

**NELINEARNA STATIČKA ANALIZA VIŠESPRATNE ZIDANE ZGRADE
PROJEKTOVANE PREMA EVROKODU****NONLINEAR STATIC ANALYSIS OF A MASONRY BUILDING DESIGNED
ACCORDING TO EUROCODE**Ljubica Šobot, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAĐEVINARSTVO**

Kratik sadržaj – Seizmički odgovor zidane zgrade projektovane prema Evrokodu je ocenjen sprovođenjem pushover analize na prostornom modelu formiranom od ekvivalentnih okvira. Vršeno je praćenje ponašanja objekta tokom postepenog nanošenja seizmičkih sila i provera ispunjenja zadatih seizmičkih zahteva prema odredbama Evrokoda uz primenu softvera "AmQuake". Ispitane su vrednosti faktora ponašanja q , u smislu poređenja dobijenih vrednosti sa onima koje su predviđene u standardu.

Ključne reči: zidana zgrada, pushover analiza, q faktor, Evrokod

Abstract – The seismic response of a masonry building designed according to Eurocode was assessed by conducting a pushover analysis on a spatial model formed from equivalent frames. The behavior of the structure was monitored during the gradual application of seismic forces and the fulfillment of the chosen seismic requirements was checked according to the provisions of Eurocode with the application of "AmQuake" software. The values of behavior factor q were examined, in terms of comparing the obtained values with the ones provided in the code.

Keywords: masonry building, pushover analysis, q factor, Eurocode

1. UVOD

Zidane konstrukcije su izrazito nepovoljne sa aspekta seizmičke otpornosti, jer se odlikuju karakteristikama kao što su velika masa, mala zatezna čvrstoća i niska duktilnost. Duktilnost materijala i konstrukcije i kapacitet disipacije energije su osobine na kojima se insistira u svim aktuelnim seizmičkim propisima. Zbog smanjene duktilnosti, zidane zgrade po pravilu imaju znatno manju seizmičku otpornost u odnosu na savremene armiranobetonske i čelične objekte. U Evrokodu 6 (EC6), deo 1-1, mogu se naći opšta pravila za projektovanje nearmiranih i armiranih zidanih zgrada, dok se u Evrokodu 8 (EC8), navode dodatna pravila koja se moraju uzeti u obzir pri proračunu zidanih konstrukcija u seizmičkim područjima [1-3].

NAPOMENA:

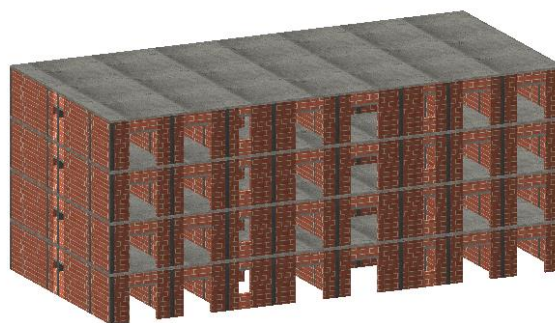
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio doc. dr Vladimir Vukobratović.

