

NELINEARNA STATIČKA ANALIZA ZIDANE ZGRADE Po+P+4 U VALJEVU**NONLINEAR STATIC ANALYSIS OF A MASONRY BUILDING B+GF+4 IN VALJEVO***David Radojević, 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 Valjeva, 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 Valjevo, 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

Zidane konstrukcije su tradicionalno bile popularne zbog jednostavne gradnje, dugotrajnosti i otpornosti na požar, temperaturu i vremenske uslove. Međutim, one imaju slabosti u pogledu seizmičke otpornosti zbog velike mase, niske zatezne čvrstoće i smanjene duktilnosti, što ih čini manje otpornim na potrese u poređenju s armiranobetonskim i čeličnim zgradama. Pre 20. veka, zidane konstrukcije su građene bez detaljnih proračuna, ali današnji propisi, poput Evrokoda 6 i 8, postavljaju stroge smernice za njihovu seizmičku otpornost. Iako se softveri koriste za proračune, postoji prostor za napredak u analizi seizmičkog ponašanja ovih konstrukcija.

NAPOMENA:

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

2. OPIS OBJEKTA

Projektuje se stambeni objekat spratnosti Pr+4 u okolini Valjeva, dimenzija osnove 39,1x16,7 metara i visine 15,91 metar. Zgrada je namenjena isključivo za stanovanje, sa osam stanova po spratu, pri čemu svaki sprat ima identičan raspored prostorija. Vertikalna komunikacija se ostvaruje pomoću dva lifta i dva stepeništa, dok je na svakom spratu hodnik koji obezbeđuje horizontalnu komunikaciju.

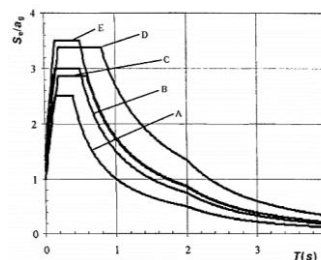
Spoljašnji zidovi su obloženi izolacionim slojem stiropora debljine 10 mm. Krov je ravna armiranobetonska ploča debljine 20 cm. Pregradni zidovi unutar objekta su od blokova debljine 12 cm, što pruža odgovarajuću zvučnu i termičku izolaciju između stanova. Temelji objekta su armiranobetonska ploča debljine 40 cm, čime se osigurava stabilnost i dugovečnost zgrade.

U konstruktivnom smislu objekat je masivnog sistema, izrađen od zidanih zidova koji su ukrućeni horizontalnim i vertikalnim serklažima. Noseći zidovi u prizemlju su debljine 38cm, dok su na spratovima 25cm. Svi armiranobetonski elementi u konstrukciji su betonirani betonom klase C 25/30. Vertikalni serklaži su dimenzija 38x38 i 25x25 cm. Horizontalni serklaži se oslanjaju na noseće zidove a njihova visina odgovara visinama tavanica. Dimenzije horizontalnih serklaža su 25x20 i 38x20 cm. Serklaži su armirani sa 4Ø12 i UØ8/15 cm.

Projektom je predviđena AB međuspratna i krovna ploča debljine 20 cm, izvedena betonom klase C25/30 i armirana u obe zone armaturom Q335.

3. ANALIZA OPTEREĆENJA

Na objekat pored sopstvene težine deluju i sledeća opterećenja: dodatno stalno opterećenje čija je vrednost 1,145 kN/m², odnosno 1,56 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 1 kN/m². Seizmičko opterećenje je izraženo preko spektra odgovora tip 1 (Slika 1), tip tla je B.



Slika 1. Preporučeni tip 1 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.



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 zadovoljavajući odgovor. Klasa značaja objekta je II i faktor $\gamma_I = 1,0$.

