

N. Obradović, P. Mitković, and S. Radovanović

„Nelinearna statička metoda postupnog guranja – pushover analiza AB okvira sa zidanom ispunom“, in Zbornik radova Međunarodnog simpozijuma o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, Vršac, 18-20. oktobar 2017., pp. 245-254

ISBN:978-86-87615-08-3

XXVII KONGRES I MEĐUNARODNI SIMPOZIJUM O ISTRAŽIVANJIMA I PRIMENI SAVREMENIH DOSTIGNUĆA U GRAĐEVINARSTVU U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA

Nikola Obradović¹
Predrag Mitković²
Slobodan Radovanović³

NELINEARNA STATIČKA METODA POSTUPNOG GURANJA-PUSHOVER ANALIZA AB OKVIRA SA ZIDANOM ISPUNOM

Rezime: U radu je ukratko opisana problematika proračuna AB okvira sa zidanom ispunom primenom nelinearne statičke metode (pushover analiza). Prikazani su različiti načini modeliranja zidane ispune. Izvršena je pushover analiza AB okvira (P+5) sa zidanom ispunom. Prvo je izvršeno dimenzionisanje AB okvira prema Evrokodu. Nakon toga je sprovedena pushover analiza AB okvira primenom programskog paketa SAP2000. Razmatran je model AB okvira bez ispune i model gde je ispuna modelirana pomoću zamenjujućih dijagonala. Na kraju je data uporedna analiza rezultata iz ova dva modela.

Ključne reči na srpskom jeziku: AB okvir, zidane konstrukcije, Pushover analiza, ekvivalentna zamenjujuća metoda dijagonale

STATIC NONLINEAR ANALYSIS METHOD-PUSHOVER ANALYSIS OF RC FRAMES WITH MASONRY INFILL

Summary: In this paper, procedures used for static nonlinear analysis (pushover analysis) of RC frames with masonry infill are presented. Also, different ways how to model masonry infill are described. On the example of RC frames with five stories, the application of pushover analysis is presented. As a first step, RC frame is designed according to Eurocodes. After that, pushover analysis is conducted using computer program SAP2000. Two computer models are considered. One of RC frame without masonry infill, and other where masonry infill is modeled using diagonal struts. As conclusion, a comparative study of results obtained from previously described computer models of RC frame is given.

Keywords: RC frame, masonry infill, Static nonlinear analysis method, Pushover analysis, diagonal struts.

¹ mast. inž. građ., asistent-student doktorskih studija, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, nobradovic@grf.bg.ac.rs

² mast. inž. građ., asis-student doktorskih studija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Prištini, predrag.mitkovic@pr.ac.rs

² mast. inž. građ., asistent-student doktorskih studija, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, radovanovic@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Glavni cilj savremenih propisa i normi za proračun konstrukcija u seizmičkim područjima jeste da osiguraju dovoljan kapacitet trošenja energije bez bitnog smanjenja lokalne i globalne nosivosti na horizontalna i vertikalna opterećenja i bez oštećenja koja bi ograničila upotrebljivost građevine. Metode koje se koriste pri ispunjavanju tih ciljeva su sledeće [3], [4]:

- a) linearni statički proračun primenom ekvivalentnog statičkog opterećenja
- b) linearni dinamički modalni proračun spektrima odgovora
- c) nelinearna statička analiza - metoda postupnog guranja(*pushover*)
- d) nelinearni dinamički proračun upotrebom zapisa ubrzanja u vremenu (*time-history*).

Redosled kojim su ove metode nabrojane odgovara i njihovoj tačnosti. Međutim, kako raste tačnost metode, tako raste i njena složenost, što povećava napor i vreme potrebno za njeno sprovođenje.