2. OPIS OBJEKTA I SEIZMIČKI PARAMETRI

Objekat je u osnovi dimenzija 29,5x14,2 m i visine 16,16 m. U konstruktivnom smislu objekat je masivnog sistema, izrađen od zidanih zidova koji su ukrućeni horizontalnim i vertikalnim serklažima. Primenjeni POROTHERM 25 S P+E blok spada u grupu 2, a za klasu efikasnosti nadzora usvojena je klasa 3. Karakteristična čvrstoća pri pritisku iznosi 4,15 MPa, modul elastičnosti (E) iznosi 4150 MPa a modul smicanja (G) 1612,4 MPa. Usvojena je srednja normalizovana čvrstoća pri pritisku blokova od $f_b = 12$ MPa. Blokovi su povezani u sklop zida malterom opšte namene M5 (čvrstoće 5 MPa) preko horizontalnih i vertikalnih spojnica. Vertikalni i horizontalni serklaži su izvedeni od betona C25/30. Svi vertikalni serklaži se pružaju od temelja do vrha zgrade. Dimenzije vertikalnih serklaža su 25x25 cm. Horizontalni serklaži se oslanjaju na noseće zidove a njihova visina odgovara visinama tavanica. Dimenzije horizontalnih serklaža su 25x20 cm. Serklaži su armirani sa 4Ø14 i UØ8/15 cm. Armiranobetonske ploče (od betona C25/30) debljine 20 cm modelirane su na svim spratovima, uključujući i krov. Ploče su modelirane kao krute dijafragme. Vrednost savojne i poprečne krutosti zidova i armiranog betona uzeta je kao 1/2 od stvarne kako bi se simulirala isprskalost preseka. Postupno guranje je vršeno na prostornom modelu konstrukcije u dva pravca (X, Y) za dva tipa raspodele opterećenja (ravnomerna i modalna).

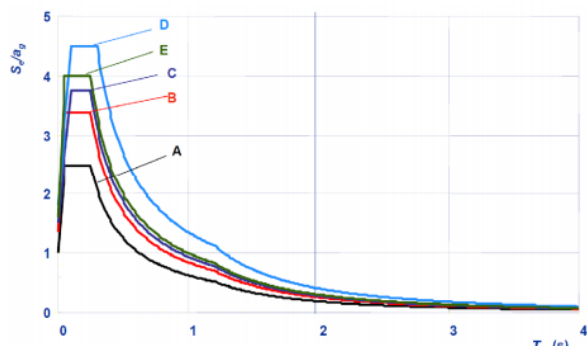
3. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE I OPTEREĆENJA

U modelu ekvivalentnog okvira je konstrukcija predstavljena 1D elementima postavljenim u težišnu liniju zidova, serklaža i nadvoja (Slika 1). Ovakav pristup modeliranja dovodi do sadejstva između zidova, zbog čega dolazi do varijacije intenziteta aksijalnih sila [4].



Slika 1. 3D model zgrade

Pored sopstvene težine zgrade, dodatno stalno opterećenje iznosilo je 1,45 kN/m², promenljivo opterećenje na svakom spratu (osim krova) iznosilo je 2,5 kN/m², a opterećenje snegom na krovu iznosilo je 1,0 kN/m². Seizmičko opterećenje je u proračun uvedeno preko spekta odgovora. Usvojen tip tla je TIP D, i tip spektra 2 (Slika 2).



Slika 2. Preporučene tip 2 elastičnog spektra odgovora za kategorije tla A do E (5% prigušenje)

Na modelu je varirano ubrzanje sa hodom od 0,02 g, i vršena je provera za koje maksimalno ubrzanje bi zgrada imala zadovoljavajući odgovor. U poslednjem koraku usvojen je duplo kraći hod jer se konstrukcija približila stanju loma.

Klasa značaja je II (Obične zgrade) i faktor $\gamma_I = 1$

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I \quad (1)$$

$$a_{g,ULS} = 0,10 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1 = 1,00 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = 0,12 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1 = 1,20 \frac{m}{s^2}$$

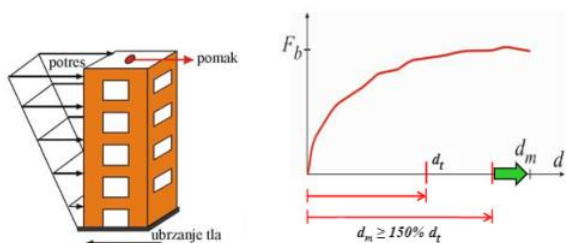
$$a_{g,ULS} = 0,14 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1 = 1,40 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = 0,16 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1 = 1,60 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = 0,17 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1 = 1,70 \frac{m}{s^2}$$

