

NELINEARNA STATIČKA ANALIZA ZIDANE ZGRADE Po+P+4 U BEOGRADU**NONLINEAR STATIC ANALYSIS OF A MASONRY BUILDING B+GF+4 IN BELGRADE**Tamara Matić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GRAĐEVINARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je sprovedena nelinearna statička analiza višespratne zidane zgrade spratnosti (Po+P+4) na području Beograda, prema Evrokod standardima. Trodimenzionalni matematički model formiran je primenom ekvivalentnih okvira. Nivo seizmičkog dejstva (ubrzanje tla) je postepeno uvećavan kako bi se dobio krajnji seizmički kapacitet objekta. Pri analizi su u obzir uzeta dva rasporeda seizmičkih sila za glavne pravce objekta. Proračunate su vrednosti faktora prekoračenja (OSR), duktilnosti (μ) i faktora ponašanja (q), i upoređene su sa vrednostima dobijenim u softveru, i sa vrednostima datim u Evrokodu.

Ključne reči: višespratna zidana zgrada, model ekvivalentnog okvira, pushover analiza, OSR faktor, q faktor, Evrokod

Abstract – The study presents a nonlinear static analysis of a multi-story masonry building (B+GF+4) situated in Belgrade, according to Eurocode standards. A three-dimensional mathematical model was formed using equivalent frames. The seismic intensity (ground acceleration) was incrementally increased to determine the structure's ultimate seismic capacity. Two configurations of seismic forces for the main directions of the building were considered during the analysis. Calculations were conducted to assess the overstrength ratio (OSR), ductility (μ), and behavior factor (q), and the values were compared with values derived from software, and with values given in Eurocode.

Keywords: multi-storey masonry building, equivalent frame model, pushover analysis, OSR factor, q factor, Eurocode

1. UVOD

Zidanje je jedan od najstarijih načina građenja objekata. Takav način gradnje se zbog svoje jednostavnosti zadržao sve do danas. Kroz vekove menjali su se osnovni materijali za zidanje, ali je tehnika izvođenja ostala gotovo nepromenjena. Međutim, zidane konstrukcije su nepovoljne sa aspekta seizmičke otpornosti. Njih odlikuje velika masa i krutost, odnosno niska duktilnost. Zbog smanjene duktilnosti zidane konstrukcije imaju znatno manju seizmičku otpornost u odnosu na savremene armiranobetonске i čelične konstrukcije.

NAPOMENA:

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

Evrokod 6 daje opšta pravila za projektovanje nearmiranih i armiranih zidanih zgrada, a u Evrokodu 8 nalaze se dodatna pravila koja se odnose na projektovanje zidanih zgrada u seizmički aktivnim područjima [1-3].

2. OPIS OBJEKTA

Projektnim zadatkom predviđena je analiza stambenog objekta spratnosti Po+P+4 sprata. Lokacija predmetnog objekta je Beograd.

Relativna kota pešačkog pristupa objektu iznosi +0.00 m i determinisana je apsolutna kota 188,30 mnv. Na nivou prizemlja omogućen je ulaz u stambenu jedinicu u prizemlju. Takođe sa nivoa prizemlja moguće je pristupiti garažnim mestima koja se nalaze u prizemlju objekta. Sa nivoa prizemlja omogućen je pristup stepeništu koje omogućava vertikalnu komunikaciju među etažama. Spratovi su tipski i na svakom se nalazi jedna stambena jedinica. Objekat je u osnovi dimenzija 15,12x14,19 m, visine 14,54 m.

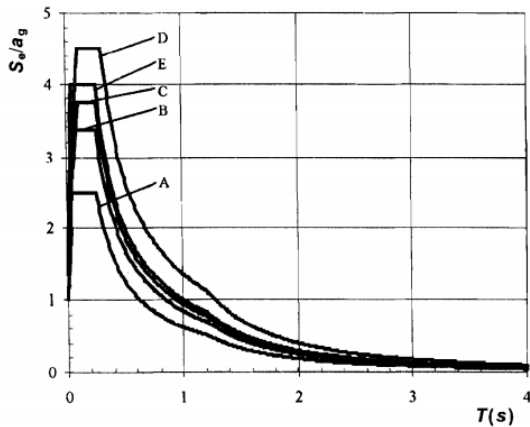
Predmetni objekat je masivnog konstruktivnog sistema, izrađen od zidova zidanih blokom Porotherm 25S P+E koji su ukruženi horizontalnim i vertikalnim serklažima. Blokovi su u sklopu zida povezani malterom opšte namene M10 (čvrstoća 10 MPa) preko horizontalnih i vertikalnih spojnica.