1.1. Tradicionalni pristup

Tradicionalni pristup u seizmičkim proračunima konstrukcija zasniva se na zadovoljavanju opštih zahteva proverom graničnog stanja nosivosti i graničnog stanja upotrebljivosti elastičnim proračunom konstrukcije. Da bi se izbegao nelinearni proračun konstrukcije, kapacitet trošenja energije u konstrukciji uzima se u obzir koristeći linearni proračun koji se zasniva na redukovanim elastičnim spektrima odgovora ubrzanja podloge. Redukcija se izvodi koeficijentom koji je u evropskim metodama nazvan faktorom ponašanja q , a tako redukovani elastični spektri nazivaju se proračunskim spektrima. Međutim, postoje nedostaci takvog pristupa[4], a oni su sledeći:

- preporučene vrednosti za faktor ponašanja su približne i ne predstavljaju nužno konkretnu konstrukciju
- kada ponašanje konstrukcije uđe u nelinearno područje dolazi do preraspodele sila i deformacija, što nije obuhvaćeno proračunom
- mehanizam koji dovodi do loma ne može se predvideti elastičnom raspodelom sila i deformacija
- raspodela i vrednost deformacija u neelastičnom području nemaju nikakvu sličnost s onima u elastičnom području.

Elastične metode, bez obzira na navedene nedostatke, zbog svoje jednostavnosti i pristupačnosti, zauzimaju glavno mesto u današnjoj inženjerskoj praksi.

1.2. Savremeni pristup

Poslednjih godina razvijaju se nove metode koje sadrže inženjerske koncepte bazirane na ponašanju konstrukcije (*performance based engineering concept*), čime se želi posvetiti veća pažnja kontroli oštećenja. Pristup na osnovu pomeranja (*displacement-based approach*) pokazuje se kao puno bolji izbor u težnji za realnijim spoznavanjem problema seizmičkog delovanja od tradicionalnog pristupa na osnovu sila (*force-based approach*).

Najtačniji u opisu problema jeste svakako nelinearni seizmički proračun upotrebom zapisa ubrzanja u vremenu - čija je primena veoma retka jer je potrebno mnogo vremena za sprovođenje jedne takve analize. Međutim, zbog svoje kompleksnosti i zahtevnosti još uvek izlazi iz okvira praktične primene.

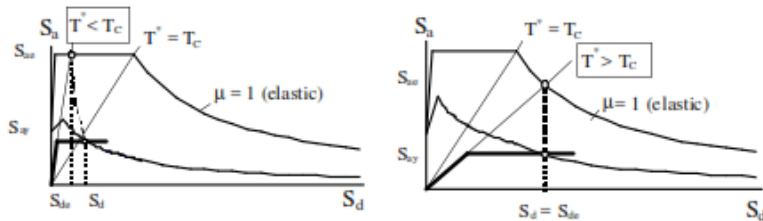
Između linearnih metoda i nelinearnog dinamičkog proračuna upotrebom zapisa ubrzanja u vremenu, kao veza i trenutno najracionalnije održivo rešenje, radi se nelinearni statički pristup. Tako je u novije vreme u evropske norme ušla metoda N2 [3, 4, 5]. U američkom ATC-u 40 [1] obrađena je metoda spektra kapaciteta (*Capacity Spectrum Method*). Njena novija unapređena varijanta prikazana je u FEMA-i 440 [6]. Metoda koeficijentata (*Coefficient Method*) odnosno NSP (*Non-linear Static Procedure*) uvedena je u FEMA-i 274 [7], a novija unapređena verzija prikazana je u FEMA-i 356 [8].

2. NELINEARNA STATIČKA ANALIZA-METODA POSTUPNOG GURANJA(PUSHOVER ANALISYS)

Nelinearnom statičkom analizom određuje se kriva kapaciteta poznata još kao i push-over kriva. Tačnije, ona se dobije tako što se statičko gravitaciono opterećenje kombinuje sa lateralnim tj. bočnim silama od zemljotresa koje su opet statičkog karaktera. Cilj ove analize je definisanje zavisnosti pomeranja poslednje etaže ili krova konstrukcije i smičuće sile u osnovi koja prouzrokuje prvo tečenje u konstrukciji. Kontrolna tačka bi trebalo biti smeštena u centru mase najvišeg nivoa konstrukcije. Kad čvrstoća pojedinih nosivih elemenata dosegne čvrstoću napona na granici velikih izduženja, ti pojedini nosivi elementi počinju teći i formiraju takozvane plastične zglobove. Inkrementalno bočno opterećenje se i dalje nanosi sve dok se ne dostigne takozvano ciljno pomeranje ("target displacement") i ne formira kriva nelinearnog statičkog kapaciteta.