$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I$$

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

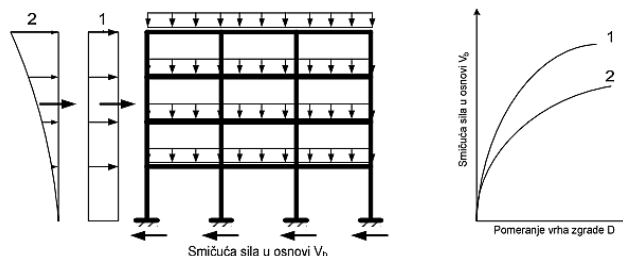
$$a_{g,ULS} = a_{gR} \cdot \gamma_I = 0,12 \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot 1,0 = 1,2 \frac{m}{s^2}$$

5. PUSHOVER 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 opterećenja. Horizontalno opterećenje je pretpostavljeno sa odgovarajućom raspodelom po visini i povećava se

monotono od nula do krajnje vrednosti koje bi izazvalo rušenje konstrukcije.

Neophodno je primeniti dve vertikalne raspodele bočnih sila - ravnomerne raspodele, 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.

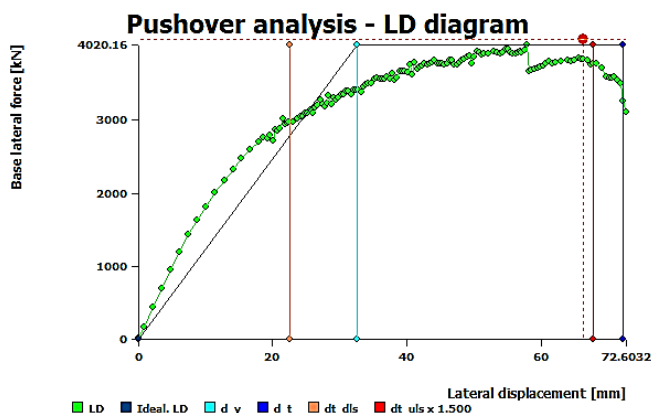


Slika 3. Raspodela bočnih sila za pushover analizu

6. 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 je dat 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	22,576	[mm]
Kapacitet za GSU - dc_dls	61,712	[mm]
Ciljno pomeranje za GSN - dt_uls	67,728	[mm]
Kapacitet za GSN - dc_uls	72,233	[mm]
Period - T	0,755	[s]
Maksimalno referentno ubrzanje tla - a_g	1,280	[m/s ²]
Duktilnost - μ	2,905	/
Faktor prekoračenja - <i>OSR</i>	9,464	/
Elastično pomeranje - dy	32,599	[mm]

7. RUČNA VERIFIKACIJA REZULTATA

7.1 Ciljna pomeranja i kapaciteti za ULS i DLS

Ciljno pomeranje u analizi pushover krive predstavlja maksimalno dopušteno pomeranje (deformaciju) koje konstrukcija može doživeti pri određenim zemljotresnim dejstvima. To je parametar koji se postavlja kako bi se odredili željeni kapacitet konstrukcije i kako bi se definisale granice njenog 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 $d_{max} = 93,821 \text{ mm}$ sila $F_{b,i}$ ima vrednost od 3757,473 kN a $F_{b,max}$ ima vrednost od 4893,93 kN, odnosno $0,8 \times F_{b,max} = 3915,144$ time 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 su prikazane u tabeli (Tabela 2).

Tabela 2. Vrednosti ubrzanja

Raspored opterećenja	Slučaj opterećenja	a_g [m/s ²]	<i>AmQuake</i>
Uniformni raspored	X+, pos exc	1,953	1,952
	X+, neg exc	1,921	1,92
	X-, pos exc	1,638	1,638
	X-, neg exc	1,544	1,544
	Y+, pos exc	1,925	1,924
	Y+, neg exc	1,927	1,928
	Y-, pos exc	1,345	2,078
	Y-, neg exc	1,468	1,526
Modalni raspored	X+, pos exc	1,291	1,291
	X+, neg exc	1,325	1,325
	X-, pos exc	1,281	1,28
	X-, neg exc	1,253	1,253
	Y+, pos exc	1,987	1,987
	Y+, neg exc	2,078	1,346
	Y-, pos exc	1,372	1,468
	Y-, neg exc	1,526	1,372

