

Primljen / Received: 16.11.2012.

Ispravljen / Corrected: 15.2.2013.

Prihvaćen / Accepted: 21.2.2013.

Dostupno online / Available online: 10.4.2013.

Iterativna metoda koeficijenata pomaka: matematička formulacija i numeričke analize

Autori:



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



Prof.dr.sc. **Stanko Brčić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
stanko@grf.bg.ac.rs

Prethodno priopćenje

Mladen Ćosić, Stanko Brčić

Iterativna metoda koeficijenata pomaka: matematička formulacija i numeričke analize

U radu je prikazana matematička formulacija i numerička analiza originalno razvijene iterativne metode koeficijenata pomaka (IDCM – Iterative Displacement Coefficient Method). IDCM je postupak iz područja istraživanja utjecaja potresa na građevine primjenom nelinearne statičke pushover analize. Razina ciljanog pomaka prema IDCM se određuje primjenom dvostrukog iterativnog postupka. Prvi iterativni postupak provodi se simultano po silama i po pomaku, dok se drugi iterativni postupak provodi korekcijom dobivenog rješenja za razinu ciljanog pomaka po pushover krivulji. IDCM je implementirana u računalni program Nonlin Quake TD.

Ključne riječi:

ciljani pomak, iterativna metoda koeficijenata pomaka, Nonlin Quake TD

Preliminary note

Mladen Ćosić, Stanko Brčić

Iterative displacement coefficient method: mathematical formulation and numerical analyses

The mathematical formulation and numerical tests of the originally developed Iterative Displacement Coefficient Method (IDCM) are presented in the paper. The IDCM method is a procedure in the field of seismic analysis of structures that is based on the Nonlinear Static Pushover Analysis. The target displacement level is determined by means of a double iterative procedure developed in the IDCM. The first iterative procedure is carried out simultaneously by forces and displacements, while the second iterative procedure is conducted by correction of the solution obtained for the level of target displacement along a pushover curve. The IDCM method is incorporated in the computer code Nonlin Quake TD.

Key words:

target displacement, iterative displacement coefficient method, Nonlin Quake TD

Vorherige Mitteilung

Mladen Ćosić, Stanko Brčić

Iterative Verschiebungskoeffizienten-Methode: mathematische Formulierung und numerische Analysen

In der vorliegenden Arbeit sind die mathematische Formulierung und numerische Analysen der original entwickelten Verschiebungskoeffizienten-Methode (IDCM – Iterative Displacement Coefficient Method) dargestellt. Dieses Verfahren zählt zum Forschungsgebiet der Berechnung von Erdbebeneinwirkungen auf Bauwerke mit Hilfe nichtlinearer statischer Pushover Methoden. Werte der Zielverschiebung werden nach der IDCM durch ein zweifaches Iterationsverfahren ermittelt. Die erste Iteration wird simultan für Kräfte und Verschiebungen durchgeführt, während im zweiten Iterationsverfahren eine Korrektur des ermittelten Ergebnisses für die Zielverschiebung entlang der Kapazitätskurve abgeschlossen wird. Die IDCM ist in das Computerprogramm Nonlin Quake TD implementiert.

Schlüsselwörter:

Zielverschiebung, Iterative Verschiebungskoeffizienten-Methode, Nonlin Quake TD

1. Uvod

Nova metoda koja se primjenjuje zadnja dva desetljeća, a i u tijeku su istraživanja na njenom poboljšanju, zasniva se na nelinearnom modelu ponašanja građevina za uvjete seizmičkog djelovanja. Ta je metoda popularno nazvana *nelinearna statička pushover analiza* (NSPA - *Nonlinear Static Pushover Analysis*). NSPA analiza je koncipirana na modeliranju geometrijski i materijalno nelinearnog ponašanja konstrukcije uzimajući u obzir seizmičke utjecaje kao statičko opterećenje, posredno preko sila ili neposredno preko pomaka. Dakle, ideja je koncipirana na principu što realnijeg formuliranja numeričkog modela i nelinearnog ponašanja konstrukcije i materijala, dok se seizmičke sile u inkrementalnim koracima određuju u kapacitivnoj domeni, a ne u vremenskoj. Na taj način znatno je smanjeno vrijeme potrebno za provođenje numeričke simulacije u odnosu na vrijeme potrebno za proračun kod *inkrementalne nelinearne dinamičke analize* (INDA - *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*). Također, znatno je smanjena i količina dobivenih podataka u postupku koji treba naknadno obraditi i prikazati. NSPA se općenito izvodi u dvije faze. Prva faza se provodi nad modelom s više stupnjeva slobode (MDOF - *multi degree of freedom*), dok se u drugoj fazi provodi analiza ciljanog pomaka (*target displacement analysis*) primjenom sustava s jednim stupnjem slobode (SDOF - *single degree of freedom*) ili se ta faza provodi izravnim postupkom. S gledišta matematičke analize, numerički model koji se koristi za NSPA je diskretni model, a formulira se primjenom *metode konačnih elemenata* (FEM - *Finite Element Method*). Ovdje se posebno naglašava da se diskretizacijom konstrukcije konačnim elementima efikasno formiraju složeni numerički modeli, u kojima se realno prikazuju svi značajni aspekti konstrukcije, uključujući i detalje. NSPA može biti nezavisna od analize ciljanog pomaka u smislu mogućnosti analiziranja ključnih parametara konstrukcije kao što su nosivost, krutost i duktilnost u linearnom, nelinearnom i području sloma. Utvrđivanje tih parametara bitno je za ocjenu trenutnog stanja konstrukcije i procjenu njezina ponašanja za uvjete djelovanja u budućim potresima. Analiza ciljanog pomaka ne može biti nezavisna, jer je postupak određivanja ciljanog pomaka (*target displacement*) u funkciji tipa i karaktera *pushover* krivulje (PC - *pushover curve*).

2. Postojeće metode za analizu ciljanog pomaka

Razvoj koncepta analiza NSPA i analiza ciljanog pomaka zgrada za uvjete seizmičkog djelovanja iniciran je prije više od dva desetljeća, a službene su primjene uslijedile kad su propisane u ATC 40 [1], FEMA 273 [2], Eurocode EC 8 [3], FEMA 356 [4] i FEMA 440 [5]. Danas postoji širok spektar NSPA i analiza ciljanog pomaka, ali se sa svojom učinkovitošću i superiornošću izdvajaju:

- *metoda spektra kapaciteta* (CSM - *Capacity Spectrum Method*),

- *metoda koeficijenata pomaka* (DCM - *Displacement Coefficient Method*),
- *metoda ekvivalentne linearizacije* (ELM - *Equivalent Linearization Method*),
- *metoda modifikacije pomaka* (DMM - *Displacement Modification Method*),
- *N2 metoda* (N2 Method),
- *modalna pushover metoda* (MPA - *Modal Pushover Analysis*),
- *metoda modalnih kombinacija* (MMC - *Method of Modal Combinations*).

Metoda spektra kapaciteta uvrštena je u propise ATC 40 [1], a istraživanja na temu razvoja, testiranja i poboljšanja te metode prikazana su u radovima [6, 7]. Razina ciljanog pomaka, prema *metodi spektra kapaciteta*, određuje se na osnovi presjeka *pushover* krivulje i krivulje zahtjeva (*demand curve*), a konstruira se iterativnim postupkom. Grafički prikaz *pushover* krivulje, krivulje kapaciteta, elastičnog spektra odgovora i radijalnih pravaca perioda vibracija predstavlja se u obliku "spektralno ubrzanje - spektralni pomak" (ADRS: *acceleration-displacement response spectrum*). Također, značajna istraživanja na temu *metode spektra kapaciteta* s dodatnim poboljšanjem prikazana su kao AutoCSM metoda i navedena u radovima [8, 9]. Daljnji korak u poboljšanju *metode spektra kapaciteta* uslijedio je razvojem *prilagodljive (adaptivne) metode spektra kapaciteta* (ACSM - *Adaptive Capacity Spectrum Method*) [10], a znatna unaprjeđenja prikazana su *poboljšanom metodom spektra kapaciteta* (ICSM - *Improved Capacity Spectrum Method*) [11 - 14]. S druge strane, radi brže procjene razina ciljanog pomaka, razvijena je *ne-iterativna metoda spektra kapaciteta* (NICSM - *Non-Iterative Capacity Spectrum Method*) koja se zasniva na principu ekvivalentne linearizacije za procjenu zahtjevanog nelinearnog odgovora zgrada [15]. Ta je metoda također predstavljena u FEMA 440 [5] u obliku modificiranog *spektralnog ubrzanja-spektralnog pomaka* (MADRS - *modified acceleration-displacement response spectrum*). *Metoda koeficijenata pomaka* zasniva se na multiplikaciji određenih koeficijenata prema FEMA 356 [4] tako da se beziterativno određuje razina ciljanog pomaka. Istraživanja na temu određivanja koeficijenata mjerodavnih u ovoj metodi prikazana su u radovima [16, 17]. Poboljšanje ove metode, a predstavljeno *metodom modifikacije pomaka*, navedeno je u FEMA 440 [5]. *N2 metoda* uvrštena je u Eurocode EC 8 [3], a detaljnija istraživanja na temu ove metode prikazana su u radovima [18, 19, 20]. *Modalna pushover metoda* se pokazala veoma superiorna i djelotvorna za analizu ciljanog pomaka, a zasniva se na reformulaciji *metode spektra odgovora* [21]. U odnosu na tu metodu, razvijena je i *multimodalna pushover analiza* (MMPP - *Multi-Mode Pushover Procedure*) [22, 23]. Također, razvijena je i *metoda modalnih kombinacija* [24] kao i podvarijanta s *prilagodljivom (adaptivnom) modalnom kombinacijom* (AMC - *Adaptive Modal Combination*) [25].

3. Iterativna metoda koeficijenata pomaka

Iterativna metoda koeficijenata pomaka (IDCM - *Iterative Displacement Coefficient Method*), izvorno formulirana i prikazana u ovom radu, zasniva se na metodi koeficijenata pomaka (DCM - *Displacement Coefficient Method*) prema FEMA 356 [4]. Metoda DCM se provodi multiplikacijom određenih koeficijenata, a metodom IDCM određuju se razine ciljanog pomaka primjenom dvostruke iterativne procedure. Prvi iterativni postupak provodi se simultano u odnosu na sile i pomak inkrementalnim prirastom od nultih početnih do maksimalnih vrijednosti. Drugi iterativni postupak se provodi korekcijom dobivenog rješenja za razinu ciljanog pomaka u odnosu na *pushover* krivulju. Kod dvostrukog iterativnog algoritma se najprije provodi prvi iterativni postupak po svim iteracijama, a zatim se iteriraju vrijednosti prema drugom iterativnom postupku za jednu iteraciju. Kontinuitet algoritma se uspostavlja sukcesivnom provedbom prethodno opisanog tijeka postupka.