Pretpostavka je da konstrukcija može napraviti više takvih ciklusa i ponašati se na histerezisni način. Krutost koja se uzima u proračunima je redukovana na sekantnu koja se dobija za najveće pomeranje uočeno na krivoj kapaciteta. Preporuka je da tamo gde se projektno pomeranje definiše kao ciljno pomeranje, konstrukcija ipak "gurne" još malo kako bi se dobio veći nivo tačnosti i pouzdanosti[7].

Pushover analiza je dovoljno tačna kada konstrukcija osciluje pretežno u prvom obliku oscilovanja. Postupak se primjenjuje na deformabilne objekte s duktilnim nosivim elementima. Za dobijanje krive kapaciteta, koja predstavlja horizontalno pomeranje vrha konstrukcije, pushover analiza se primenjuje do vrednosti kontrolnog pomeranja koje odgovara 150% vrednosti ciljnog pomeranja.(slika 1)



Slika 1. Određivanje ciljnog pomeranja za ekvivalentni SDOF sistem

3. MODELIRANJE I ANALIZA

Generalna procedura za izvršenje nelinearne statičke procedure (Nonlinear Static Procedure –NSP) je sledeća:

1. potrebno je napraviti elastični model konstrukcije koji će uključiti sve nove i stare komponente koji imaju značajan doprinos težini, čvrstoći, krutosti i stabilnosti konstrukcije i čije je učešće važno za dobijanje realne slike ponašanja konstrukcije za vreme zemljotresa. Konstrukcija je opterećena sa gravitacionim opterećenjem kao i u slučaju "regularne" statičke procedure pre nanošenja bilo kakvog bočnog opterećenja od zemljotresa,

2. konstrukciju izložiti setom poprečnih opterećenja koristeći jedan od ponuđenih načina raspodele, ali najmanji broj ovih različitih opterećenja bi trebao biti dva(2) za svaki glavni pravac konstrukcije,

3. intenzitet horizontalnog opterećenja se povećava sve dok najslabiji element ne dostigne deformacije za koje će se njegova krutost znatno smanjiti, a to je najčešće opterećenje koje izaziva tečenje elementa ili dostiže njegovu čvrstoću. Krutost nosivog elementa koji teče je modifikovana pa je takva modifikovana konstrukcija izložena daljem porastu bočnog opterećenja, (za slučaj kada je ona izložena kontroli putem sila) ili porastu pomeranja, (kada je kontrola putem pomeranja). Pri tome se koristi isti oblik raspodele horizontalnog zemljotresnog opterećenja ili modifikovan oblik koji se može pojaviti u jednoj od sledećih formi:

3.1. ubacivanje plastičnih zglobova gde je element napregnut na savijanje dostigao čvrstoću na savijanje (ovo može biti na kraju grede, stuba ili u dnu AB zida),

3.2. eliminacijom krutosti smicanja poprečnih zidova koji su dostigli čvrstoću smicanja na pojedinom spratu,

3.3. eliminacijom elementa za ukrućenje koji se izvio i čija čvrstoća nakon izvijanja rapidno opada,

4. korak 3. se ponavlja onoliko puta koliko treba da dođe do postizanja čvrstoće pojedinih elemenata. Iako se opterećenje povećava, oblik opterećenja ostaje isti. U ovom koraku se za svaki nivo opterećenja računaju unutrašnje sile i deformacije-kako elastične tako i plastične,

