

Primljen / Received: 25.9.2013.

Ispravljen / Corrected: 30.12.2013.

Prihvaćen / Accepted: 11.1.2014.

Dostupno online / Available online: 10.2.2014.

# Utjecaj posmičnih zidova na utrošak materijala na temelju seizmičke analize

## Autori:



**Mohammad Ahmadi**, dipl.ing.građ.  
Malezijsko tehničko sveučilište (UTM)  
Građevinski fakultet  
Johor, Malezija  
mfp\_ahmadi@yahoo.com



Izv.prof.dr.sc. **Suhaimi Abu Bakar**, dipl.ing.građ.  
Malezijsko tehničko sveučilište (UTM)  
Građevinski fakultet  
Zavod za konstrukcije i materijale  
Johor, Malezija  
suhaimibakar@utm.my

Prethodno priopćenje

**Mohammad Ahmadi, Suhaimi Abu Bakar**

## Utjecaj posmičnih zidova na utrošak materijala na temelju seizmičke analize

Utrošak materijala jedan je od najvažnijih ciljeva pri seizmičkom projektiranju višekatnih okvira. U članku se predlaže smanjenje utroška materijala uporabom posmičnih zidova na temelju seizmičke analize konstrukcije prema njezinim svojstvima (Performance-Based Seismic Design - PBSB). U tu su svrhu analizirani višekatni okvirni sustavi sa i bez posmičnih zidova. Uspoređivan je dobiveni pomak s ciljanim pomakom te je predložen jednostavan algoritam za praćenje općeg odziva sustava. Rezultati jasno pokazuju da je utrošak materijala u dvojnog sustavu manji nego u okvirnom sustavu.

### Ključne riječi:

okvirni sustav, dvojni sustav, ciljni pomak, PBSB

Preliminary note

**Mohammad Ahmadi, Suhaimi Abu Bakar**

## Shear wall effect on material consumption based on seismic design

The question of material consumption is one of the most important issues in seismic design of multi-story frames. The paper illustrates how material consumption can be reduced by utilizing shear wall according to the Performance-Based Seismic Design (PBSB). For this purpose, different story frames with and without shear walls are designed. In addition, a simple algorithm is proposed for monitoring global response of the system. The results explicitly show that the material consumption in Dual System is lower when compared to the Frame System.

### Key words:

moment resisting frames, dual system, life safety, target displacement, PBSB

Vorherige Mitteilung

**Mohammad Ahmadi, Suhaimi Abu Bakar**

## Einfluss von Scherwänden auf den Materialverbrauch beim seismischen Bemessungsverfahren

Beim erdbebengerechten Entwurf von mehrstöckigen Rahmenkonstruktionen spielt der Materialverbrauch eine bedeutende Rolle. Die vorliegende Arbeit analysiert die mögliche Reduzierung des Materialverbrauches durch die Nutzung von Scherwänden beim verhaltensorientierten seismischen Bemessungsverfahren (engl. Performance-Based Seismic Design - PBSB). Daher sind verschiedene mehrstöckige Rahmensysteme mit und ohne Scherwände. Ein einfacher Algorithmus für die Ermittlung des globalen Strukturverhaltens ist vorgeschlagen. Den Resultaten zufolge ist der Materialverbrauch für Dualsysteme bedeutend geringer im Vergleich zu Rahmensystemen.

### Schlüsselwörter:

Rahmensystem, Dualsystem, Verschiebung im Grenzzustand der Tragfähigkeit, PBSB

## 1. Uvod

Pri projektiranju konstrukcijskog sustava izloženog bočnim silama, obično treba zadovoljiti dva uvjeta: postići dovoljnu otpornost presjeka te otpornost na bočne pomake. No problem u građevinarstvu jest linearno i elastično ponašanje konstrukcija pod uporabnim opterećenjem. Prije dosezanja graničnog stanja i sloma, konstrukcije se ponašaju nelinearno zbog nelinearnosti materijala i/ili geometrijske nelinearnosti, što može dovesti do promjena krutosti, čvrstoće, duktilnosti (žilavosti) i prirodnih frekvencija. U radu se izlaže nelinearni pristup procjeni učinkovitosti okvirnih sustava uslijed seizmičkog djelovanja uz uvažavanje njihovih svojstava (eng. *Performance-Based Seismic Design* - PBSD), čime se mogu zadovoljiti spomenuti osnovni uvjeti.

Katkad izvođači građevinskih radova ne žele uporabiti posmične zidove zbog financijskih razloga, odnosno većeg utroška materijala, i tako odgovornost za postojeće rizike prebacuju na projektante. Taj je nemar uzet u obzir pri istraživanju nastojeći dokazati da odluke pri projektiranju utječu na uštedu i životnu sigurnost. Proučen je postotak uštede materijala ostvaren uporabom posmičnih zidova uvažavajući stupanj sigurnosti konstrukcije LS (eng. *Life safety* - sigurnost života), tj. zgrada smije doživjeti veću štetu konstrukcije i drugih elemenata prilikom projektnog potresnog opterećenja, ali se dozvoljavaju samo manje veličine kolapsa. Na ovaj način se dobije najbolji odnos ekonomske isplativosti sustava i kvalitete njegovih svojstava. U svrhu proračuna navedenog postotka projektirano je pet armiranobetonskih okvira (slika 1.) koji su analizirani uz pomoć programa za analizu i konstrukciju ETABS2000. Sve analizirane konstrukcije (2D okviri) podvrgnute su i seizmičkom opterećenju određenom prema EN 1998-1 [1] kao osnovnom seizmičkom zahtjevu, pretpostavivši da su sve konstrukcije u seizmički aktivnim područjima ( $a = 0,35 g$ ).