4. PUSHOVER ANALIZA

Pushover analiza je nelinearna statička analiza čiji je glavni princip da se prati odgovor sistema za rastuću horizontalnu silu uz konstantno vertikalno opterećenje. Iz dobijenog odnosa horizontalne sile i referentnog pomeranja može se odrediti seizmička otpornost sistema. Seizmičko opterećenje se inkrementalno nanosi na sistem koji je prethodno u potpunosti opterećen vertikalnim dejstvima. Na ovaj način, simuliraju se inercijalne sile koje se javljaju u sistemu prilikom zemljotresa. Povećavanjem inkrementalnog opterećenja dolazi do otkazivanja pojedinih elemenata konstrukcije, što uzrokuje smanjenje krutosti sistema.



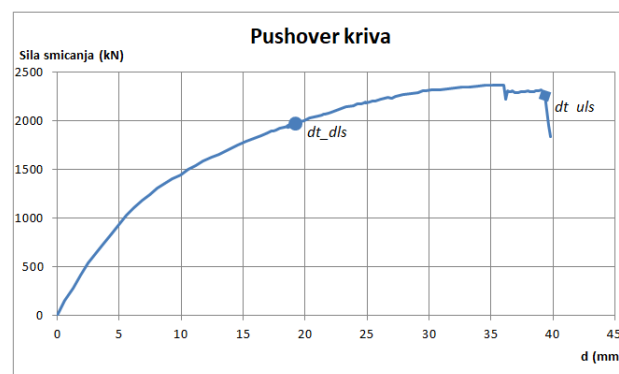
Slika 3. Kontrolno pomeranje vrha zgrade [5]

Ocena seizmičke otpornosti se daje na osnovu praćenja jednog karakterističnog čvora – kontrolnog čvora (Slika 3). Kontrolni čvor je najčešće centar mase najvišeg sprata. Na osnovu pomeranja kontrolnog čvora crta se kriva nosivosti iz koje se ocenjuje seizmička otpornost sistema.

5. REZULTATI PRORAČUNA

Ulazni podaci: tip spektra 2; ubrzanje $a_{g,ULS}$ za granično stanje nosivosti (GSN) prema Poglavlju 3; ubrzanje za granično stanje upotrebljivosti (GSU) $a_{g,SLs} = v \cdot a_{g,ULS}$, pri čemu je $v = 0.5$ za klasu značaja II.

Uniformna raspodela je zasnovana na bočnim silama koje su proporcionalne masama bez obzira na visinski položaj. Modalna raspodela je proporcionalna bočnim silama koje su u skladu sa oblikom oscilovanja prvog tona u posmatranom pravcu. U oba slučaja, bočne sile moraju biti aplicirane na mestima koncentrisanih masa u proračunskom modelu konstrukcije.



Slika 4. Slučaj opterećenja koji daje najmanju rezervu u nosivosti (X-, uniformni raspored)

Iz rezultata prikazanih na dijagramu sa Slike 4 može se uočiti da vrednosti dt_{dls} i dt_{uls} padaju na delove pushover krive povezane sa nelinearnim odgovorom. Očigledno je da postoje značajne rezerve u nosivosti za niže vrednosti ubrzanja. Za vrednost ubrzanja od 1,67 m/s² kapacitet za GSN iznosi 40,4 mm, dok je pomeranje za GSN jednako 39,3 mm. Ove vrednosti su dobijene za slučaj opterećenja X-, za uniformnu raspodelu opterećenja (Slika 4, Tabela 1).