5. sile i deformacije iz prethodnih nivoa opterećenja se dodaju da bi se obezbedila ukupna sila i deformacija i to za sve komponente i za sve nivoe opterećenja,

6. proces opterećenja se nastavlja sve dok se ne detektuje neprihvatljivo ponašanje konstrukcije ili dok pomeranje na krovu ne dostigne maksimalno pomeranje za dati računski zemljotres,

7. iscrtava se pomeranje kontrolne tačke naspram smičuće sile u osnovi tj. prvom spratu za razne nivoe opterećenja kako bi se dobio nelinearni dijagram odgovora konstrukcije,

8. kada se odredi ciljno pomeranje, akumulirane sile i deformacije na mestu pomeranja kontrolne tačke treba koristiti kako bi se procenilo ponašanje pojedinih komponenti i to:

8.1. za dejstva koja su kontrolisana deformacijama, npr. savijanje u gredama, zahtevane (računske) deformacije su poređene sa maksimalnim dopuštenim vrednostima-kapacitetom deformacija,

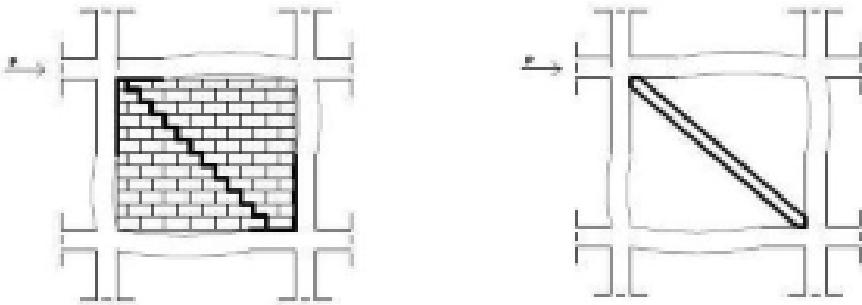
8.2. za dejstva koja su kontrolisana silama, npr. smicanje u gredama, kapacitet nosivosti je poređen sa zahtevanom silom,

8.3. ako bilo koji element po 8.1 ili 8.2. dostigne dopuštene vrednosti, tada dejstva, komponente ili elementi narušavaju utvrđene kriterijume i vode ka lomu konstrukcije.

3.1. MODELIRANJE ISPUNE POMOĆU ZAMENJUJUĆE DIJAGONALE

FEMA 273[7] propisuje da zidane ispune treba da budu predstavljene kao ekvivalentni dijagonalni štapovi(Slika 2). Štapovi mogu da se rasporede koncentrično preko dijagonale, ili ekscentrično da se direktno izračuna uticaj ispune na stubove. Da bi se u proračunu uvela dijagonala ispuna mora da zadovolji uslov $0,50 < h/L < 2,0$ (h- visina ispune, a L-raspon ispune).

FEMA uzima u obzir dozvoljene deformacije. Ona dopušta da se uzme u obzir nelinearno ponašanje konstrukcije, primena izolatora i prigušivača. FEMA 356 [8]propisuje da ekvivalentna dijagonala ima istu debljinu i modul elastičnosti kao zidana ispuna,ali ne daje preporuke duž kojeg pravca se računa modul elastičnosti.



Slika 2. Ispuna kao ekvivalentni dijagonalni štap

t - debljina ispune, h - visina, l - dužina, I_c ... moment inercije stuba, h'-visina rama izmerena između sredine greda, E_d и E_f - Jangov moduo ispune i materijala konstrukcije okvira.

