

Нелинеарна статичка анализа зидане зграде спратности П+5 у Новом Саду

Nonlinear Static Analysis of a Masonry Building GF+5 in Novi Sad

Дарко Бошковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – У раду је спроведена нелинеарна статичка анализа вишеспратне зидане зграде спратности (П+5) на подручју Новог Сада, према Еврокод стандардима. Тродимензионални математички модел формиран је применом еквивалентних оквира. Ниво сеизмичког дејства (убрзање тла) је постепено увећаван како би се добио крајњи сеизмички капацитет објекта. При анализи су у обзир узета два распореда сеизмичких сила за главне правце објекта. Прорачунате су вредности фактора прекорачења (OSR), дуктилности (μ) и фактора понашања (q), и упоређене су са вредностима добијеним у софтверу, и са вредностима датим у Еврокоду.

Кључне речи: вишеспратна зидана зграда, модел еквивалентног оквира, pushover анализа, OSR фактор, q фактор

Abstract – The study presents a nonlinear static analysis of a multi-storey masonry building (GF+5) situated in Novi Sad, 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

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Владимир Вукобратовић, ванр. проф.

1. УВОД

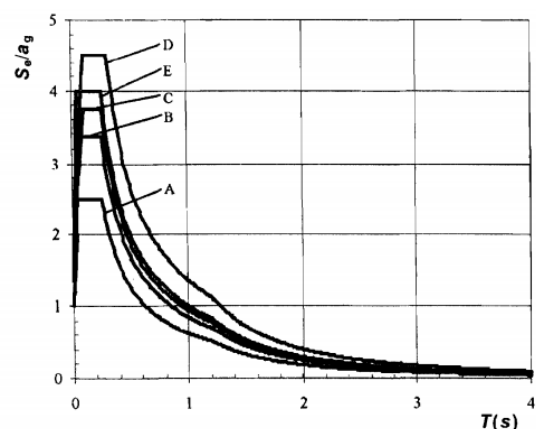
Зидане конструкције су традиционално популарне због једноставне градње, дуготрајности и отпорности на пожар, температуру и временске услове. Међутим, оне имају слабости у погледу сеизмичке отпорности због велике масе, ниске затезне чврстоће и смањене дуктилности, што их чини мање отпорним на потресе у поређењу са АБ и челичним.

2. ОПИС ОБЈЕКТА

Пројектује се стамбени објекат спратности П+5 у Новом Саду, димензија основе 15,15x14,65 m и висине 17,40 m. У конструктивном смислу објекат је масивног система, израђен од зиданих зидова који су укрупњени хоризонталним и вертикалним серклажима. Носећи зидови у приземљу и на спратовима су дебљине 25 cm. Сви армиранобетонски елементи у конструкцији су пројектовани у бетону класе С30/37. Вертикални серклажи су димензија 25x25 cm и 25x25 cm. Хоризонтални серклажи се ослањају на носеће зидове а њихова висина одговара висинама таваница. Димензије хоризонталних серклажа су 25x20 cm и 25x25 cm. Серклажи су армирани са $\varnothing 14$ (подужна арматура) и $U\varnothing 8$ (узеније). Пројектом су предвиђене АБ међуспратне и кровна плоча дебљине 20 cm, изведене бетоном класе С30/37 и армиране у обе зоне арматуром Q335. Кровна плоча има благи нагиб за одвод атмосферских вода.

3. АНАЛИЗА ОПТЕРЕЋЕЊА

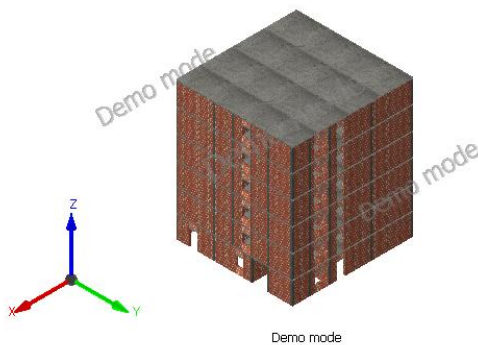
На објекат поред сопствене тежине делују и следећа оптерећења: додатно стално оптерећење чија је вредност 1,50 kN/m²; променљиво оптерећење које износи 2,0 kN/m² на међуспратним таваницама, док на кровној плочи износи 1,0 kN/m²; и оптерећење снегом у износу 1,0 kN/m². Сеизмичко дејство је изражено преко спектра одговора тип 2 (Слика 2), тип тла је Б.