Određivanje razine ciljanog pomaka D_t prema DCM propisanoj u FEMA 356 [4] provodi se multipliciranjem koeficijenata:

$$D_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

gdje su C_0, C_1, C_2, C_3 modificirani koeficijenti, S_a spektralno ubrzanje, T_{eff} efektivan period vibracija. C_0 je modificirani koeficijent kojim se pretvara spektralni pomak ekvivalentnog SDOF sustava u pomak najvišeg čvora MDOF sustava, a koji se proračunava primjenom faktora participacije prvog svojstvenog oblika Γ_1 na razinu kontrolnog čvora ili prema FEMA 356 [4]. C_1 je modificirani koeficijent koji predstavlja odnos očekivanog maksimalnog nelinearnog pomaka s pomakom linearnoelastičnog odgovora, a određuje se prema FEMA 356 [4]:

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{za } T_{eff} \geq T_s \\ 1 + \frac{(R-1)T_s}{T_{eff}} & \text{za } T_{eff} < T_s \end{cases} \quad (2)$$

gdje je T_s karakterističan period vibracija na spektru odgovora pri prelasku iz domene konstantnog ubrzanja u domenu konstantnih brzina, R koeficijent odnosa elastične nosivosti i nosivosti na granici tečenja. C_2 je modificirani koeficijent koji predstavlja efekt "uštipnuća" histerezne petlje (eng. *pinched hysteretic shape*), degradaciju krutosti (eng. *stiffness degradation*) i opadanje nosivosti (eng. *strength deterioration*) pri maksimalnoj razini pomaka. Vrijednosti su ovog koeficijenta u funkciji proračuna temeljen na odzivu i stanjima konstrukcije: trenutna useljivost (IO - *immediate occupancy*), zaštita života (LS - *life safety*) ili sprječavanje rušenja (CP - *collapse prevention*), tipa konstrukcijskog sustava i veličine početnog elastičnog perioda vibracija $T_e \leq 0,1s$ i $T_e \geq T_s$. C_3 je modificirani koeficijent kojim se uvodi povećanje pomaka uslijed dinamičkih $P-\Delta$ efekata, pri čemu se pretpostavlja

da je vrijednost $C_3=1$ za pozitivnu krutost u nelinearnoj zoni ponašanja $K_{n,PC} > 0$, dok se za negativnu krutost u nelinearnoj zoni ponašanja $K_{n,PC} < 0$ određuje prema FEMA 356 [4]:

$$C_3 = 1 + \frac{|\alpha_{BC}|(R-1)^2}{T_{eff}} \quad (3)$$

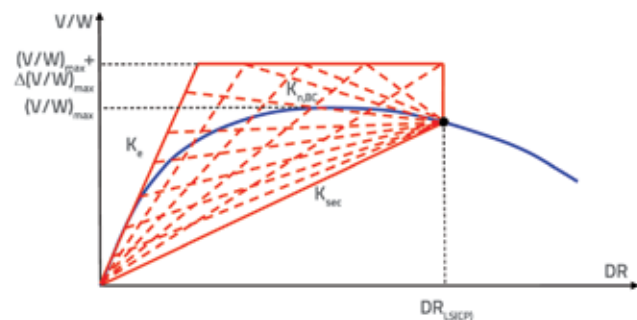
gdje je α_{BC} odnos krutosti u nelinearnoj zoni ponašanja $K_{n,BC}$ određena postupkom bilinearizacije, prema efektivnoj krutosti K_{eff} . Efektivan period vibracija T_{eff} se određuje prema FEMA 356 [4]:

$$T_{eff} = T_e \sqrt{\frac{K_e}{K_{eff}}} \quad (4)$$

gdje je K_e početna elastična krutost. Ukupna poprečna sila u osnovi građevine za razinu efektivnog pomaka V_{eff} određuje se iz presjeka *pushover* krivulje i efektivnog pomaka D_{eff} dok se efektivna krutost K_{eff} određuje prema:

$$K_{eff} = \frac{V_{eff}}{D_{eff}} \quad (5)$$

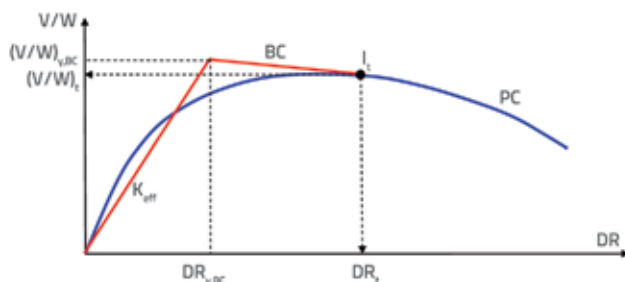
Domena mogućih vrijednosti efektivne krutosti K_{eff} u općem slučaju, jest od početne elastične krutosti K_e do sekantne krutosti K_{sec} . Dostizanje razine ciljanog pomaka D_t , a proračunatu prema prethodno izloženim izrazima, očekuje se u granicama $D_{IO} \leq D_t \leq D_{LS}$, čime je moguće osigurati povoljno duktilno ponašanje sustava, dok se u izuzetnim slučajevima razina ciljanog pomaka može nalaziti u granicama $D_{IO} \leq D_t \leq D_{CP}$. Neispunjenje prethodnog uvjeta znači da konstrukcija nije sposobna razviti minimalno potrebno duktilno ponašanje. Domena mogućih vrijednosti za $K_{n,BC}$ bilinearne krivulje (BC - *bilinear curve*) definiran je granicama kao na slici 1 i pomoću maksimalne vrijednosti ukupne relativne posmične sile u osnovi građevine $(V/W)_{max}$. U određenim situacijama javlja se potreba za povećanjem maksimalne vrijednosti ukupne relativne poprečne sile u osnovi građevine $(V/W)_{max}$ za vrijednost $\Delta(V/W)_{max}$. Alternativa je uvedena zato što se u slučaju NSPA *pushover* krivulje sa $K_{n,PC} < 0$ mogu javiti problemi u kvaliteti rješenja postupka bilinearizacije.



Slika 1. Domena mogućih vrijednosti $K_{n,BC}$ za $(V/W)_{max} + \Delta(V/W)_{max}$

Određivanje ciljanog pomaka prema (1) zahtjeva poznavanje svih modificiranih koeficijenata, ali kao što se vidi iz

prethodnih izraza, izravno je moguće odrediti C_0 i C_2 dok u određenim situacijama C_1 i C_3 može biti nepoznato, osim ako se podrazumijeva da su C_1 i C_3 jednaki 1. U ovim koeficijentima kao nepoznanice se javljaju R i α_{BC} dok se u R javlja nepoznanica $V_{y,BC}$ (sila na granici tečenja za bilinearni sustav), a α zavisi od $D_{y,BC}$ (pomaci na granici tečenja za bilinearni sustav) i $V_{y,BC}$. Općenito gledano, proces određivanja ciljanog pomaka MDOF sustava se zasniva na bilinearizaciji SDOF sustavom, uz dodatna poboljšanja nelinearnog ponašanja SDOF kao MDOF sustava (slika 2.). Prema FEMA 356 [4] preporučuje se izjednačavanje površine ispod NSPA *pushover* krivulje i bilinearne krivulje. Rješenje koje je primijenjeno u ovoj metodi zasniva se na načelu jednakosti energije elastoplastičnih deformacija realiziranih NSPA analizom, što je prikazano odnosom *kapacitet nosivosti-deformacija* E_{NSPA} i energije realiziranih elastoplastičnih deformacija iz bilinearizacije E_B . Energija elastoplastičnih deformacija dobivena primjenom NSPA analize E_{NSPA} određuje se površinom određenom poligonalmom crtom (*pushover* krivulja), vertikalama na mjestu ciljanog pomaka D_t i apscisom. Termin poligon za bilinearni sustav u potpunosti odgovara jer se sastoji od dva pravca, no za MDOF sustav nije na prvi pogled termin matematički ispravno formuliran. Međutim, budući da se *pushover* krivulja za MDOF sustav generira povezujući diskretne vrijednosti iz inkrementalnih situacija NSPA, realan oblik *pushover* krivulje također je poligon. Grafički prikaz ostavlja dojam glatke krivulje zbog velikog broja diskretnih vrijednosti koje su na bliskoj udaljenosti te zbog dodatne primjene interpolacije krivuljama višeg reda.



Slika 2. Bilinearizacija NSPA *pushover* krivulje

Postupak dvostrukog iterativnog algoritma provodi se u nekoliko koraka, pri čemu se najprije određuje maksimalna vrijednost ukupne poprečne sile u osnovi građevine iz NSPA:

$$V_{max} = [V_0, V_n]_{max}, (V/W)_{max} = \frac{V_{max}}{W} \tag{6}$$

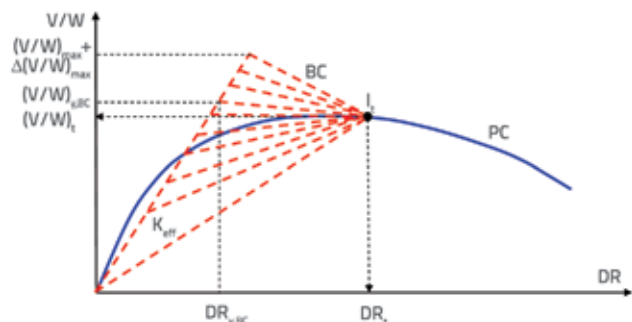
i pripadajući pomak D_{adeq} :

$$D_{adeq} = PC \cap V_{max}, DR_{adeq} = \frac{D_{adeq}}{H} \tag{7}$$

gdje je V_{max} maksimalna vrijednost ukupne poprečne sile u osnovi građevine, W ukupna težina građevine, H visina građevine. U prvoj fazi IDCM provodi se iterativan postupak za $D_{y,BC}$ i $V_{y,BC}$ u intervalu (slika 3.):

$$D_{y,BC} \in [D_0, D_{max}], V_{y,BC} \in [V_0, V_{max} + \Delta V_{max}] \tag{8}$$

gdje je D_{max} maksimalna vrijednost pomaka vrha građevine, ΔV_{max} povećanje maksimalne vrijednosti ukupne poprečne sile u osnovi građevine. U ovoj iteraciji, izjednačavaju se koeficijenti C_1 i C_3 sa 1, dok se u idućoj iteraciji određuju C_1 i C_3 slijedom prema izrazima (2) i (3).