Vrednost savojne i poprečne krutosti zidova i armiranog betona je uzeta kao $\frac{1}{2}$ stvarne, kako bi se simulirala isprskalost preseka. Svi armiranobetonski elementi u konstrukciji su betonirani betonom klase C 25/30. Vertikalni serklaži su dimenzija 25x25 cm. Horizontalni serklaži se oslanjaju na noseće zidove a njihova visina odgovara visinama tavanica. Dimenzije horizontalnih serklaža su 15x25 cm. Serklaži su armirani sa 4Ø12 i UØ8/15 cm.

Projektom je predviđena AB međuspratna ploča debljine $d=15$ cm izvedena betonom klase C25/30 i armirana u obe zone armaturom Q335. Krovna ploča je izvedena kao AB ploča debljine 15 cm, sa minimalnim potrebnom nagibima za odvod atmosferilija.

3. ANALIZA OPTEREĆENJA

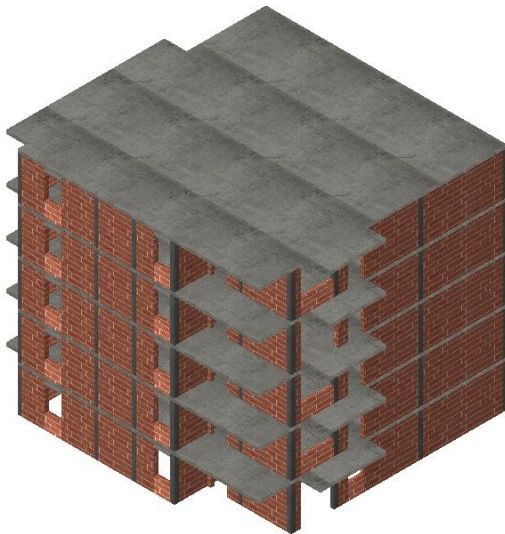
Na objekat pored sepsstvene težine djeluju i sledeća opterećenja: dodatno stalno opterećenje čija je vrednost 1,60 kN/m², odnosno 2,10 kN/m²; promenljivo opterećenje koje iznosi 2,50 kN/m² na međuspratnim tavanicama, dok na krovnoj ploči iznosi 1,00 kN/m²; opterećenje snegom je 0,80 kN/m². Seizmičko opterećenje je izraženo preko spektra odgovora tip 2 (Slika 1), tip tla je C.



Slika 1. Preporučeni tip 2 elastičnog spektra odgovora za kategorije tla A do E (5% prigušenja)

4. MODELIRANJE KONSTRUKCIJE I OPTEREĆENJA

Objekat je modeliran kao trodimenzionalan (3D) u programu AmQuake (Slika 2). Za modeliranje konstrukcije korišćen je model ekvivalentnog okvira, gde su svi elementi konstrukcije, osim međuspratnih ploča, prikazani kao 1D elementi. Kao vertikalni gredni elementi prikazani su noseći zidovi i vertikalni serklaži, dok su kao horizontalni gredni elementi modelirani parapeti, horizontalni serklaži, natprozorne i nadvratne grede. Međuspratne tavanice su u svojoj ravni beskonačno krute i obezbeđuju kompatibilnost horizontalnih pomeranja svih čvorova tj. zidova koje povezuju [4].



Slika 2. 3D model zgrade

U Evrokodu razlikujemo stalno (GO), dodatno stalno (G1) i korisno (Q), te ga tako zadajemo i u programu. Stalno opterećenje odnosi se na konstantna opterećenja koja su prisutna na objektu tokom celog veka njegove eksploatacije. Promenljiva opterećenja - korisno opterećenje i opterećenje snegom prikazana su kao jednakopodeljena opterećenja po površini međuspratnih ploča, odnosno krovne ploče. Pored intenziteta opterećenja u ovom prozoru definišu se i vrednosti koeficijenata za kombinacije opterećenja.

Na modelu je varirano ubrzanje i vršena je provera za koje maksimalno ubrzanje bi zgrada imala zado-

voljavajući odgovor. Klasa značaja objekta je III i faktor $\gamma_I = 1,2$.

