

Primljen / Received: 23.1.2021.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2020.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2020.

Dostupno online / Available online: 10.12.2022.

Analiza postupnog guranja za procjenu seizmičkih zahtjeva okvira s eliptičnim vezovima

Autori:



Doc.dr.sc. **Habib Ghasemi Jouneghani**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Sydney, NSW, Australija
Fakultet građevinarstva i inženjerstva okoliša
Habib.GhasemiJouneghani@uts.edu.au

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Abbas Haghollahi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište za izobrazbu nastavnika Shahid Rajaei
Teheran, Iran
Odjel za građevinarstvo
Haghollahi@Sru.ac.ir



Dr.sc. **Mina Mortazavi**, dipl.ing.građ.
Tehnološko sveučilište Sydney, NSW, Australija
Fakultet građevinarstva i inženjerstva okoliša
Mina.Mortazavi@uts.edu.au

Prethodno priopćenje

Habib Ghasemi Jouneghani, Abbas Haghollahi, Mina Mortazavi

Analiza postupnog guranja za procjenu seizmičkih zahtjeva okvira s eliptičnim vezovima

U ovom se radu vrednuje seizmički odziv inovativnog čeličnog veznog sustava: okvir s eliptičnim vezovima (elliptic braced moment resisting frames - ELBRF). ELBRF ima bolje konstrukcijsko ponašanje u odnosu na druge vezne sustave te arhitektonsku prednost koja smanjuje smetnje pri umetanju otvora u zidove. Seizmičko ponašanje ELBRF-a procjenjuje se pomoću različitih obrazaca opterećenja primjenom konvencionalne metode postupnog guranja konstrukcije. Rezultati analize potvrđuju se pomoću nelinearne analize primjenom vremenskog zapisa (nonlinear time history analysis - NTHA) ELBRF okvira na 3, 5, 7 i 10 katova na tlu 2. tipa pogođenih potresima magnitude do 10 i uspoređuju se s posebnim okvirima (special moment resisting frames - SMRF) i okvirima s križnim i obrnutim V centričnim vezovima. Vrednuju se međukatni pomaci, pomaci te katni posmici. Postiže se proporcionalno točno vrednovanje pomoću metoda postupnog guranja konstrukcije u usporedbi s NTHA-om. Modalna metoda postupnog guranja konstrukcije (MPA) omogućuje procjenu seizmičkih zahtjeva s ciljem prevladavanja nedostataka raspoređivanja opterećenja prema FEMA-i kada se radi o učincima viših modova. Poboľšano je seizmičko ponašanje protupotresnog sustava ELBRF, oštećenja se prenose na gornje katove, a povećava se i faktor modifikacije odziva kod ELBRF-ova.

Ključne riječi:

okvir s eliptičnim vezom, seizmički zahtjev, nelinearna statička analiza postupnog guranja, seizmičko ponašanje, nelinearna analiza primjenom vremenskog zapisa, faktor modifikacije odziva

Research Paper

Habib Ghasemi Jouneghani, Abbas Haghollahi, Mina Mortazavi

Pushover analysis for estimating seismic demand of elliptic braced moment resisting frames

In this paper, an innovative steel bracing system, known as the seismic response of elliptic braced moment resisting frame (ELBRF), is evaluated. ELBRF has a better structural behavior comparing to the other bracing systems and it has an architectural advantage allowing to place openings in walls with less interference. The demand for seismic performance of ELBRF is estimated through different loading patterns by adopting the conventional pushover methods. The pushover results are verified through nonlinear time history analysis (NTHAs) of 3, 5, 7, and 10-story ELBRF frames, which are on type II soil and are affected by 10 scaled earthquake records. These results are also with special moment resisting frames (SMRF) and X-Braced CBF and Inverted V-Braced CBF concentrically braced frames. Story drifts, displacements, and story shears are evaluated. A proportionally accurate estimation is observed through the pushover methods in comparison with NTHAs. Modal Pushover Analysis (MPA) can estimate the seismic demands by overcoming the shortcomings of FEMA load distributions when the higher mode effects are of concern. The seismic performance of the ELBRF system against earthquakes has improved, failure is transmitted to the upper stories, and the response modification factor is increased in ELBRF.

Key words:

elliptic braced moment resisting frame, seismic demand, nonlinear static pushover analysis, seismic performance, nonlinear time history analysis, response modification factor

1. Uvod

Proučavanjem rušenja objekata tijekom seizmičkih događaja otkriveno je da su konvencionalne elastične metode nedovoljno učinkovite za projektiranje zgrada. Te metode ne pružaju stvaran uvid u način na koji se konstrukcije ponašaju kad su izložene ekstremnim seizmičkim fenomenima. Stvarno ponašanje konstrukcija utvrđuje se pomoću metoda orijentiranih na ponašanje i smjernica podložnih inovativnom pristupu projektiranju pod nazivom projektiranje temeljeno na ponašanju (performance-based design) [1].

Ova nova analitička metoda projektiranja ima dvije glavne razlike u odnosu na konvencionalne perspektive u potresnom inženjerstvu. Prva se sastoji u postojanju izravne veze između projektiranja i ponašanja konstrukcije, a druga u njegovoj multifunkcionalnosti. Ciljevi ponašanja mogu biti razina naprezanja koja se ne smije prekoračiti, opterećenje, pomak, granično stanje ili ciljano stanje oštećenja. Do konstrukcijskih oštećenja tijekom trešnji tla uzrokovanih potresom prije svega dolazi zbog bočnih pomaka. Procjena bočnog pomaka ključna je u protupotresnom projektiranju temeljenom na ponašanju. Nelinearna analiza primjenom vremenskog zapisa temeljena na preciznom analitičkom modelu, vjerojatno je najbolji način procjene deformacija. Postoje mnoge neizvjesnosti u vezi s generiranjem ulaznih podataka specifičnog za mjesto te uobičajenih analitičkih modela za prikaz ponašanja konstrukcije. Stoga je sigurnije koristiti se jednostavnijim sredstvom za analizu seizmičkog ponašanja okvirne konstrukcije [2].

Predviđanje u procjeni ponašanja konstrukcije izložene potresu odvija se pomoću nelinearne analize primjenom vremenskog zapisa (eng. *Nonlinear Time History Analysis* - NTHA). Nelinearna dinamička metoda najsveobuhvatnija je metoda analize i kombinira zapise gibanja tla s preciznim modelom konstrukcije. Tom se metodom postiže relativno niska razina neizvjesnosti. Izračunani odgovori vrlo su osjetljivi na jedinstvene karakteristike svakog gibanja tla kao korištenog seizmičkog ulaznog podatka. Stoga je potrebno nekoliko analiza za korištenje različitih zapisa gibanja tla [3]. Iako se rezultati NTHA-a često primjenjuju u teorijskim studijama, takva analiza oduzima puno vremena i često ju je teško primijeniti na projektiranje. Stoga je korisno primijeniti jednostavnije metode analize kod vrednovanja seizmičkog ponašanja konstrukcija. Nelinearna statička analiza postupnog guranja (eng. *nonlinear static pushover analysis* - NSPA) se tu pokazala kao jedna od boljih metoda. Vrlo važne informacije mogu se dobiti jednostavnom i ekonomičnom NSPA metodom umjesto provođenja dinamičke analize.

U (NSP) ili metodi postupnog guranja konstrukcije u smjericama NEHRP-a [4, 5], zahtjevi se izračunavaju putem statičke nelinearne analize konstrukcije koja podliježe stalnom porastu bočnih sila i nepromjenjivoj raspodjeli po visini, do mjere u kojoj pomak određene točke dovodi do (kontrolna točka) određene ciljane stope pomaka ili izazva kolaps konstrukcije. Pretpostavlja se da su raspodjela sile i ciljani pomak podložni odgovoru kontroliranom osnovnim modom

praćenim pretpostavkom da se modalni oblik ne mijenja nakon što konstrukcija popusti. Te se pretpostavke smatraju procjenama nakon što konstrukcija popusti. Posljedično, procjene deformacije dobivene analizom postupnog guranja mogu biti netočne za konstrukcije kod kojih su važni učinci viših modova i katni posmici.

Povezanost između pomaka kata i obrasca primijenjenog opterećenja je osjetljiva [1, 6]. Osnovni zahtjev za analizu postupnog guranja konstrukcije je odabir odgovarajućeg obrasca bočnog opterećenja. Obrazac opterećenja primijenjen na konstrukciju u analizi predstavlja raspodjelu inercijske sile na visinu konstrukcije koja nastaje tijekom potresa. Odabir modela koji je proporcionalniji i sličniji raspodjeli inercijskih sila dao bi bolje rezultate u analizama [7]. Kako bi prevladali ta ograničenja, nekoliko je istraživača predložilo adaptivne raspodjele sila koje pokušavaju pobliže pratiti raspodjele inercijskih sila promjenjivih kroz vrijeme [8-10]. Iako te prilagodljive raspodjele sile mogu dati bolje procjene seizmičkih zahtjeva, one su konceptualno komplicirane i računalno zahtjevne za rutinsku primjenu u praksi građevinskog inženjerstva (konstruktorstvu).

U ovom radu, Propisi za seizmičko projektiranje konstrukcija (Norma 2800) [11] i iranske nacionalne građevinske norme (10. dio) [12] predstavljaju smjernice za projektiranje čeličnih konstrukcija. U postizanju ciljeva provode se analize nelinearnog statičkog postupnog guranja konstrukcije i nelinearne dinamičke analize primjenom vremenskog zapisa. Ovim se metodama analizira novi ELBRF sustav koji prenosi bočno opterećenje. Kada se radi o izvedbi, ELBRF ima veću prednost u odnosu na druge konstrukcijske sustave. Ovdje se pokušava najprije procijeniti seizmičko ponašanje ELBRF sustava u skladu s obrascima opterećenja FEMA-356 (2000.) [5], a zatim se analizira modalna metoda postupnog guranja i nelinearna analiza primjenom vremenskog zapisa izložena različitim zapisima potresa. Potom se ovo ponašanje uspoređuje s drugim konstrukcijskim sustavima, kao što su posebni okviri (eng. *special moment resisting frames* - SMRF) te okviri s križnim i obrnutim V centričnim vezovima.

Rezultati dobiveni provođenjem NSPA i NTHA analiza sastoje se od pomaka katova, pomaka i smicanja. Točnost nelinearne statičke analize postupnog guranja (NSPA) procjenjuje se i za procjenu seizmičke deformacije konstrukcija. U slučaju visoke zgrade otkriveno je da analiza postupnog guranja ne može zamijeniti analizu odziva zapisima u vremenu. Valjanost rezultata primjenom okvira s eliptičnim vezovima ili ELBRF modela (eng. *elliptic braced moment resisting frames* - ELBRF) procjenjuje se kroz nelinearnu dinamičku analizu ELBRF okvira na 3, 5, 7 i 10 katova koji su podvrgnuti deset različitih umjetno generiranih zapisa potresa, što predstavlja gotov spektar projektiranja za tlo drugog tipa. Studije otkrivaju da su procjene napravljene prema nelinearnom dinamičkom odzivu visokih građevina točnije u usporedbi s nelinearnim statičkim metodama. Izračunani su efektivni parametri u seizmičkom projektiranju čeličnih konstrukcija s vezovima kao što su duktilnost, prevelika čvrstoća i faktori modifikacije odziva u ELBRF.

