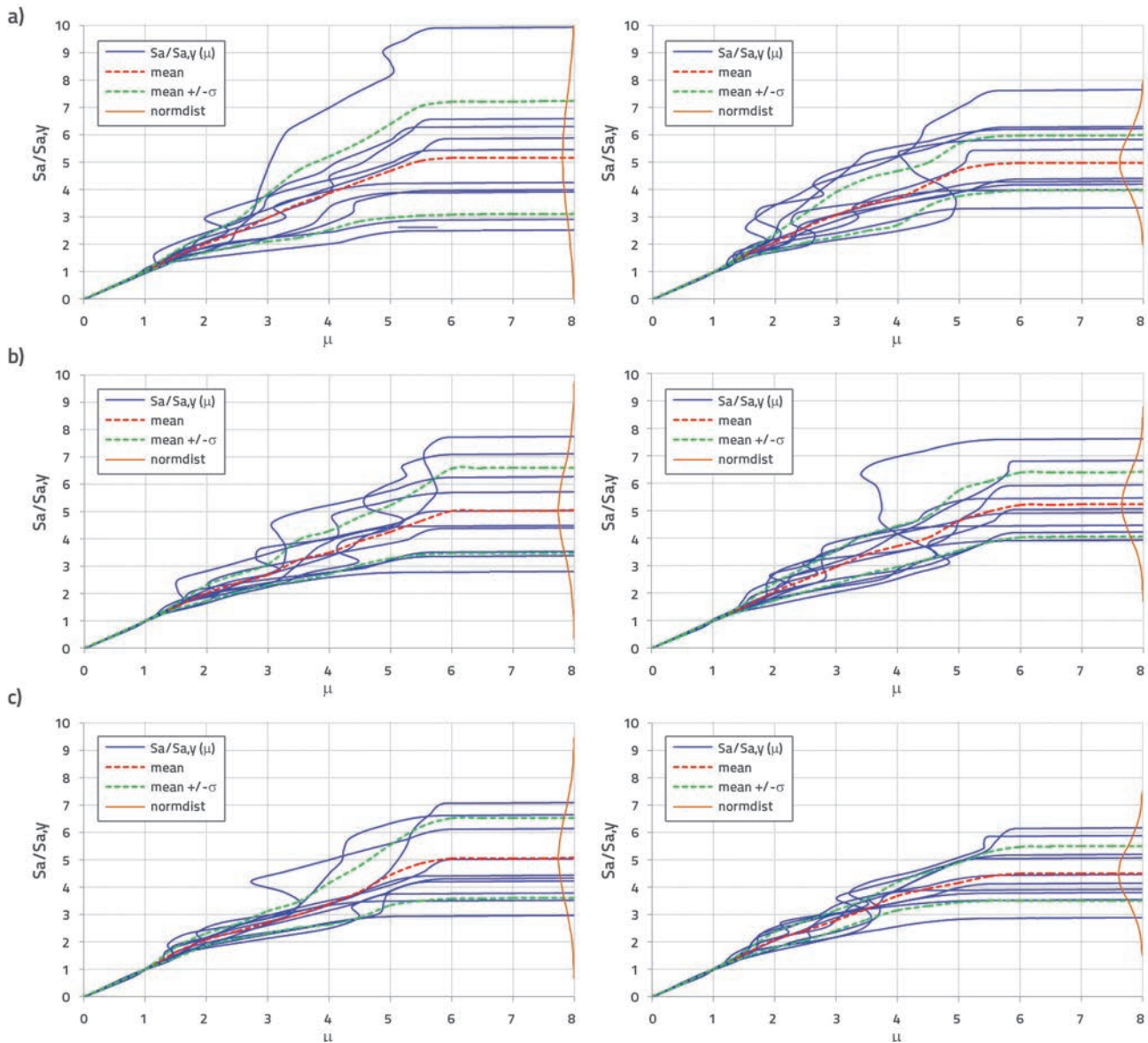
U linearno elastičnom području sve su krivulje kolinearni pravci, tako da ne postoji odstupanje, jer je ovo posljedica