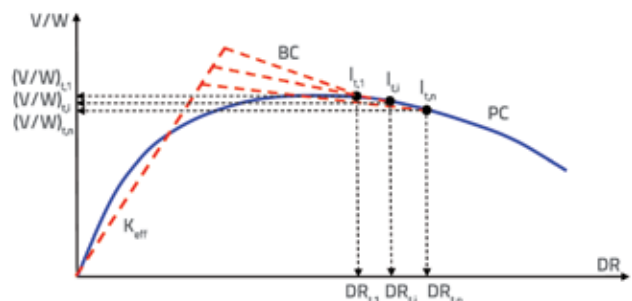
Slika 3. Određivanje $D_{y,BC}$ i $V_{y,BC}$ primjenom prvog iterativnog postupka

U drugoj fazi se provodi iterativni postupak za D_t i V_t na osnovi prethodno određenih $D_{y,BC}$ i $V_{y,BC}$ (slika 4.). Zatim se određuje maksimalna vrijednost ukupne poprečne sile za bilinearni model $V_{max,BC}$:

$$V_{max,BC} = V_{max} + \frac{\Delta V_{max} V_{max}}{100}, (V/W)_{max,BC} = \frac{V_{max,BC}}{W} \tag{9}$$

i pripadajući pomak $D_{adeq,BC}$:

$$D_{adeq,BC} = \frac{V_{max,BC}}{K_{eff}}, DR_{adeq,BC} = \frac{D_{adeq,BC}}{H} \tag{10}$$



Slika 4. Određivanje D_t i V_t primjenom drugog iterativnog postupka

Povećanje maksimalne vrijednosti ukupne poprečne sile je zbog toga što sila na granici tečenja bilinearnog sustava $V_{y,BC}$ može biti veća od maksimalne sile dobivene prema NSPA $V_{y,PC}$. Ovo je gotovo obavezan slučaj kod NSPA *pushover* krivulja s negativnom krutošću u nelinearnoj domeni $K_{n,PC} < 0$. Veličina inkrementa pomaka se određuje iz razlike pripadajućeg pomaka $D_{adeq,BC}$ za $V_{max,BC}$ i početnog pomaka D_0 prema:

$$\Delta D = \frac{D_{adeq,BC} - D_0}{N_{it1}} \tag{11}$$

dok se inkrement sile određuje iz:

$$\Delta V = \frac{V_{\max,BC} - V_0}{N_{it1}} \quad (12)$$

gdje je ΔD inkrement pomaka, ΔV inkrement sile, N_{it1} broj iteracija prvog iterativnog postupka. Nulta, prva i i -ta iteracija pomaka na granici tečenja bilinearnog sustava proračunavaju se prema:

$$D_{y,BC}^{(1,0)} = D_0, D_{y,BC}^{(1,1)} = D_0 + \Delta D, D_{y,BC}^{(1,i)} = D_{y,BC}^{(1,i-1)} + \Delta D \quad (13)$$

a sile prema:

$$V_{y,BC}^{(1,0)} = V_0, V_{y,BC}^{(1,1)} = V_0 + \Delta V, V_{y,BC}^{(1,i)} = V_{y,BC}^{(1,i-1)} + \Delta V \quad (14)$$

Prvi indeks u $D_{y,BC}^{(i,j)}$ i $V_{y,BC}^{(i,j)}$ odnosi se na broj iteracije prvog iterativnog postupka, a drugi indeks na broj iteracije drugog iterativnog postupka. Sljedeće iteracije za pomake i silu na granici tečenja nastavljaju se dodavanjem inkrementa pomaka i opterećenja na prethodne vrijednosti sve dok se ne ispuni uvjet da je zadnja iteracija $i_{\Delta D} = i_{\Delta D}^{(n)}$ i $i_{\Delta V} = i_{\Delta V}^{(n)}$. U prvom iterativnom postupku se za modificirane koeficijente C_1 i C_3 uzimaju jedinične vrijednosti:

$$C_1 = C_1^{(1)} = 1, C_3 = C_3^{(1)} = 1 \quad (15)$$

Ciljani pomak se za prvi iterativni postupak određuje kao:

$$D_t^{(1)} = C_0 C_2 \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} g \quad (16)$$

a vrijednost ukupne poprečne sile za prvi iterativni postupak prema:

$$V_t^{(1)} = PC \cap D_t^{(1)} \quad (17)$$

Određivanje energije deformacije ostvarene bilinearnom krivuljom $E_B^{(i,j)}$ provodi se prema:

$$E_B^{(i,j)} = 0.5 \left(V_{y,BC}^{(i,j)} D_{y,BC}^{(i,j)} + \left(V_{y,BC}^{(i,i)} + V_t^{(i)} \right) \left(D_t^{(i)} - D_{y,BC}^{(i,j)} \right) \right) \quad (18)$$

dok se određivanje energije deformacija dobivene iz NSPA $E_{NSPA}^{(i,j)}$ provodi prema:

$$E_{NSPA}^{(i)} = \left[\sum_{l=1}^{i-1} \frac{(V_l + V_{l+1})}{2} (D_l - D_{l-1}) \right] + \frac{(V_i + V_{i-1})}{2} (D_i - D_{i-1}) \quad (19)$$

a razlika energija deformacija po iteracijama iz:

$$\Delta E^{(i,j)} = \frac{|E_{NSPA}^{(i,j)} - E_B^{(i,j)}|}{E_{NSPA}^{(i,j)}} (\%) \quad (20)$$

Energija realizirana NSPA analizom je konstantna i ne proračunava se po iteracijama prvog iterativnog postupka. Određivanje mjerodavnog ciljanog pomaka za prvi iterativni postupak provodi se tako što se najprije odredi minimalna vrijednost razlika energija iz svih iteracija:

$$\Delta E_{\min}^{(i)} = \left[\Delta E^{(i,1)}, \Delta E^{(i,n)} \right]_{\min} \quad (21)$$

a ostale vrijednosti se uzimaju iz baze podataka proračunanih iteracija (DBget):

$$D_{y,BC}^{(i)} = \text{DBget} \left(D_{y,BC}, \Delta E, f \left(\Delta E_{\min}^{(i)} \right) \right), DR_{y,BC}^{(i)} = \frac{D_{y,BC}^{(i)}}{H} \quad (22)$$

$$V_{y,BC}^{(i)} = \text{DBget} \left(V_{y,BC}, \Delta E, f \left(\Delta E_{\min}^{(i)} \right) \right), (V/W)_{y,BC}^{(i)} = \frac{V_{y,BC}^{(i)}}{W} \quad (23)$$

$$E_B^{(i)} = \text{DBget} \left(E_B, \Delta E, f \left(\Delta E_{\min}^{(i)} \right) \right) \quad (24)$$

U općem slučaju se može napisati da se $D_{y,BC}$ i $V_{y,BC}$ nalaze u području koji je ograničen presjekom krivulja:

$$(D_{y,BC}, V_{y,BC}) = f(K_{eff} \cap V_{\max}) \cap (K_{eff} \cap PC) \quad (25)$$

Nakon završenog prvog iterativnog postupka, dalje se nastavlja proračun s drugim iterativnim postupkom kod kojeg se sada proračunavaju koeficijenti C_1 i C_3 . Koeficijent $R^{(i)}$ se određuje prema:

$$R^{(i)} = \frac{S_a}{V_{y,BC}^{(i-1)} / W} C_m \quad (26)$$

dok se koeficijent $C_1^{(i)}$ određuje prema izrazu (2), a koeficijent $C_3^{(i)}$ prema izrazu (3). Na osnovi prethodno određenih koeficijenata razina se ciljanog pomaka proračunava prema izrazu:

$$D_t^{(i)} = C_0^{(i)} C_1^{(i)} C_2^{(i)} C_3^{(i)} S_a \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} g \quad (27)$$

Konačne vrijednosti modificiranih koeficijenata i razine ciljanog pomaka dobivaju se na kraju svih provedenih iteracija za prvi i drugi iterativni postupak. Prvi postupak s iteracijama zahtjeva znatno veći broj iteracija u odnosu na drugi iterativni postupak.

Određivanje realizirane duktilnosti za razinu ciljanog pomaka μ_t i maksimalne raspoložive duktilnosti sustava μ_{\max} provodi se pomoću pomaka na granici tečenja sustava $D_{y,PC}$ iz NSPA:

$$DR_{y,PC} = \frac{D_{y,PC}}{H}, V_{y,PC} = PC \cap D_{y,PC}, (V/W)_{y,PC} = \frac{V_{y,PC}}{W} \quad (28)$$

ili pomoću K_{eff} :

$$D_{y,PC} = PC \cap K_{eff}, V_{y,PC} = K_{eff} \cap D_{y,PC} \text{ za } K_{eff} \neq K_e \quad (29)$$

ili proračunom pomaka na granici tečenja sustava $D_{y,PC}$ prema [26]:

$$D_{y,PC} = DR_{y,PC} H_{eff}, DR_{y,PC} = 0.5 \epsilon_y \frac{L_b}{h_b} \quad (30)$$

pri čemu se efektivna visina H_{eff} proračunava prema izrazu:

$$H_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (31)$$

Projektni pomak i -tog kata Δ_i je:

$$\Delta_i = \delta_i \left(\frac{\Delta_c}{\delta_c} \right) \tag{32}$$

pri čemu vrijedi:

$$\begin{aligned} n \leq 4; & \quad \delta_i = \frac{H_i}{H} \\ n > 4; & \quad \delta_i = \frac{4}{3} \left(\frac{H_i}{H} \right) \left(1 - \frac{H_i}{4H} \right) \end{aligned} \tag{33}$$

dok za propisane okvirne sustave vrijedi:

$$H_{eff} = 0,7H \tag{34}$$

gdje je ε_y deformacija čelika na granici tečenja, L_b dužina grede računajući od osnih razmaka stupova, h_b visina grede, m_i masa i -tog kata, H_i visina i -tog kata. Maksimalni pomak i odgovarajuća ukupna poprečna sila određuju se prema:

$$D_{max} = [D_0, D_n]_{max}, DR_{max} = \frac{D_{max}}{H}, V_{adeq} = PC \cap D_{max}, (V/W)_{adeq} = \frac{V_{adeq}}{W} \tag{35}$$

tako da je ostvarena duktilnost μ_t za razinu ciljanog pomaka i maksimalna raspoloživa duktilnost sustava μ_{max} :

$$\mu_t = \frac{D_t}{D_y}, \mu_{max} = \frac{D_{max}}{D_y} \tag{36}$$

Također, bitni parametri za procjenu seizmičkih svojstava sustava jesu sekantna krutost $K_{t,sec}$ i sekantni period vibracija $T_{t,sec}$ za razinu ciljanog pomaka:

$$K_{t,sec} = \frac{V_t}{D_t}, T_{t,sec} = T_e \sqrt{\frac{K_e}{K_{t,sec}}} \tag{37}$$

optimalan period vibracija prema FEMA 356 [4]:

$$T_{e,opt} = 0.018(3.28H)^{0.9} \tag{38}$$

minimalan potreban pomak za postizanje povoljnog - duktilnog ponašanja sustava:

$$D_{d,min} = 1.5D_t, DR_{d,min} = \frac{D_{d,min}}{H} \tag{39}$$

i indeks oštećenja (opći) za razinu ciljanog pomaka D_t [27]:

$$DI_t = \frac{D_t - D_{y,PC}}{D_{max} - D_{y,PC}} \tag{40}$$

4. Specifičnosti pri određivanju razine ciljanog pomaka u *Nonlin Quake TD*

Iterativna metoda koeficijentata pomaka implementirana je u originalno softversko rešenje *Nonlin Quake TD* (eng. TD - target displacement). Program *Nonlin Quake TD* je dio složene softverske platforme *Nonlin Quake* za nelinearnu seizmičku analizu okvirnih zgrada u skladu s zahtjevanim

svojstvima. *Nonlin Quake TD* je napisan u VB/VBA (*Visual Basic/Visual Basic for Application*) programskom jeziku [28, 29], pri čemu se interakcija korisnik-računalni program odvija preko korisničkog sučelja (eng. GUI - graphic user interfaces). Iniciranje IDCM metode za određivanje razine ciljanog pomaka, u *Nonlin Quake TD*, provodi se korekcijom diskretnih vrijednosti *pushover* krivulje dobivenih na osnovi *nelinearne statičke pushover* analize:

$$D_0 = 0, V_0 = 0, D_i \rightarrow |D_i|, V_i \rightarrow |V_i|, i = 1, \dots, n \tag{41}$$

Postupak prevođenja u apsolutne vrijednosti provodi se onda kad se u velikom broju slučajeva kao rezultat numeričkog rješenja dobivaju negativne vrijednosti za V_i . Početna elastična krutost građevine K_e se određuje prema:

$$K_e = \frac{V_1}{D_1} \tag{42}$$

gdje je V_1 ukupna poprečna sila u osnovi građevine za prvu diskretnu vrijednost, D_1 pomak vrha građevine za prvu diskretnu vrijednost. Zatim se izvodi transformacija iz apsolutnih u relativne vrijednosti:

$$DR_i = \frac{D_i}{H}, (V/W)_i = \frac{V_i}{W} \tag{43}$$

Odluka o znaku nelinearne krutosti MDOF (eng. multi degree of freedom) sustava $K_{n,PC}$ provodi se tako što se najprije proračunava tangenta krutost sustava $K_{t,i}$ za dvije uzastopne diskretne vrijednosti *pushover* krivulje:

$$K_{t,i} = \frac{V_i - V_{i-1}}{D_i - D_{i-1}} \tag{44}$$

s mogućnošću izbora domena:

$$DR_{IO,min} \leq DR_i \leq DR_{LS,max} \text{ odnosno } DR_{IO,min} \leq DR_i \leq DR_{CP,max} \tag{45}$$

kao i:

$$\frac{DR_{IO,max} + DR_{IO,min}}{2} \leq DR_i \leq \frac{DR_{LS,max} + DR_{LS,min}}{2} \tag{46}$$

odnosno:

$$\frac{DR_{IO,max} + DR_{IO,min}}{2} \leq DR_i \leq \frac{DR_{CP,max} + DR_{CP,min}}{2} \tag{47}$$

Sveukupni međukatni pomaci DR_{IO} , DR_{LS} i DR_{CP} za armiranobetonske zidove (48)-prvi supac i okvirne (48)-drugi stupac (eng. SPL - structural performance levels) prema SEAOC [30] i FEMA 356 [4] glase:

$$\begin{aligned} DR_{IO,min} \leq 0.5\% & \quad DR_{IO,max} \leq 1\% & \quad D_{IO} = DR_{IO}H & \quad P_{50\%/50} \\ DR_{LS,min} \leq 1\% & \quad DR_{LS,max} \leq 2\% & \quad D_{LS} = DR_{LS}H & \quad P_{10\%/50} \\ DR_{CP,min} \leq 2\% & \quad DR_{CP,max} \leq 4\% & \quad D_{CP} = DR_{CP}H & \quad P_{2\%/50} \end{aligned} \tag{48}$$

Podaci za zidove Podaci za okvire

dok se odgovarajuće ukupne poprečne sile u osnovi građevine za IO, LS i CP razine svojstava određuju iz presjeka *pushover* krivulje i relativnih pomaka DR_{IO} , DR_{LS} i DR_{CP} . Nakon izbora domene i utvrđivanja K_{tj} određuju se težinski koeficijenti prema:

$$C_{w,i} = \tau \frac{D_i - D_{i-1}}{D_{P,max} - D_{P,min}} (\%), \quad \tau = \begin{cases} + & \text{za } K_{tj} > 0 \\ - & \text{za } K_{tj} < 0 \end{cases} \quad (49)$$

gdje je $D_{P,max}$ maksimalna vrijednost za odabranu domenu prema (45) do (47), $D_{P,min}$ minimalna vrijednost za odabranu domenu prema (45) do (47), a zatim se zbrajaju svi koeficijenti:

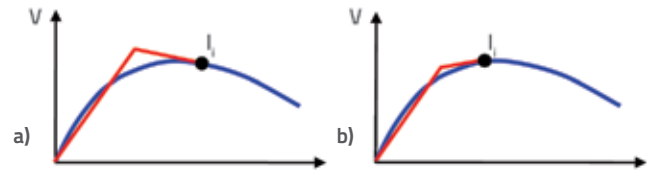
$$C_w = \sum_{i=1}^n C_{w,i} \quad (50)$$

i konačno se odluka o znaku $K_{n,PC}$ donosi na osnovi pozitivne ili negativne vrijednosti C_w (pozitivnom znaku C_w odgovara pozitivna krutost). U određenim situacijama K_{tj} može značajno mijenjati znak u nelinearnoj domeni, od pozitivne, preko nulte, pa sve do negativne (eng. *saw-tooth force-deflection behavior*) [31]. S druge strane, razlika pomaka dviju uzastopnih diskretnih vrijednosti *pushover* krivulje može biti vrlo značajna, tako da opća procjena predznaka nelinearne krutosti može biti komplicirana. Ovo je posebno značajno pri prelasku iz linearne u nelinearnu domenu, a također i u domenu predslomnog stanja. U istraživanjima [32, 33, 34] koja su provedena s linijskim konačnim elementima za modeliranje okvirnih konstrukcija, a primjenom računalnog programa *SeismoStruct* [35], prikazane su *pushover* krivulje dobivene primjenom NSPA bez učestale promjene krutosti u nelinearnoj domeni. Domene (45) do (47) odabrane su zato što se od konstrukcije očekuje pojava nelinearnog ponašanja s maksimalnim pomakom većim od LS razine odziva. Ako se ne realizira maksimalni pomak veći od LS razine odziva, razmatraju se niži realizirani pomaci, samo što je u tom slučaju broj diskretnih vrijednosti odgovora manji. U *Nonlin Quake TD* postoji mogućnost iterativnog određivanja α_{BC} (odnos krutosti u nelinearnoj zoni ponašanja $K_{n,BC}$ određene postupkom bilinearizacije, prema efektivnoj krutosti K_{eff}), pri čemu se znak može razlikovati od α_{PC} ili se kroz iteracije može odrediti najpovoljniji slučaj za isti znak kao kod α_{PC} (slika 5.). Postupak određivanja očekivanog (preliminarnog) sveukupnog $DR_{t,exp}$ i međukatnog relativnog pomaka $IDR_{t,exp}$ provodi se primjenom modificirane beta-raspodjele [36]:

$$DR_{t,exp} = \frac{DR_{min} + 4DR_t + DR_{max}}{6}, \quad IDR_{t,exp} = \frac{IDR_{min} + 4IDR_t + IDR_{max}}{6} \quad (51)$$

gdje se DR_{min} i IDR_{min} odnosi na minimalni sveukupni relativni pomak, odnosno međukatni relativni pomak, a DR_{max} i IDR_{max} na maksimalni sveukupni relativni pomak, odnosno međukatni relativni pomak u okviru dviju uzastopnih razina odziva:

$$DR_{min} < DR_t \leq DR_{max}, \quad IDR_{min} < IDR_{t,m} \leq IDR_{max} \quad (52)$$

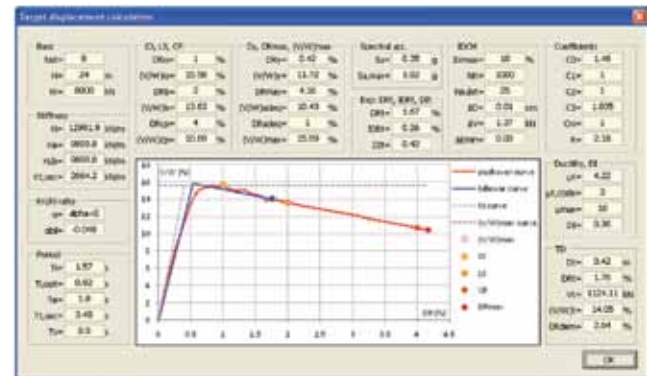


Slika 5. a) $\alpha_{BC} < 0, \alpha_{PC} < 0$; b) $\alpha_{BC} > 0, \alpha_{PC} < 0$

Određivanje minimalnih i maksimalnih vrijednosti sveukupnih i međukatnih relativnih pomaka provodi se tako što se najprije odredi kojoj razini odziva pripada ciljani pomak. Ako je riječ o sveukupnom relativnom pomaku, minimalne i maksimalne vrijednosti su prikazane u (48), dok za međukatne relativne pomake vrijedi [37]:

$$\begin{aligned} IDR_{IO,min} &\leq 0.2\% & IDR_{IO,max} &\leq 0.5\% & P_{50\%/50} \\ IDR_{LS,min} &\leq 0.5\%, & IDR_{LS,max} &\leq 1.5\% & \text{za } P_{10\%/50} \\ IDR_{CP,min} &\leq 1.5\% & IDR_{CP,max} &\leq 3\% & P_{2\%/50} \end{aligned} \quad (53)$$

Na slici 6. su prikazani svi proračunani parametri IDCM metode i određena razina ciljanog pomaka.