Izrađeni su okviri s dva (2S), četiri (4S), šest (6S), osam (8S) ili deset katova (10S) s tri polja (3B). Svaki kat bio je visok 3,2 metra, a svako polje dugo 4 metra u svim okvirima. Grede na svim katovima opterećene su stalnim i pokretnim opterećenjem od

20 i 10 N/mm. U tablicama i slikama,  $S$  označava broj katova, a  $B$  broj polja. Karakteristike materijala su sljedeće:

$f_c = 25 \text{ N/mm}^2$  (B - 300),  $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$  (A - III),  $f_{ys} = 300 \text{ N/mm}^2$  (A - II), Seizmički zahtjevi su zadovoljeni primjenom načela jakih stupova i slabih greda. Primijenjena je nelinearna statička metoda postupnog guranja (eng. *Nonlinear Static Pushover Analysis* - NSPA), a razina stupnja sigurnosti LS određena je kao osnovna razina kontrole štete. Analiza je nastavljena sve dok se nisu pojavili znaci plastičnog zgloba na razini ugrožavanja životne sigurnosti (ciljana otpornost).

Mnogi su istraživači iscrpno dokumentirali štete na konstrukcijama pri PBSD-u (Habibi i Izadpanah, [2]; Arjomandi i sur. [3]; Rofooei i Imani [4]), a postoje i mnoga istraživanja o utjecajima raznih konstrukcijskih sustava na odziv višekatnica (Naresh Kumar i sur. [5]; Habibi i Izadpana [2]).

Inel i Baytan Ozmen [6] proučavali su svojstva nelinearnog zgloba koja su odredili korisnici te propisana svojstva zgloba određena nekim programima temeljenim na nuputcima ATC-40 [7] i FEMA-356 [8]. Drugi autori opisuju seizmički odziv postojećih zgrada u odnosu na različite verzije istog standarda te različite standarde (Rama Raju i sur. [9]; Malekpour i sur. [10]).

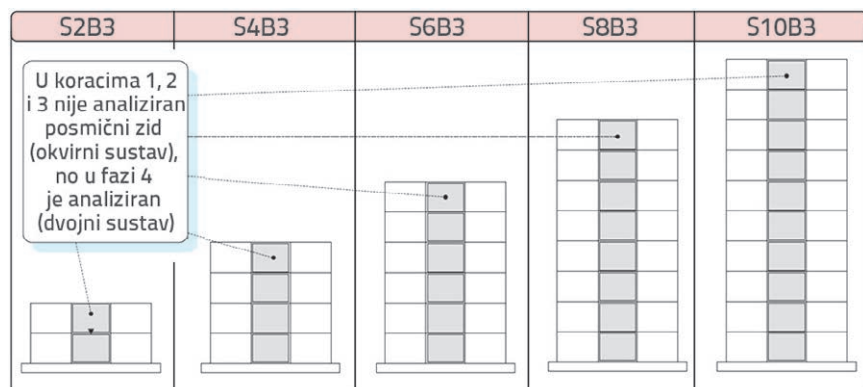
Također napominjemo da se u jednom radu spominju najbolji konstrukcijski sustavi za izgradnju seizmički otpornih armiranobetonskih višekatnica. Autori navode kako odabir različitih konstrukcijskih sustava utječe na ekonomske čimbenike, no bez analize ciljanog pomaka (Katkhoda i Knaa [11]). Iako se svi navedeni radovi uspješno primjenjuju pri PBSD-u višekatnica, nijedan od njih postotak uštede materijala (armature i betona) uporabom posmičnih zidova ne stavlja u odnos s razinom kontrole stupnja sigurnosti LS kako bi odredio najstabilniji i ekonomski najisplativiji armiranobetonski okvirni sustav.

## 2. Postavljanje problema

Svake godine nekoliko razornih potresa pogodi različite dijelove svijeta i uzrokuje velike gubitke. Armiranobetonski (AB) okviri projektirani su tako da izdrže seizmička opterećenja i smanje bočni pomak, što određuje ponašanje konstrukcije. Zato AB okviri nose vertikalna opterećenja i sprečavaju određene bočne pomake (pomak katova). Tako se sustavi pod opterećenjem dijele na:

- okvire otporne na savijanje (okvire bez ispune)
- okvire s posmičnim zidovima (dvojni sustave).