linearno elastičnog ponašanja sustava. Također, uslijed normalizacije koja je izvršena po EDP-IM parametrima, slijedi da je $S_o / S_{o,y}(\mu)$ krivulja u ovom području pravac. U nelinearnom području postoji odstupanje među krivuljama $S_o / S_{o,y}(\mu)$, što je posljedica odziva sustava za generirane umjetne akcelerograme s primijenjenom stohastičkom modulacijom. U području otkazivanja sve $S_o / S_{o,y}(\mu)$ krivulje se asimptotski približavaju horizontali jer se pri skaliranju i -tog akcelerograma i odzivu sustava za $\mu > 6$, a u okviru jedne IDA analize, dobiva izuzetno veliki pomak sustava D_r . S obzirom na to da je duktilnost μ_r za ovaj pomak D_r znatno veća od maksimalno raspoložive duktilnosti $\mu_{max} = 6$ ($\mu_i > \mu_{max}$), to su ove krivulje bliske horizontali.

Usporedba dobivenih $S_o / S_{o,y}(\mu)$ krivulja provedena je na osnovi odnosa tih krivulja (koeficijenta Δ) za $N_{it} = 20 / N_{it} = 1$:



Slika 6. $S_o / S_{o,y}(\mu)$ krivulje određene IDA analizom sustava s krutošću $K_n > 0$ ($K_n / K_o = 5\%$) za $N_{it} = 1$ i $N_{it} = 20$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s

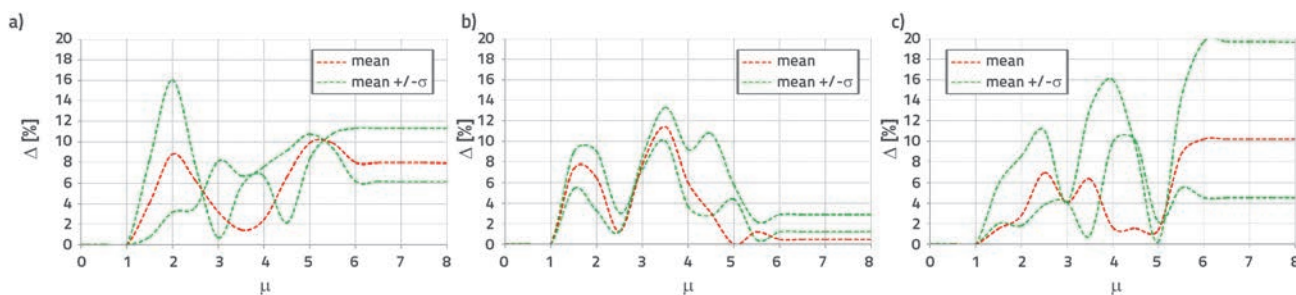


Slika 7. $S_a / S_{a,y}(\mu)$ krivulje određene IDA analizom sustava s krutošću $K_n < 0$ ($K_n / K_e = -5\%$) za $N_{it} = 1$ i $N_{it} = 20$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s

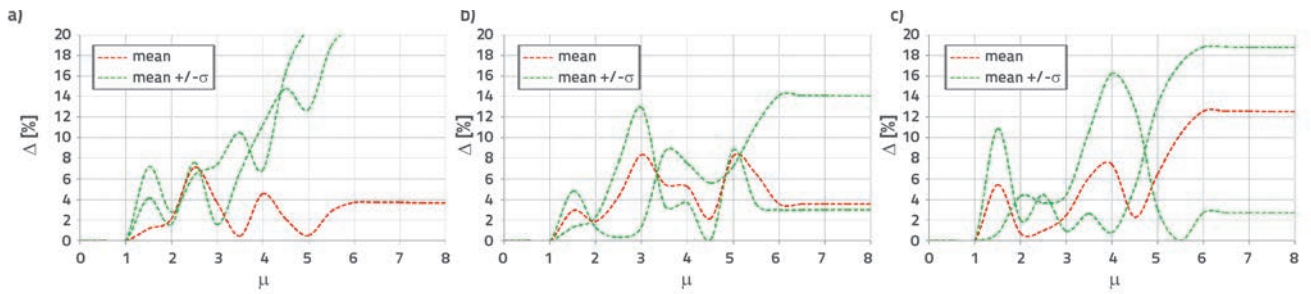
$$\Delta = \left| \frac{(S_a / S_{a,y})_{m,N_{it}=20} - (S_a / S_{a,y})_{m,N_{it}=1}}{(S_a / S_{a,y})_{m,N_{it}=20}} \right| (\%) \quad (9)$$

$$\Delta = \left| \frac{((S_a / S_{a,y})_{m,N_{it}=20} \pm \sigma) - ((S_a / S_{a,y})_{m,N_{it}=1} \pm \sigma)}{(S_a / S_{a,y})_{m,N_{it}=20} \pm \sigma} \right| (\%) \quad (10)$$