$$\lambda' = \sqrt[4]{\frac{E_d t \sin(2\theta)}{4E_f I_c h}} \quad (1)$$

$$w = 0.175(\lambda' h')^{-4} \cdot d \quad (2)$$

$$w = 5,1 \cdot 0,175 \cdot \left(\frac{0,589587}{2,4}\right)^{-0,4} \quad (3)$$

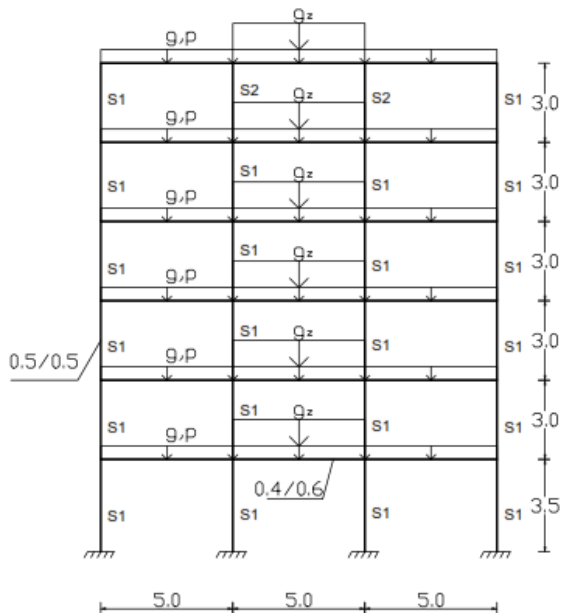
$$w = 1,5571m \quad (4)$$

4. PRIMER ZA ILUSTRACIJU METODE POSTUPNOG GURANJA(PUSHOVER) PRIMENOM PROGRAMA SAP2000

Primenu navedenih nelinearnih metoda pokazaćemo na primeru AB rama.(slika 3) AB okvir ima 6 spratova od kojih je prvi 3,50 m, a ostali 3,00 m. Svi stubovi su dimenzija 50x50 cm, a grede 40x60 cm . Ploča je debljine 20 cm. Beton je klase čvrstoće C30/37, a armatura B500. Usvojeno je tlo kategorije B, konstrukcija je visoke klase duktilnosti,faktor ponasanja je $q=5,95$ određen prema odredbama evrokoda 8, ubrzanje $a_g = 0.175g$.

4.1.1. Modeliranje konstrukcije

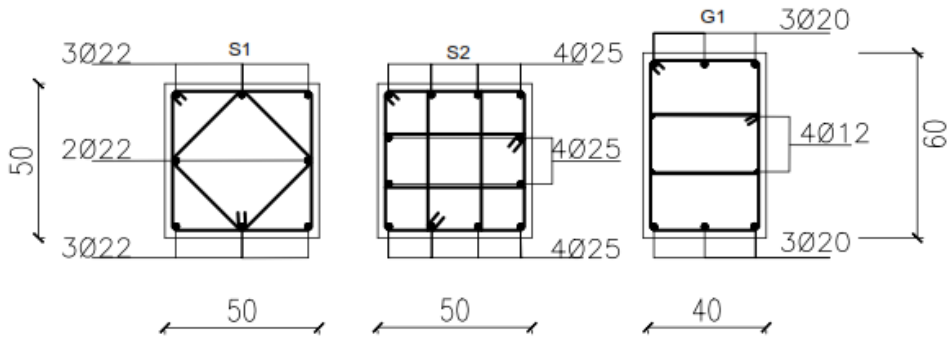
Prvo je ,naravno, potrebno oformiti model konstrukcije, što uz pomoć kompjuterskog software-a SAP2000 predstavlja brz i jednostavan zadatak. Neka se radi o modelu konstrukcije koji je predstavljen (slika 3) sa stalnim opterećenjem $g=37.5KN/m, g_z=7.44KN/m$ i povremenim $p=12.5KN/m$,armirana rebrastom armaturom B500,marke betona C30/37. Razmatrana su dva modela(model bez zida i model u kom je zid predstavljen kao prosti stap).