Slika 6. Pregled svih proračunanih parametara pri određivanju razine ciljanog pomaka prema IDCM metodi

5. Numeričke analize

Analiza razvijene *iterativne metode koeficijenata pomaka* implementirane u *Nonlin Quake TD* za NSPA analizu ciljanog pomaka, provedena je radi procjene svojstava, potvrđivanja i usporedbe dobivenih rješenja s rješenjima *nelinearne dinamičke analize* (NDA - *Nonlinear Dynamic Analysis*), i to za:

- 15 različitih NSPA *pushover* krivulja generiranih za standardne modele odgovora okvirnih sustava i definirajući krutost, nosivost duktilnost slučajnim izborom (primjenom *random* funkcije) unutar empirijskih granica za te parametre, na bazi literature i iskustava,
- 2D osmokatni četveropoljni pravilni okvirni sustav prema [34] za seizmičko djelovanje u ravnini okvira,
- SDOF model stupa mosta kružnog poprečnog presjeka visine $H=10$ m, promjera $D_c=2.5$ m, mase $m=1000$ t za dvosmjerno seizmičko djelovanje, a projektiran prema

metodologiji proračuna konstrukcija prema pomacima za seizmičko djelovanje (DBSD - Displacement-Based Seismic Design) [26].

Najprije su promatrane vrijednosti koeficijenta C_3 za 30 NSPA pushover krivulja sa $K_n < 0$, koje su svrstane u dvije grupe. U prvu grupu ubrajaju se NSPA pushover krivulje generirane za različite vrijednosti početne elastične krutosti K_e i razine duktilnosti μ (slika 7.a):

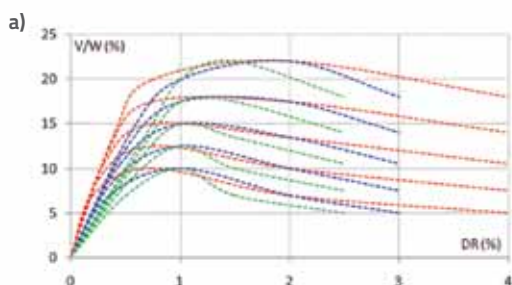
$$\begin{aligned} DR_y &= 0.2 + 0.05i & i &= 0, 1, \dots, 10 \\ DR_{max} &= 0.5i (DR_{IO,max} + DR_{IO,min}) & i &= 1, 1.333 \\ DR_{LS} &= DR_{LS,max} - i & i &= 0, 1, 1.5 \\ DR_{CP} &= DR_{CP,max} - i & i &= 0, 1, 1.5 \end{aligned} \tag{54}$$

$$\begin{aligned} (V/W)_y &= 0.7 (V/W)_{max} - \\ (V/W)_{max} &= 10 + 2.5j & j &= 0, 1, \dots, 4 \\ (V/W)_{LS} &= 6 + 4j & j &= 0, 1, \dots, 4 \\ (V/W)_{CP} &= 3 + 4j & j &= 0, 1, \dots, 4 \end{aligned} \tag{55}$$

Drugoj grupi pripadaju NSPA pushover krivulje generirane primjenom random funkcije uzimajući u obzir granice za linearno, nelinearno i područje sloma (slika 7.b):

$$\begin{aligned} DR_y &= 0.1 + 0.6rand() \\ DR_{max} &= 0.7 (DR_{IO,max} + DR_{IO,min}) (0.8 + 0.3rand()) \\ DR_{LS} &= 1.5 + 0.5rand() \\ DR_{CP} &= 2 + 2rand() \end{aligned} \tag{56}$$

$$\begin{aligned} (V/W)_y &= (0.05 + 0.3rand()) (V/W)_{max} \\ (V/W)_{max} &= 7.5 + 12.5rand() \\ (V/W)_{LS} &= (V/W)_{max} - 0.3rand() (V/W)_{max} \\ (V/W)_{CP} &= (V/W)_{max} - (0.3 + 0.4rand()) (V/W)_{max} \end{aligned} \tag{57}$$



Koeficijentom C_3 se uvode utjecaji dinamičkih $P-\Delta$ efekata, a budući da su oni značajni u formiranju oblika NSPA pushover krivulja sa $K_n < 0$, to je i istraživanje provedeno za te vrste krivulja. Metodom IDCM određene su vrijednosti koeficijenta C_3 za prethodno definirane NSPA pushover krivulje, i to za ukupno 180 IDCM analiza. Zatim je provedena serija nelinearnih regresijskih analiza s različitim vrstama funkcija. Najpovoljnije rješenje je postignuto s eksponencijalnom funkcijom jer je koeficijent korelacije bio najveći (slika 8.). Koeficijent korelacije r^2 određen je prema [38]:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{3,IDCM,i} - C_{3,IDCM,m})(C_{3,Reg,i} - C_{3,Reg,m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{3,IDCM,i} - C_{3,IDCM,m})^2 \sum_{i=1}^n (C_{3,Reg,i} - C_{3,Reg,m})^2}} \tag{58}$$

dok je standardna devijacija određena iz:

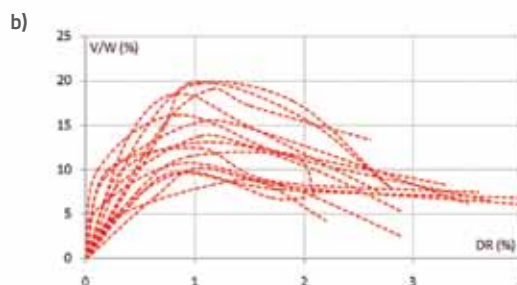
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{3,IDCM,i} - C_{3,IDCM,m})^2}{n - 1}} \tag{59}$$

Pri tome su proračunate: $C_{3,IDCM,i}$ diskretna vrijednost prema IDCM metodi, $C_{3,IDCM,m}$ srednja vrijednost prema IDCM metodi, $C_{3,Reg,i}$ diskretna vrijednost primjenom regresijske analize i $C_{3,Reg,m}$ srednja vrijednost također primjenom regresijske analize. Primjenom nelinearne regresije s eksponencijalnom funkcijom izveden je izraz za koeficijent C_3 u funkciji spektralnog ubrzanja S_d a za standardizirani model odgovora NSPA pushover krivulje:

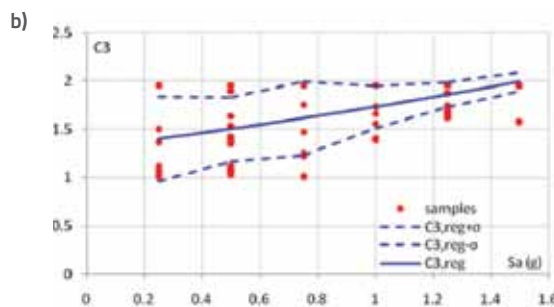
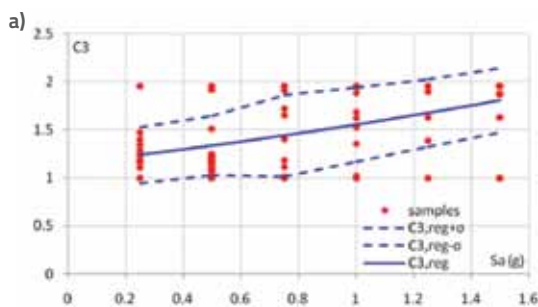
$$C_3 = 1.146e^{0.304S_d} \tag{60}$$

dok je za random funkciju odgovora NSPA pushover krivulje:

$$C_3 = 1.304e^{0.282S_d} \tag{61}$$



Slika 7. Generirane NSPA pushover krivulje: a) standardizirani modeli odgovora, b) random funkcija odgovora, prema izrazima (54) do (57)



Slika 8. Proračunate vrijednosti koeficijenta C_3 primjenom Nonlin Quake TD za NSPA pushover krivulje: a) standardizirani modeli odgovora; b) random funkcija odgovora

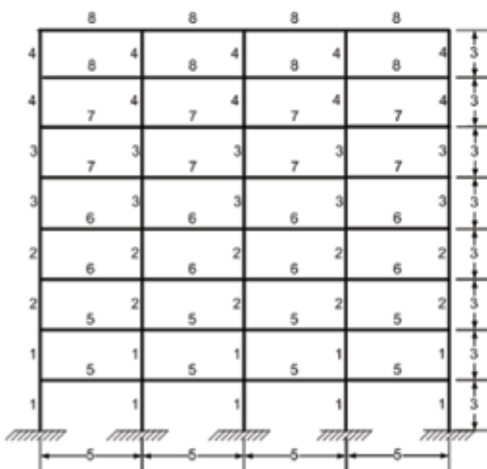
Konačno, za sve modele NSPA *pushover* krivulja izveden je izraz za koeficijent C_3 , a koji glasi:

$$C_3 = 1.222e^{0.293S_a} \quad (62)$$

U odnosu na rad [39] gdje je za istraživanje primijenjen bilinearni elastoplastični sustav, za potrebe ovog istraživanja je primijenjeno 30 NSPA *pushover* krivulja realnih i simuliranih odgovora zgrade kao MDOF sustava, tako da izrazi (60) do (62) mogu koristiti izravno u praktične svrhe.