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

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

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,12 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,2 = 1,4 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,13 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,2 = 1,6 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,15 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,2 = 1,8 \frac{m}{s^2}$$

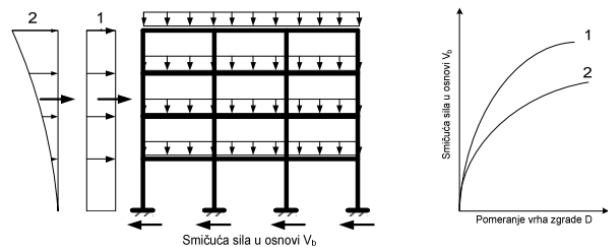
$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,17 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,2 = 2,0 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,18 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,2 = 2,1 \frac{m}{s^2}$$

5. PUSHOVER ANALIZA

Metoda postupnog guranja, odnosno pushover metoda, je nelinearna statička metoda proračuna novih ili postojećih objekata. Glavni princip metode je praćenje odgovora konstrukcije za rastuću horizontalnu silu uz konstantno vertikalno opterećenje. Iz dobijenog odnosa horizontalne sile i referentnog pomeranja može se odrediti seizmička otpornost konstrukcije. Za konstrukcije koje zadovoljavaju uslove regularnosti u osnovi analiza se može primeniti na dva ravanska modela, dok se za slučaj neregularnosti mora upotrebiti prostorni model konstrukcije.

Nema ograničenja po pitanju regularnosti konstrukcije po visini. Nelinearna statička analiza se sprovodi pod konstantnim gravitacionim opterećenjem primenom monotono rastućeg horizontalnog opterećenjem. Horizontalno opterećenje je pretpostavljeno sa odgovarajućom raspodelom po visini i povećava se monotono od nula do krajnje vrednosti koje bi izazvalo rušenje konstrukcije [5]. Neophodno je primeniti dve vertikalne raspodele bočnih sila ravnomernu raspodelu, gde su bočne sile proporcionalne masama bez obzira na visinski položaj i modalnu raspodelu gde su bočne sile u skladu sa raspodelom sila pri elastičnoj analizi (Slika 3). Nepovoljniji rezultati se usvajaju kao merodavni.

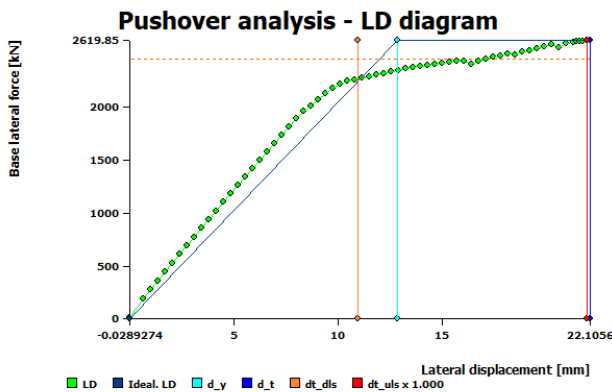


Slika 3. Raspodela bočnih sila za pushover analizu [6]

6. REZULTATI PRORAČUNA

Postupno guranje je vršeno na prostornom modelu konstrukcije u X i Y pravcu. Na osnovu dobijenih rezultata iz softvera: faktora prekoračenja (overstrenght factor - OSR) i duktilnosti izračunava se faktor ponašanja q , koji se upoređuje sa njegovim preporučenim vrednostima za zidane konstrukcije definisanim u Evrokodu 8.

U Tabeli 1 dat je prikaz rezultata pushover analize (prikazane Slikom 4) za slučaj opterećenja koji daje najmanju rezervu nosivosti.



Slika 4. Slučaj opterećenja koji daje najmanju rezervu nosivosti (Y-, uniformna raspodela)

Tabela 1. Rezultati pushover analize, Y-, uniformna raspodela opterećenja

Ciljno pomeranje za GSU - dt_dls	10,981	[mm]
Kapacitet za GSU - dc_dls	22,106	[mm]
Ciljno pomeranje za GSN - dt_uls	21,962	[mm]
Kapacitet za GSN - dc_uls	22,106	[mm]
Period - T	0,431	[s]
Maksimalno referentno ubrzanje tla - a_g	2,114	[m/s ²]
Duktilnost - μ	1,757	/
Faktor prekoračenja - OSR	3,429	/
Elastično pomeranje - dy	12,854	[mm]

7. RUČNA VERIFIKACIJA REZULTATA

7.1 Ciljna pomeranja i kapaciteti za ULS i DLS

Ciljno pomjeranje u analizi pushover krive predstavlja maksimalno dopušteno pomjeranje (deformaciju) koje konstrukcija može doživjeti pri određenim zemljotresnim dejstvima. To je parametar koji se postavljamo kako bismo odredili željeni kapacitet konstrukcije i kako bismo definisali granice njezinog ponašanja tokom zemljotresa.