Слика 1. Препоручен тип 2 еластичног спектра одговора за категорије тла А до Е (5% пригушења)

4. МОДЕЛИРАЊЕ КОНСТРУКЦИЈЕ И ОПТЕРЕЋЕЊА

Објект је моделиран као тродимензионалан (3D) у софтверу AmQuake (Слика 2). За моделирање конструкције коришћен је модел еквивалентног оквира, где су сви елементи конструкције, осим међуспратних плоча, приказани као 1D елементи. Као вертикални гредни елементи приказани су носећи зидови и вертикални серклажи, док су као хоризонтални гредни елементи моделирани парпети, хоризонтални серклажи, натпозорне и надвратне греде. Међуспратне таванице су у својој равни бесконачно круте и обезбеђују компатибилност хоризонталних померања свих чворова тј. зидова које повезују.



Слика 2. 3D модел зграде

Стално оптерећење односи се на константна оптерећења која су присутна на објекту током целог века његове експлоатације. Променљива оптерећења - корисно оптерећење и оптерећење снегом приказана су као једнакоподељена оптерећења по површини међуспратних плоча, односно кровне плоче. На моделу је варирано убрзање и вршена је провера за које максимално убрзање би зграда имала задовољавајући одговор. Класа значаја објекта је II и фактор $\gamma_I = 1,0$.

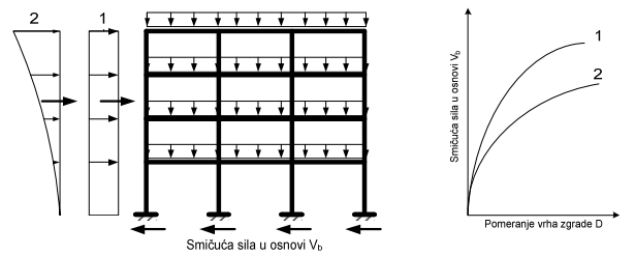
$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,10 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,0 = 1,0 \frac{m}{s^2}$$

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

5. PUSHOVER АНАЛИЗА

Метода поступног гурања, односно pushover метода, је нелинеарна статичка метода прорачуна нових или постојећих објеката. Главни принцип методе је праћење одговора конструкције за растућу хоризонталну силу уз константно вертикално оптерећење. Нелинеарна статичка анализа се спроводи под константним гравитационим оптерећењем применом монотонно растућег хоризонталног оптерећења. Хоризонтално оптерећење је претпостављено са одговарајућом расподелом по висини и повећава се монотонно од нула до крајње вредности које би изазвало рушење конструкције. Неопходно је применити две вертикалне расподеле бочних сила, и то: равномерну расподелу, где су бочне

силе пропорционалне масама без обзира на висински положај, и модалну расподелу, где су бочне силе у складу са расподелом сила при еластичној анализи (Слика 3). Неповољнији резултати се усвајају као меродавни.

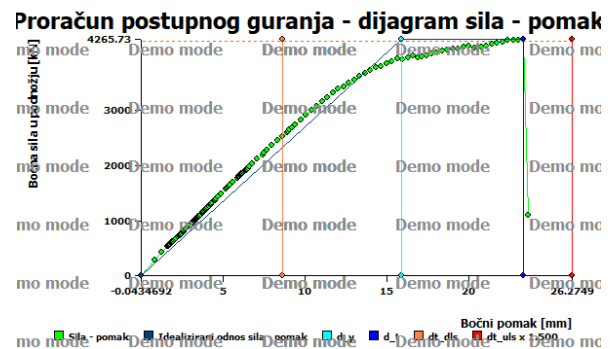


Слика 3. Расподеле бочних сила које треба користити за pushover анализу

6. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА

Поступно гурање је вршено на просторном моделу конструкције у X и Y правцима. На основу добијених резултата из софтвера: фактора прекорачења (eng. overstrength factor - *OSR*) и дуктилности μ , израчунава се фактор понашања q , који се упоређује са препорученим вредностима за зидане конструкције дефинисаним у Еврокоду 8.

У Табели 1 је дат приказ резултата pushover анализе приказане Сликаом 4, за случај оптерећења који даје најмању резерву носивости.