U ovom se radu predlaže primjena seizmičke analize konstrukcije prema njezinim svojstvima (PBSD), što projektantima omogućava sprečavanje pomaka i osigurava odgovarajuće ponašanje zgrada tijekom potresa. U radu je dokazano da dvojni sustav može smanjiti ciljani pomak (eng. *Performance Point Displacement -  $D_{pp}$* ) i pomak pri postizanju graničnog stanja (eng. *Life Safety Displacement -  $D_L$* ) konstrukcije.

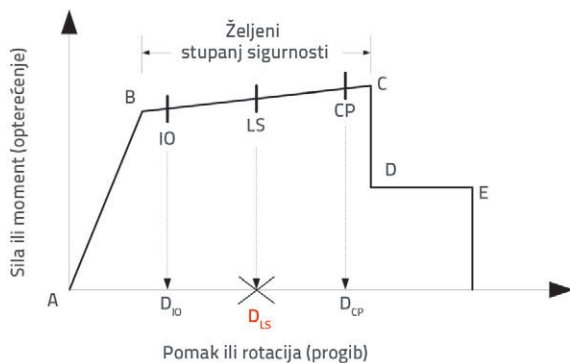


\* Pri prvoj analizi proučava se okvirni sustav, a pri drugoj kombinirani (dvojni) sustav (okvir i vertikalni armiranobetonski zid)

Slika 1. Geometrija i nazivi analiziranih okvira

### 3. Seizmička analiza konstrukcije prema njezinim svojstvima (PBSD)

Dosad je seizmičko opterećenje (seizmički zahtjevi) za linearne konstrukcije bilo smanjeno dijeljenjem ukupne proračunske potresne sile u podnožju građevine s redukcijskim faktorom (R), što je dovelo do elastičnih konstrukcija. Tako je dokazano da je seizmičko opterećenje proporcionalno težini zgrade (5-10 % težine zgrade). U skladu s ATC 40, određena je idealizirana višelinearna krivulja sila-pomak (pojednostavljena nelinearna osnovna krivulja histereze, slika 2.) kako bi se odredile konstrukcijske komponente za NSPA. Na temelju NSPA određeno je prirodno ponašanje konstrukcija. U tu svrhu primijenjena je metoda spektra nosivosti (kapaciteta).



Slika 2. Odnos sile i pomaka na tipičnom plastičnom zglobovima

Metoda spektra nosivosti nelinearna je statička procedura na temelju koje se dobiva krivulja nosivosti konstrukcije. Krivulja nosivosti je prikaz ponašanja baze pri postupnom bočnom opterećenju u odnosu na bočni pomak zgrade na razini krova. Takva je krivulja obično padajući niz ravnih crta. Opadanje je dokaz sve veće degradacije konstrukcijske krutosti zgrade tijekom vremena zbog sve većeg bočnog pomaka, popustljivosti i oštećenja. Prije prvih plastičnih zglobova konstrukcija se ponaša linearno i elastično. Nakon popuštanja konstrukcije povećano bočno opterećenje uzrokuje nastanak novih plastičnih zglobova. Taj se proces nastavlja dok se ne stvori mehanizam unutar konstrukcije koji zatim počinje djelovati na razini stabilnosti.

Krivulja spektra nosivosti konstrukcije dobiva se na način da se prebaci krivulja nosivosti iz koordinatnog sustava s bočnom silom (posmikom u bazi) i bočnim pomakom (pomakom krova) u koordinatni sustav sa spektralnim ubrzanjem ( $S_a$ ) i spektralnim pomakom ( $S_d$ ) uz pomoć modalnih vektora oblika, sudjelujućih faktora i modalnih masa dobivenih modalnom analizom konstrukcije. Sljedeći korak jest prenošenje projektnog spektra iz sustava s koordinatama spektralnog ubrzanja i odsječaka vremena u sustav s koordinatama spektralnog ubrzanja i spektralnog pomaka. Projektni je spektar ucrtan u formatu koji nazivamo spektrom odgovora ubrzanja i pomaka (eng. *Acceleration-Displacement Response Spectra - ADRS*).

U završnoj se fazi krivulje nosivosti i zahtjeva mogu ucrtati zajedno jer su obje u istom koordinatnom sustavu. Točku u

kojoj se siječe krivulja nosivosti i krivulja zahtjeva nazivamo ciljnom točkom. Kad se u bilo kojem od članova pojavi znak LS razine (između točaka B i C na slici 2.), treba prekinuti s postupnim opterećenjem jer pomak krova konstrukcije pokazuje  $D_{LS}$ . Razina sigurnosti (LS) uzeta je kao osnovni standard za kvalitetu svojstava (kontrolu štete). Ciljani pomak ( $D_{PP}$ ) u formatu ADRS dobiven je metodom spektra nosivosti (eng. *Capacity Spectrum Method - CSM*). Važno je primijetiti da je ovaj rad, koliko znamo, prvi koji ispituje određenu jednadžbu pri primjeni PBSD-a (1). Ako  $D_{LS}$  zadovoljava sljedeću jednadžbu, zgrada je sigurna kad je riječ o stupnju sigurnosti LS (postignuta je željena kvaliteta svojstava).