Kapacitetom konstrukcije se smatra pomeranje pri kome je prekoračen kriterijum:

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

$F_{b,i}$ - smičuća sila u osnovi zgrade pri kojoj dolazi do progresivnog oštećenja i loma pojedinih elemenata sistema za prijem bočnog opterećenja; $F_{b,max}$ - maksimalna nosivost zgrade. Za pomeranje $d_{max} = 14,029$ mm sila $F_{b,i}$ ima vrednost od 972,25 kN a $F_{b,max}$ ima vrednost od 2088,98 kN, tako da je traženi uslov zadovoljen.

7.2 Određivanje maksimalnog ubrzanja a_g

$$a_g = \frac{S_e(T^*)}{S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{T_c}{T^*}\right)} \quad (3)$$

Dobijene vrednosti maksimalnih mogućih ubrzanja prikazane su u tabeli (Tabela 2).

Tabela 2. Vrednosti ubrzanja

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	a_g [m/s ²]
Uniformni raspored	X+	1,214
	X-	1,210
	Y+	1,214
	Y-	1,217
Modalni raspored	X+	1,219
	X-	1,222
	Y+	1,223
	Y-	1,213

7.3 Duktilnost μ

Duktilnost je karakteristika materijala koja se meri stepenom plastične deformacije koju materijal može podneti pre nego što dođe do prelaska između elastičnog i plastičnog deformisanja ili pre nego što dođe do konačnog loma. Duktilnost se računa prema sledećem izrazu:

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

d_{max} - kapacitet konstrukcije za MDOF sistem; d_y - pomeranje na granici tečenja za MDOF sistem; Dobijene vrednosti duktilnosti su prikazane u Tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti duktilnosti

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	μ	AmQuake
Uniformni raspored	X+	1,0615	1,085
	X-	1,0232	1,045
	Y+	1,1339	1,158
	Y-	1,2137	1,240
Modalni raspored	X+	1,0929	1,419
	X-	1,0314	1,339
	Y+	1,2132	1,576
	Y-	1,1996	1,558

7.4 Faktor prekoračenja OSR

Faktor prekoračenja OSR izražava se preko odnosa F_y/F_{el} ili α_u/α_l .

$$OSR = \frac{F_y}{F_{el}} \quad (5)$$

F_y - granična smičuća sila na idealizovanoj bilineralnoj krivi; F_{el} - smičuća sila pri kojoj se formira prvi plastični zglobov. Faktor prekoračenja (ili faktor bezbednosti) zavisi od različitih faktora koji uključuju karakteristike materijala, vrstu opterećenja, životni vek konstrukcije, krutost tavanica u svojoj ravni, pretpostavke o modeliranju vezanih elemenata, veze između konstruktivnih elemenata.

Niže vrednosti faktora prekoračenja merodavne su u pushover analizi, odnosno u našem slučaju merodavna je uniformna raspodela bočnih sila.

Tabela 4. Vrednosti faktora prekoračenja OSR

X+	2,882
X-	2,964
Y+	5,549
Y-	2,996

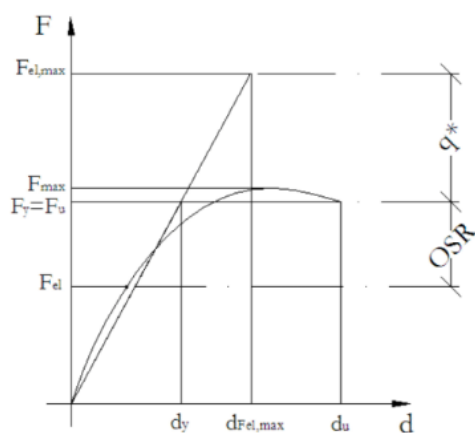
Plastični mehanizam određujemo za dve raspodele bočnih sila i on je u skladu sa mehanizmom na kojem je zasnovan faktor ponašanja q koji se koristi u analizi.