2. Eliptični vezni sustav

U konstrukcijama se obično primjenjuju SMRF i CBF sustavi. SMRF sustav je podložan stvaranju odgovarajućeg bočnog opterećenja s obzirom na plastičnost konstrukcije [13]. Iskorištenje konstrukcija je ograničeno kada se primjenjuju ključni parametri poput prekomjernog relativnog pomaka zbog velike fleksibilnosti konstrukcije i zahtijevaju se neizbježne koncentracije naprezanja na zavarenim stupovima i gredama. Poboljšana krutost postiže se primjenom CBF sustava ako je smanjenje ostvarene deformacije konstrukcije od važnosti. Dodavanjem dijelova veza SMRF sustavu, kao i implementacija takvog projektiranja spriječila bi manju duktilnost CBF-a koji je posljedica faktora seizmičkog ponašanja [14]. Pregledom dostupne literature na ovu temu, utvrđeno je da je izvijanje veznih elemenata u CBF-u suočeno s promjenama u konstrukciji koje su u tijeku, a koje potiču gubitak energije.

ELBRF je novi sustav koji su 2016. prvi put predstavili autori ovog rada [15]. Novopredloženi oblik konstrukcije u kojem je ELBRF usvojen u srednjem otvoru okvira doveo bi do povećanja učinkovitosti projektiranja. U geometrijskom smislu, eliptični vez, sa širim otvorom je bolji od centričnog veza. Preporuča se primjena ovog ELBRF-a u poboljšanju ponašanja konstrukcije i njezine disipacije energije jer je njezin otvor oslobođen problema arhitektonskog prostora [15-21]. Također se procjenjuju duktilnost i volumeni modifikacije odziva na preveliku čvrstoću, slika 1.



Slika 1. Nelinearna deformacija u eliptičnom vezu [15-21]

U ovom sustavu spojevi stupa i grede s eliptičnim vezom moraju biti upeti kao dvostruki priključci (tj. spojevi moraju imati dovoljnu krutost na savijanje na spojnoj točki da izdrže izvijanje izvan ravnine). Veze okvira s eliptičnim vezom proizvele su stupnjeve neodređenosti u konstrukciji tako da konstrukcija ima odgovarajuću stabilnost. U ovom slučaju vezovi kao dijelovi rešetke nisu okomiti na okvir, već se ponašaju kao elementi nosač- stup. Kod vezova u tlaku može doći do izvijanja izvan ravnine koje je uzrokovano generiranim deformacijama na spojnim točkama nosača i stupa u okviru, a koje se može pojaviti kada su vezovi u tlaku, slika 1. Vezovi se mogu projektirati i ugraditi pod uvjetom da su na stupu i

nosaču dostupni odgovarajući spojevi vezova, koji bi osigurali dovoljnu krutost.

U ELBRF sustavu podvrgnutom bočnom opterećenju (slijeva nadesno), vlačna i tlačna sila stvaraju se u svakom od četvrtinskih segmenata eliptičnog veza. Raspodjela unutarnjih sila u četvrtinskim segmentima eliptičnog veza uzrokovala je izlaganje desnog i lijevog bočnog stupa tlačnom, odnosno vlačnom aksijalnom opterećenju. Mehanizam sloma konstrukcije u ravnini nastao je zbog izvijanja četvrtinskih segmenata eliptičnog veza u tlaku i stvaranja plastičnog zgloba u sredini segmenata eliptičnog veza. Važno je napomenuti da se taj mehanizam temelji na pretpostavci odgovarajuće stabilnosti konstrukcije izvan ravnine.

3. Nelinearni statički postupci za procjenu seizmičkog zahtjeva

3.1. Obrasci opterećenja

Postoji nekoliko postupaka koji se mogu usvojiti u svrhu provođenja nelinearne statičke analize. Dok je temeljni postupak za postupnu analizu uglavnom jednak, postupci se većinom razlikuju u obliku raspodjele bočne sile primijenjene na model konstrukcije u svakom koraku analize. FEMA-356 (2000.) [5] i slična literatura predlažu sljedeće postupke. Odabrani obrasci opterećenja su obrnuti trokutasti, jednoliki i obrasci opterećenja oblika prvog moda koji su ovdje ukratko predstavljeni. Obrazac obrnutog trokuta rezultira raspodjelom obrnutog trokuta na visinu zgrade i većinom je valjan kada je udio mase u osnovnom modu vibracije veći od 75 %. Taj obrazac bočnog opterećenja izražen je sljedećom FEMA-356 (2000.) [5] izrazom (1):

$$F_i = \frac{W_i h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j} V \quad (1)$$

pri čemu je F_i bočno opterećenje na razini kata i , a W_i je težina na razini kata i , h_i je visina od baze do razine kata i , dok je V ukupno bočno opterećenje (posmik na razini temelja) koje treba primijeniti. Jednoliki obrazac opterećenja temelji se na bočnim silama proporcionalnim ukupnoj masi na svakoj razini kata za koje se očekuje da simuliraju katni posmik, a dobiva se na sljedeći način [5]:

$$F_i = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^n W_j} V \quad (2)$$

Obrazac opterećenja prvog moda proporcionalan je osnovnom modu modalnih odgovora izdvojenih iz metode spektralne analize (eng. *Response Spectrum Analysis - RSA*) zgrade [5].

3.2. Modalna metoda postupnog guranja konstrukcije (MPA)

Prije pokretanja analize postupnog guranja, konstrukcija se najprije analizira pod gravitacijskim opterećenjima. Ta opterećenja uzrokovana su statičkom analizom kontroliranom opterećenjem u 10 koraka prema [22]. Za sve naknadne analize, konstrukcija je izložena tim opterećenjima. Naredba "load Const" (koja se koristi za ponovno postavljanje vremena na nulu tako da postupno guranje počinje od nultog vremena) primijenjena je nakon završetka analize gravitacijskog opterećenja. Ova analiza se provodi kroz statičku analizu kontroliranu pomakom. U ovom se radu konstrukcija gura do ciljnog pomaka kroz MPA postupak koji su predstavili Chopra i Goel (2004.) [22].

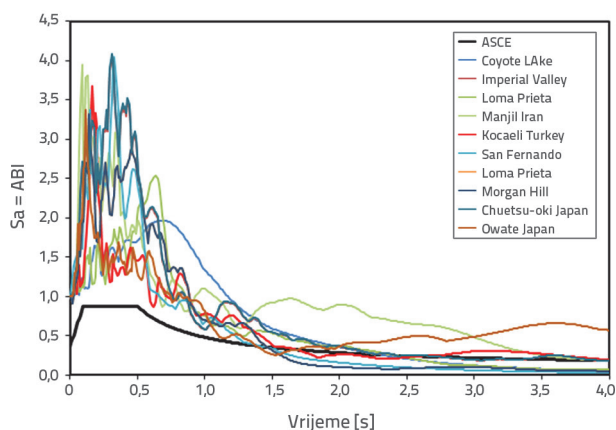
4. Nelinearna analiza primjenom vremenskog zapisa

4.1. Odabir ljestvice ubrzanja

Seizmička ubrzanja odabrana su u NTHA za okvire SMRF-a, okvire s križnim i obrnutim V centričnim vezovima i okvire ELBRF. Odabrano gibanje tla naširoko se primjenjuje u mnogim novijim istraživanjima te prikazuju lokacije konstrukcije čiji parametri ovisе o specifikacijama mjesta gdje su građevine izgrađene. Pruža se detaljan opis značajki skupa zapisa [23]. Deset zapisa udaljenih potresa s različitim magnitudama i udaljenostima primijenjenih u ovom istraživanju prikazani su u tablici 1. Ti su zapisi preuzeti sa stranice centra pod nazivom Pacific Earthquake Engineering Research (PEER). Brzine posmičnih valova svih ovih mjesta klasificirane su za tlo drugog tipa pomoću norme za seizmičko projektiranje (Norma 2800), [11] i B grupiranja na USGS lokalitetu.

Na temelju Međunarodnih građevinskih normi (IBC), [24] i Kalifornijskih građevinskih normi (CBC), [25], potrebno je skalirati zapis potresa u skladu s ASCE 7-05 (2005), [26]. U tu je svrhu gibanje tla skalirano na maksimalno gravitacijsko

ubrzanje g , a spektru odziva ubrzanja za svako od izmjerenih gibanja zemlje dodijeljeno je 5 % prigušenja i skalirano u smislu da, za svaku konstrukciju s periodom T u rasponu od $0,2T$ do $1,5T$, srednja vrijednost projektnog spektra odziva ne smije biti manja od 10 % od 1,3 puta odgovarajuće vrijednosti proračunskog standardnog spektralnog plana standardnog tla drugog tipa. T je osnovni period vibracija zgrade. Proračunsko spektralno ubrzanje u smislu spektralnog ubrzanja prvog moda tla drugog tipa u smislu izmjeničnih vremenskih razdoblja konstrukcije (T) i skaliranog spektra odziva od zapisa potresa ilustrirani su na slici 2.



Slika 2. Skalirani spektri odgovora za svaki okvir

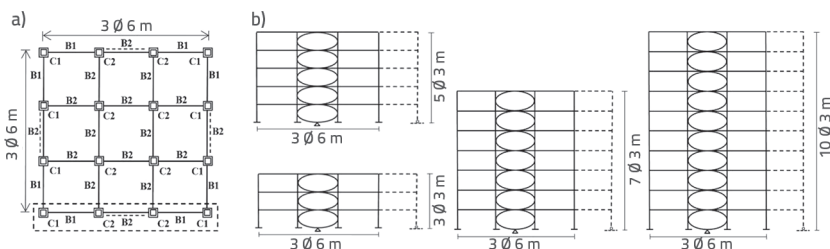
5. Proučavani modeli

Projektirana su četiri okvira uključujući SMRF, okvir s križnim i obrnutim V centričnim vezovima i ELBRF sustave u skladu sa zahtjevima iranske norme za projektiranje zgrada otpornih na potres (Norma 2800) [11] i iranskog nacionalnog građevinskog propisa (10. dio) [12] u slučaju čeličnih konstrukcija od 3, 5, 7 i 10 katova, za koje se pretpostavlja da se nalaze u području visoke seizmičnosti s tlom drugog tipa i prosječnom brzinom posmičnih valova od 750–360 m/s^2 na dubini od 30 m [11].