$$D_{PP} < D_{LS} < \alpha \cdot D_{PP} \quad (1)$$

Koeficijent  $\alpha$  dodatni je i konzervativni kapacitet koji su autori izrazili kao pola kapaciteta između  $D_{LS}$  i  $D_{CP}$  (slika 2.). Iako nijedna faza nakon nastanka mehanizma plastifikacije na razini stupnja sigurnosti LS nije sigurnosno prihvatljiva i isključena je iz ograničenja stupnja sigurnosti LS, ipak se moraju uzeti u obzir konzervativne procjene. Kad se pojave znaci kod stupnja sigurnosti LS (tirkizna boja u ETABS2000), potrebno je računati i na preostalu nosivost prije faze sprečavanja urušavanja. Na temelju svojstava plastičnog zgloba određenih u ATC 40, autori predlažu vrijednost od pola udaljenosti između  $D_{LS}$  i  $D_{CP}$  koristeći sljedeću jednadžbu (2).  $D_{10}$  i  $D_{CP}$  oznake su za pomak pri neposrednoj uporabljivosti (eng. *Immediate Occupancy*) gdje zgrada smije doživjeti izrazito ograničena oštećenja konstrukcijskih i ostalih elemenata zgrade za vrijeme projektnog potresa, a njihove su vrijednosti 2 i 6 ( $D_{LS} = 4$ ). Vrijednosti 2, 4 i 6 odnose se na prosječne deformacije nakon popuštanja, odnosno na plastičnu deformaciju [9].

$$\alpha = 1 + 0,5 [(D_{LS} - D_{10}) / (D_{CP} - D_{10})] = 1 + 0,5[(4 - 2) / (6 - 2)] = 1,25$$

Ako se ova vrijednost za koeficijent  $\alpha$  uvrsti u izraz (1), tada on glasi:

$$D_{PP} < D_{LS} < 1,25 \cdot D_{PP} \quad (2)$$

Jednadžba (2) se može izraziti na sljedeći način:

$$1 < D_{LS} / D_{PP} < 1,25 \quad (3)$$

### 4. Metodologija pristupa

Za potrebe istraživanja izrađeno je pet modela okvira koji su analizirani po katovima kako bi se izmjerio utjecaj uporabe posmičnih zidova na utrošak materijala. Svi su okviri smješteni u seizmički aktivnim područjima ( $a = 0,35$ ), pa se analiza pomicanja tla mogla rabiti pri analizi ponašanja konstrukcije. Uz pomoć PBSD-a projektanti mogu odrediti ciljanu nosivost ciljani pomak. Djelovanje na okvire je nastavljeno sve dok se nisu pojavili plastični zglobovi pri razini sigurnosti LS (ciljana nosivost). U radu je dokazano da se uporabom

različitih sustava (dvojnog sustava) može izmijeniti i smanjiti  $D_{LS}$  i  $D_{pp}$  konstrukcije. Metoda polazi od toga da, ako je  $D_{pp} < D_{LS} < 1,25 \cdot D_{pp}$ , konstrukcija može podnijeti bočno opterećenje u određenom seizmički aktivnom području bez mjere sprečavanja urušavanja. Sljedeći koraci omogućili su izražavanje cilja istraživanja u obliku algoritma.

**Prvi korak:** Projektiranje okvira bez kontrole pomaka i bilježenje zadnjeg presjeka svakog elementa greda i stupova

**Drugi korak:** određivanje svojstava plastičnih zglobova za svaki element (propisanih svojstava zgloba, a ne svojstava koje su odredili korisnici: određivanje momenta plastifikacije za grede i plastifikacije kroz međudjelovanje momenta savijanja i normalne sile za stupove) u skladu s njegovim ponašanjem; provođenje metode postupnoga guranja te određivanje ciljanog pomaka ( $D_{pp}$ ) te pomaka pri postizanju razine sigurnosti LS ( $D_{LS}$ ) kako bi se mogli usporediti (slika 3).

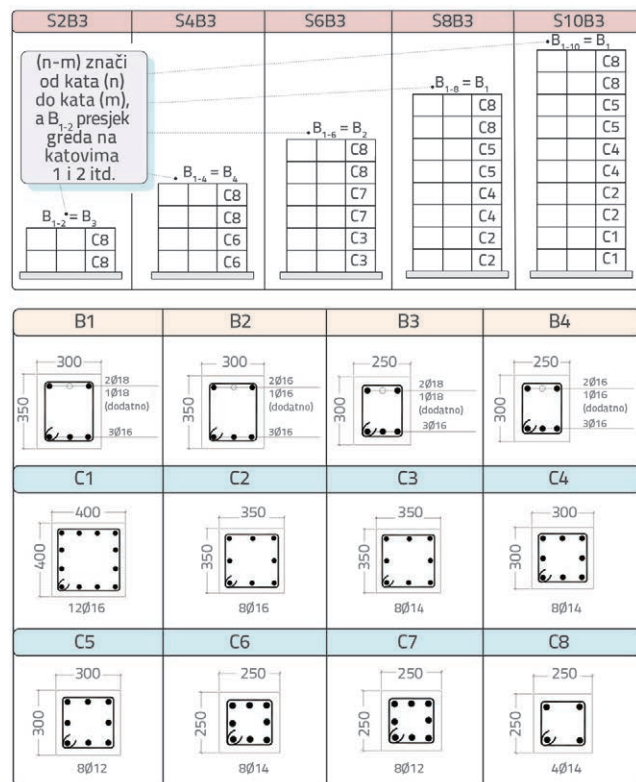
Usto, metoda konačnih elemenata podrazumijeva određivanje i promjenu mreže konačnih elemenata što je često vremenski najzahtjevnije. ETABS ima mogućnost uporabe automatskog rubnog ograničenja. To svojstvo omogućava korisniku da zada uvjet da elementi s ruba ljuske budu povezani s elementom ljuske. Mrežu konačnih elemenata (primjerice, u poboljšanoj bilinearnoj kvadrilateralnoj metodi) ne određuje korisnik, nego je automatski određena pridruživanjem parametara mreže. Neki od parametara su veličina elementa mreže, razmak između elemenata i postupno profinjavanje mreže. Uz tu opciju učinci progušćivanja mreže mogu se proučavati odredi li se samo nekoliko kontrolnih parametara.