U drugom dijelu istraživanja razmatran je 2D osmokatni četveropoljni pravilni okvirni sustav prema [34] (slika 9.) kod kojega je za IDCM metodu provedena parametarska analiza (40 analiza) broja iteracija N_{it1} , broja iteracija N_{it2} i dodatne maksimalne ukupne poprečne sile u osnovi građevine ΔV_{max} :

$$N_{it1} = (50; 200; 500; 2000), \quad N_{it2} = (5; 25; 50; 100), \quad \Delta V_{max} = (0; 10)\% \quad (63)$$



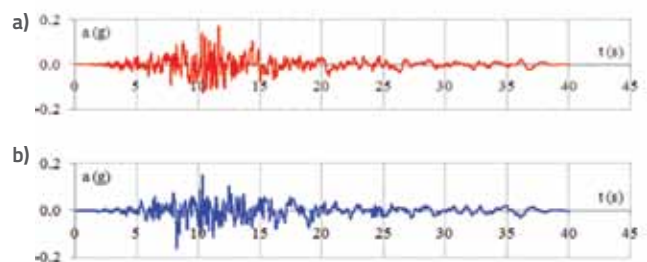
Slika 9. 2D osmokatni i četveropoljni pravilni okvirni sustav [34]

Tablica 1. Dimenzije i armatura poprečnih presjeka [34]

Štap	Tip	Dimenzije popr. presj.	Armatura			
			krajevi		sredina	
1	stup	40x60	2x5RØ19			
2	stup	40x55	2x3RØ19			
3	stup	40x50	2x3RØ19			
4	stup	40x40	2x3RØ19			
5	greda	30x60	A2	7RØ19	A2	3RØ19
			A1	4RØ19	A1	3RØ19
6	greda	30x55	A2	7RØ19	A2	3RØ19
			A1	4RØ19	A1	3RØ19
7	greda	30x45	A2	7RØ19	A2	3RØ19
			A1	4RØ19	A1	3RØ19
8	greda	30x40	A2	6RØ19	A2	2RØ19
			A1	3RØ19	A1	2RØ19

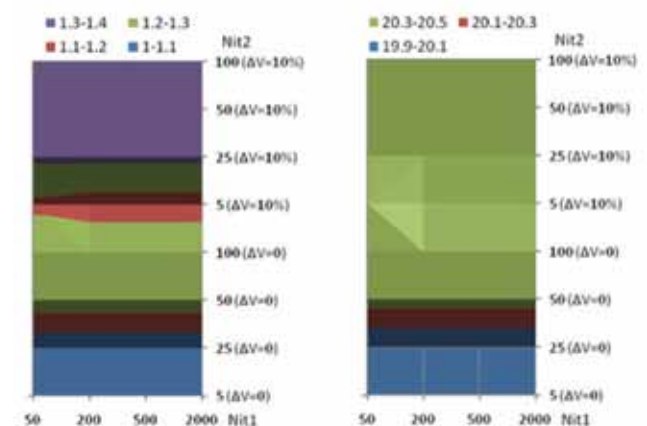
Određivanje preliminarnog broja iteracija prvog iterativnog postupka N_{it1} može se provesti i razmatrajući vrijednost ukupne poprečne sile u osnovi građevine V . Ako se usvoji da je minimalan inkrement priraštaja sile m , tada je potreban broj iteracija N_{it1} jednak V/m . S druge strane, određivanje broja iteracija prvog iterativnog postupka N_{it1} može se provesti i razmatrajući vrijednost maksimalnog pomaka građevine D_{max} . Ako se usvoji da je minimalan inkrement priraštaja pomaka n , tada je potreban broj iteracija N_{it1} jednak D_{max}/n . Opsežnim istraživanjem pokazalo se da je mjerodavniji kriterij kada se N_{it1} određuje iz odnosa V/m .

Analogiju u određivanju preliminarnog broja iteracija prvog iterativnog postupka N_{it1} nije moguće primijeniti i za drugi iterativni postupak N_{it2} . U ovom slučaju parametarska analiza i empirijski pristup bili su pouzdanije rješenje. Ukupno je provedeno 32 IDCM analize ciljanog pomaka. Prethodno je pomoću NDA određena razina ciljanog pomaka okvira $DR_{t,NDA} = 1,39\%$ i $(V/W)_{t,NDA} \approx 20\%$ za potres Loma Prieta (stanica Agnews State Hospital, LP89, $PGA_o = 0.17g$) prema PEER GMDB [40] (slika 10.).

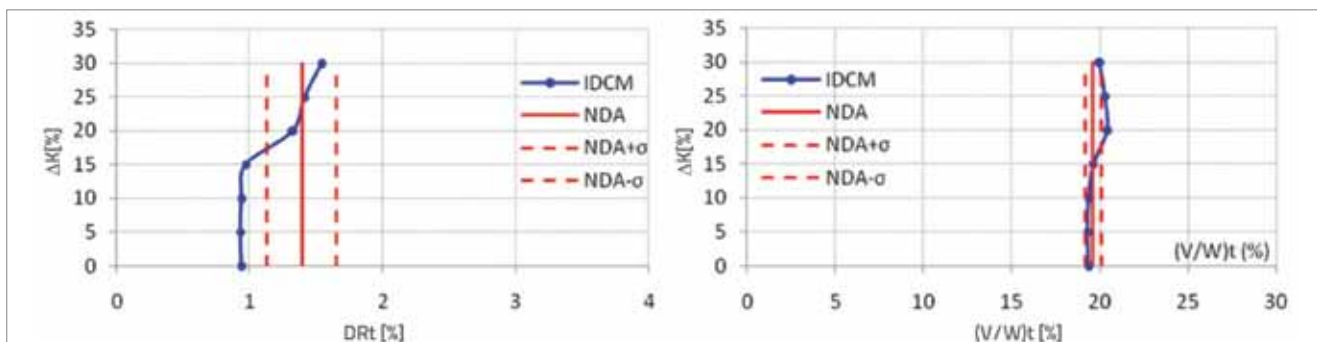


Slika 10. Originalni neskaliran akcelerogram Loma Prieta LP89: a) prva komponenta; b) druga komponenta

Na slici 11.a prikazane su proračunane vrijednosti sveukupnog relativnog pomaka za razinu ciljanog pomaka DR_t , dok su na slici 11.b prikazane proračunane relativne vrijednosti ukupne poprečne sile u osnovi građevine za razinu ciljanog pomaka $(V/W)_t$ prema IDCM.



Slika 11. Parametarska analiza za varijabilno N_{it1} , N_{it2} , ΔV_{max} : a) DR_t ; b) $(V/W)_t$



Slika 12. Parametarska analiza za varijabilno ΔK

Domena optimalnog broja iteracija N_{it1} i N_{it2} utvrđena je usporedbom sveukupnih relativnih pomaka za razinu ciljanog pomaka $DR_{t,IDCM}$ i $DR_{t,NDA}$ i odgovarajuće relativne vrijednosti ukupne poprečne sile u osnovi građevine $(V/W)_{t,IDCM}$ i $(V/W)_{t,NDA}$ parametarske IDCM metode i NDA analize:

$$\begin{aligned} N_{r1} \in (50;2000) &\Rightarrow 1250 \leq \Sigma N_{it} \leq 200000 \\ N_{r2} \in (25;100) &\end{aligned} \quad (64)$$

Drugi parametar koji znatno utječe na razinu ciljanog pomaka jest vrijednost redukcije početne elastične krutosti ΔK , na osnovi kojega se određuje K_{eff} . Parametarska IDCM metoda je provedena za vrijednosti ΔK (slika 12.):

$$\Delta K = (0;5;10;15;20;25;30)\% \quad (65)$$

a kao mjerodavna, razmatrana je razina ciljanog pomaka prema NDA.

Opći je zaključak da je kod NSPA *pushover* krivulja sa $K_n < 0$ preporučljivo koristiti određeno povećanje maksimalne vrijednosti ukupne poprečne sile u osnovi građevine ΔV_{max} oko 5-10 %, a preporučuje se uvesti i razliku između početne i efektivne krutosti $K_e \neq K_{eff}$ u određivanju razine ciljanog pomaka. U analizama gdje se usvaja $K_{eff} = K_e$ može se očekivati manja razina ciljanog pomaka u postupku bilinearizacije.

U trećem dijelu istraživanja razmatran je SDOF model stupa mosta kod koga je, za IDCM, također provedena parametarska analiza izravno skalirajući po maksimalnom ubrzanju tla (PGA - *peak ground acceleration*). Kao što je rečeno, stup je kružnog poprečnog presjeka, promjera $D_o = 2.5$ m, visine $H = 10$ m i mase $m = 1000$ t, a projektiran je za dvosmjerno seizmičko djelovanje

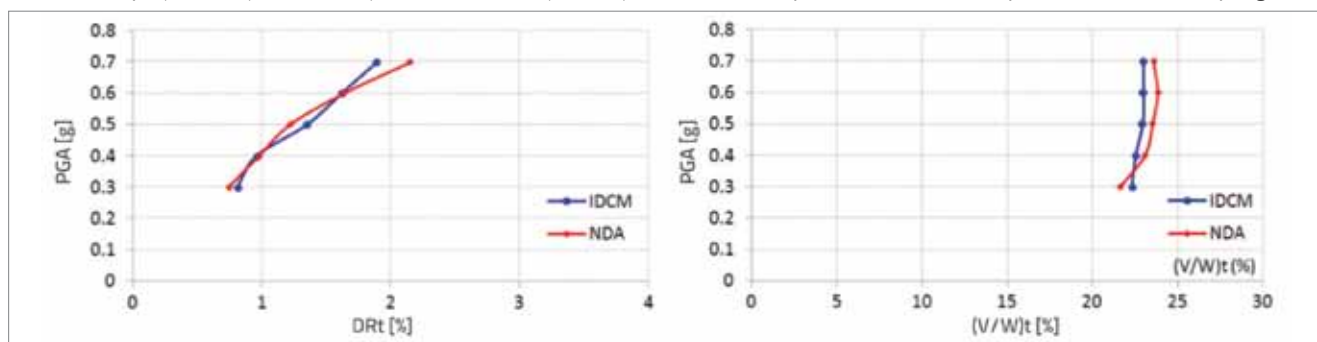
prema metodologiji seizmičkog proračuna konstrukcija prema pomacima (DBSD), [26]. Analize su provedene za *Loma Prieta* (prethodno prikazan) dvokomponentni akcelerogram (eng. FP - *fault parallel* i FN - *fault normal accelerations*). Zatim su generirane međukomponente akcelerograma za inkrementni priraštaj kuta od $\Delta\theta = 30^\circ$, tako da je razmatrano ukupno 12 međukomponenti. Postupak generiranja međukomponenta akcelerograma provodi se rotacijom komponenata FP i FN u referentni koordinatni sustav, gdje se u konačnom obliku dobiva:

$$\begin{bmatrix} a_\theta(t) \\ a_{\theta-90}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{FP}(t) \\ a_{FN}(t) \end{bmatrix} \quad (66)$$