Слика 4. Случај оптерећења који даје најмању резерву носивости (Y-, униформна расподела сила)

Табела 1. Резултати pushover анализе, Y-, униформна расподела оптерећења

Циљно померање за ГСУ - $d_{t,dis}$	8,64	[mm]
Капацитет за ГСУ - $d_{c,dis}$	23,31	[mm]
Циљно померање за ГСН - $d_{t,uls}$	26,28	[mm]
Капацитет за ГСН - $d_{c,uls}$	23,31	[mm]
Период - T	0,43	[s]
Максимално референтно убрзање - a_g	1,08	[m/s ²]
Дуктилност - μ	1,50	/
Фактор прекорачења - OSR	4,90	/
Еластично померање - d_y	15,87	[mm]

7. РУЧНА ВЕРИФИКАЦИЈА РЕЗУЛТАТА

7.1 Циљна померања и капацитети за гранична стања ULS i DLS

Циљно померање у анализи pushover криве представља максимално допуштено померање (деформацију) које конструкција може поднети при одређеним земљотресним дејствима. Капацитетом конструкције се сматра померање при коме је прекорачен критеријум:

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

$F_{b,i}$ - смичућа сила у основи зграде при којој долази до прогресивног оштећења и лома појединих елемената система за пријем бочног оптерећења; $F_{b,max}$ - максимална носивост зграде.

7.2 Одређивање максималног убрзања a_g

Максимално убрзање одређује се као:

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

Добијене вредности максималних могућих убрзања су приказане у Табели 2.

Табела 2. Вредности максималних могућих убрзања

Распоред оптерећења	Случај оптерећења	a_g [m/s ²]	Am_{Quake}
Униформни распоред	X+, pos exc	1,48	1,16
	X+, neg exc	0,85	1,12
	X-, pos exc	0,85	1,13
	X-, neg exc	0,86	1,08
	Y+, pos exc	1,00	1,25
	Y+, neg exc	1,00	1,23
	Y-, pos exc	1,00	1,35
	Y-, neg exc	1,00	1,31
Модални распоред	X+, pos exc	0,82	1,37
	X+, neg exc	0,82	1,37
	X-, pos exc	0,82	1,25
	X-, neg exc	0,82	1,24
	Y+, pos exc	1,00	1,25
	Y+, neg exc	1,00	1,22
	Y-, pos exc	1,00	1,70
	Y-, neg exc	1,00	1,79

7.3 Дуктилност μ

Дуктилност је карактеристика која се мери степеном пластичне деформације до које може доћи пре него што дође до преласка између еластичног и пластичног деформисања или пре него што дође до коначног лома. Дуктилност у односу на померање се рачуна према следећем изразу:

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

d_{max} - капацитет конструкције за MDOF систем; d_y - померање на граници течења за MDOF систем.

Добијене вредности дуктилности су приказане у Табели 3.

7.4 Фактор прекорачења OSR

Фактор прекорачења OSR се изражава преко односа F_y/F_{el} или α_u/α_1 .

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

F_y - гранична смичућа сила на идеализованој билинералној криви; F_{el} - смичућа сила при којој се формира први пластични зглоб. Фактор прекорачења зависи од различитих фактора који укључују карактеристике материјала, врсту оптерећења, животни век конструкције, крутост таваница у својој равни, претпоставке о моделирању везних елемената, везе између конструктивних елемената.

Табела 3. Вредности дуктилности

Распоред оптерећења	Случај оптерећења	μ	Софтвер μ/g
Униформни распоред	X+, pos exc	1,51	1,54
	X+, neg exc	1,47	1,51
	X-, pos exc	1,53	1,56
	X-, neg exc	1,47	1,50
	Y+, pos exc	1,80	1,84
	Y+, neg exc	1,73	1,77
	Y-, pos exc	1,69	1,73
	Y-, neg exc	1,63	1,66
Модални распоред	X+, pos exc	1,51	1,91
	X+, neg exc	1,52	1,92
	X-, pos exc	1,43	1,81
	X-, neg exc	1,44	1,82
	Y+, pos exc	1,89	2,39
	Y+, neg exc	1,82	2,31
	Y-, pos exc	2,12	1,70
	Y-, neg exc	2,29	2,89

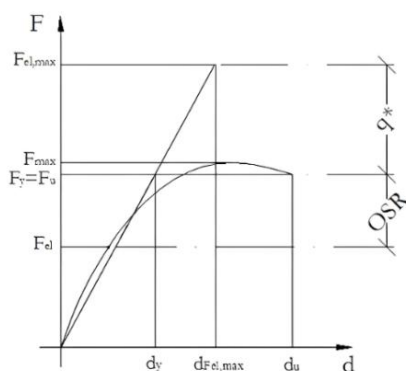
Ниже вредности фактора прекорачења меродавне су у pushover анализи, односно у овом случају меродавна је униформна расподела бочних сила.