Tablica 1. Karakteristike zapisa o potresima za nelinearnu analizu primjenom vremenskog zapisa

Potres	Podaci	Stanica	Komponenta [°]	VS30 [m/s]	PGA
Jezero Coyote	06.08.1979.	Gilroy Array	230	663,31	0,422
Imperial Valley (EL centro)	15.10.1979.	Cerro Prieto	E	471,53	0,168
Loma Prieta	18.10.1989.	BRAN	90	476,54	0,502
Loma Prieta	18.10.1989.	Jugozapadni upornjak	285	561,43	0,485
Manjil Iran	20.06.1990.	Abbar	T	723,95	0,497
Kocaeli Turska	17.08.1999.	Arcelik	0	523,0	0,210
San Fernando	09.02.1971.	Castaic	270	450,28	0,320
Morgan Hill	24.04.1984.	Brana Anderson (nizvodno)	250	488,77	0,422
Chuetsu - Oki Japan	16.07.2007.	Yamakoshi Takezawa Nagaoka	NS	655,45	0,356
Iwate Japan	13.06.2008.	Tamati Ono	NS	561,59	0,285

Vrsta tla u UBC 1997 je SB, a razred lokacije u NEHRP je B.



Slika 3. Konfiguracija modela konstrukcije pomoću Open Sees: a) Ravnina; b) Konfiguracija veza s lažnim stupom

Svi katovi imaju visinu od 3 metra i tri raspona u svakom katu dužine 6 metara. Srednji raspon okvira je ukrućen vezom. Lokacija vezova prikazana je točkastom linijom na slici 3. Učinci težine ostalih okvira modelirani su lažnim stupom (eng. *dummy column*) (slika 3.). Korišten je čelik tipa ST37-1 (jednak čeliku S235 na temelju Norme EN 10025) s granicom popuštanja od 235 MPa. Stalna i korisna opterećenja jednaka su 5,0 i 2,0 kN/m². Svi spojevi stupova s nosačima i njihovim vezovima su upeti. Svi ležajevi stupova upeti su tako da svaki translacijski i rotacijski stupanj slobode ostaje konstantan. Pojava popratnih uvjeta, ako ih ima, očekuje se u sredini okvira ispod eliptičnih vezova u slučaju zglobnog ograničenja.

U projektiranju SMRF-a, okvira s križnim i obrnutim V centričnim vezovima i ELBRF-a primjenjuju se ekvivalentne statičke bočne sile na sve katove podložne učinku potresa. Te sile izračunane su prema iranskim propisima o potresima (Norma 2800) [11]:

$$V = C \cdot W = \left[\frac{A \times B \times I}{R} \right] \cdot W \quad (3)$$

pri čemu je V posmik na razini temelja, C je seizmički koeficijent, W je efektivna težina konstrukcije, A je proračunsko osnovno ubrzanje, B je faktor odziva, I je stopa važnosti i R je faktor modifikacije odziva (omjer ponašanja). U ovom izračunu, A i I okvira iznose 0,35 odnosno 1.

U krajnjem graničnom stanju proračunska metoda je 7,5, 7,0, 7,0 odnosno 9,0, te čini faktor modifikacije odziva za SMRF, okvir s križnim i obrnutim V centričnim vezovima i ELBRF. Projektiranje faktora opterećenja i otpornosti (Load and Resistance Factor Design - LRFD) primjenjuje se na neke projektirane dijelove okvira na temelju Iranskog nacionalnog građevinskog propisa (10. dio) za projektiranje čelične konstrukcije [12]. Prema tablici 2., IPE presjek primjenjuje se za popečni presjek nosača, a kvadratni sandučasti presjek odabran je za projektiranje stupova i vezova.

Odabirom 2D okvira kao reprezentativnog za 3D okvir smanjili bi se vrijeme i obujam izračuna u NTHA i NSPA.

6. OpenSees računalni program

Za provođenje NSPA i NTHA na konstrukciji, primijenjen je računalni program OPENSEES 2.4.6 [27]. Taj je softver razvilo Sveučilište Berkeley u Kaliforniji, a radi se o vrlo praktičnom programu za nelinearne i dinamičke analize.

Nelinearni elementi nosač-stup primjenjuju se za modeliranje stupova, nosača i eliptičnih vezova. Ti elementi mogu uzeti u obzir P- Δ učinke i velike deformacije u zadanom učinku nelinearne geometrije modela. Kako bi se proširila plastičnost modela po duljini elemenata i nelinearnom izvijanju, svaki element je podijeljen na nekoliko nizova po poprečnim presjecima i nekoliko presjeka po njihovim duljinama, slika 4. Da bi se povećala točnost analize,

elementi nosača i stupova podijeljeni su na 10, a eliptični vez je podijeljen na 32 u svakom otvoru. Pojasnica i hrbat čeličnog profila primijenjenih u modelu razdijeljeni su u 15 do 20 deformacijskih elemenata duž pojasnice i hrpta na temelju njihovih dimenzija.

3-D konstrukcije su projektirane u ETABS okruženju. Odabrani 2-D okviri modelirani su u 3-D u okruženju OpenSees 2.4.6 [27]. Konstrukcije, opterećenja i potresne sile razmatraju se u ravnini xz ravnini u 2-D, a stupnjevi slobode svih čvorova, osim onih do vezova, fiksirani su u y-smjeru. U ovoj postavci, vezovi bi mogle izviti svoje ploče. Kako bi se modeliralo izvijanje izvan ravnine, smatra se da je iznos početne nesavršenosti 0,0015 za vezove; budući da je eliptični vez zakrivljen, nema potrebe dodijeliti početnu nesavršenost izvijanja unutar ravnine unutar ploča.

Početna nesavršenost dodijeljena je svim stupovima na sredini duljine kako bi se primijenili nelinearni geometrijski aspekti [28]. Mase katova postavljene su prema krutoj dijafragmi za dinamičku analizu. Odjeljak niza primjenjuje se za svaki element. Učinak težine drugih okvira modeliran je kroz lažni stup.

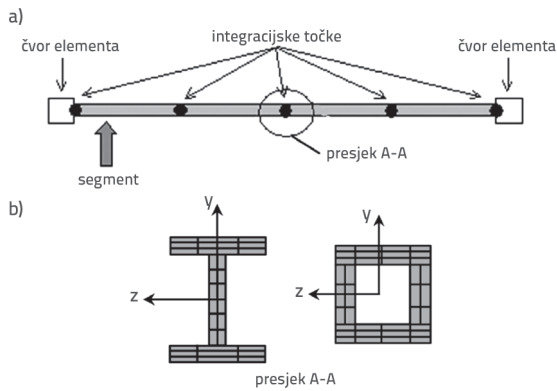
Za modeliranje P- Δ učinaka susjednih gravitacijskih okvira primjenjuje se lažni stup koji je povezan s truss elementima s glavnim okvirom. Taj lažni stup s momentom inercije i poprečnim presjekom koji je sto puta veći od stupova glavnog okvira primjenjuje se za određivanje učinka P- Δ na polovicu gravitacijskih stupova 3-D konstrukcije [29].

Velike deformacije i učinak analize drugog reda na stupove (P- Δ) i nosače (linearne) određuju se korotacijskom pretvorbom koordinata. U ovom je istraživanju fleksibilnost temelja zanemarena, a dno stupova je modelirano kao upeto. Kako bi se modelirala kruta dijafragma, horizontalni pomak svih čvorova u katu se povezuje na prvi lijevi čvor na istom katu u skladu s naredbom *equalDOF*. Polovica ukupne mase svakog kata dodijeljena je čvorovima 2-D okvira na istom katu. Ponašanje čelika u modelu jednoosnih histereznih materijala sposobno je izdržati 3 linearna oblika ponašanja vlaka i tlaka. Ovaj se model primjenjuje za modeliranje čeličnih komponenti. Nagib krutosti čelika izloženog vlaku primjećuje se na 2 % elastične površine. Model ponašanja materijala prikazan je na slici 5. U ovom se modeliranju P- Δ efekti i velike nelinearne geometrijske deformacije pripisuju geometrijskoj matrici krutosti kroz korotacijsku deformaciju [27]. Za modeliranje elemenata okvira s križnim i obrnutim V centričnim vezovima, element veza razmatra se s velikom plastičnošću, a elementi koji se temelje na sili s vlaknastim dijelovima primjenjuju se na koncentričan način, slika 4.

Tablica 2. Poprečni presjeci elemenata modela

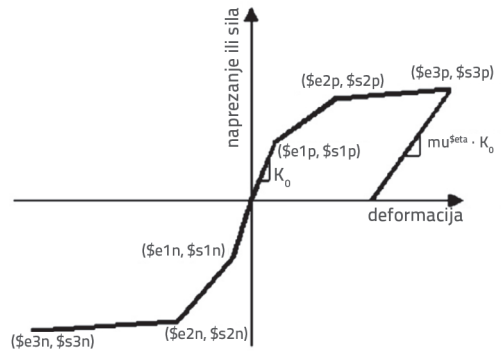
Okvir		SMRF			Ukručeni okvir s obrnutim V centričnim vezom			
Konstrukcije	Kat	C1	C2	B1 i B2	C1	C2	B1 i B2	Vez
Tri kata	1	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 360	BOX 150×15	BOX 150×15	IPE 300	BOX 100×10
	2	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 360	BOX 150×15	BOX 150×10	IPE 300	BOX 100×10
	3	BOX 150×25	BOX 150×25	IPE 330	BOX 150×15	BOX 150×10	IPE 300	BOX 100×10
Pet katova	1	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 400	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10
	2	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 400	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10
	3	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 360	BOX 150×20	BOX 150×15	IPE 300	BOX 100×10
	4	BOX 200×20	BOX 200×25	IPE 360	BOX 150×20	BOX 150×10	IPE 300	BOX 100×10
	5	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 150×20	BOX 150×10	IPE 300	BOX 100×10
Sedam katova	1	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 400	BOX 200×20	BOX 200×25	IPE 330	BOX 120×10
	2	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 400	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 120×10
	3	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 400	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10
	4	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 400	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10
	5	BOX 300×30	BOX 350×30	IPE 360	BOX 150×15	BOX 150×15	IPE 330	BOX 100×10
	6	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 360	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10
	7	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10
10 katova	1	BOX 450×30	BOX 450×30	IPE 450	BOX 200×20	BOX 250×25	IPE 360	BOX 120×12
	2	BOX 450×30	BOX 450×30	IPE 450	BOX 200×20	BOX 250×20	IPE 360	BOX 120×12
	3	BOX 450×30	BOX 450×30	IPE 450	BOX 200×20	BOX 250×20	IPE 360	BOX 100×10
	4	BOX 450×30	BOX 450×30	IPE 400	BOX 150×25	BOX 200×20	IPE 360	BOX 100×10
	5	BOX 450×30	BOX 450×30	IPE 400	BOX 150×25	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10
	6	BOX 400×30	BOX 400×30	IPE 400	BOX 150×25	BOX 150×25	IPE 330	BOX 100×10
	7	BOX 400×30	BOX 400×30	IPE 360	BOX 150×25	BOX 150×25	IPE 330	BOX 100×10
	8	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 360	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10
	9	BOX 200×20	BOX 250×25	IPE 330	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10
	10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10