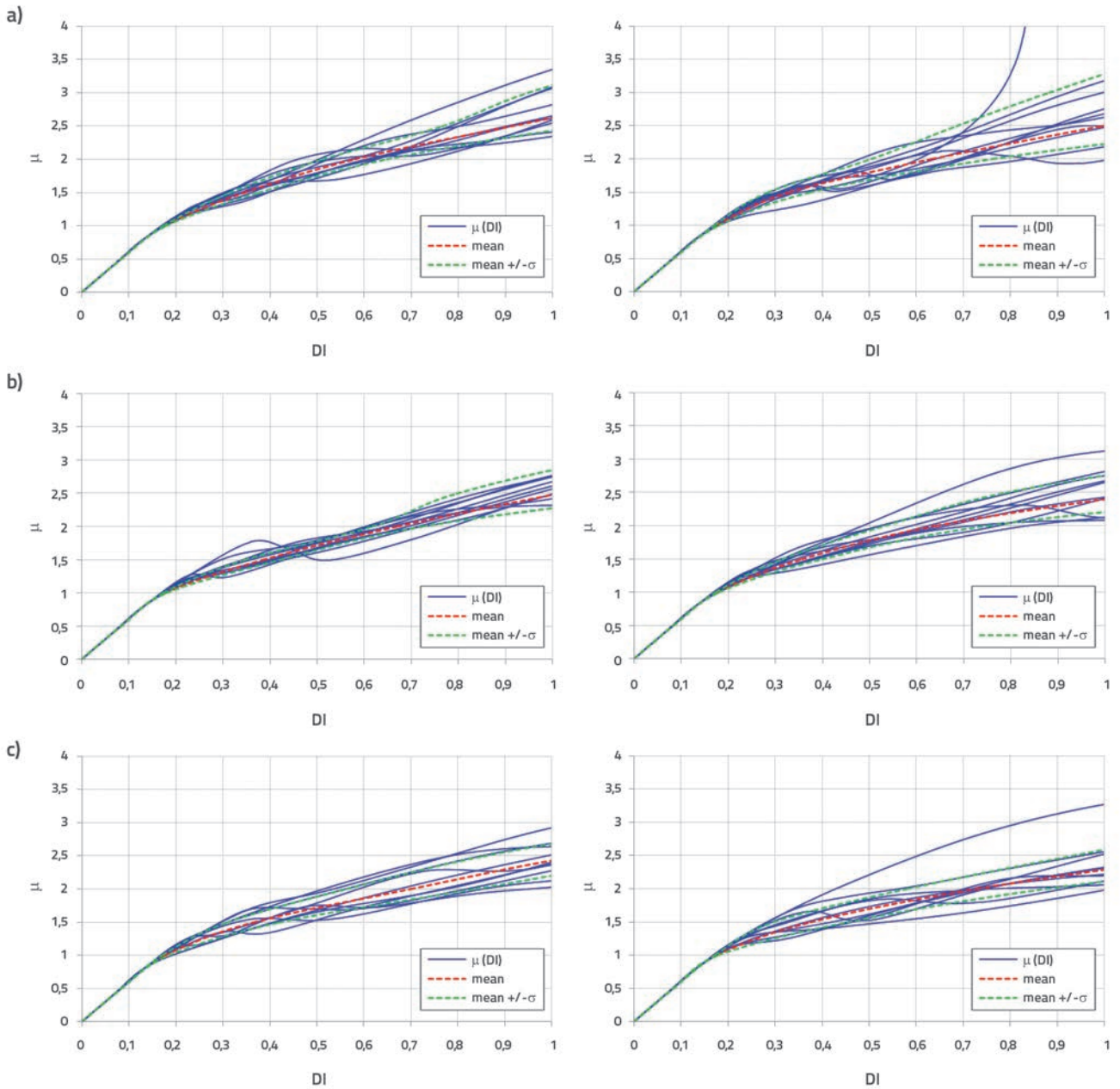
Na slikama 8. i 9. prikazani su izračunani koeficijenti Δ u funkciji promjene duktilnosti sustava za nelinearnu krutost $K_n > 0$ i $K_n < 0$, za vremena trajanja akcelorograma $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s. Razlika u nelinearnim odzivima sustava izračunanim preko koeficijenata Δ za $N_{it} = 20 / N_{it} = 1$ iznosi i do 20 %, što upućuje na utjecaj broja iteracija u generiranju umjetnih akcelorograma.