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	Softver μ/r
Uniformni raspored	X+, pos exc	3,116	3,116
	X+, neg exc	3,046	3,046
	X-, pos exc	2,595	2,595
	X-, neg exc	2,454	2,455
	Y+, pos exc	3,169	3,170
	Y+, neg exc	3,188	3,188
	Y-, pos exc	2,168	2,168
	Y-, neg exc	2,378	2,378
Modalni raspored	X+, pos exc	2,331	2,331
	X+, neg exc	2,377	2,377
	X-, pos exc	2,297	2,297
	X-, neg exc	2,247	2,247
	Y+, pos exc	3,419	3,420
	Y+, neg exc	3,710	3,710
	Y-, pos exc	2,301	2,301
	Y-, neg exc	2,671	2,671

7.4 Faktor prekoračenja *OSR*

Faktor prekoračenja *OSR* se izražava preko odnosa F_y/F_{el} ili a_u/a_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*

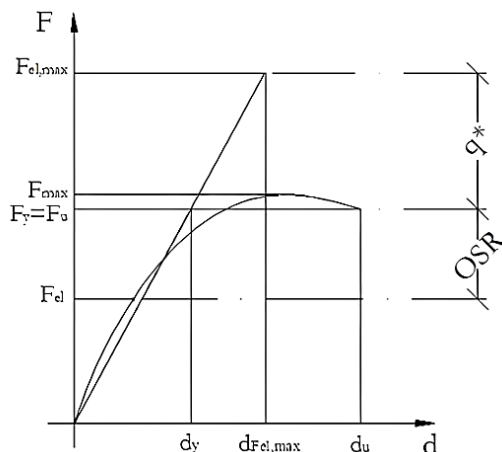
Uniformni raspored	X+, pos exc	2,660	2,660
	X+, neg exc	2,675	2,675
	X-, pos exc	2,678	2,678
	X-, neg exc	2,677	2,677
	Y+, pos exc	2,562	2,562
	Y+, neg exc	2,587	2,587
	Y-, pos exc	2,613	2,613
	Y-, neg exc	2,592	2,592
Modalni raspored	X+, pos exc	2,789	2,789
	X+, neg exc	2,806	2,806
	X-, pos exc	2,809	2,809
	X-, neg exc	2,814	2,814
	Y+, pos exc	2,817	2,817
	Y+, neg exc	2,819	2,819
	Y-, pos exc	2,887	2,887
	Y-, neg exc	2,813	2,813

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.



Slika 5. Parametri za definiciju faktora ponašanja q (F - bazna smičuća sila, d - pomeranje 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

Uniformni raspored	X+, pos exc	8,287
	X+, neg exc	8,147
	X-, pos exc	6,950
	X-, neg exc	6,571
	Y+, pos exc	8,123
	Y+, neg exc	8,248
	Y-, pos exc	5,666
	Y-, neg exc	6,165
Modalni raspored	X+, pos exc	6,502
	X+, neg exc	6,670
	X-, pos exc	6,451
	X-, neg exc	6,322
	Y+, pos exc	9,634
	Y+, neg exc	10,459
	Y-, pos exc	6,643
	Y-, neg exc	7,513

Dobijene vrednosti faktora ponašanja se kreću u intervalu od 18,8 do 33,7. Najveća vrednost je dobijena za negativan

Y pravac sa pozitivnim ekscentricitetom delovanja opterećenja. Dobijene vrednosti su znatno veće od vrednosti 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

Iz proračuna konstrukcije prema Evrokodovima zaključuje se da svi elementi ispunjavaju kriterijume nosivosti. Iako zidane konstrukcije predstavljaju izazov u pogledu seizmičke otpornosti, stručno projektovanje i pridržavanje propisa omogućavaju njihovo efikasno savladavanje. Nosivost zidova zavisi od vertikalnih opterećenja, dok prisustvo otvora smanjuje stabilnost. Serklaži su posebno važni za zidove sa otvorima, jer zidovi bez serklaža imaju manju otpornost na horizontalne sile.

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:



David Radojević rođen u Valjevu 1997. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Građevinarstvo – Zidane konstrukcije odbranio je 2024. god. kontakt: radojevicdavid97@gmail.com