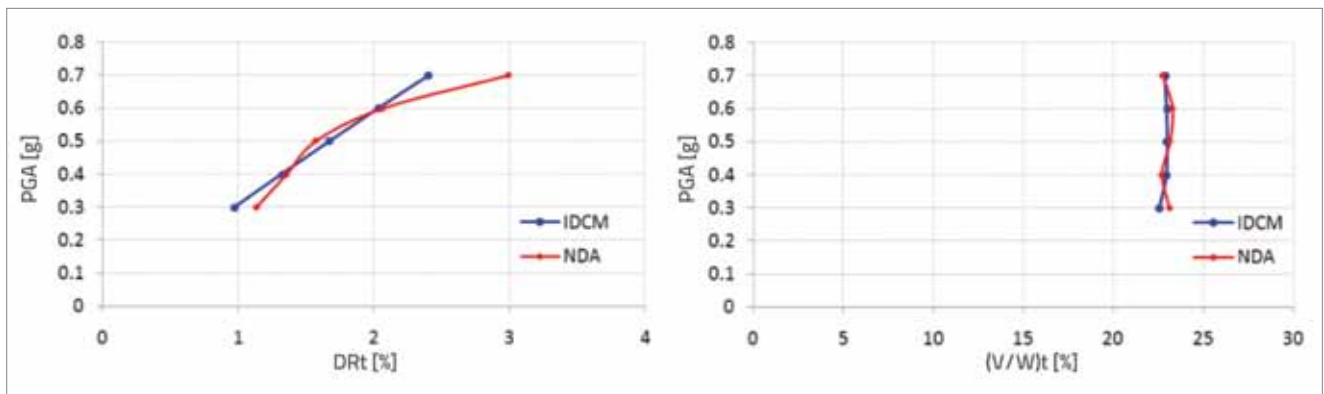
gdje je $a_\theta(t)$ akcelerogram za kut rotacije θ , $a_{FP}(t)$ akcelerogram za FP pravac, $a_{FN}(t)$ akcelerogram za FN pravac. Kut ϕ se određuje prema:

$$\phi = \alpha_i - 90^\circ + i\Delta\theta \text{ za } i = 0, \dots, 11 \quad (67)$$

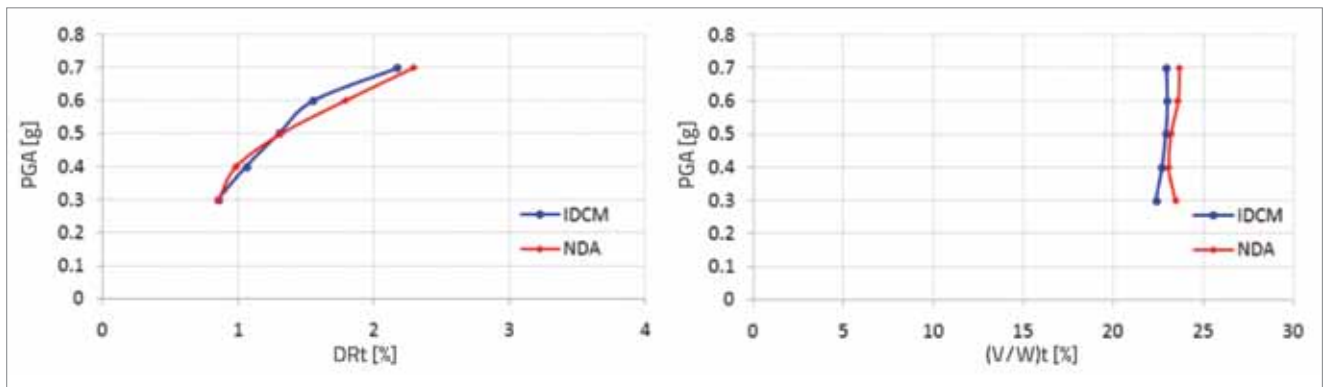
gdje je α_j kut položaja rasjeda. Analogno broju međukomponenti akcelerograma generiran je i isti broj *pushover* krivulja iz NSPA i određeni su ciljani pomaci iz IDCM. Na slikama 13 do 18 prikazani su isječci NSPA i NDA *pushover* krivulja, koji su generirani kao razina ciljanih pomaka dobivenih parametarskom analizom. U slučaju NDA isječci su dijelovi INDA *pushover* krivulje (INDA - *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*), dok u slučaju NSPA isječci su dijelovi NSPA *pushover* krivulje za razinu skaliranja $PGA = 0.3 \cdot 0.7$ g. Ukupno je provedeno 60 IDCM i NDA analiza. Uočeno je veoma zadovoljavajuće slaganje vrijednosti relativnih pomaka realiziranih prema IDCM i NDA pri gotovo



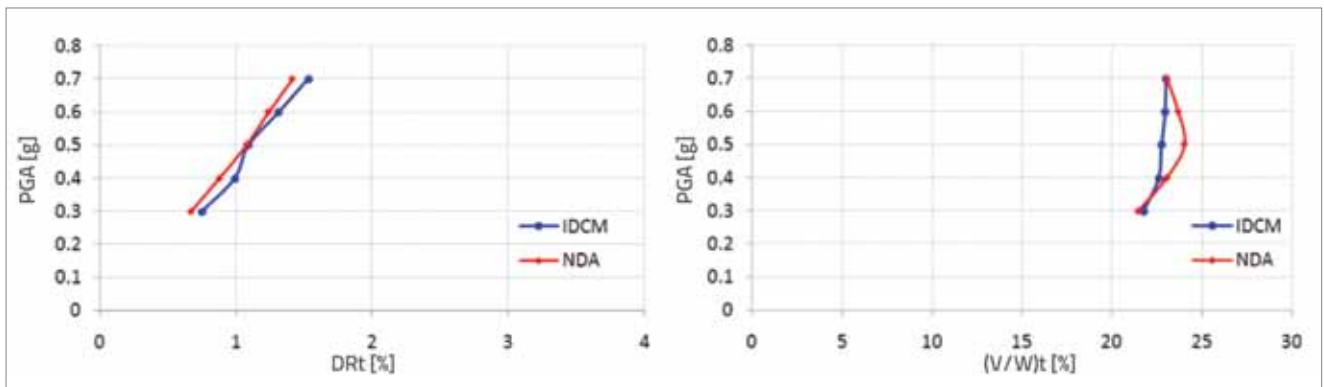
Slika 13. Isječci *pushover* krivulja za razine ciljanih pomaka pri $\theta = 0^\circ$



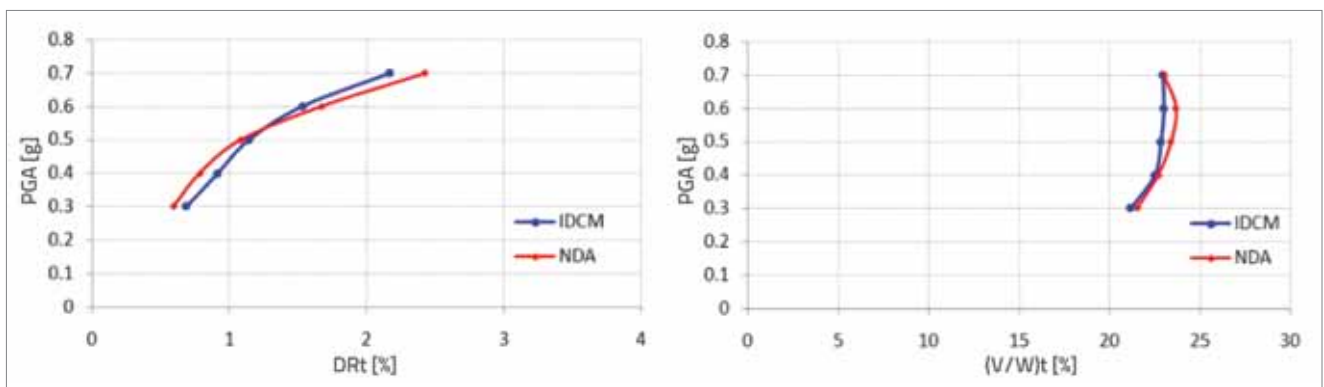
Slika 14. Isječci *pushover* krivulja za razine ciljanih pomaka pri $\theta = 30^\circ$



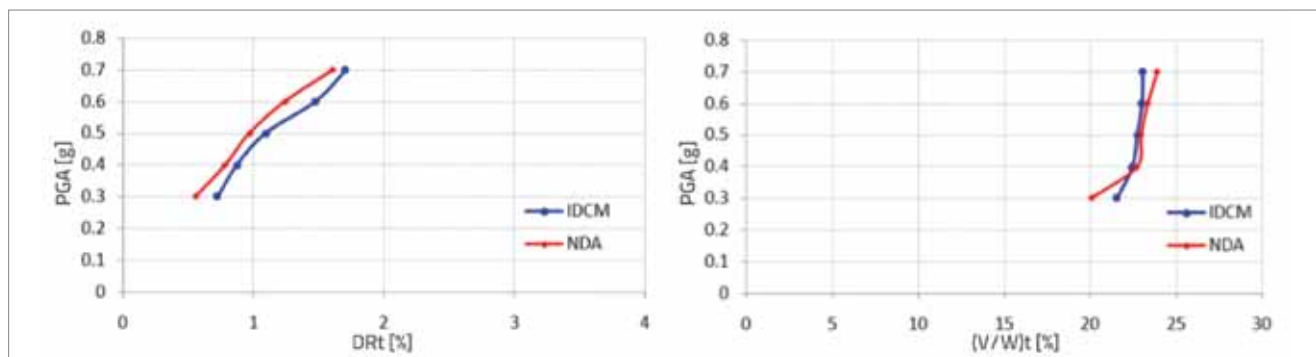
Slika 15. Isječci *pushover* krivulja za razine ciljanih pomaka pri $\theta = 60^\circ$



Slika 16. Isječci *pushover* krivulja za razine ciljanih pomaka pri $\theta = 90^\circ$



Slika 17. Isječci *pushover* krivulja za razine ciljanih pomaka pri $\theta = 120^\circ$



Slika 18. Isječci *pushover* krivulja za razine ciljanih pomaka pri $\theta = 150^\circ$: a) DR_t ; b) $(V/W)_t$

svim razinama ciljanih pomaka DR_t . Također, minimalna su odstupanja relativne vrijednosti ukupne poprečne sile u osnovi građevine realizirana IDCM metodom u odnosu na rješenja dobivena NDA metodom pri razinama ciljanih pomaka $(V/W)_t$.