Tabela 1. Taberarni prikaz rezultata pushover analize (X-, uniformni raspored)

Ciljno pomeranje za GSU - dt_{dls} (mm)	19,6
Kapacitet za GSU - dc_{dls} (mm)	40,4
Ciljno pomeranje za GSN - dt_{uls} (mm)	39,3
Kapacitet za GSN - dc_{uls} (mm)	40,4
Period - T (s)	0,68
Maksimalno referentno ubrzanje tla a_g (m/s ²)	1,66
Duktilnost - μ	1,9
Faktor prekoračenja - OSR	4,6
Elastično pomeranje - dy (mm)	19,5

Manji kapaciteti su dobijeni za uniformnu raspodelu opterećenja. Uvek bi trebalo proveriti zahteve i kapacitete i za uniformnu i za modalnu raspodelu, što je za ovaj nivo seizmičkog ulaza i dato u Tabeli 2.

Tabela 2. Kapaciteti za granična stanja nosivosti (GSN) i granična stanja upotrebljivosti (GSU)

Slučaj opterećenja	Kapacitet-GSU [mm]	Kapacitet-GSN [mm]
X+, uniformna raspodela	39,5	39,5
X+, modalna raspodela	47,6	50,5
X-, uniformna raspodela	40,4	40,4
X-, modalna raspodela	47,7	53,0
Y+, uniformna raspodela	41,3	41,3
Y+, modalna raspodela	47,6	47,6
Y-, uniformna raspodela	41,7	41,7
Y-, modalna raspodela	45,0	45,0

Za tip spektra 1 i ubrzanje $a_{g,ULS} = 1,0 \frac{m}{s^2}$ utvrđeno je da konstrukcija ne poseduje dovoljan kapacitet, te slučaj spektra tipa 1 dalje nije ni razmatran.

6. RUČNA VERIFIKACIJA REZULTATA

Izvršena je „ručna“ provera rezultata dobijenih softverom.

6.1. Ciljna pomeranja za GSN i GSU

Ciljno pomeranje se definiše kao seizmički zahtev određen iz elastičnog spektra odgovora, preko pomeranja ekvivalentnog sistema sa jednim stepenom slobode kretanja. AmQuake koristi N2 metodu za određivanje ciljnog pomeranja. Kapacitetom konstrukcije se smatra pomeranje pri kome je prekoračen kriterijum:

$$F_{b,i} \leq 0,8 \cdot F_{b,max} \quad (2)$$

$F_{b,max}$ – maksimalna nosivost zgrade;

$F_{b,i}$ – smičuća sila u osnovi zgrade pri kojoj dolazi do progresivnog oštećenja i loma pojedinih elemenata sistema za prijem bočnog opterećenja.

6.2. Određivanje maksimalnog mogućeg ubrzanja a_g

Tabela 3. Vrednosti ubrzanja

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	a_g (m/s ²)
Uniformni raspored	X+	1,68
	X-	1,66
	Y+	2,06
	Y-	2,11
Modalni raspored	X+	1,84
	X-	1,91
	Y+	1,91
	Y-	1,93

Maksimalna moguća ubrzanja imaju veće vrednosti u Y pravcu (Tabela 3).

6.3. Faktor prekoračenja OSR

Koeficijent prekoračenja OSR možemo izraziti preko odnosa F_y/F_{el} , ili preko odnosa α_u/α_l , gde je F_y granična smičuća sila (na idealizovanoj bi-linearnoj krivi), a F_{el} smičuća sila koje odgovara dostizanje kapaciteta po savijanju ili smicanju prvog zida u konstrukciji zgrade prema linearnoj teoriji.

$$OSR = \frac{F_y}{F_{el}} \quad (3)$$

Kada se odnos prekoračenja određuje primenom pushover analize, treba koristiti nižu vrednost faktora prekoračenja dobijenih od dve raspodele bočnih sila. U ovom slučaju, korišćena je uniformna raspodela opterećenja (Tabela 4).

Tabela 4. Vrednosti faktora prekoračenja OSR

Slučaj opterećenja	OSR
X+	4,4
X-	4,6
Y+	2,8
Y-	3,2

Plastični mehanizam treba da bude u skladu sa mehanizmima na kojima je zasnovan faktor ponašanja q koji se koristi u analizi.