Okvir		Križno ukručeni koncentrični okvir				ELBRF			
Konstrukcije	Kat	C1	C2	B1 i B2	Ukruta	C1	C2	B1 i B2	Ukruta
Tri kata	1	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 360	BOX 100×10
	2	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 150×15	BOX 200×20	IPE 360	BOX 100×10
	3	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 150×15	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10
Pet katova	1	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10
	2	BOX 150×20	BOX 150×15	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10
	3	BOX 150×20	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 250×20	IPE 330	BOX 100×10
	4	BOX 150×20	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10
	5	BOX 150×20	BOX 150×10	IPE 330	BOX 80×8	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10
7 katovaSedam	1	BOX 200×20	BOX 200×25	IPE 330	BOX 100×10	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 400	BOX 120×12
	2	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 400	BOX 120×12
	3	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 400	BOX 120×12
	4	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 250×20	BOX 250×20	IPE 360	BOX 120×12
	5	BOX 150×15	BOX 150×15	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 360	BOX 100×10
	6	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10
	7	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 80×8	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10
Deset katova	1	BOX 200×20	BOX 300×20	IPE 330	BOX 120×12	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 450	BOX 120×12
	2	BOX 200×20	BOX 250×20	IPE 330	BOX 120×12	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 450	BOX 120×12
	3	BOX 200×20	BOX 200×25	IPE 330	BOX 120×12	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 400	BOX 120×12
	4	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 400	BOX 120×12
	5	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 350×30	BOX 350×30	IPE 400	BOX 120×12
	6	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 250×25	BOX 250×25	IPE 400	BOX 120×12
	7	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 250×25	BOX 250×25	IPE 360	BOX 100×10
	8	BOX 150×20	BOX 150×20	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 360	BOX 100×10
	9	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10
	10	BOX 150×10	BOX 150×10	IPE 330	BOX 100×10	BOX 200×20	BOX 200×20	IPE 330	BOX 100×10

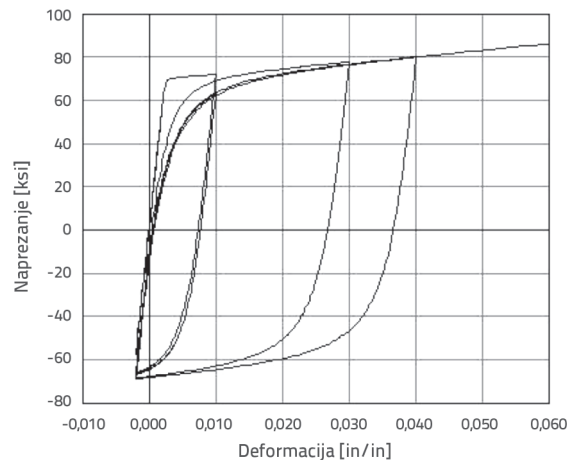


Slika 4. Shematska podjela elementa i presjeka na segmentne i vlaknaste elemente u OpenSees-u: a) Dijeljenje elementa u nekoliko segmenata: b) Dijeljenje presjeka na vlaknaste elemente [27]

P-delta učinci i nelinearne geometrijske deformacije razmatraju se kroz korotacijsku deformaciju tipa geometrijske matrice krutosti u modeliranju [30]. Nelinearni element nosač-stup primjenjuje se za modeliranje vezova kako bi se odredili učinci umjerenih do velikih deformacija uzrokovanih nelinearnim izvijanjem elemenata. Kako bi se povećala točnost analize u modeliranju konstrukcije, modelu je dodijeljeno pet integracijskih točaka. Elementi vezova u konstrukcijama ukrućenih okvira s križnim i obrnutim V centričnim vezovima sastoje se od dva dijela, a početni defekt je postavljen na 0,002 srednje duljine elementa kako bi se odredili nelinearni geometrijski učinci. Ovdje primijenjeni čelik je Steel02, slika 6. Za modeliranje loma čelika, deformacije su ograničene primjenom MinMax materijala. Vlačna čvrstoća čelika čini 2 % elastične zone.



Slika 5. Model ponašanja histereznog materijala [27]



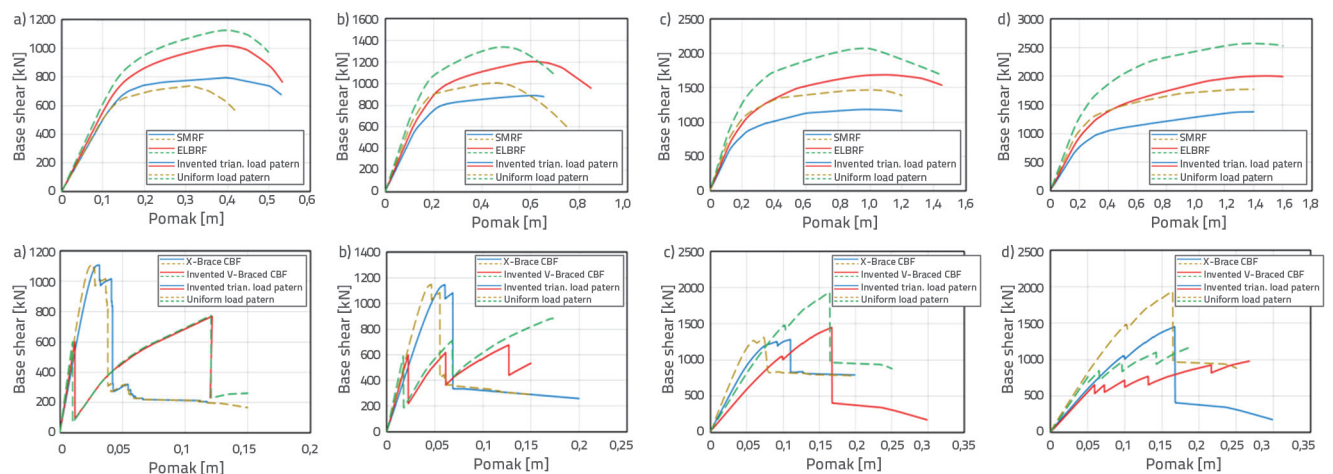
Slika 6. Ponašanje modela materijala Steel02 [27]

7. Analitički rezultati

7.1. Nelinearna statička analiza

Nakon nelinearne statičke analize, dijagrami krovnog pomaka-posmik na razini temelja koji se odnose na

ELBRF za konstrukcije od 3, 5, 7 i 10 katova ucrtavaju se pomoću rezultata dobivenih softverom OpenSees [27] za obrazac opterećenja obrnutog trokuta i jednoliki obrazac opterećenja. Ova ucrtana shema uspoređuje se sa SMRF-ovima, okvirima s križnim i obrnutim V centričnim vezovima, slika 7.



Slika 7. Krivulje postupnog guranja proučavanih okvira u SMRF, okvirima s križnim i obrnutim V centričnim vezovima i ELBRF katnosti od: a) 3 kata, b) 5 katova, c) 7 katova, d) 10 katova

Tablica 3. Prekomjerna čvrstoća, faktori duktilnosti i faktor promjene odziva modela za obrnute trokutaste i jednolike obrasce opterećenja u ELBRF-u

Broj katova	Obrnuto trokutasti obrazac opterećenja						Jednolik uzorak opterećenja					
	R_{SD}	R_S	R_μ	γ	R_{ASD}	R_{LRFD}	R_{SD}	R_S	R_μ	γ	R_{ASD}	R_{LRFD}
3	2,28	2,62	5,1	1,44	19,26	13,37	2,32	2,668	5,24	1,44	20,13	13,98
5	2,1	2,42	4,36	1,44	15,16	10,53	2,17	2,495	4,47	1,44	16,06	11,15
7	2,0	2,30	3,4	1,44	11,26	7,82	2,12	2,438	3,72	1,44	13,06	9,07
10	2,0	2,30	2,97	1,44	9,84	6,83	2,10	2,415	3,14	1,44	10,92	7,58

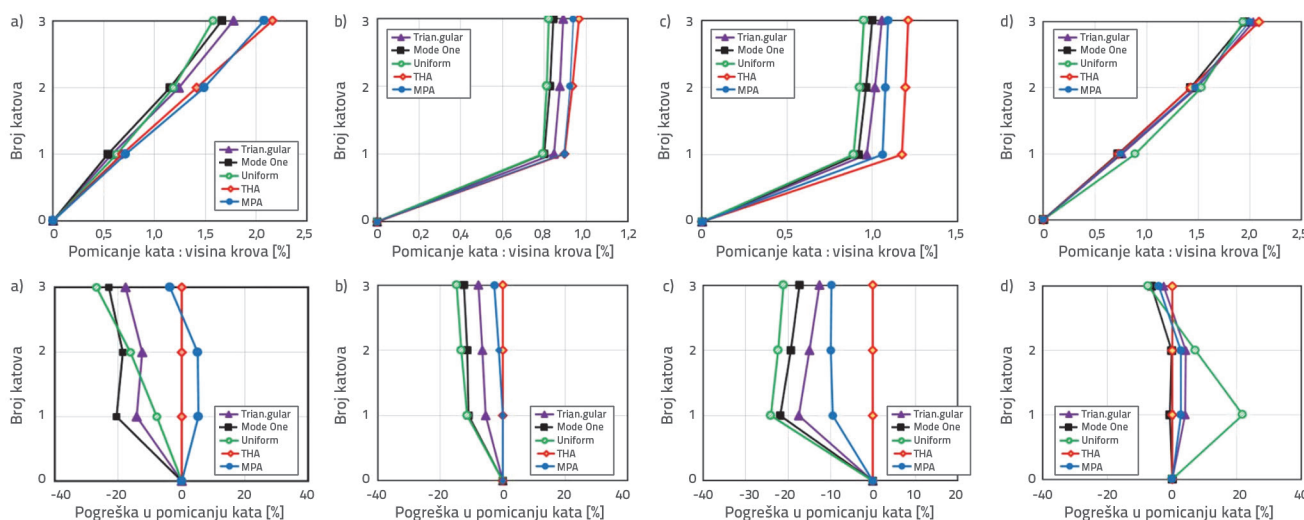
Prema dobivenim rezultatima i opisu metode projektiranja kroz metode graničnog stanja i dopuštenog naprezanja [31], duktilnost, faktori prekomjerne čvrstoće i faktor modifikacije odziva izračunavaju se putem bilinearne idealne krivulje (idealizirani odziv).

