

M. Petronijević, M. Marjanović, and P. Radeka, 'Seismic Assessment of RC Buildings using N2 Method', in Zbornik radova / Šesto međunarodno naučno-stručno savetovanje Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija = Conference Proceedings / Sixth International Conference Seismic Engineering and Engineering Seismology, Kraljevo, 13.-15. jun 2018. godine, Beograd, 2018, pp. 387–395.

UDC: 624.012.45.042.7
Izvorni naučni članak

PROCENA PONAŠANJA AB ZGRADA PRI DEJSTVU ZEMLJOTRESA PRIMENOM N2 METODE

Mira Petronijević*, Miroslav Marjanović*, Petar Radeka**

* *Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Email: pmira@grf.bg.ac.rs,
mmarjanovic@grf.bg.ac.rs*

** *Conpro d.o.o., Joakima Vujića 10, Novi Sad, office@conpro.rs*

REZIME

U radu su prikazani rezultati uporedne analize ponašanja osmospratne AB zgrade tipa: (1) prostornog okvira i (2) prostornog okvira sa zidnim platnima, u skladu sa EN1998-1, primenom N2 metode. Proračun je sproveden standardnom pushover analizom i multi modalnom pushover analizom primenom programa ETABS. Upoređena su dobijena ciljna pomeranja, pojava i raspored plastičnih zglobova i relativna međuspratna pomeranja (interstory drift) za projektni zemljotres, na osnovu čega su izvedeni određeni zaključci.

KLJUČNE REČI: AB prostorni okvir, zidna platna, multimodalna pushover analiza

SEISMIC ASSESMENT OF RC BUILDINGS USING N2 METHOD

ABSTRACT

This paper presents the results of a comparative analysis of the behavior of a eight-storey RC building of type: (1) spatial frame and (2) spatial frame with shear walls, according to EN1998-1, using N2 method. The analysis was carried out using standard pushover analysis and multi-modal pushover analysis, using ETABS software. The obtained target displacements, appearance and arrangement of plastic hinges and interstory drifts were compared for the design earthquake, and certain conclusions were carried out.

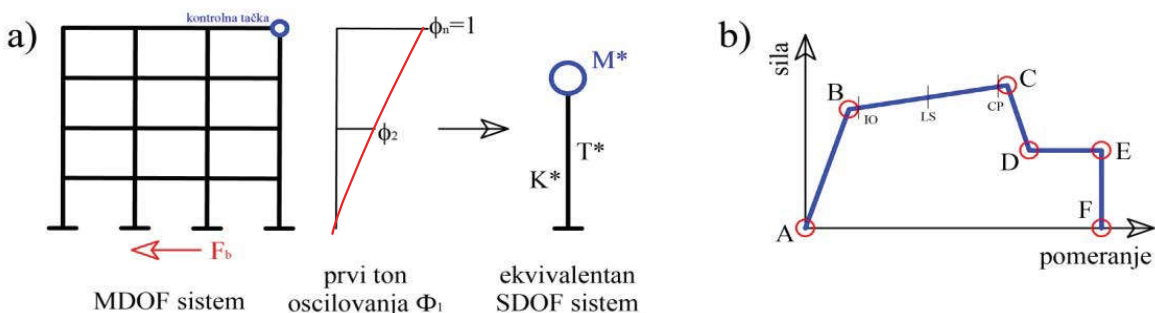
KEY WORDS: RC space frame, shear walls, multi-modal pushover analysis

UVOD

U ovom radu su prikazani uporedni rezultati analize ponašanja AB osmospratne zgrade sa dva različita konstruktivna sistema, i to: (1) ramovske konstrukcije i (2) ramovske konstrukcije sa zidnim platnima, pri ekstremnom zemljotresnom ubrzanju od 0.4g. Procena ponašanja sprovedena je u skladu sa (EN1998-1, 2006), korišćenjem standardne pushover analize (SPA) i multi modalne pushover analize (MPA) u programu ETABS.