Slika 3. Model konstrukcije

4.1.2. Dimenzionisanje poprečnih preseka

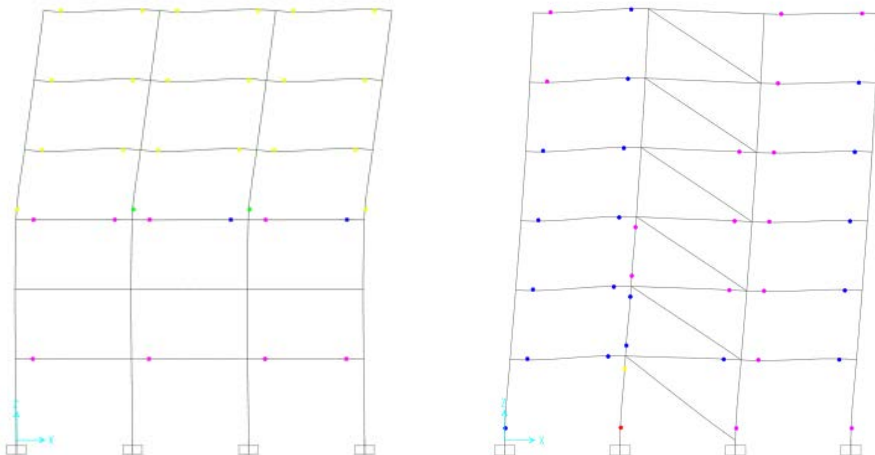
Usvojeni poprečni presezi i dimenzionisanje AB rama prema zadatom opterećenju.(slika 4)



Slika 4. Poprečni presezi stubova i greda u AB ramu

4.1.3. Definisane zglobova

SAP2000 [10] koristi dve osnovne vrste nelinearnih elemenata:linijski (ramovski/kablovski) elementi kod kojih je definisano nivo pritiska/zatezanja koji mogu primiti i plastični zglobovi. Svaka linearna analiza počinje od neopterećenog (nultog) stanja, i odvija se kao da nisu prisutni nelinearni parametri. Moguće je umetnuti proizvoljan broj zglobova na bilo kojoj lokaciji, a svaki zglob je modeliran kao diskretna tačka na modelu. SAP2000 poseduje standardne, već definisane zglobove pa nije potrebno određivati nove.



Slika 5. Plastični zglobovi na modelu bez ispunje i sa ispunom

Tačnije postoje dve osnovne vrste zglobova: standardni zglobovi i zglobovi definisani od strane projektanta kao i generisani zglobovi, međutim samo prva dva tipa mogu biti pridružena ramovskim elementima. Program automatski kreira različite osobine zglobova za svaki generisani zglob ponaosob. Osobine ovih tipskih zglobova su definisane po kriterijima iz FEMA-e 273 (za čelične konstrukcije) i ATCa-40 (za betonske konstrukcije). Formiranje plastičnih zglobova na modelima sa ispunom i bez nje.(slika 5).

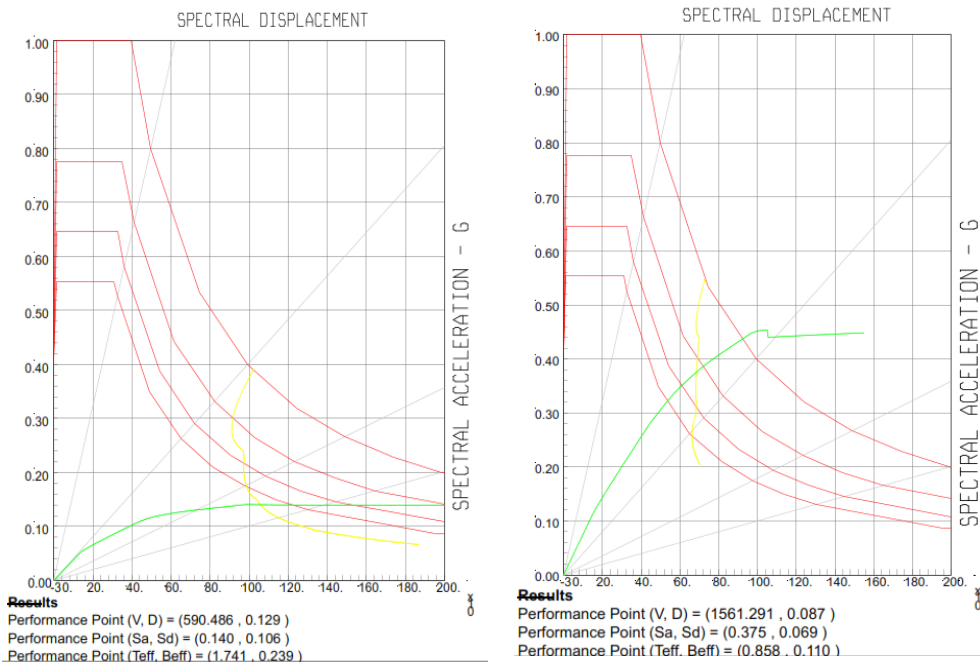
4.1.4. Prikazivanje push-over krive i krive spektra kapaciteta