**Treći korak:** povećanje veličine presjeka stupova i greda dok  $D_{pp}$  ne izađe iz  $D_{LS}$  i zadovolji jednadžbu (2).

**Četvrti korak:** uz konstantnu debljinu posmičnog zida koji debljinu okvira povećava za 15 cm, grede i stupovi zamjenjuju se onima manjeg presjeka dok  $D_{LS}$  ne bude veći od  $D_{pp}$  i zadovolji jednadžbu (2).

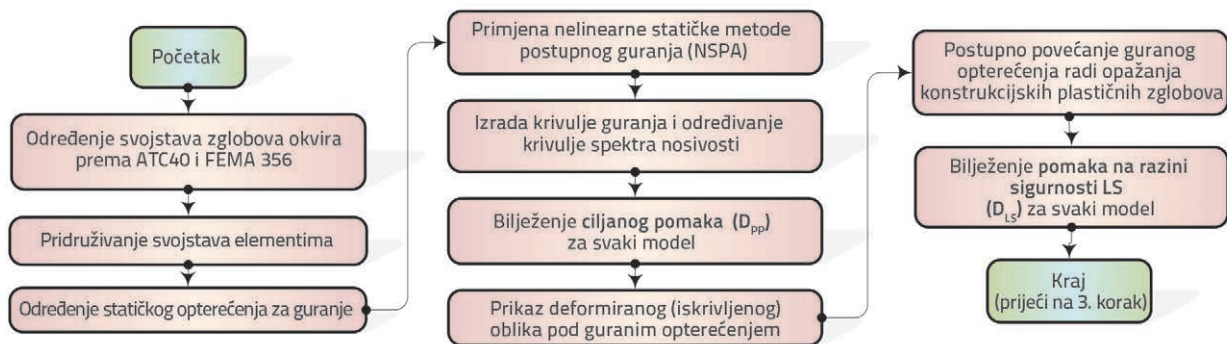
### 5. Rezultati provedenih analiza

U daljnjem tekstu (tablica 3.), prikazuje se utjecaj okvira otpornih na savijanje i dvojnog sustava na  $D_{pp}$  i  $D_{LS}$  te na utrošak materijala. Prema slici 4., nakon konstrukcije okvira (prvi korak) dobivaju se presjeci konstruiranih elemenata (presjeci greda i stupova).



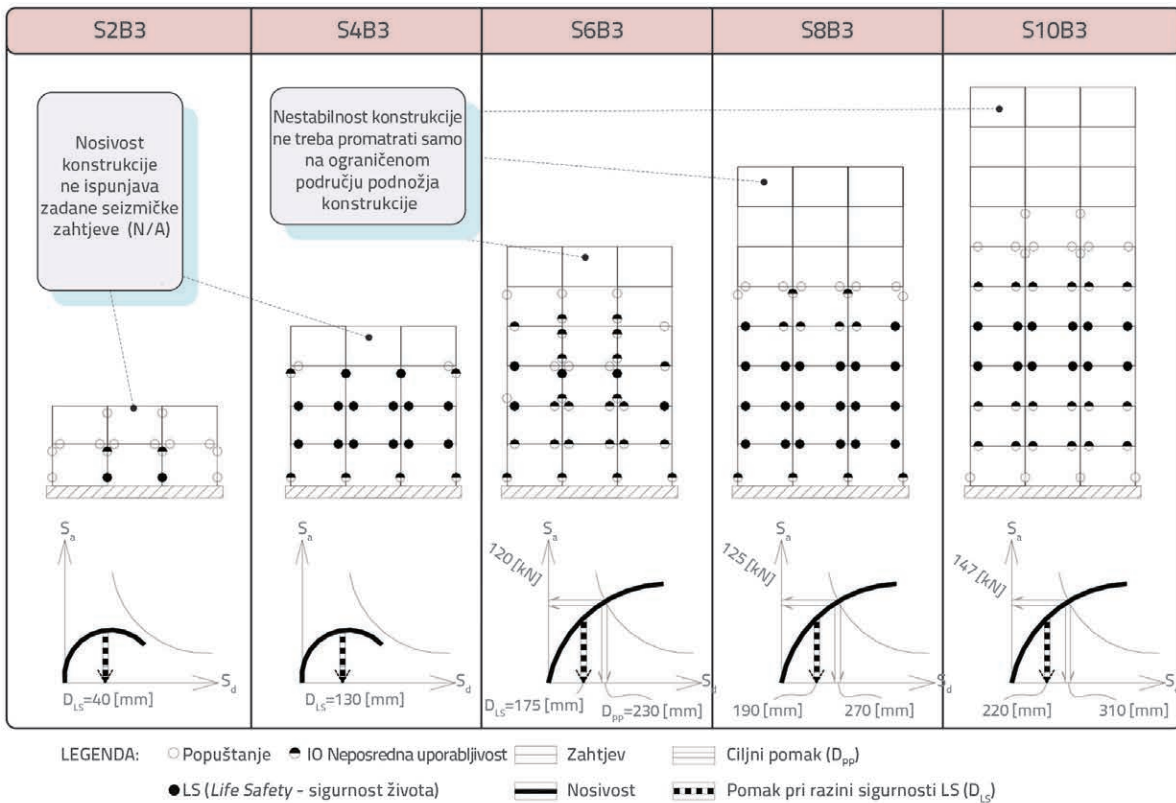
Slika 4. Svojstva presjeka za sve okvire iz prvog koraka: a) smještaj svih presjeka u okvirima; b) svojstva presjeka greda i stupova (B - oznaka za gredu; C - oznaka za stup)