Табела 4. Вредности фактора прекорачења OSR

		OSR	софтвер
Униформни распоред	X+, pos exc	4,53	4,506
	X+, neg exc	4,00	4,058
	X-, pos exc	6,36	7,748
	X-, neg exc	5,31	15,407
	Y+, pos exc	5,35	6,079
	Y+, neg exc	4,56	4,652
	Y-, pos exc	4,90	4,952
	Y-, neg exc	4,96	4,953
Модални распоред	X+, pos exc	6,57	6,569
	X+, neg exc	5,77	5,848
	X-, pos exc	5,57	13,663
	X-, neg exc	6,42	20,225
	Y+, pos exc	5,26	5,363
	Y+, neg exc	5,46	5,508
	Y-, pos exc	6,34	9,237
	Y-, neg exc	6,47	6,460

7.5 Фактор понашања q

Фактор понашања представља нумерички параметар који одражава очекивано понашање конструкције под сеизмичким дејством. Фактор понашања q представља приближну вредност односа између сеизмичких сила које би деловале на конструкцију када би њен одговор био потпуно еластичан ($F_{el,max}$) са 5% релативног вискозног пригушења и сила које се користе у анализи (F_{el}) користећи уобичајени линеарно-еластични модел. Овај фактор осигурава задовољавајући одговор конструкције (Слика 5).



Слика 5. Параметри за дефиницију фактора понашања q (F - базна смичућа сила, d - померање контролне тачке)

За зидане конструкције, као што је то случај и код других типова конструкција (армиранобетонске, челичне), у дефиницији фактора понашања q потребно је узети у обзир ојачање конструкције преко односа прекорачења (OSR). Фактор понашања q се тада може дефинисати на следећи начин:

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

q^* - основна вредност фактора понашања која узима у обзир дисипативну способност конструкције.

У Табели 5 дате су вредности фактора понашања одређене анализом.

Табела 5. Вредности фактора понашања q

Униформни распоред	X+, pos exc	6,85
	X+, neg exc	5,89
	X-, pos exc	9,75
	X-, neg exc	7,80
	Y+, pos exc	9,63
	Y+, neg exc	7,90
	Y-, pos exc	8,28
	Y-, neg exc	8,06
Модални распоред	X+, pos exc	9,94
	X+, neg exc	8,46
	X-, pos exc	9,17
	X-, neg exc	7,81
	Y+, pos exc	9,94
	Y+, neg exc	9,95
	Y-, pos exc	13,45
	Y-, neg exc	14,78

Добијене вредности фактора понашања се крећу у интервалу од 5,89 до 14,78. Највећа вредност је

добијена за негативан Y правац са позитивним ексцентрицитетом деловања оптерећења. Добијене вредности су знатно веће од вредности које су препоручене у делу 1 Еврокода 8.

Табела 6. Вредности фактора понашања према Еврокоду 8

Начин грађења	q
Неармирани зидови према ЕС6 за случај ниске сеизмичности	1,5
Неармирани зидови према ЕС8	1,5-2,5
Зидови са серклажима	2,0-3,0
Армирани зидови	2,5-3,0

8. ЗАКЉУЧАК

На основу извршених прорачуна конструкције, у складу са одредбама Еврокодова, може се са сигурношћу закључити да сви конструктивни елементи испуњавају потребне критеријуме носивости. Зидови изложени већим вертикалним оптерећењима показују повећану носивост, док присуство отвора може довести до смањења стабилности и већих померања, што захтева посебан приступ приликом пројектовања. У том смислу, серклажи играју кључну улогу, нарочито код зидова са отворима, док зидови без серклажа бележе знатно мању отпорност на хоризонталне силе. Еврокод 8 пружа свеобухватан оквир за пројектовање сеизмички отпорних конструкција, интегришући савремене инжењерске праксе и стандарде. Анализе указују на веће q факторе од прописаних, док процене показују висок степен поузданости у предвиђању понашања зидане конструкције изложене сеизмичком дејству.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] ЕН 1996-1-1: 2005 – Еврокод 6 „Прорачун зиданих конструкција”; Београд, новембар 2009.
- [2] ЕН 1998-1: 2004 – Еврокод 8 „Прорачун сеизмички отпорних конструкција”; Београд, новембар 2009.
- [3] Стевановић Б., Лађиновић Ђ.: „Основни принципи и правила пројектовања, прорачуна и изградње зиданих зграда према ЕС6 и ЕС8”, прегледни рад.
- [4] Вукобратовић Владимир: „Материјал за предавања из предмета Одабрана поглавља зиданих конструкција”.
- [5] Лађиновић Ђорђе: „Савремене методе сеизмичке анализе конструкција зграда”, прегледни рад, 2008.
- [6] Манојловић Драган: „ Материјал за вежбе из предмета Одабрана поглавља зиданих конструкција”.

Кратка биографија:



Дарко Бошковић рођен је у Новом Саду 11.12.1997. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Грађевинско инжењерство одбранио је 2026. год.

контакт:

darko97boskovic@gmail.com