Tradicionalno je predstavljanje spektara odgovora u obliku S_a - T odnosno S_d - T . Ili, na apscisi su periodi oscilovanja, a na ordinati veličine posmatranog spektralnog odgovora, S_a , ili S_v , ili S_d . Za inženjere – projektante zanimljiva su spektralna ubrzanja S_a i spektralna pomeranja S_d , koji su međusobno povezani formulom(5)

$$S_a = \omega^2 \cdot S_d \quad (5)$$

Koristeći se formulom (2) i poznatom vezom (5) iz dinamike konstrukcija između kružne frekvencije ω i perioda oscilovanja T :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$



Slika 6. Spektralna pomeranja S_{de} i spektralna ubrzanja S_{ae}

a) model bez ispunom

b) model sa ispunom

Sledi:

$$S_a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot S_d \quad (7)$$

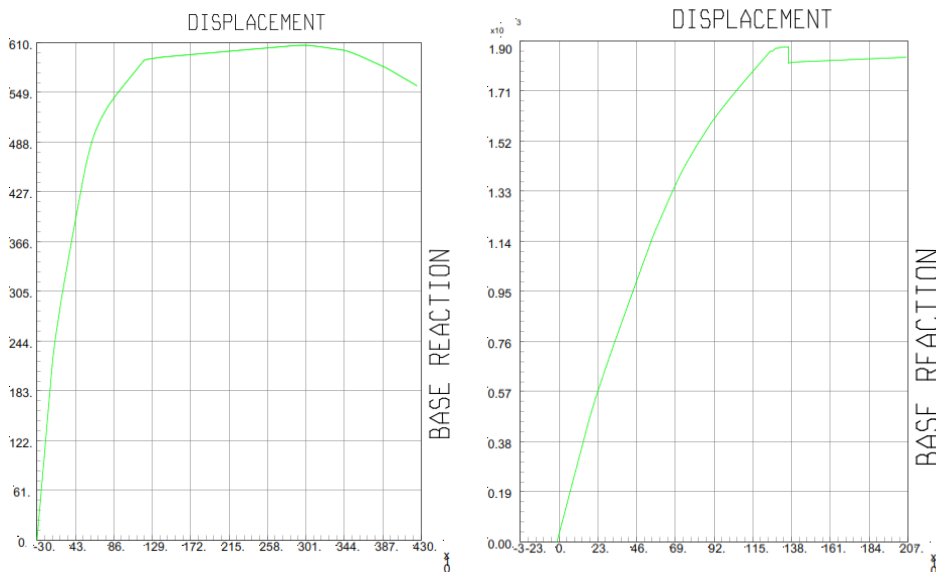
Na osnovu formule (7) crtaju se spektri odgovora u obliku Sa-Sd, poznatom [1,2,9] kao ADRS-format(Acceleration- Displacement Response Spectrum). U ovom načinu prikazivanja periodi oscilovanja su predstavljeni radijalnim pravcima koji polaze iz koordinatnog početka. Spektralno ubrzanje se u dijagramima najčešće predstavlja kao deo gravitacionog ubrzanja g.