Kako bi se zadovoljili zahtjevi iz drugog koraka, u drugoj fazi elementima su pridruženi plastični zglobovi propisanih svojstava i provjereni su odzivi okvira. Na slici 5. prikazana je uporaba simbola, legendi i brojeva te mjesto nastanka plastičnih zglobova na elementima konstrukcije s obzirom

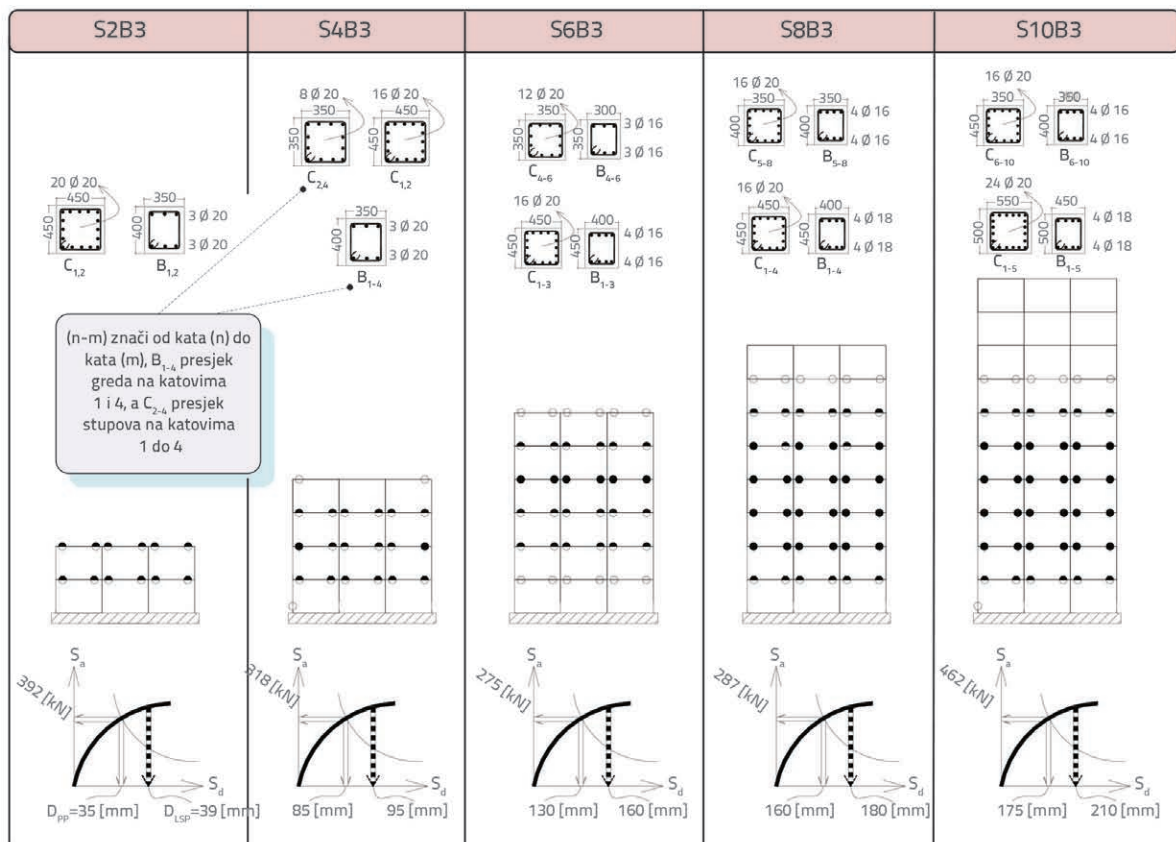


Slika 3. Drugi korak; procedura PBSD-a za dobivanje  $D_{pp}$  i  $D_{LS}$





Slika 5. Svojstva presjeka stupova i greda, mehanizam nastanka plastičnih zglobova propisanih svojstava i njihove shematske krivulje nosivosti u drugom koraku