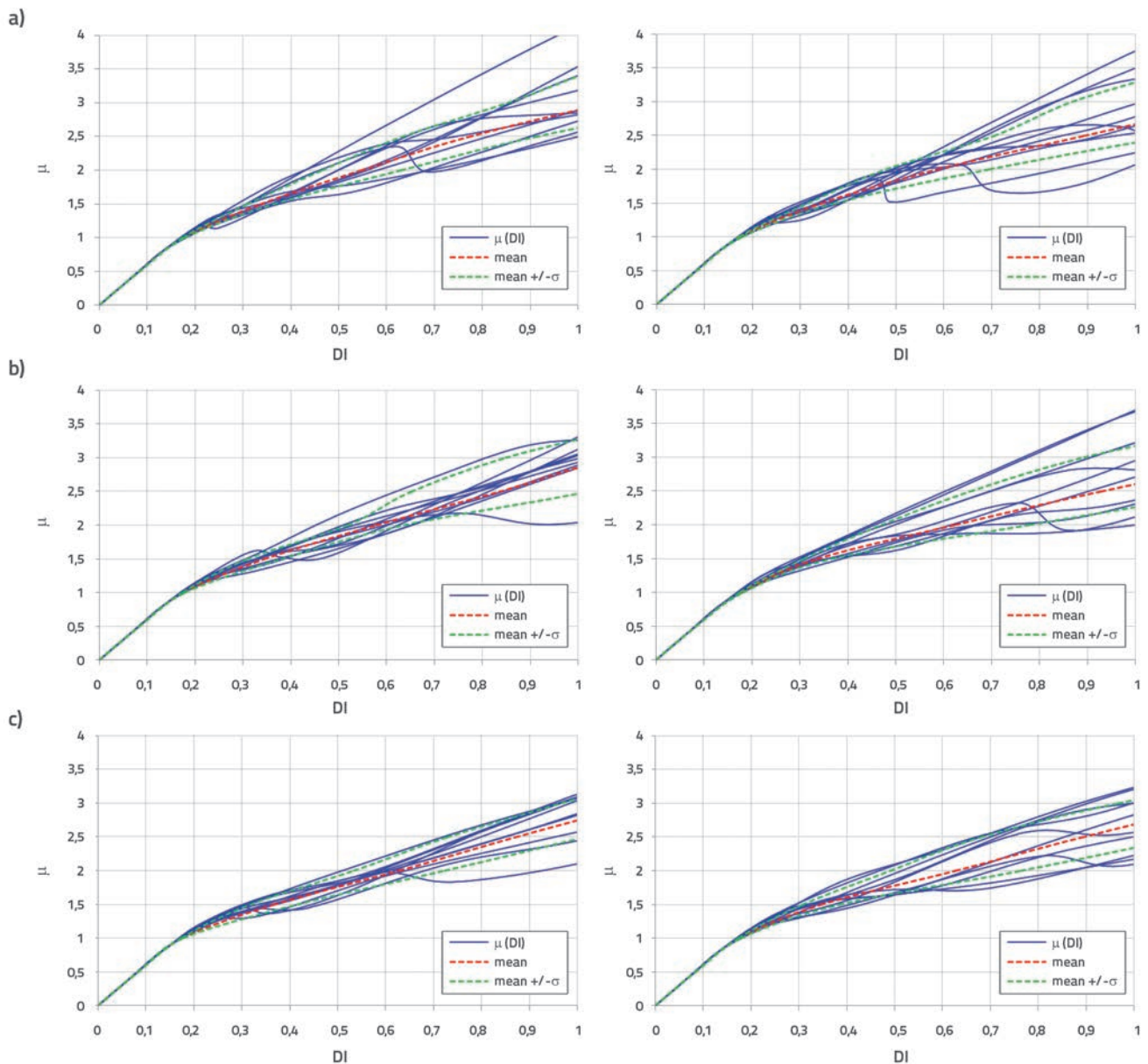
Slika 8. Dijagram izračunanih koeficijenata Δ za krutost $K_n > 0$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s