SAP2000 automatski vrši konvertovanje krive sila-pomeranje u ADRS format tako što smičuća sila prelazi u spektralno ubrzanje, Sa, a pomeranje u kontrolisanom pravcu u spektralno pomeranje,Sd.

Pushover analiza sastoji se u određivanju grafika nelinearne zavisnosti sile i pomeranja. Ova zavisnost predstavlja ukupnu horizontalnu silu na mestu nestabilnosti u zavisnosti od pomeranja kontrolne tačke odabrane negde na nosivom elementu. Najčešće se kontrolna tačka bira na vrhu objekta. Za određivanje Pushover krive(krive kapaciteta nosivosti slika 7) koristi se ekvivalentni nelinearni sistem sa jednim stepenom slobode.

4.1.5. Performance point (tačka ciljnog pomeranja)

Presečna tačka pushover krive i neelastičnog spektra odgovora naziva se performance point. Ova tačka predstavlja vrednost maksimalnog pomeranja za analizirani element. Iz slike 6. se može očitati da presečna tačka neelastičnog spektra pomeranja s pushover krivom (tačka 1) daje vrednost od 87mm kod modela sa ispunom dok kod modela bez ispune iznosi 129mm.



Slika 7. Pushover kriva

a) model bez ispune

b) model sa ispunom

5. ZAKLJUČAK

Metoda spektra kapaciteta i metoda postupnog guranja efikasna su sredstva za inženjersku analizu ponašanja konstrukcije u nelinearnom području rada materijala. To je naročito važno za opterećenje zemljotresom. Krive spektra kapaciteta daju veoma dobru sliku odnosa nosivosti i deformacije konstrukcije. Opisani je postupak naročito dobar za procenu postojećih građevina. Velik broj postojećih zgrada ne zadovoljava najnovije seizmičke propise. Metoda spektra kapaciteta može na relativno jednostavan način pokazati kakvi su zahvati na nosivoj konstrukciji potrebni da bi se mogao očekivati njen povoljan odaziv na zemljotres.

U ovom radu prikazan je postupak proračuna AB okvira sa zidanom ispunom i bez nje temeljen na pomeranjima. Na osnovu dobijenih rezultata dozvoljeno maksimalno pomeranje konstrukcije sa ispunom je za 30% manje od pomeranja konstrukcije bez ispune. Što za posledicu ima veću smičuću silu u osnovi. To dalje vodi do većih presečnih sila u stubovima i gredama. S obzirom da su elementi konstrukcije dimenzionisani za presečne sile dobijene u modelu bez ispune, tako dimenzionisani poprečni preseci neće zadovoljiti kriterijume nosivosti za povećane presečne sile. Dakle, pushover analiza je pokazala da je potrebno uzeti u obzir doprinos zidova ispune krutosti konstrukcije prilikom projektovanja, bilo novih konstrukcija, ili proceni nosivosti postojećih konstrukcija. U budućim istraživanjima trebalo bi se posvetiti načinu što realnijeg modeliranja ispune.

6. REFERENCE

- [1] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, 1996.
- [2] Badoux, M.: Comparison of seismic retrofitting strategies with the capacity spectrum method, 11th European Conference on Earthquake Engineering, 1998.
- [3] *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – EN 1998-1: 2004*, CEN, Brussels, November 2004.
- [4] Čaušević, M., Zahenter, E.: Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema EN 1998-1:200, Građevinar, 59 (2007) 9,767-777.
- [5] Fajfar, P.: A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design, Earthquake Spectra 16, No. 3, pp 573-592,2000.
- [6] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2005, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA-440*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [7] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997, NEHRP guidelines for seismic rehabilitation of buildings, FEMA 273, and NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 274, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [8] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2000, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [9] Freeman, S. A.: Development and use of capacity spectrum method, 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1998.
- [10] SAP2000, Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures, Detailed Tutorial Including Pushover Analysis, Computers and Structures, Inc.Berkeley, California, USA.