Slika 6. Svojstva presjeka stupova i greda, mehanizam nastanka plastičnih zglobova propisanih svojstava i njihove shematske krivulje nosivosti u trećem koraku

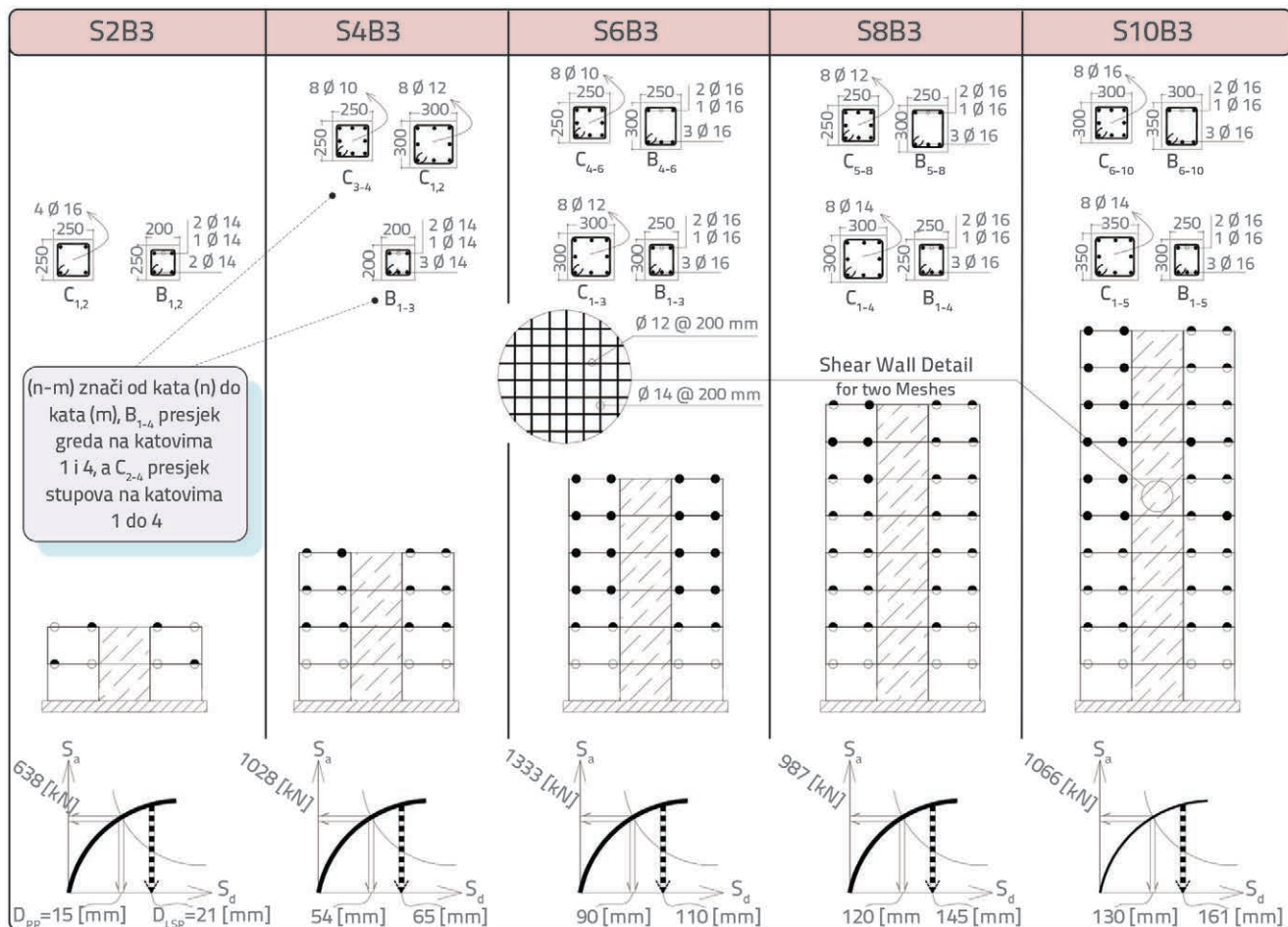
Tablica 1. Broj plastičnih zglobova (PH) na pojedinim razinama kvalitete konstrukcije (Y, IO, LS)

Okviri	Drugi korak (broj plastičnih zglobova - PH)						Treći korak (broj plastičnih zglobova - PH)						Četvrti korak (broj plastičnih zglobova - PH)					
	Stupovi			Grede			Stupovi			Grede			Stupovi			Grede		
	Y	IO	LS	Y	IO	LS	Y	IO	LS	Y	IO	LS	Y	IO	LS	Y	IO	LS
S2B3	8	2	2	6	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	4	4	0
S4B3	0	6	2	2	0	12	1	0	0	2	16	2	0	0	0	4	11	1
S6B3	4	12	2	4	12	3	0	0	0	12	18	6	0	0	0	4	4	16
S8B3	2	6	0	6	4	20	0	0	0	6	14	22	0	0	0	5	23	4
S10B3	8	0	0	6	18	12	1	0	0	6	12	24	0	0	0	4	22	13