N2 METODA

N2 metoda je varijanta metode spektra kapaciteta koja se zasniva na neelastičnom spektru (Fajfar, 1999, 2000). Kapacitet ramovske konstrukcije se određuje nelinearnom statičkom (*pushover*) analizom, u kojoj se pretpostavlja da je prvi ton oscilovanja dominantan i da je horizontalno opterećenje konstrukcije proporcionalno pomeranjima u prvom tonu. Opterećivanjem okvirne konstrukcije pretpostavljenim bočnim opterećenjem dobija se kriva zavisnosti sile u osnovi (F_b) i pomeranja kontrolne tačke (d_t), tzv. pushover kriva, slika 1a. Da bi se kapacitet konstrukcije mogao uporediti sa zadatim seizmičkim zahtevom (elastičnim spektrom), pushover kriva sistema sa više stepeni slobode (MDOF) se konvertuje u krivu kapaciteta ekvivalentnog sistema sa jednim stepenom slobode (SDOF).



Slika 1. a) MDOF sistem, prvi ton oscilovanja i ekvivalentni SDOF system; b) dijagram sila-pomeranje za procenu stanja prema FEMA 356

Horizontalna sila u osnovi F_b i pomeranje vrha d_t MDOF sistema konvertuju se u spektralno ubrzanje S_a i spektralno pomeranje S_d SDOF sistema, primenom sledećih izraza:

$$S_a = \frac{F_b}{\Gamma M^*} \quad S_d = d_t^* = \frac{d_t}{\Gamma} \quad (1)$$

gde je:

$$\Gamma = \frac{\Phi^T \mathbf{M} \{1\}}{\Phi^T \mathbf{M} \Phi} \quad M^* = \Phi^T \mathbf{M} \Phi \quad (2)$$

Φ i \mathbf{M} su svojstveni vektor i matrica masa posmatranog okvira, slika 1a, Γ je faktor participacije, a M^* masa ekvivalentnog SDOF sistema. Ciljno pomeranje, d_{et}^* , ekvivalentnog SDOF sistema sa periodom T^* i neograničenim elastičnim ponašanjem jednako je:

$$d_{et}^* = S_{de}(T^*) = S_{ae}(T^*) \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad T^* = 2\pi \sqrt{\frac{M^* d_y^*}{F_y^*}} \quad (3)$$

gde su $S_{ae}(T^*)$ i $S_{de}(T^*)$ ordinata i apscisa elastičnog spektra, slika 2.

Na slici 2 prikazane su kriva kapaciteta, elastični spektar i neelastični spektar u ADRS formatu, kao i grafički postupak dobijanja ciljnog pomeranja SDOF sistema. Prema EN1998-1, ciljno pomeranje ekvivalentnog SDOF sistema se može odrediti i direktno, u

zavisnosti od toga da li je period oscilovanja ekvivalentnog SDOF sistema (T^*) veći ili manji od T_C . Ukoliko je $T^* < T_C$, i ako je:

$$\square S_{ay} = F_y^*/m^* \geq S_{ae}(T^*) \text{ odgovor je elastičan i } d_t^* = d_{et}^*$$

$$\square S_{ay} = F_y^*/m^* < S_{ae}(T^*) \text{ odgovor je nelinearan i } d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} (1 + (q_u - 1) \frac{T_C}{T^*}) \geq d_{et}^*$$

gde je q_u faktor ponašanja, koji predstavlja odnos između ubrzanja u konstrukciji sa neograničenim elastičnim ponašanjem i ubrzanja u konstrukciji sa ograničenom nosivošću:

$$q_u = \frac{S_e(T^*)M^*}{F_y^*} = \frac{S_e(T^*)}{S_{ay}} \quad (4)$$

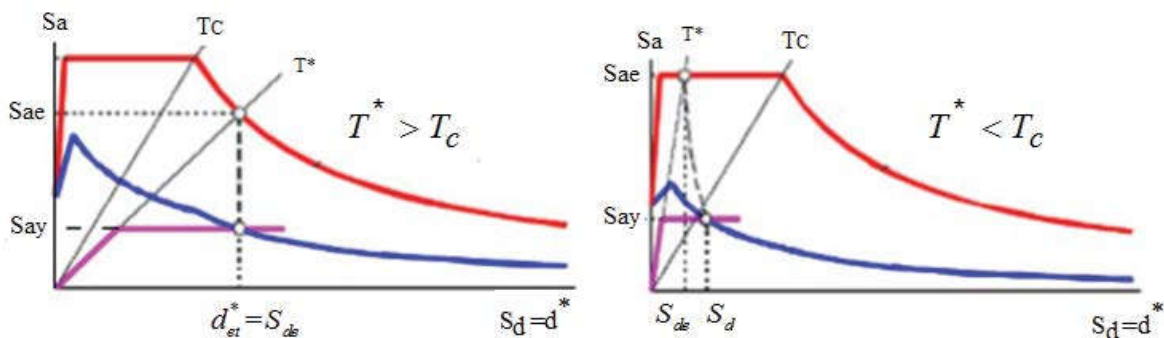
Ukoliko je period oscilovanja ekvivalentnog SDOF sistema u oblasti srednjih i dugih perioda ($T^* > T_C$), onda je pomeranje ekvivalentnog SDOF sistema: $d_t^* = d_{et}^* < 3d_{et}^*$.