Slika 9. Dijagram proračunatih koeficijenata Δ za krutost $K_n < 0$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s



Slika 10. Krivulje $\mu(DI)$ određene IDA analizom i analizom oštećenja sustava s krutošću $K_n > 0$ ($K_n / K_e = 5\%$) za $N_{it} = 1$ i $N_{it} = 20$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s



Slika 11. Krivulje $\mu(DI)$ određene IDA analizom i analizom oštećenja sustava s krutošću $K_n < 0$ ($K_n / K_e = -5\%$) za $N_{it}=1$ i $N_{it} = 20$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s

S druge strane, najveća odstupanja su dobivena za umjetne akcelorograme sa $t_{acc} = 60$ s i za nelinearno područje odnosno područje otkazivanja.

Svojstva bilinearnog elastoplastičnog sustava s histereznim modelom ponašanja su razmatrane i primjenom analize seizmičkog oštećenja, bazirajući se na rješenju IDA analize. Kod analize seizmičkog oštećenja sustava uspostavljen je odnos između EDP parametra i mjere oštećenja (DM), pri čemu se na apscisi prikazuju vrijednosti za DM mjeru, a na ordinati vrijednosti za EDP parametar. Duktilnost sustava je zadržana za EDP parametar, dok je za DM mjeru odabran indeks oštećenja DI . Indeks oštećenja je određen korištenjem NDA i IDA analize prema [20]:

$$DI = \frac{|D|_{max}}{D_{ult}} + \beta \frac{E_h}{V_y D_{ult}} \tag{11}$$

gdje je D_{ult} maksimalan kapacitet deformacija sustava pri opterećenju s monotonim prirastom (može se usvojiti da je jednako $4D_y$), β koeficijent koji zavisi od svojstava sustava (0,15), E_h histerezna energija. Stupanj oštećenosti sustava, izražen indeksom oštećenja, definiran je u pet kategorija: $DI < 0,1$ veoma mala oštećenja, $0,1 \leq DI < 0,25$ mala oštećenja, $0,25 \leq DI < 0,4$ oštećenja srednjeg nivoa, $0,4 \leq DI < 1$ značajna oštećenja i $DI \geq 1$ kolaps sustava. Na slici 10. su prikazane $\mu(DI)$ krivulje određene IDA i analizom oštećenja sustava s krutošću $K_n > 0$ ($K_n / K_e = 5\%$) za $N_{it} = 1$, $N_{it} = 20$, i to za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s, $t_{acc} = 60$ s, dok su na

slici 11. prikazane te krivulje određene IDA analizom i analizom oštećenja sustava s krutošću $K_n < 0$ ($K_n / K_e = -5\%$) za $N_{it} = 1$, $N_{it} = 20$, i to za $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s, $t_{acc} = 60$ s. Također, prikazane su i krivulje statistički određene za srednju vrijednost $\mu(DI)_m$ i srednju vrijednost +/- standardna devijacija σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\mu_i - \mu_m)^2}{n-1}} \tag{12}$$

gdje je μ_m srednja vrijednost duktilnosti.

U skladu s prethodno definiranim stupnjevima oštećenosti sustava prema indeksu oštećenja, usvojena je gornja granica indeksa oštećenja, odnosno supremum $DI_{sup} = 1$. S druge strane, analizom $\mu(DI)$ krivulja za $DI_{sup} = 1$ utvrđeno je da duktilnost ne prelazi vrijednost od $\mu = 4$, osim u dva slučaja (dvije krivulje), tako da je usvojena gornja granica duktilnosti $\mu_{sup} = 4$. Analizom svih rešenja, odnosno krivulja $\mu(DI)$, utvrđeno je da se s povećanjem vremena trajanja akcelorograma ($t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s) blago reducira nivo duktilnosti za odgovarajuću vrijednost indeksa oštećenja. Kod $\mu(DI)$ krivulja se za indekse oštećenja, a prema kriteriju stupnja oštećenosti, identificiraju spomenute vrijednosti duktilnosti: $DI < 0,1$ i $\mu < 0,65$; $0,1 \leq DI < 0,25$ i $0,65 \leq \mu < 1,4$; $0,25 \leq DI < 0,4$ i $1,4 \leq \mu < 1,8$; $0,4 \leq DI < 1$ i $1,8 \leq \mu < 3,5$; $DI \geq 1$ i $\mu \geq 3,5$. Na osnovi određene duktilnosti $\mu \geq 3,5$ za indeks oštećenja pri otkazivanju $DI \geq 1$, može se konstatirati da maksimalna raspoloživa duktilnost $\mu_{max} = 6$ nije ni dostignuta, a već je uočen slom sustava. U odnosu na prethodno rješenje koje je dobiveno pri otkazivanju, primjenom analize seizmičkog odziva, kod analize seizmičkog oštećenja dobiva se oštrij kriterij za nivo otkazivanja. S obzirom na to da se pri određivanju sloma