6.4. Duktilnost μ i njemu odgovarajući R_μ

U N2 metodi se primenjuju neelastični spektri, koji su u zoni srednjih i dugih perioda zasnovani na pravilu o jednakosti pomeranja: „Pomeranje konstrukcija sa jednakom krutošću i masom je za vreme dejstva zemljotresa jednako, ako se konstrukcija ponaša elastično ili se plastifikuje“.

$$\mu = \frac{d_{max}}{d_y} \quad (4)$$

d_{max} – kapacitet konstrukcije za MDOF sistem;
 d_y – pomeranje na granici tečenja za MDOF sistem.

$$\begin{cases} R_\mu = (\mu - 1) \cdot \frac{T^*}{T_c} + 1 \text{ za } T^* \leq T_c \\ R_\mu = \mu \text{ za } T^* \geq T_c \end{cases} \quad (5)$$

Zbog činjenice da vrednosti T^* uvek premašuju vrednost T_c , R_μ i μ su uvek jednaki. Dobijene vrednosti su prikazane u Tabeli 5.

Tabela 5. Vrednosti duktilnosti μ

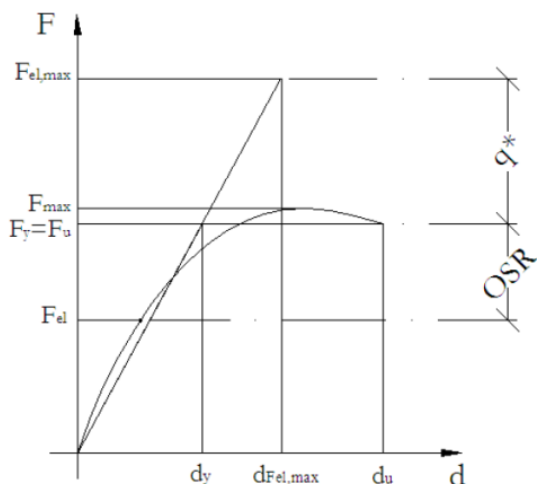
Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	μ	Softver
Uniformni raspored	X+	2,1	2,0
	X-	2,1	2,1
	Y+	2,5	2,5
	Y-	2,4	2,4
Modalni raspored	X+	2,4	2,4
	X-	2,4	2,4
	Y+	2,4	2,4
	Y-	2,3	2,3

6.5. Faktor ponašanja q

U EN 1998-1 je propisan koncept projektovanja seizmički otpornih konstrukcija koji se zasniva na kontrolisanom smanjenju nosivosti, preko smanjenja seizmičkih sila, koje se postiže primenom faktora ponašanja q koji praktično smanjuje vrednost elastičnog spektra odgovora. Potrebna nosivost određuje se za projektni nivo seizmičkih uticaja, koji je višestruko manji u odnosu na vrednosti koje bi se javile pri elastičnom odgovoru. Time se za stvarno seizmičko dejstvo dopušta nelinearni odgovor, pri

čemu će konstrukcija tokom zemljotresa biti izložena seizmičkim silama koje su približno jednake njenoj nominalnoj nosivosti. Na ovaj način je konstrukcija zaštićena od nepotrebnog preopterećenja, ali će se javiti određeni stepen oštećenja jer je konstrukcija prinuđena da pređe u neelastičnu fazu odgovora.

Procena i određivanje faktora ponašanja q može se izvršiti numeričkim modeliranjem i sprovođenjem nelinearne statičke pushover analize, odnosno odrediti na osnovu dobijene krive kapacitet-ukupna smičuća bazna sila F u odnosu na kontrolno pomeranje d (Slika 5).