Ciljno pomeranje MDOF sistema dobija se iz sledeće jednačine:

$$d_t = \Gamma d_t^* \quad (5)$$

Opterećivanjem MDOF sistema horizontalnim opterećenjem sve dok se ne postigne zadato ciljno pomeranje d_t dobija se uvid u ponašanje konstrukcije pri nelinearnom odgovoru, tj. raspored plastičnih zglobova, relativna međuspratna pomeranja i sile u osnovi konstrukcije, na osnovu kojih se određuje nivo oštećenja i sigurnost ramovske konstrukcije pri zatom seizmičkom dejstvu. Dijagram sila-pomeranje, na osnovu koga se vrši procena stanja konstrukcije prema FEMA 356, prikazan je na slici 1b, gde je:

A - početno stanje	CP - zaštita od rušenja	D - rezidualna otpornost
IO - trenutna useljivost	B - granica tečenja	E - totalni kolaps
LS - zaštita života	C - granični kapacitet	F - krajnje stanje



Slika 2. Grafički prikaz određivanja ciljnog pomeranja

— elastični spektar, — neelastični spektar — kriva kapaciteta u ADRS formatu

MULTI MODALNA PUSHOVER ANALIZA (MPA)

Kod višespratnih konstrukcija umesto standardne pushover analize (SPA), koristi se multimodalna analiza. Osnovne pretpostavka MPA je da su oscilacije male, tako da se svaki ton može posmatrati nezavisno od ostalih tonova. Ukupan broj tonova koji se uzima u analizi treba da sadrži više od 90% modalne mase. Za svaki ton i sprovodi se nezavisna pushover analiza za opterećenje horizontalnim silama

$$s_i^* = \mathbf{M}\Phi_i \quad (6)$$

gde je \mathbf{M} matrica masa, a Φ_i vektor svojstvenih oblika i -tog tona oscilovanja. Idealizovana, bilinearna, pushover kriva F_{bi} - $d_{t,i}$ se prevodi u krivu kapaciteta za n -ti ton u ADRS formatu, primenom sledećih izraza (Chopra&Goel, 2001):

$$S_{ai} = \frac{F_{bi}}{\Gamma_i M_i^*} \quad S_{di} = d_{t,i}^* = \frac{d_{t,i}}{\Gamma_i \Phi_i} \quad (7)$$

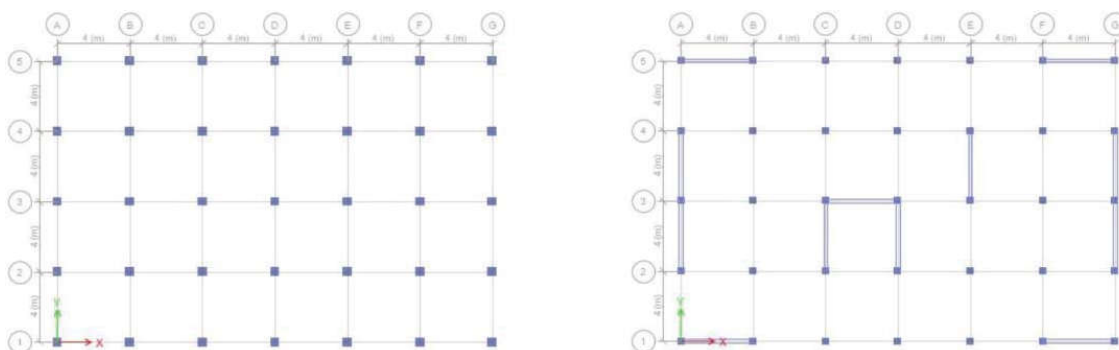
gde su F_{bi} i $d_{t,i}$ sila u osnovi i pomeranje kontrolne tačke, Γ_i i M_i^* su faktor participacije i ekvivalentna masa za ton i . Za dobijanje ciljnog pomeranja potrebno je odrediti neelastični spektar, deljenjem elastičnog spektra faktorom redukcije $R_{\mu,i}$. Faktor redukcije se određuje za 2 karakteristična slučaja na osnovu navedenih izraza:

$$\begin{aligned} \square \text{ za } T_i^* < T_C &\Rightarrow R_{\mu,i} = (\mu - 1) \frac{T_i^*}{T_C} + 1 \Rightarrow S_{a,i} = \frac{S_{ae,i}}{R_{\mu,i}}, \quad d_{t,i}^* = S_{d,i} = \frac{\mu_i}{R_{\mu,i}} S_{de,i} \\ \square \text{ za } T_i^* > T_C &\Rightarrow R_{\mu,i} = \mu_i \Rightarrow S_{a,i} = \frac{S_{ae,i}}{\mu_i}, \quad d_{t,i}^* = d_{et,i}^* \end{aligned} \quad (8)$$

gde je $\mu_i = d_{et,i}^* / d_{yi}^*$ odnos pomeranja $d_{et,i}^*$ idealno elastičnog sistema koje odgovara periodu oscilovanja T_i^* i pomeranja na granici tečenja d_{yi}^* ekvivalentnog SDOF sistema (Slika 2). Ukupno ciljno pomeranje dobija se sumiranjem vrednosti dobijenih za n tonova primenom SRSS postupka.

PRIMER

Za ilustraciju metode opisane u prethodnim poglavljima, izvršena je uporedna analiza dve osmospratne AB zgrade, sa i bez zidnih platana, spratne visine $H_s = 3\text{m}$, na dejstvo zemljotresa primenom N2 metode. Zgrade su pravougaone u osnovi, sa 6×4 raspona od 4m ($24 \times 16\text{m}$), klase značaja II prema EN1992. Dispozicije dve razmatrane konstrukcije su prikazane na slici 3. Osnovni materijal je beton C30/37 ($E=33\text{ GPa}$, $\nu = 0.2$, $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$).



Slika 3. Osnove razmatranih konstrukcija AB zgrada

Konstrukcije su prethodno dimenzionisane na vertikalna opterećenja i horizontalno dejstvo zemljotresa (metoda ekvivalentnih bočnih sila, za tlo tipa A prema EN1998-1 i $a_{gR}=0.1g$). Dimenzije stubova b_s/h_s , greda b_g/h_g i zidova d_z usvojene su iz uslova potrebne duktilnosti prema EC8 za srednje duktilne konstrukcije (DCM, $q=3.5$). Debljine ploča d_p usvojene su iz uslova ograničenja ugiba. Dodatna masa po spratovima (dodatno stalno opterećenje + korisno opterećenje) usvojeno je prema EN1998-1. Usvojene dimenzije konstruktivnih elemenata i usvojene količine armature u gredama i stubovima date su u Tabeli 1.

Tabela 1. Usvojene dimenzije konstruktivnih elemenata i količine armature u gredama i stubovima

Model	b_s/h_s	A_{as}	d_z	b_g/h_g	A_{ag}	d_p
bez zidova	50×50 cm	32.16 cm ²	-	20/40 cm	±7.62 cm ²	14 cm
sa zidovima	40×40 cm	16.08 cm ²	20 cm	20/40 cm	±7.62 cm ²	14 cm

Masa konstrukcije iznosi za model bez zidova $m_A = 1928.92t$, a za model sa zidovima $m_B = 2200.92t$. Starenje i potencijalna oštećenja konstrukcije su uzeta u obzir redukcijom modula elastičnosti u stubovima prema EN1998-1 na 50% njegove prvobitne vrednosti. Modalna, SPA i MPA analize su urađene u programu ETABS. Zemljotresno opterećenje definisano je elastičnim spektrom odgovora za tlo tipa A, ekstremnim ubrzanjem od $a_g=0.4g$ i prigušenjem od 5%. Pretpostavljena je pojava plastičnih zglobova na krajevima greda i u uklještenjima stubova. Usvojen je tip plastičnih zglobova P-M3 u programu ETABS. Rezultati SPA i MPA analize suprikazani za x-pravac. U Tabeli 2 prikazani su periodi oscilovanja za prva 3 tona, koja daju više od 90% modalne mase.