sustava prema indeksu oštećenja uzima u obzir, između ostalog, i disipacija histerezne energije, to se za $DI = 1$ mogu realizirati različite vrijednosti odgovarajuće duktilnosti sustava.

Usporedba dobivenih krivulja $\mu(DI)$ provedena je na osnovi njihovog odnosa (koeficijenta Δ) za $N_{it} = 20 / N_{it} = 1$:

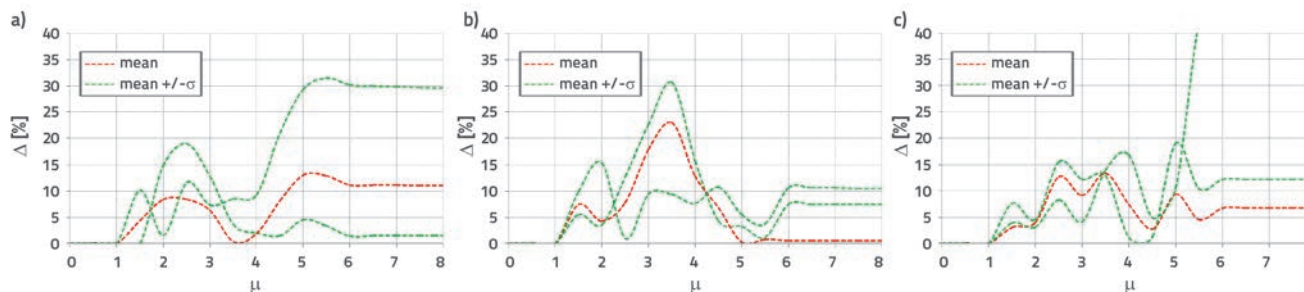
$$\Delta = \left| \frac{DI_{m,Nit=20} - DI_{m,Nit=1}}{DI_{m,Nit=20}} \right| (\%) \tag{13}$$

$$\Delta = \left| \frac{(DI_{m,Nit=20} \pm \sigma) - (DI_{m,Nit=1} \pm \sigma)}{DI_{m,Nit=20} \pm \sigma} \right| (\%) \tag{14}$$

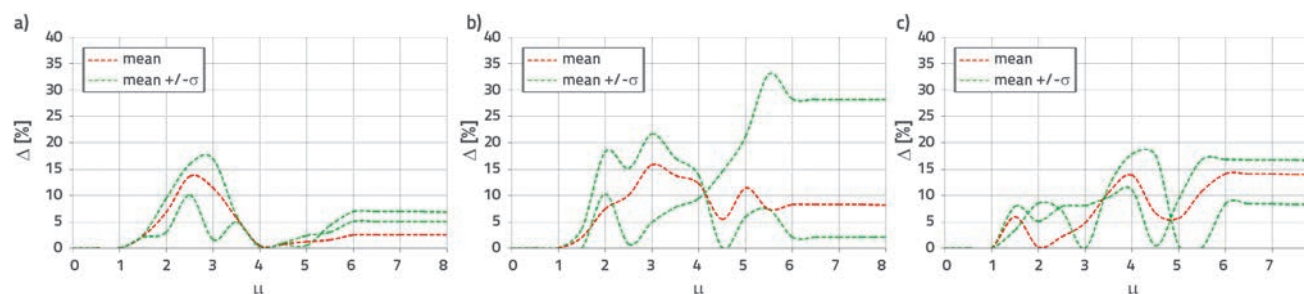
Na slici 12. i 13. prikazani su izračunani koeficijenti Δ u funkciji promjene indeksa oštećenja sustava za nelinearnu krutost $K_n > 0$ i $K_n < 0$, a za vrijeme trajanja akcelorograma: $t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s. Razlika u nelinearnim odzivima sustava izračunanim prema koeficijentu Δ za $N_{it} = 20 / N_{it} = 1$ iznosi i do 40%, što upućuje na utjecaj broja iteracija u generiranju umjetnih akcelorograma.