7.5 Faktor ponašanja q

Faktor ponašanja predstavlja numerički parametar koji odražava očekivano ponašanje konstrukcije pod dejstvom opterećenja.

Faktor ponašanja q predstavlja približnu vrednost odnosa između seizmičkih sila koje bi delovale na konstrukciju kada bi njen odgovor bio potpuno elastičan ($F_{el,max}$) sa 5% relativnog viskoznog prigušenja i sila koje se koriste u analizi (F_{el}) koristeći uobičajeni linearno-elastični model. Ovaj faktor osigurava zadovoljavajući odgovor konstrukcije (Slika 5).

Vrednost faktora ponašanja može da bude različita za različite horizontalne pravce konstrukcije, iako će klasifikacija duktilnosti da bude ista za sve pravce [5].



Slika 5. Parametri za definiciju faktora ponašanja q (F - bazna smičuća sila, d - pomerenje kontrolne tačke)

Za zidane konstrukcije, kao što je to slučaj i kod drugih tipova konstrukcija (armiranobetonske i čelične), u definiciji faktora ponašanja q potrebno je uzeti u obzir ojačanje konstrukcije preko odnosa prekoračenja (OSR). Faktor ponašanja q se tada može definisati na sledeći način:

$$q = \frac{F_{el,max}}{F_{el}} = \frac{F_{el,max}}{F_y} \cdot \frac{F_y}{F_{el}} = q^* \cdot OSR \quad (6)$$

q^* - osnovna vrednost faktora ponašanja koja uzima u obzir disipativnu sposobnost konstrukcije pomnožena sa koeficijentom prekoračenja OSR .

Tabela 5. Vrednosti faktora ponašanja q

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	q
Uniformni raspored	X+	3,059
	X-	3,033
	Y+	6,292
	Y-	3,636
Modalni raspored	X+	3,990
	X-	3,494
	Y+	5,975
	Y-	4,626

Dobijene vrednosti faktora ponašanja kreću se u intervalu od 3,033 do 6,292. Najveća vrednost je dobijena za

pozitivni Y pravac delovanja opterećenja. Dobijene vrednosti su veće od vrijednosti preporučenih u EC8-1.

Tabela 6. Vrednosti faktora ponašanja prema EC8-1

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

8. ZAKLJUČAK

Analizom predmetne konstrukcije, prema odredbama Evrokodova, zaključeno je da svi elementi imaju zadovoljavajuću nosivost. Možemo zaključiti da je jedan od većih problema, odnosno nedostataka zidanih konstrukcija, mala seizmička otpornost, na koju je prilikom proračuna potrebno obratiti posebnu pažnju. EC8 je sveobuhvatan standard koji pruža smernice za seizmičko projektovanje sa širokim spektrom informacija. Adekvatnu primenu zidanih konstrukcija mora da prati odgovarajući – savremeni koncept proračuna.

Analizom predmetne konstrukcije dobijene su veće vrednosti faktora ponašanja q od vrijednosti preporučenih EC8-1, što znači da postoji značajan konzervativizam uključen u odredbe propisa. Za očekivati je da će se postojeće odredbe Evrokoda 8 koje se odnose na faktor ponašanja u sledećoj generaciji standarda izmeniti, do tada usvajanje većih vrednosti faktora ponašanja (q) u specifičnim slučajevima može biti razmatrano pod određenim okolnostima, ali to zahteva pažljivu analizu i argumentaciju.

9. 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] Stevanović Boško, Lađinović Đorđe: „Osnovni principi i pravila projektovanja, proračuna i izgradnje zidanih zgrada prema EC 6 i EC 8”, Pregledni rad.
- [4] Vukobratović Vladimir: „Materijal za predavanja iz predmeta Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija”.
- [5] Lađinović Đorđe: „Savremene metode seizmičke analize konstrukcija zgrada“, Pregledni rad, 2008.
- [6] Manojlović Dragan: „Materijal za vežbe iz predmeta Odabrana poglavlja zidanih konstrukcija”.

Kratka biografija:



Tamara Matić rođena je u Banjaluci 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Građevinarstvo – Zidane konstrukcije odbranila je 2024. god.
kontakt: tamara.matic10@gmail.com