Tabela 2. Periodi oscilovanja za prva 3 tona u x-pravcu, za oba razmatrana modela

Model	T_1	T_2	T_3
bez zidova	0.771	0.243	0.133
sa zidovima	0.378	0.087	0.039

Standardna pushover analiza (SPA)

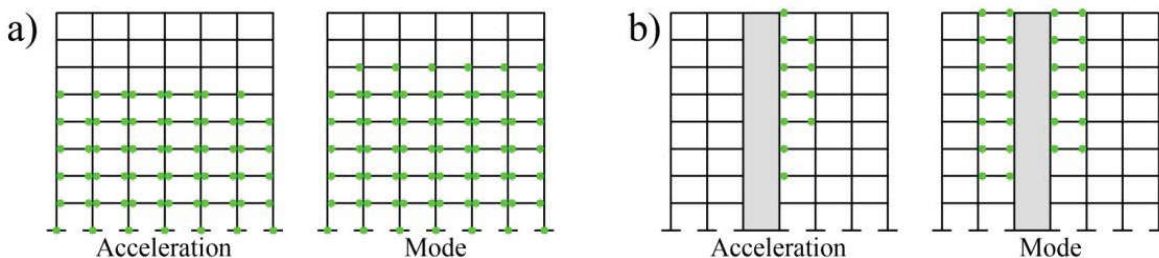
Ponašanje prostorne konstrukcije opisano je ponašanjem centralnog rama paralelnog x-pravcu (Chopra&Goel, 2001). Oba modela (A i B) su podvrgnuta pushover opterećenju bočnim silama usled: (i) jednako podeljenog opterećenja (Acceleration) i (ii) trougaonog

opterećenja (Mode) koje odgovara prvom tonu u x -pravcu, za zadato ciljno pomeranje od 720mm (3% od ukupne visine zgrade), prema EN1998-1.

Tabela 3. Rezultati SPA analize za oba modela i obe raspodele bočnog opterećenja

Model	Γ	Opt.	T^*	R_{μ}	$S_d=S_{de}=d_t^*$	$d_t=\Gamma d_t^*$	$1.5d_t$
Bez zidova	1.297	Acc.	0.964s	2.071	9.58cm	12.43cm	18.64cm
		Mode	1.102s	2.370	10.95cm	14.21cm	21.32cm
Sa zidovima	1.448	Acc.	0.479	1.378	4.76cm	6.90cm	10.35cm
		Mode	0.531	4.059	5.28cm	7.64cm	11.46cm

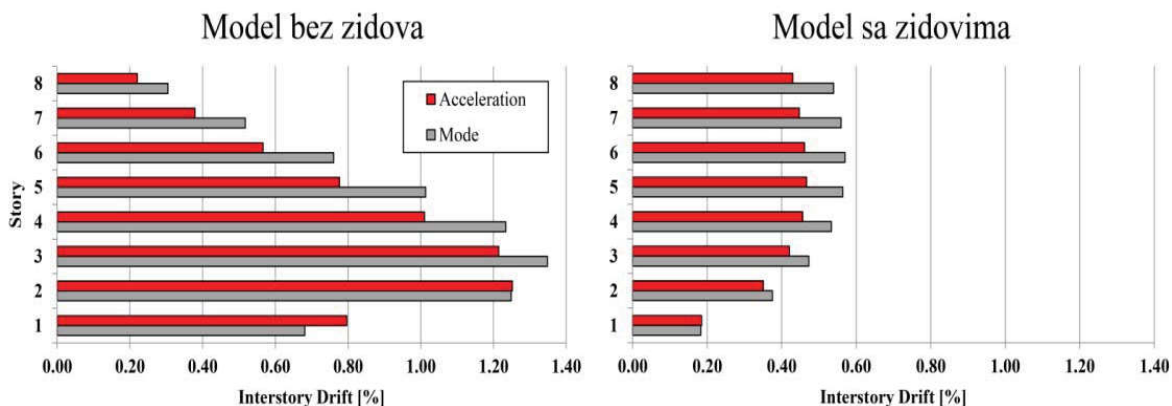
Za obe raspodele bočnog opterećenja sračunati su elastični periodi ekvivalentnog SDOF sistema T^* , redukcioni faktori R_{μ} , ciljna pomeranja SDOF sistema d_t^* i MDOF sistema d_t , kao i vrednosti $1.5d_t$ do koje se prema EN1998-1 sprovodi pushover analiza. U svim razmatranim slučajevima, $R_{\mu} > 1$, $T^* \geq T_C$, pa je stoga $S_d = S_{de}$. Za vrednost ciljnog pomeranja od $1.5d_t$ izvršena je pushover analiza za oba modela i obe raspodele poprečnog opterećenja. Dobijen je raspored plastičnih zglobova (slika 4), kao i interstory drift (slika 5).