4. Zaključak

Provedene analize upućuju na važnost izbora pojedinih parametara umjetnih potresnih zapisa, koji u EN 1998-1 nisu dovoljno detaljno definirani. Prilikom generiranja umjetnih akcelorograma potrebno je ispuniti prvi uvjet da vrijednosti spektralnih akceleracija ne smiju biti manje od 90% spektralnih akceleracija elastičnog spektra odziva prema EN 1998-1. Interval perioda titranja od $0,2T_1$ do $2T_1$ za koji se provodi generiranje i skaliranje akcelorograma potrebno je dodatno



Slika 12. Dijagram izračunanih koeficijenata Δ za krutost $K_n > 0$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s



Slika 13. Dijagram izračunanih koeficijenata Δ za krutost $K_n < 0$: a) $t_{acc} = 20$ s, b) $t_{acc} = 40$ s, c) $t_{acc} = 60$ s

razmotriti, i to utvrđivanjem posljednjeg perioda titranja konstrukcije kako bi se dobilo da je zbroj efektivnih modalnih masa za sve razmatrane vlastite oblike titranja veći od 90 % ukupne mase konstrukcije. To je drugi uvjet koji treba ispuniti, a posebno je bitno razmotriti donju granicu kriterija $0,2T_1$. Na osnovi tako utvrđenih kriterija može se iterativno utvrditi koliki je potreban broj ciklusa za generiranje spektra odziva umjetnog akceleroograma N_{it} . Istraživanjem prikazanim u ovom radu utvrđeno je da se za $N_{it} = 20$ mogu ispuniti prethodno postavljeni uvjeti.

U istraživanju učinaka varijacije parametara umjetnih akceleroograma na seizmičke karakteristike konstrukcija primijenjena je analiza seizmičkog odziva i analiza seizmičkog oštećenja. Za analizu seizmičkog odziva primijenjena je inkrementalna dinamička analiza IDA, dok je analiza seizmičkog oštećenja zasnovana na IDA analizi i analizi indeksa oštećenja. Istraživanjem je utvrđeno da međusobno odstupanje krivulja $S_a / S_{a,y}(\mu)$, mjereno prema koeficijentu Δ za $N_{it} = 20 / N_{it} = 1$, iznosi do 20 %. Kod krivulja $S_a / S_{a,y}(\mu)$ utvrđen je i nešto veća raspršenost vrijednosti $S_a(T, 5\%) / S_{a,y}(T, 5\%)$ za nivo stanja sloma, a mjereno na osnovi krivulja normalne raspodjele. Ovo se potvrđuje i većim realiziranim standardnim

devijacijama diskretnih vrijednosti $S_a(T, 5\%) / S_{a,y}(T, 5\%)$ za $N_{it} = 1$, u odnosu na $N_{it} = 20$. Istraživanjem na osnovi indeksa oštećenja utvrđeno je da međusobno odstupanje $\mu(DI)$ krivulja mjereno prema koeficijentu Δ za $N_{it} = 20 / N_{it} = 1$ iznosi do 40 %. Također, analizom krivulja $\mu(DI)$ je utvrđeno da se povećanjem trajanja akceleroograma ($t_{acc} = 20$ s, $t_{acc} = 40$ s i $t_{acc} = 60$ s) blago smanjuje nivo duktilnosti za odgovarajuću vrijednost indeksa oštećenja. Usporedbom analize seizmičkog odziva i analize seizmičkog oštećenja dobivaju se različite razine početka stanja otkazivanja. Kod analize seizmičkog oštećenja, na osnovi indeksa oštećenja za $DI \geq 1$, dobivene su niže vrijednosti duktilnosti sustava nego što je maksimalna raspoloživa duktilnost sustava. Početak stanja sloma ima veći utjecaj kod sustava s nelinearnom krutošću $K_n < 0$, s obzirom na to da u ovom slučaju, između ostalog, bitan utjecaj ima i degradacija nosivosti u nelinearnom području.