Primarni okviri projektirani su u skladu s preliminarnim faktorom modifikacije odziva nakon čega su procijenjene njihove empirijske vrijednosti. Stoga je faktor modifikacije odziva procijenjen iterativnim postupkom pokušaja i pogreške. Kako bi se izračunao konačni faktor modifikacije odziva, modeli se modificiraju, dodjeljuju i temelje na ovim novo modificiranim faktorima odziva. Konačni rezultati su prikazani u tablici 3. Kao što je vidljivo u tablici 3., prekomjerna čvrstoća, duktilnost i faktori promjene odziva smanjeni su povećanjem visine okvira. Može se zaključiti da je faktor modifikacije odziva ovisio o konfiguraciji vezova. Iako je elastična krutost u čeličnim okvirima s križnim i obrnutim V centričnim vezovima bila veća od ELBRF sustava, uočeno je da su prekomjerna čvrstoća, duktilnost i faktori modifikacije

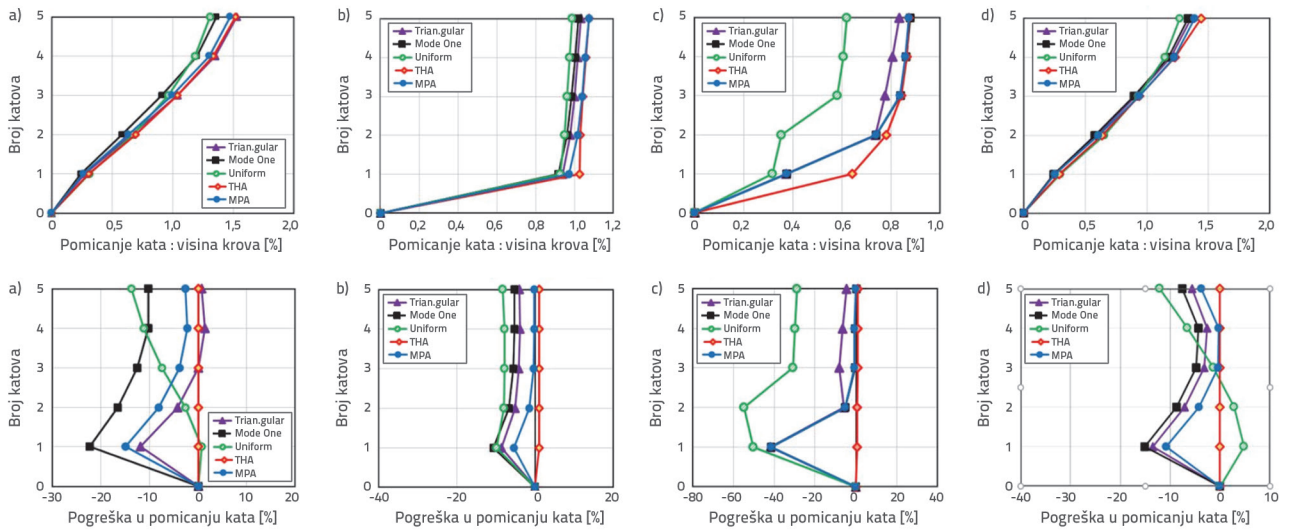
odziva u ELBRF sustavu bili veći od njihovih odgovarajućih vrijednosti u drugim sustavima. Štoviše, usporedbom varijacija faktora prekomjerne čvrstoće i duktilnosti u ELBRF sustavu, pokazano je da je faktor duktilnosti smanjen povećanjem broja katova s većom stopom od faktora prekomjerne čvrstoće.

7.2. Evaluacija konvencionalnih metoda postupnog guranja

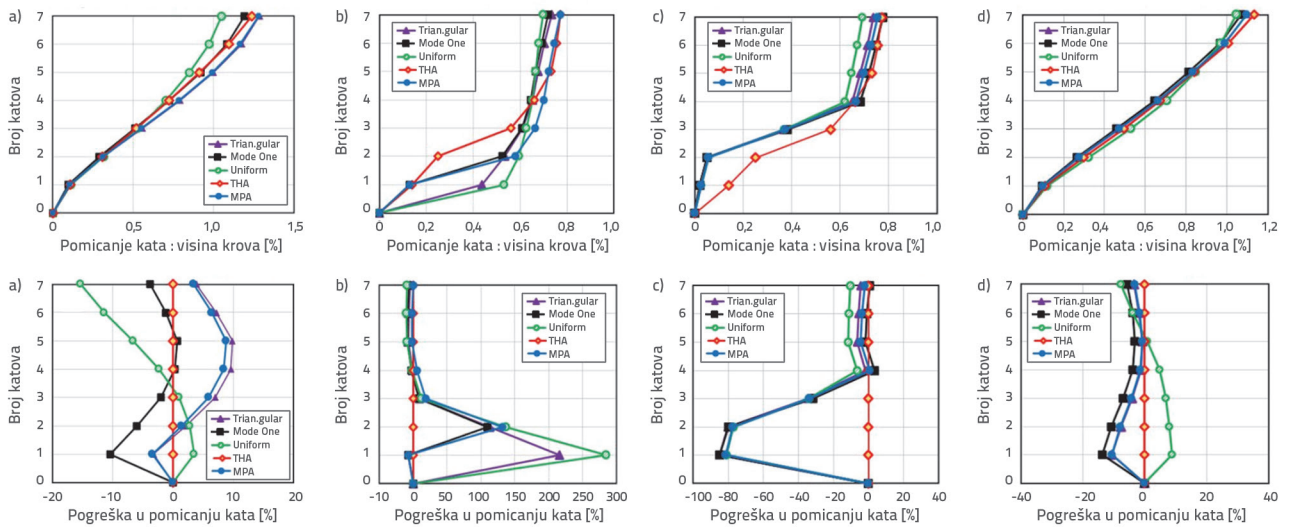
Konvencionalne metode postupnog guranja procjenjuju se usporedbom procijenjenog omjera pomaka krova (maksimalnog pomaka krova normaliziranog visinom zgrade) i omjera pomaka između katova (relativni pomak između dva uzastopna kata normaliziranog visinom kata) i vrijednosti katnog posmika u odnosu na nelinearnu analizu primjenom vremenskog zapisa. Rezultati analize primjenom vremenskog zapisa prikazani su u skupu od deset skaliranih zapisa zajedno sa srednjom NTHA i četiri uzorka opterećenja na slikama 8. do 19.



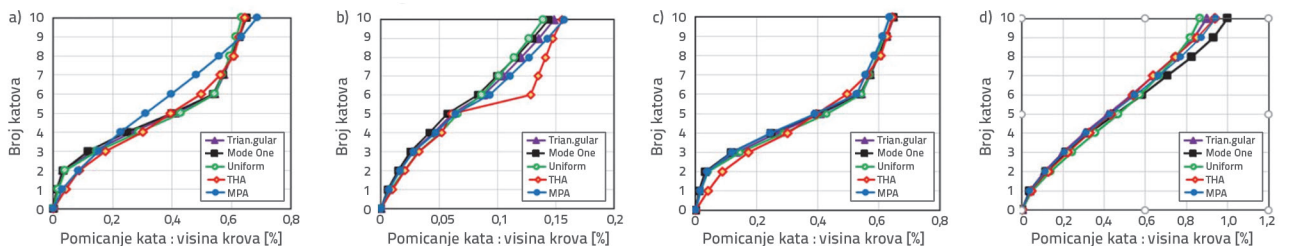
Slika 8. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za tri kata u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



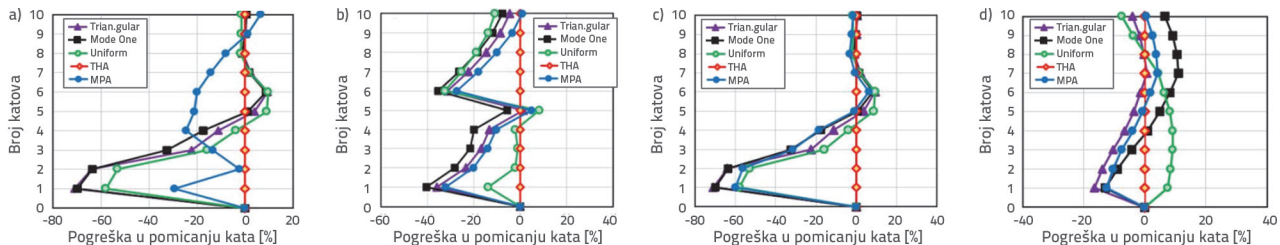
Slika 9. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za pet katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



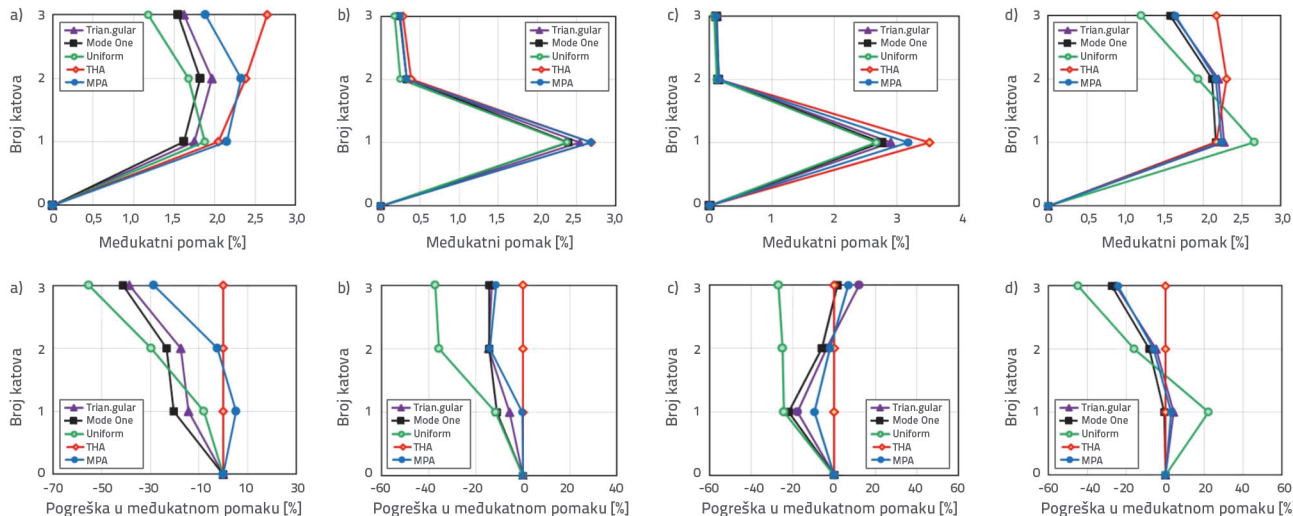
Slika 10. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za sedam katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