Slika 4. Raspored i stanje plastičnih zglobova okvira (a) i okvira sa zidovima (b) u SPA analizi, za oba razmatrana slučaja bočnog opterećenja

Rezultati pushover analize pokazuju da se kod okvira javljaju plastični zglobovi na krajevima greda od I do V sprata i u uklještenjima stubova (za Acc opterećenje), dok se kod Mode opterećenja plastični zglobovi javljaju na krajevima greda od I do VI sprata i u uklještenjima stubova. Kod okvira sa zidovima, plastični zglobovi se javljaju na krajevima greda koje su bliže zidnom platnu. Veći broj plastičnih zglobova (slika 4), javlja se u slučaju Mode opterećenja, zbog većeg momenta spoljašnjih sila usled bočnog opterećenja.

U svim prikazanim slučajevima, plastifikacija spada u domen BC, tj. zaštita života, pa nema opasnosti od rušenja konstrukcije. Konstrukcija nije izgubila sav kapacitet, tj. nijedan njen deo nije postao mehanizam.



Slika 5. Interstory drift za oba razmatrana modela i obe raspodele bočnog opterećenja

Kod modela bez zidova, najveća relativna međuspratna pomeranja javiće se na nižim spratovima, za obe raspodele bočnog opterećenja. Veća relativna pomeranja javljaju se u slučaju trougaono raspodeljenog opterećenja. Prema EN1998-1, vrednost relativnog međuspratnog pomeranja ograničava se sledećim izrazom:

$$dr \cdot v \leq 0.005h \quad (9)$$

gde su dr – vrednost relativnog spratnog pomeranja, v – redukcionni faktor koji uzima u obzir klasu značaja objekta (0.5 za klase 1 i 2, 0.4 za klase 3 i 4), a h je spratna visina.

U ovom slučaju, ako se zameni najveća vrednost međuspratnog pomeranja koja iznosi 40.45 mm, a za redukcionni faktor usvoji vrednost od 0.5, dobija se:

$$40.45 \cdot 0.5 = 20.22 \text{ mm} > 0.005 \cdot 3000 = 15 \text{ mm},$$

Odavde je očigledno da konstrukcija ne zadovoljava zahteve EN1998-1 u pogledu maksimalnog međuspratnog pomeranja, za $PGA = 0.4g$.

Kod modela sa zidovima, najveća relativna međuspratna pomeranja javiće se na višim spratovima, za obe raspodele bočnog opterećenja. Takođe, veća relativna međuspratna pomeranja javljaju se u slučaju trougaono raspodeljenog opterećenja. U ovom slučaju, za najveću vrednost međuspratnog pomeranja od 17.10 mm i za redukcionni faktor od 0.5, dobija se:

$$17.10 \cdot 0.5 = 8.55 \text{ mm} < 0.005 \cdot 3000 = 15 \text{ mm},$$

što znači da konstrukcija sa zidovima zadovoljava zahteve EN1998-1 u pogledu maksimalnog međuspratnog pomeranja.

Multi modalna pushover analiza (MPA)

Rezultati multi modalne pushover analize za tri tona oscilovanja u x -pravcu, koji uzimaju u obzir više od 90% modalne mase, dati su u tabeli 4. Za oba modela i sva tri razmatrana tona ($i=1,2,3$) oscilovanja sračunati su faktori participacije Γ_i , mase i periodi oscilovanja ekvivalentnog SDOF sistema (M_i^* i T_i^*) i redukcionni faktori R_{\square} . Određena su ciljna

pomeranja SDOF (d_i^*) i MDOF sistema ($d_{t,i}$) po tonovima. SRSS kombinacijom ciljnih pomeranja $d_{t,i}$ određeno je ciljno pomeranje u_{SRSS} :

$$u_{SRSS} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 d_{t,i}^2} \quad (10)$$

Konačno, sračunata je relativna razlika ciljnih pomeranja dobijenih primenom MPA i SPA analize $\Delta_{MPA-SPA}$ i prikazana je u tabeli 4.