Zahvala

Rad je nastao kao rezultat istraživanja na projektu TR 36043 koje financira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Der Kiureghian, A., Crempien, J.: An Evolutionary Model for Earthquake Ground Motion, *Structural Safety*, Vol. 6, No. 2-4, pp. 235-246, 1989.
- [2] Yeh, C., Wen, Y.: Modeling of Nonstationary Ground Motion and Analysis of Inelastic Structural Response, *Structural Safety*, Vol. 8, No. 1-4, pp. 281-298, 1990.
- [3] Conte, J., Pister, K., Mahin, S.: Nonstationary ARMA Modeling of Seismic Motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 7, pp. 411-426, 1992.
- [4] Ghaboussi, J., Lin, C.: New Method of Generating Spectrum Compatible Accelerograms Using Neural Networks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, No. 4, pp. 377-396, 1998.
- [5] Suarez, L., Montejo, L.: Generation of Artificial Earthquakes via the Wavelet Transform, *International Journal of Solid and Structures*, Vol. 42, No. 21-22, pp. 5905-5919, 2005.
- [6] Chen, H-T., Ou, J-Y.: Seismic Responses of Structures Subjected to Artificial Ground Motions Generated Using 1D and 2D Ground Model, *The 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1765, pp. 1-9, Vancouver, Canada, 2004.
- [7] Bahar, O., Taherpour, A.: Selection of Artificial Spectrum Compatible Accelerograms for Nonlinear Dynamic Analysis of RC Buildings, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 215, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- [8] Fahjan Y., Ozdemir Z.: Scaling of Earthquake Accelerograms for Non-Linear Dynamic Analyses to Match the Earthquake Design Spectra, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 165, Beijing, China, October 12-17, 2008.
- [9] Nakamura, M., Sasaki, F., Yokoyama, K., Tamaoki, T., Tanabe, A., Mizumachi, W., Yamada, M.: Generation of Artificial Earthquake Motion Using Observed Earthquake Motions, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 11, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
- [10] Laurendeau, A., Causse, M., Guéguen, P., Perrault, M., Bonilla, L., Douglas, J.: A Set of Eurocode 8-Compatible Synthetic Time-Series as Input to Dynamic Analysis, *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 4089, pp. 1-10, Lisbon, Portugal, 2012.
- [11] Ichihashi, I., Sone, A., Masuda, A., Noma, T.: A Study on Variance of Maximum Responses of Elastoplastic Structure Subjected to Artificial Earthquake Ground Motions, *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 976, pp. 1-10, Lisbon, Portugal, 2012.
- [12] Iervolino, I., De Luca, F., Cosenza, E.: Spectral Shape-Based Assessment of SDOF Nonlinear Response to Real, Adjusted and Artificial Accelerograms, *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 9, pp. 2776-2792, 2010.
- [13] Simqke: URL: <http://dicata.ing.unibs.it/gelfi/software/simqke>
- [14] Gasparini, D., Vanmarcke, E.: Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra, Massachusetts Institute of Technology, 100p, Boston, USA, 1976.
- [15] EN 1998 (Eurocode 8): *Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, 229p, Brussels, Belgium, 2004.
- [16] Soong, T.: *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*, John Wiley & Sons Ltd, 408p, Chichester, USA, 2004.

Connecting Global Competence

Messe München International

The future of building

BAU 2015

19.-24. siječnja · München

Vodeći svjetski međunarodni sajam
za arhitekturu, građevne materijale
i sustave

www.bau-muenchen.com

HR BELIMPEX d.o.o.
office@belimpex.hr · www.belimpex.hr
Tel. +385 1 36-48-276/36-38-363
Fax +385 1 30-17-992

- [17] Bommer, J., Martinez-Pereira, A.: The Effective Duration of Earthquake Strong Motion, *Journal of Earthquake Engineering*, Imperial College Press, Vol. 3, No. 2, pp. 127-172, 1999.
- [18] Rathje, E., Abrahamson, N., Bray, J.: Simplified Frequency Content Estimates of Earthquake Ground Motions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 150-159, 1998.
- [19] Vamvatsikos, D., Cornell, A.: Incremental Dynamic Analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 491-514, 2002.
- [20] Park, Y., Ang, A., Wen, Y.: Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 111, No. 4, pp. 740-757, 1985.