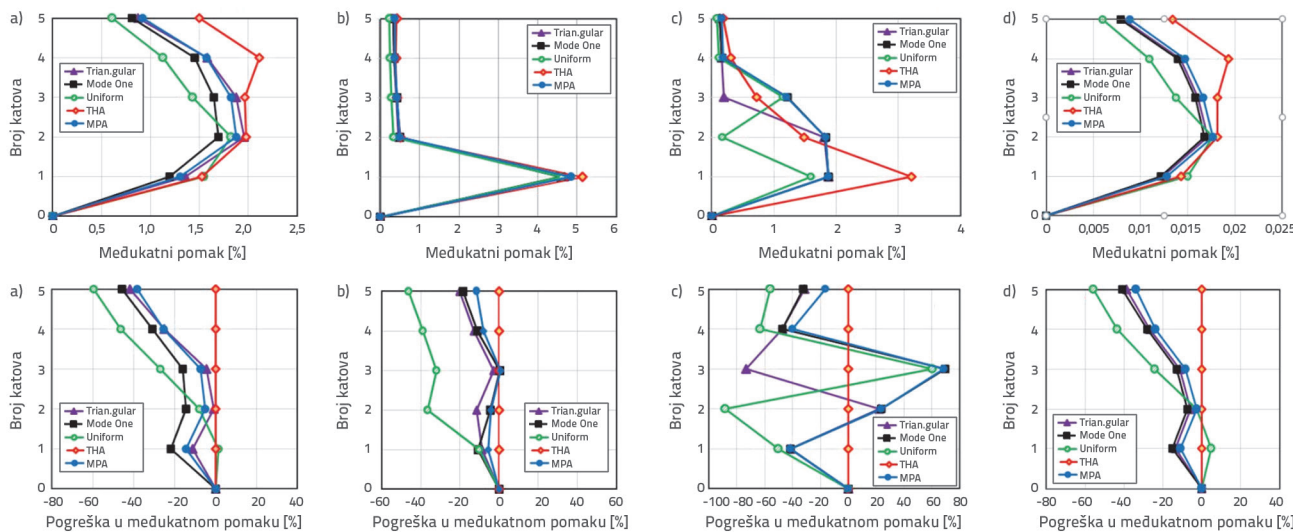
Slika 11. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za deset katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u (prvi dio slike)



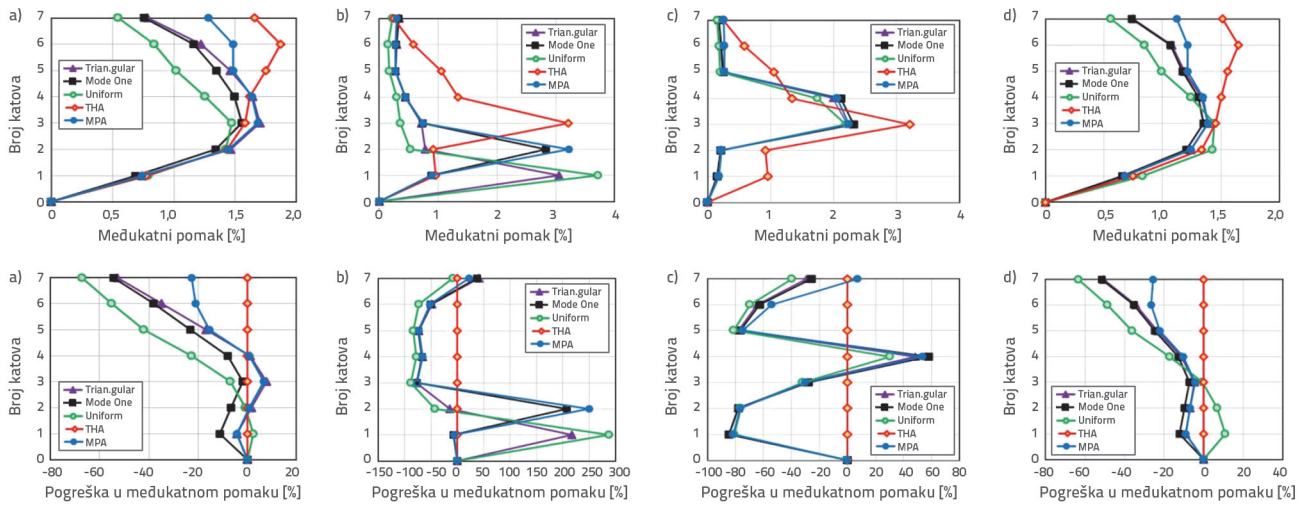
Slika 11. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za deset katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u (nastavak slike)



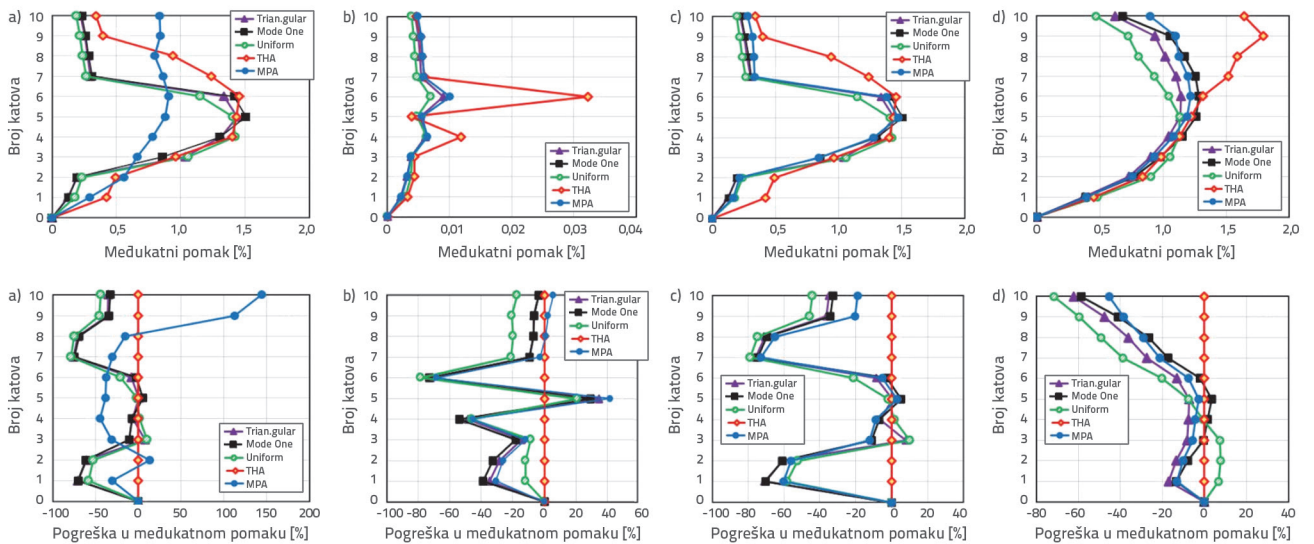
Slika 12. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom između katova i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za tri kata u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



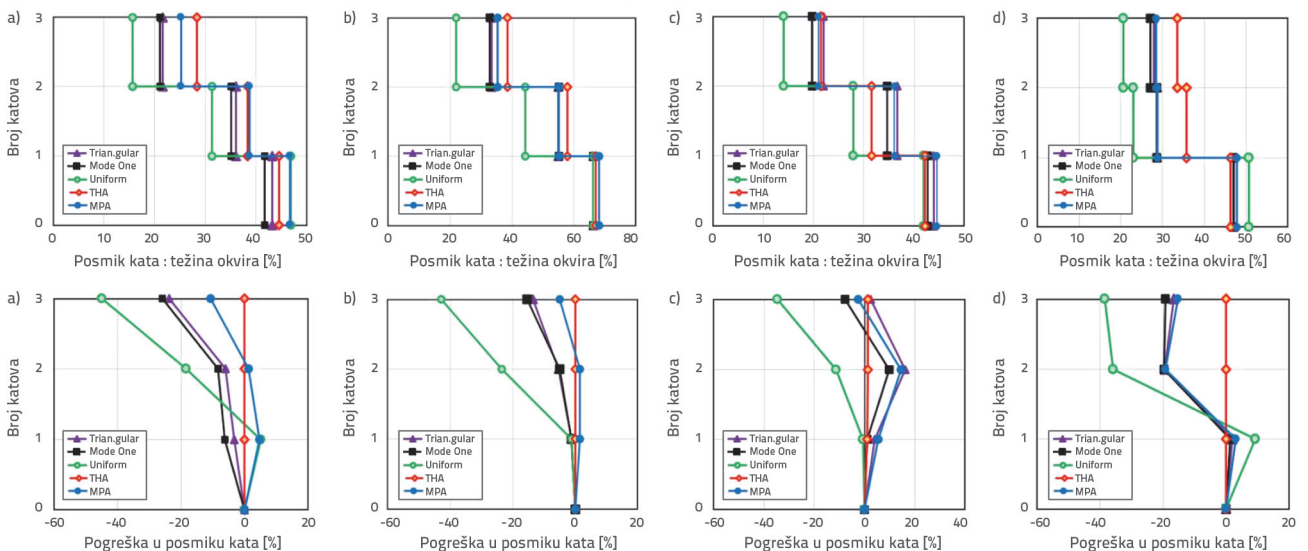
Slika 13. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom između katova i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za pet katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



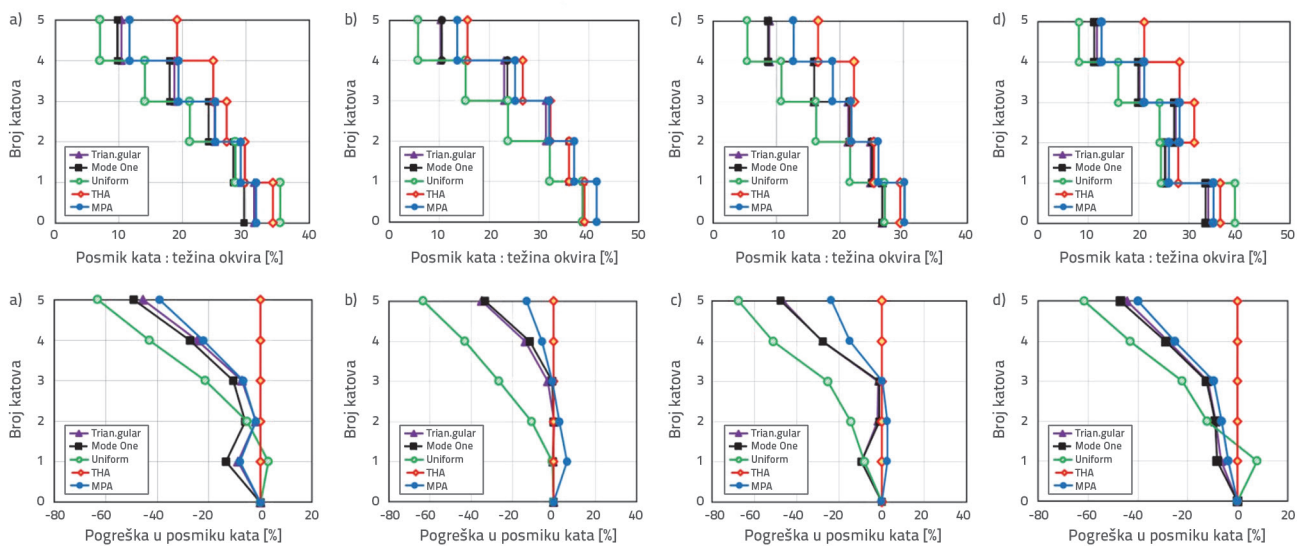
Slika 14. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom između katova i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za sedam katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