Slika 5. Kriva kapaciteta [5]

$$q = \frac{F_{el,max}}{F_{el}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} q^* = (\mu - 1) \cdot \frac{T^*}{T_C} + 1 \text{ za } T^* \leq T_C \\ q^* = \mu \text{ za } T^* \geq T_C \end{cases} \quad (7)$$

$$q = q^* \cdot OSR \quad (8)$$

Tabela 6. Vrednosti faktora ponašanja q

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	q
Uniformni raspored	X+	9,1
	X-	9,7
	Y+	6,9
	Y-	7,6
Modalni raspored	X+	11,5
	X-	11,8
	Y+	7,2
	Y-	8,3

Vrednosti faktora ponašanja se kreću u intervalu od 7,2 do 11,8 (Tabela 6). Dobijene su znatno veće vrednosti faktora ponašanja q od onih koje su date u Evrokodu 8 (Tabela 7). Iako je u Evrokodu 8 u vrednostima q uključena određena doza konzervativnosti, one su i dalje bliže realnim nego vrednosti dobijene numerički. Osnovni razlozi za to su nepouzdanosti koje se javljaju pri izvođenju zidanih konstrukcija, i aproksimacije koje su prisutne u numeričkim modelima koji se koriste za njihovu analizu.

Naime, radi se o tome da način modeliranja zidanih konstrukcija, kao i "pristup obradi" rezultata pushover analize dovodi do previsokih vrednosti, kako faktora prekoračenja OSR , tako i duktilnosti. Posledično, kada se pomnože, dobiju se nerealno visoke vrednosti q faktora.

Tabela 7. Faktor ponašanja za zidane zgrade iz EC8

Način građenja	q
Nearmirani zidovi prema EC6, slučaj niske seizmičnosti	1.5
Nearmirani zidovi prema EC8	1.5 – 2.5
Zidovi sa serklažima	2.0 – 3.0
Armirani zidovi	2.5 – 3.0

Odgovarajuće vrednosti q faktora tek treba da se utvrde i potrebna su buduća istraživanja na tu temu. Ne očekuje se da će se vrednosti q faktora za zidane konstrukcije značajno povećati u sledećoj generaciji standarda, biće verovatno slične sadašnjim.

7. ZAKLJUČAK

Nakon sprovedenog proračuna konstrukcije prema odredbama Evrokodova utvrđeno je da svi elementi imaju zadovoljavajuću nosivost. Jedan od većih problema zidanih konstrukcija jeste mala seizmička otpornost, zbog čega je pri projektovanju potrebno strogo poštovati odredbe Evrokoda 8 koje se odnose na jednostavnost oblika i simetriju konstrukcije.

Pravce budućeg istraživanja na polju materijala trebalo bi usmeriti na kvalitet zidanih elemenata, prvenstveno blokova i maltera. U proizvodnji zidanih elemenata trebalo bi težiti što lakšim elementima sa većom čvrstoćom pri pritisku. Vrednosti faktora ponašanja q dobijene u radu su znatno veće od vrednosti datih u Evrokodu 8, pre svega zbog aproksimacija prisutnih u primenjenom numeričkom modelu. Za očekivati je da će odredbe Evrokoda 8 koje se odnose na faktor ponašanja q u sledećoj generaciji standarda biti izmenjene.

8. LITERATURA

- [1] EN 1996-1-1 : 2005– Evrokod 6 „Proračun zidanih konstrukcija”; Beograd, novembar 2009
- [2] EN 1998-1 : 2004 – Evrokod 8 „Proračun seizmički otpornih konstrukcija”; Beograd, novembar 2009
- [3] EN 1998-3 : 2005 – Evrokod 8 „Proračun seizmički otpornih konstrukcija”; Beograd, novembar 2000
- [4] Vukobratović Vladimir: „Materijal za predavanja iz predmeta Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija”
- [5] Manojlović Dragan: „Materijal za vežbe iz predmeta Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija”

Kratka biografija:



Ljubica Šobot rođena je u Novom Sadu 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Građevinarstvo –Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija odbranila je 2021.god. kontakt: ljubicasantobot95@gmail.com