6. Zaključak

U ovom je radu prikazana matematička formulacija i numerička analiza originalno razvijene *iterativne metode koeficijentata pomaka* (IDCM) s algoritmom *korak po korak*. IDCM je postupak iz područja analize utjecaja potresa na građevine primjenom *nelinearne statičke pushover analize*. Prvobitna ideja je bila da se IDCM algoritam provodi primjenom trostrukih iteracija: prvi iterativni postupak za efektivnu krutost, drugi iterativni postupak općenito za sile i pomake i treći iterativni postupak za korekciju dobivenog rješenja za razinu ciljanih pomaka po *pushover* krivulji. Naknadnom optimizacijom algoritma obavljena je redukcija broja iteracija uz testiranje dobivenih rješenja, tako da je u konačnom obliku prikazan dvostruki iterativni algoritam. IDCM implementirana je u originalno razvijenu računalnu aplikaciju *Nonlin Quake TD*, a koja je dio složene računalne platforme *Nonlin Quake* za nelinearnu seizmičku analizu okvirnih zgrada prema zahtjevanim svojstvima IDCM metoda implementirana u *Nonlin Quake TD* omogućava širok spektar variranja parametara, a čime se izravno utječe na kvalitetu dobivene razine ciljanog pomaka. U zavisnosti od selektiranih opcija za provedbu jedne analize ciljanog pomaka, a koje su implementirane u *Nonlin Quake TD*, mogu se dobiti manje ili više pouzdana rješenja. Također, u određenim situacijama se mogu pojaviti i numerički neprihvatljiva kvazirješenja, gdje

robustnost računalnog programa pokazuje najčešće potrebu za korigiranjem broja iteracija N_{it1} , N_{it2} i dodatnu maksimalnu ukupnu poprečnu silu u osnovi građevine ΔV_{max} .

U prvom dijelu istraživanja primjenom nelinearne regresije s eksponencijalnom funkcijom izveden je izraz za vrijednost koeficijenta C_3 u funkciji spektralnog ubrzanja S_a . Za potrebe tog istraživanja primijenjeno je 15 NSPA *pushover* krivulja generiranih za standardizirane modele odgovora zgrada i 15 NSPA *pushover* krivulja generiranih primjenom *random* funkcije. Koeficijent C_3 je određen, dakle, primjenom prethodno prikazanih NSPA *pushover* krivulja i varijacijom spektralnog ubrzanja u intervalu $S_a = 0,25 \cdot 1,5$ g, pri čemu je ukupan broj analiza ciljanog pomaka 180. U drugom dijelu parametarsko istraživanje je provedeno s ciljem određivanja potrebnog broja iteracija N_{it1} i N_{it2} za realan 2D osmokatni četveropoljni pravilni okvirni sustav. Skup optimalnog broja iteracija je u intervalu od 1250 do 200.000. Vrijednosti s najviše 200.000 iteracija može se zahtijevati u situacijama kada je odabrano $\Delta V_{max} = 0$ i kada, u iznimnim slučajevima, nije moguće osigurati rješenje s manjim brojem iteracija. U trećem dijelu istraživanja provedeno je 60 IDCM i NDA analiza. Usporedbom rješenja dobivenih primjenom IDCM i NDA utvrđeno je veoma dobro podudaranje vrijednosti relativnih pomaka DR_t i relativne vrijednosti ukupne poprečne sile u osnovi građevine $(V/W)_t$ za razinu ciljanog pomaka.

Zahvala

Rad je izrađen u okviru projekta TP 36043 koji je financiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja R. Srbije, na čemu drugi autor posebno zahvaljuje.

LITERATURA

- [1] ATC 40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Vol. 1, Applied Technology Council, 346p, Redwood City, USA, 1996.
- [2] FEMA 273, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of the Buildings*, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, 435p, Washington D. C., USA, 1997.
- [3] 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.

- [4] FEMA 356, *Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, American Society of Civil Engineers, Federal Emergency Management Agency, 519p, Washington D. C., USA, 2000.
- [5] FEMA 440, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Applied Technology Council (ATC-55 Project), Federal Emergency Management Agency, 392p, Washington D. C., USA, 2005.
- [6] Freeman, S.: Development and Use of Capacity Spectrum Method, 6th U.S. NCEE Conference on Earthquake Engineering, Seattle, USA, No. 269, pp. 1-12, 1998.
- [7] Freeman, S.: Review of the Development of the Capacity Spectrum Method, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 438, Vol. 41, No. 1, pp. 1-13, 2004.
- [8] Guyader, A.: *A Statistical Approach to Equivalent Linearization with Application to Performance-Based Engineering*, PhD Dissertation, California Institute of Technology, 158p, Pasadena, USA, 2003.
- [9] Guyader, A., Iwan, W.: User Guide for AutoCSM: *Automated Capacity Spectrum Method of Analysis*, California Institute of Technology, Report No. EERL 2004-05, 28p, Pasadena, USA, 2004.
- [10] Cassaroti, C., Pinho, R.: An Adaptive Capacity Spectrum Method for Assessment of Bridges Subjected to Earthquake Action, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 4., pp. 377-390, 2007.
- [11] Lin, Y.-Y., Chang, K.: An Improved Capacity Spectrum Method for ATC 40, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 13, pp. 2013-2025, 2003.
- [12] Mingkui, X., Yinfeng, D., Gang, L., Guangjun, C.: An Improved Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra, 4th International Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 230, pp. 1-8, Taipei, Taiwan, 2006.
- [13] Fajfar, P.: Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 9, pp. 979-993, 1999.
- [14] Gencturk, B., Elnashai, A.: Development and Application of an Advanced Capacity Spectrum Method, *Engineering Structures*, Elsevier, 30, pp. 3345-3354, 2008.
- [15] Lin, Y.-Y., Miranda, E.: Non-Iterative Capacity Spectrum Method Based on Equivalent Linearization for Estimating Inelastic Deformation Demands of Buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, No. 2, pp. 113s-119s, 2004.
- [16] Erduran, E., Kunnath, S.: Enhanced Displacement Coefficient Method for Degrading Multi-Degree-of-Freedom Systems, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 2, pp. 311-326, 2010.
- [17] Ruiz-Garcia, J.: Evaluation of Coefficient Method for Seismic Assessment of Existing Buildings Built on Soft Soil Sites, ATC and SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, pp. 465-476, San Francisco, USA, 2009.
- [18] Fajfar, P., Fischinger, M.: N2 - Method for Nonlinear Seismic Analysis of Regular Structures, 9th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 5, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988.
- [19] Fajfar, P.: A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design, *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 3, pp. 573-592, 2000.
- [20] Fajfar, P.: Structural Analysis in Earthquake Engineering – A Breakthrough of Simplified Non-Linear Methods, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 843, pp. 1-20, London, UK, 2002.
- [21] Chopra, A., Goel, R.: *A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimating Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, PEER Report 2001/03, 87p, 2001.
- [22] Sasaki, K., Freeman, S., Paret, T.: Multi-Mode Pushover Procedure (MMPP) – A Method to Identify the Effects of Higher Modes in a Pushover Analysis, 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-12, Seattle, USA, 1998.
- [23] Sucuoglu, H., Gunay, S.: Generalized Force Vectors for Multi-Mode Pushover Analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 40, No. 1, pp. 55-74, 2011.
- [24] Kalkan, E., Kunnath, S.: Method of Modal Combinations for Pushover Analysis of Buildings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2713, pp. 1-15, Vancouver, Canada, 2004.
- [25] Kalkan, E., Kunnath, S.: Adaptive Modal Combination Procedure for Nonlinear Static Analysis of Building Structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 11, pp. 1721-1731, 2006.
- [26] Priestley, M., Calvi, G., Kowalsky, M.: *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, 720p, Pavia, Italy, 2007.
- [27] Powel, G., Allahabadi, R.: Seismic Damage Prediction Deterministic Methods: Concepts and Procedures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, No. 5, pp. 719-734, 1988.
- [28] Halvorson, M.: Visual Basic 6.0 Professional (Step by Step), Microsoft, 667p, 2002.
- [29] Davis, G.: *VBA Mastering*, SYBEX, 707p, 2005.
- [30] SEAOC Blue book: *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, Report prepared by Structural Engineers Association of California, 440p, Sacramento, USA, 1999.
- [31] HAZUS-MH MR1, *Advanced Engineering Building Module, Multi-Hazard Loss Estimation Methodology*, Federal Emergency Management Agency, 119p, Washington D. C., USA, 2003.
- [32] Pinho, R., Bento, R., Bhatt, C.: Assessing the 3D Irregular Spear Building with Nonlinear Static Procedures, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 158, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
- [33] Lađinović, Đ., Folić, R., Ćosić, M.: Comparative Analysis of Seismic Response of Regular and Irregular Multi-Storey Frame Buildings, 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Macedonia, 2010.
- [34] Ćosić, M.: *Nelinearna statička seizmička analiza višespratnih okvira*, Magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 230str, Novi Sad, Srbija, 2010.
- [35] SeismoSoft, URL: <http://www.seismosoft.com>, 10.10.2011.
- [36] Vose, D.: *Risk Analysis: A Quantitative Guide*, John Wiley & Sons, 729p, New York, USA, 2008.
- [37] Elnashai, A., Sarno, L.: *Fundamentals of Earthquake Engineering*, John Wiley & Sons, 374p, New York, USA, 2008.
- [38] Devore, J.: *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, Brooks/Cole, 776p, Boston, USA, 2010.
- [39] Miranda, E., Akkar, S.: Dynamic Instability of Simple Structural Systems, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 12, pp. 1722-1726, 2003.
- [40] Pacific Earthquake Engineering Research Center, URL: <http://peer.berkeley.edu/>, 15.05.2012.