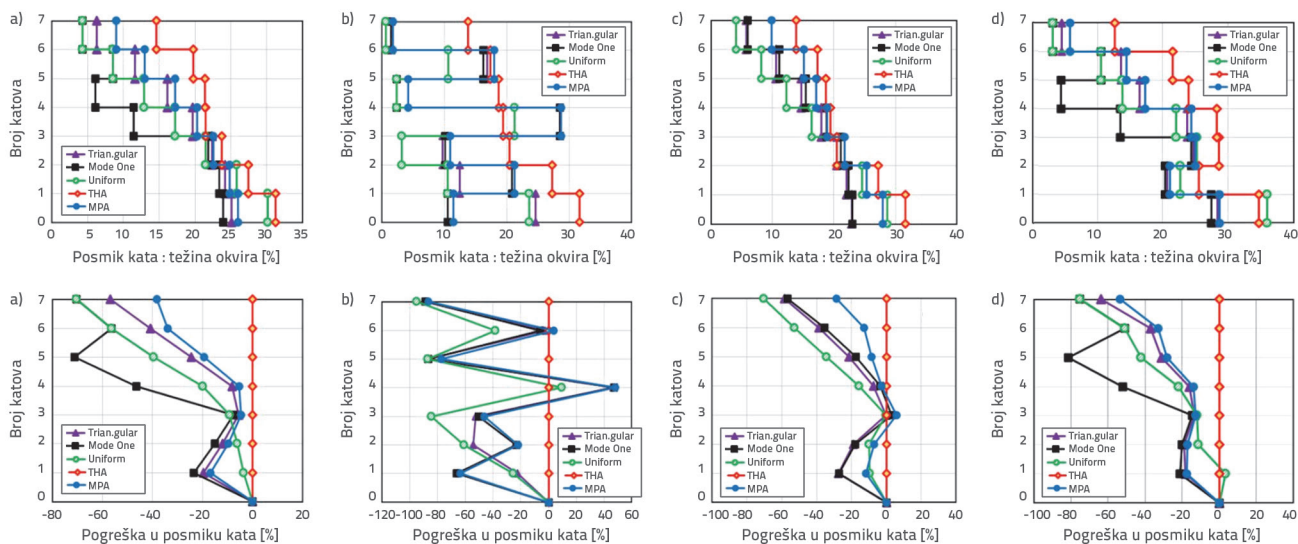
Slika 15. Predviđeni zahtjevi za vršnim pomakom između katova i pogreške prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za deset katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



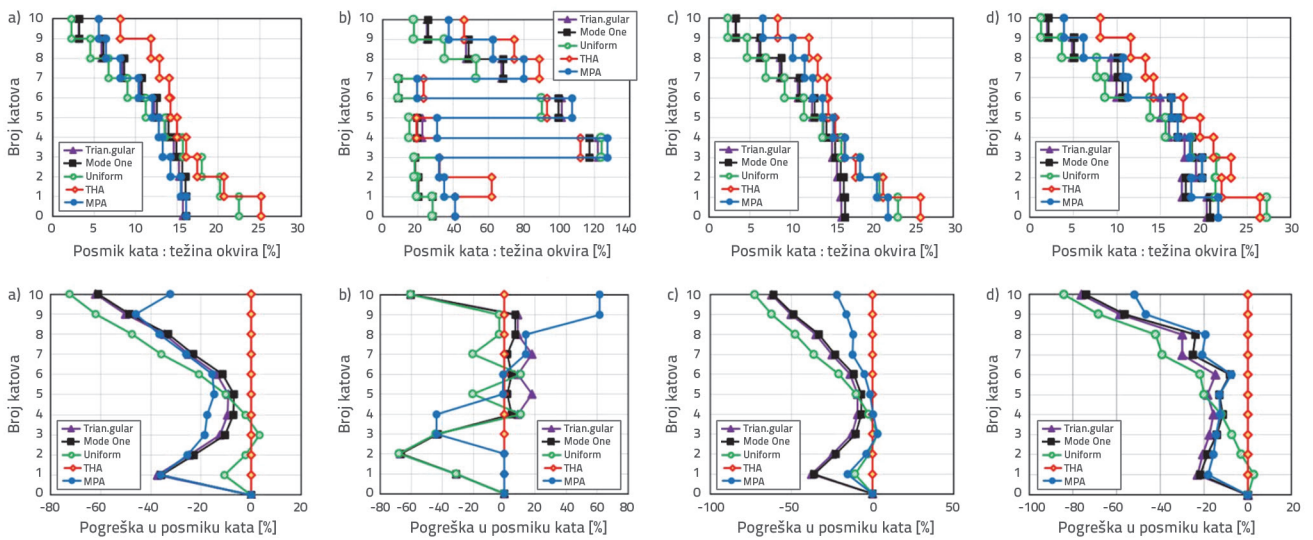
Slika 16. Predviđeni katni posmik i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za tri kata u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



Slika 17. Predviđeni katni posmik i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za pet katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



Slika 18. Predviđeni katni posmik i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za sedam katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u



Slika 19. Predviđeni katni posmik i pogreška prikupljena NSP-om u usporedbi s NTH analizama za okvire za deset katova u: a) SMRF-u; b) okvirima s križnim centričnim vezovima; c) okvirima s obrnutim V centričnim vezovima; d) ELBRF-u

U ovom su radu katni pomaci, omjeri pomaka kata i katni posmik procijenjeni pozivanjem na ELBRF-ove putem konvencionalnih nelinearnih statičkih analiza postupnog guranja. Maksimalni pomak kata procijenjen je prema jednolikom obrascu opterećenja za ELBRF od 7 i 10 katova na točan način, dok ova metoda nije primjenjiva za procjenu zahtjeva među katovima za sličan model. Metoda modalne analize postupnog guranja konstrukcije (MPA), s obzirom na uključenih više modela konstrukcije, točna je metoda za procjenu zahtjeva za smicanjem katova ELBRF modela sa 7 i 10 katova. Osim toga, ta je metoda vrlo točna za procjenu međukatnog pomaka ELBRF-7 i ELBRF modela od 10 katova. Ako je cilj procijeniti pomake kata, omjere pomaka kata i smicanje kata za ELBRF od 7 i 10 katova, među predloženim metodama, modalna analiza postupnog guranja (MPA) smatra se najboljom.

Maksimalni pomak kata procjenjuje se kroz relativnu točnost s jednolikim uzorkom opterećenja za model ELBRF s 5 katova. Međutim, ovaj obrazac opterećenja nije prikladna metoda za procjenu međukatnog pomaka i katnog posmika za modele ELBRF s 3 i 5 katova. Stoga se preporučuje usvajanje metode pod nazivom "Single Run SSP" ili modalne analize postupnog guranja (MPA). Kao što je utvrđeno, modalna analiza postupnog guranja (MPA) relativno je točna metoda usvojena u procjeni ELBRF seizmičkog ponašanja visokih zgrada.

Preciznost konvencionalnih nelinearnih statičkih metoda usvojenih u procjeni seizmičkih zahtjeva ELBRF konstrukcija korištenjem 10 zapisa gibanja tla visokog intenziteta procjenjuje se u zaključku s grafičkim oznakama u nastavku. Ti se zaključci temelje na usporedbi NSPA procjena seizmičkih zahtjeva i određivanju odgovarajućih vrijednosti dobivenih putem NTHA za 3, 5, 7 i 10-katne ELBRF konstrukcije, projektirane u skladu sa standardima propisa o potresima:

Ekvivalentni bilinearni SDF sustavi za ELBRF od 7 i 10 katova, određeni nelinearnim statičkim metodama, mogu procijeniti vršni pomak krova na savršeno točan način u usporedbi s vršnim pomakom krova u NTHA metodi. Međutim, ovaj sustav nema učinkovitost pri procjeni ELBRF modela od 3 i 5 katova.

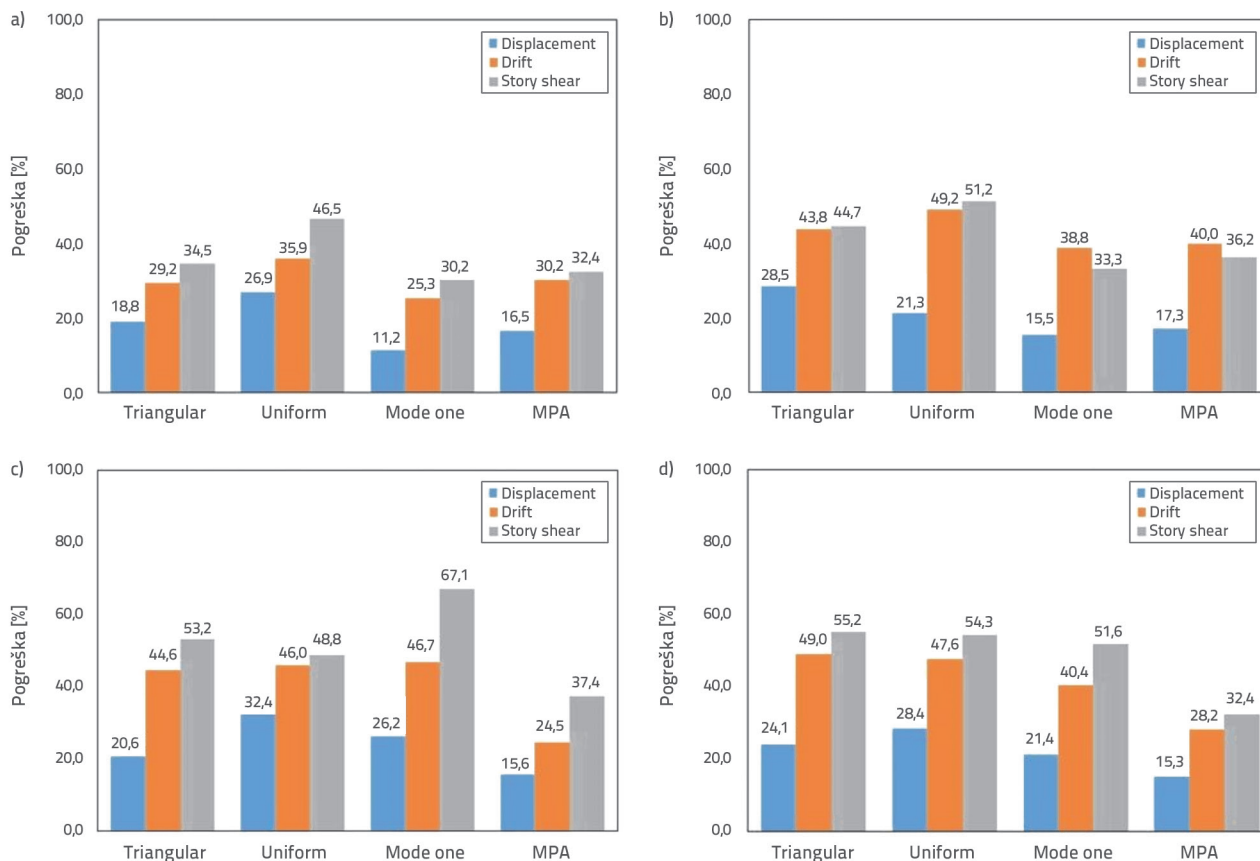
Zahtjevi za pomak kata izračunavaju se pomoću metode "Single Run SSP" i tri druga konvencionalna obrasca opterećenja u skladu s rezultatima NTHA. Ekstrakcija viših modova kroz MPA metodu kao odgovor na 3 i 5-katne ELBR zgrade općenito nema statistički značaj, to jest, prvi mod sam po sebi može biti dovoljan za opterećenja jednog moda na niskim i srednje visokim ELBRF-ovima.