Tabela 4. Rezultati MPA analize za oba razmatrana modela, za Mode opterećenje

Model	bez zidova			sa zidovima			
	Ton i	1	2	3	1	2	3
Γ_i		1.297	-0.474	0.262	1.448	-0.676	0.318
M_i^*		1193.27t	-492.58t	304.61t	1060.75t	-629.51t	419.56t
T_i^*		0.964s	0.411s	0.271s	0.479s	0.099s	0.065s
$R_{\mu i}$		2.071	1.525	1.319	1.378	0.907	0.587
$S_{de,i}$		10.95cm	4.09cm	1.82cm	5.28cm	1.94cm	0.70cm
$S_{d,i} = d_{t,i}^*$	$= S_{de}$	$= S_{de}$	$= S_{de}$	2.03cm	$= S_{de}$	$= S_{de}$	$= S_{de}$
$d_{t,i} = \Gamma_i d_{t,i}^*$		14.20cm	-1.94cm	0.53cm	7.64cm	-1.31cm	0.22cm
u_{SRSS}		14.34cm			7.75cm		
$1.5 u_{SRSS}$		21.51cm			11.63cm		
$\Delta_{MPA-SPA}$		(21.51-21.32) / 21.32 = 0.89%			(11.63-11.46) / 11.46 = 1.48%		

ZAKLJUČAK

U radu je prikazana procena kapaciteta 2 osmospratne AB okvirne konstrukcije različite krutosti na ekstremni zemljotres definisan spektrom tipa A i ekstremnim ubrzanjem od 0.4g. Konstrukcija (A) sastavljena je od stubova, greda i međuspratnih tavanica, a konstrukcija (B) je dodatno ojačana zidnim platnima. Procena kapaciteta je sprovedena primenom N2 metode, i to primenom standardne (SPA) i multimodalne pushover (MPA) analize u programu ETABS. U SPA analizi su primenjena dva slučaja opterećenja Acc i Mode.

Na osnovu SPA analize doneseni su sledeći zaključci:

- Kod fleksibilnog modela (A) prvo se plastifikuju krajevi greda na nižim spratovima, a kod krućeg modela (B) na višim spartovima.
- Kod kruće konstrukcije zglobovi se najpre formiraju uz zidove.

- Za trougaono raspodeljenog opterećenja (Mode) javlja se više plastičnih zglobova nego kod jednako podeljenog opterećenja.
- Veća ciljna pomeranja dobijaju se usled trougaono raspodeljenog opterećenja.
- Očekivano, veće horizontalne smičuće sile F_b dobijaju se usled ravnomerno raspodeljenog opterećenja.
- Relativna međuspratna pomeranja modela bez zidova (model A) su najveća na nižim spratovima, a modela sa zidovima (model B) na višim spratovima.
- Za zadato zemljotresno ubrzanje od 0.4g relativna međuspratna pomeranja fleksibilne konstrukcije su veća od dopuštenih pomeranja prema EN 1998-1, dok su za konstrukciju sa zidovima (B) ona manja od dopuštenih.
- MPA analiza je pokazala da je uticaj viših tonova zanemarljiv, i da je u ovom slučaju sasvim opravdano koristiti samo prvi ton. U SPA analizi je potrebno ispitati konstrukciju na oba tipa bočnog opterećenja, koja u zavisnosti od tipa konstrukcije daju različite rezultate.

Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz projekte TR 36043 i TR 36048.

LITERATURA:

- Chopra A.K., Goel R.K.: A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 31 (2002) 561-582.
- EN1998 -1: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, 2006.
- FEMA 356: Prestandard and commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2000.
- Fajfar P.: A nonlinear analysis method for performance based seismic design. *Earthquake Spectra* 16 (2000) 573–592.
- Fajfar P.: Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 28 (1999) 979-993.
- SAP2000 - Integrated Software for Structural Analysis and Design. Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- ETABS - Structural Software for Building Analysis and Design. Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.