Preciznost svih predloženih koraka u procjeni maksimalnog pomaka kata i pomaka krova u niskim i srednjim modovima u svim razredima općenito je niska. Međutim, preciznost ovih metoda u procjeni vršnog pomaka kata pojedinačnog kata može se primijeniti u specifičnim slučajevima. Svi usvojeni postupci daju gotovo slične rezultate u praksi, ali je jednoliki obrazac opterećenja nešto jednostavniji i praktičniji od ostalih obrazaca opterećenja.

7.3. Predviđanje pogreške ukupnog modela

Kako bi se usporedila točnost različitih parametara NSP-a u ELBRF-u, u ovom se istraživanju koristi indeks pogrešaka prema [31]. Rezultati dobiveni za ELBRF okvire prikazani su na slici 20. u stupčastom grafikonu.

$$ERROR_{(NSPS)} = 100 \times \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \times \sum_{i=q}^n \left(\frac{NSP_{Parameters} - THA_{Parameters}}{THA_{Parameters}}\right)^2} \quad (4)$$



Slika 20. Usporedba točnosti različitih NSP parametara za ELBRF katnosti od: a) 3 katova; b) 5 katova; c) 7 katova; d) 10 katova, primjenom indeksa pogreška definiranog izrazom (4)

8. Zaključak

Duktilnost, faktori povećane čvrstoće i faktor modifikacije odziva te proces oblikovanja plastičnih zglobova za ELBRF ocjenjuju se pod utjecajem obrasca opterećenja obrnutog trokuta i obrasca jednolikog opterećenja provođenjem nelinearne statičke analize. Prema dijagramima izrađenima na temelju konvencionalnih metoda postupnog guranja, uspoređujući procijenjeni omjer pomaka krova (maksimalni pomak normaliziranog krova s visinom zgrade), omjer pomaka između katova (relativni pomak između dva uzastopna kata normaliziranog visinom kata) i katnog posmika, rezultati su prikazani po točkama kako slijedi:

- Faktor prekomjerne čvrstoće za ELBRF podlošan obrascima opterećenja obrnutog trokuta i jednolikog obrasca opterećenja iznosi 2,4 odnosno 2,5.
- Faktor duktilnosti za ELBRF podlošan obrascima opterećenja obrnutog trokuta i jednolikog obrasca opterećenja iznosi 4,0 odnosno 4,15.
- Općenito, faktor prekomjerne čvrstoće i faktor redukcije sile izvedeni iz duktilnosti za ELBRF preporučuju se kao 2,45 odnosno 4,1.
- Faktor modifikacije odziva za ELBRF predlaže se za obje metode projektiranja (metode graničnog stanja i dopuštenog naprezanja) kao 10 odnosno 14,4.

- Faktori prekomjerne čvrstoće i duktilnosti smanjuju se s povećanjem broja katova.
- Okviri s križnim centričnim vezovima i okviri s obrnutim V centričnim vezovima nemaju odgovarajuću raspodjelu pomaka na visinama zgrade, osim na jednom ili dva kata gdje imaju veliki pomak. Raspodjela pomaka kata u SMRF konstrukciji ujednačenija je nego kod dviju konstrukcija s okvirima s križnim centričnim vezovima i okvirima s obrnutim V centričnim vezovima, što pokazuje da katovi međusobno postižu određenu stopu pomaka. Raspodjela pomaka ELBRF konstrukcije bolja je od SMRF, a u 3, 5 i 7-katnim ELBRF konstrukcijama ta je raspodjela ujednačenija i niža, što upućuje na poboljšanje ponašanja konstrukcije u slučaju potresa. U ELBRF konstrukciji od 10 katova, raspodjela pomaka u gornjim katovima je relativno veća od one u donjim katovima, što upozorava na potencijal deformacije u gornjim katovima visokih ELBRF konstrukcija.
- Vrijednosti pomaka u donjim katovima konstrukcija s okvirima s križnim centričnim vezovima i okvirima s obrnutim V centričnim vezovima vrlo su visoke, a u gornjim katovima gotovo su iste. U SMRF i ELBRF konstrukcijama s 3, 5 i 7 katova, raspodjela pomaka je linearna. Međutim, vrijednosti pomaka u ELBRF konstrukcijama manje su od onih u SMRF.

Raspodjela pomaka u 10-katnoj ELBRF konstrukciji je lijevo linearna, a ponašanje je SMRF konstrukcije slično onom kod konstrukcija okvira s okvirima s križnim centričnim vezovima i okvira s obrnutim V centričnim vezovima.

- Kako se broj katova povećava, odgovarajući omjer posmika u razini temelja i težine zgrade se smanjuje.

Pretvorbom konstrukcije iz SMRF sustava u ELBRF, zbog iste težine obje konstrukcije, posmik u razini temelja se nešto povećao. Raspodjela posmika u srednjim katovima ELBRF-a zamjetno je veća nego kod SMRF-a, dok je kod svih ELBRF konstrukcija smanjeni posmik vidljiv u drugom katu.

LITERATURA

- [1] Krawinkler, H., Seneviratna, G.: Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, *Engineering structures*, 20 (1998), pp. 452-464.
- [2] Moghaddam, H., Hajirasouliha, I.: An investigation on the accuracy of pushover analysis for estimating the seismic deformation of braced steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 62 (2006), pp. 343-351.
- [3] Bracci, J.M., Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M.: Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures, *Journal of Structural Engineering*, 123 (1997), pp. 3-10.
- [4] FEMA F 273 NEHRP: Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, (1997).
- [5] FEMA P: Commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, (2000).
- [6] Saravanan, M., Arul, J., Marimuthu, V., Prabha, P.: Advanced analysis of cyclic behaviour of plane steel frames with semi-rigid connections, *Steel and Composite Structures*, 9 (2009), pp. 381-395.
- [7] Gupta, B., Kunnath, S.K.: Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures, *Earthquake spectra*, 16 (2000), pp. 367-392.
- [8] Fajfar, P., Gašperšič, P.: The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25 (1996), pp. 31-46.
- [9] Hsu, H.L., Tsao, J.W.: Flexural-torsional performance of thin-walled steel hollow box columns subjected to a cyclic eccentric load, *Thin-walled structures*, 45 (2007), pp. 149-158.
- [10] Chopra, A.K., Goel, R.K.: A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31 (2002), pp. 561-582.
- [11] BHRC: Iranian code of practice for seismic resistance design of buildings: standard no. 2800, 4 ed. (Building and Housing Research Center, Tehran (Iran), 2013).
- [12] MHUD: Iranian National Building Code, part 10, steel structure design ed. (Ministry of Housing and Urban Development, Tehran (Iran), 2013).
- [13] Chou, C.C., Tsai, K.C., Wang, Y.Y., Jao, C.K.: Seismic rehabilitation performance of steel side plate moment connections, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39 (2010), pp. 23-44.
- [14] Longo, A., Montuori, R., Piluso, V.: Plastic design of seismic resistant V-braced frames, *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (2008), pp. 1246-1266.
- [15] Ghasemi, J.H., Haghollahi, A., Moghaddam, H., Moghadam, A.S.: 2099. Study of the seismic performance of steel frames in the elliptic bracing, *Journal of Vibroengineering*, 18 (2016).
- [16] Ghasemi, J.H., Haghollahi, A., Moghaddam, H., Moghadam, A. S.: Assessing Seismic Performance of Elliptic Braced Moment Resisting Frame through Pushover Method, *J. Rehabilitation in Civil Eng.*, 7 (2019) 2, pp. 68-85.
- [17] Ghasemi, J.H., Haghollahi, A.: Assessing the seismic behavior of Steel Moment Frames equipped by elliptical brace through incremental dynamic analysis (IDA), *J. Earth. Eng. and Eng. Vibration*, 19 (2020) 2, pp. 435-449.
- [18] Ghasemi, J.H., Haghollahi, A.: Experimental study on hysteretic behavior of steel moment frame equipped with elliptical Brace., *J. Steel and Comp. Struct.*, 34 (2020) 6, pp. 891-907.
- [19] Ghasemi, J.H., Haghollahi, A., Beheshti-Aval S.B.: Experimental study of failure mechanisms in elliptic-braced steel frame, *J. Steel and Comp. Struct.*, 37 (2020) 2, pp. 175-191.
- [20] Ghasemi, J.H., Haghollahi, A.: Experimental and analytical study in determining the seismic demand and performance of the ELBRF-E and ELBRF-B braced frames, *J. Steel and Comp. Struct.*, 37 (2020) 5, pp. 571-587.
- [21] Ghasemi, J.H., Haghollahi, A., Talebi Kalaleh, M., Beheshti-Aval, S.B.: Nonlinear seismic behavior of elliptic-braced moment resisting frame using equivalent braced frame, *J. Steel and Comp. Struct.*, 40 (2021) 1, pp. 45-64.
- [22] Goel, R.K., Chopra, A.K.: Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: SAC buildings, *Earthquake spectra*, 20 (2004), pp. 225-254.
- [23] Medina, R.A., Krawinkler, H.: Seismic demands for nondeteriorating frame structures and their dependence on ground motions (Pacific Earthquake Engineering Research Center), 2004.
- [24] Code, U. B.: International conference of building officials, Whittier, CA, 2006.
- [25] Code, U. B.: International conference of building officials, Whittier, CA, 2007.
- [26] Minimum design loads for buildings and other structures, Vol 7 ed. (Amer Society of Civil Engineers, 2005).
- [27] Mazzoni, S., McKenna, F., Fenves, G.L.: OpenSees command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2005).
- [28] Asgarian, B., Aghakouchack, A., Bea, R.: Inelastic postbuckling and cyclic behavior of tubular braces, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 127 (2005), pp. 256-262.
- [29] Ibarra, L.F., Krawinkler, H.: Global collapse of frame structures under seismic excitations, (Pacific Earthquake Engineering Research Center Berkeley, CA, 2005).
- [30] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L., Jeremic, B.: Opensees command language manual, 2013.
- [31] Uang, C., Establishing, R.: Factors for Building Seismic Provisions, *ASCE J, Struct Eng.*, 117 (1991).