PH - plastični zglob (eng. *plastic hinge*), Y - popuštanje (eng. *Yielding*), IO - neposredna uporabljivost (eng. *Immediate Occupancy*), LS - sigurnost života (eng. *Life safety*)

na različitu razinu kvalitete svojstava. CSM dijagrami na slici (presjek krivulje spektra nosivosti / prerađene krivulje guranja i krivulje zahtjeva) shematski prikazuju dostatnu kvalitetu okvira kad je riječ o postizanju stupnja sigurnosti LS. Iako je sa slike 5. vidljivo da su u drugom koraku na svim okvirnim sustavima nastali plastični zglobovi (konstrukcija se ponaša duktilno), nosivosti S2B3 i S4B3 ne ispunjavaju zadane seizmičke zahtjeve i javlja se programska poruka

N/A (ETABS2000) jer je  $D_{pp}$  uklonjen. No dijagram također pokazuje da su  $D_{LS}$  za S2B3 i S4B3 0,04, odnosno 0,13.  $D_{pp}$  i  $D_{LS}$  za S6B3, S8B3 i S10B3 su 160, 220, odnosno 200 mm te 230, 300, odnosno 310 mm. Svi su rezultati prikazani u tablici 2. Slika 6. prikazuje tijek trećeg koraka te stvaranje plastičnih zglobova na svim okvirnim sustavima. Većina plastičnih zglobova stvara se na gredama i tako je zadovoljeno načelo



Slika 7. Svojstva presjeka stupova i gređa, mehanizam nastanka plastičnih zglobova propisanih svojstava i njihove shematske krivulje nosivosti u četvrtom koraku

jakih stupova i slabih greda. Svi su rezultati prikazani u tablici 2. U četvrtom koraku ispitivanja, okvirima se dodaju posmični zidovi uz istodobno mijenjanje svojstava presjeka članova dok  $D_{pp}$  ne izađe iz  $D_{LS}$ . Na slici 7. vidljivo je da svi okviri mogu izdržati zadane seizmičke zahtjeve dane jednadžbom (2) ako se odaberu određeni presjeci elemenata navedenih pri vrhu slike. Svi rezultati uvršteni su u tablicu 2.

Tijekom nastanka krivulje guranja, nastaju različiti plastični zglobovi (eng. *plastic hinges* - PH) čiji broj i kvaliteta variraju. Postoji odnos između broja plastičnih zglobova i ponašanja konstrukcije. Kad se na određenoj razini kvalitete svojstava (stupnja sigurnosti LS) pojave plastični zglobovi koji se prošire sustavom, znači da je zgrada općenito na toj razini kvalitete. Stoga je u tablici 1. naveden broj plastičnih zglobova na pojedinim razinama kvalitete svojstava.

Tablica 2. Prikaz rezultata pomaka u odnosu na zahtjeve i postizanja graničnog stanja

Okviri	Drugi korak			Treći korak			Četvrti korak		
	$D_{pp}$	$D_{LS}$	$1,25 \cdot D_{pp}$	$D_{pp}$	$D_{LS}$	$1,25 \cdot D_{pp}$	$D_{pp}$	$D_{LS}$	$1,25 \cdot D_{pp}$
S2B3	N/A	40	N/A	35	39	44	15	21	19
S4B3	N/A	130	N/A	85	95	106	54	65	68
S6B3	230	175	288	130	160	163	90	110	113
S8B3	270	190	338	160	180	200	120	145	150
S10B3	310	220	388	175	210	219	130	161	163

Tablica 3a. Prikaz utroška armature i betona u svakom koraku - prikaz utroška materijala u prvom i drugom koraku

Okviri	Prvi i drugi korak					
	Utrošak armature [kg]			Utrošak betona [kg]		
	Stup	Greda	Ukupno	Stup	Greda	Ukupno
S2B3	124	230	354	3.840	4.320	8.160
S4B3	372	422	794	7.680	8.640	16.320
S6B3	552	625	1.177	15.206	15.552	30.758
S8B3	878	935	1.813	28.032	18.144	46.176
S10B3	1.364	1.169	2.532	37.862	22.680	60.542

Tablica 3b. Prikaz utroška armature i betona u svakom koraku - utroška materijala u trećem koraku

Okviri	Treći korak					
	Utrošak armature [kg]			Utrošak betona [kg]		
	Stup	Greda	Ukupno	Stup	Greda	Ukupno
S2B3	1.263	355	1.618	12.442	8.064	20.506
S4B3	1.516	711	2.226	19.968	16.128	36.096
S6B3	2.653	796	3.449	29.952	24.624	54.576
S8B3	4.042	1.373	5.415	44.544	36.864	81.408
S10B3	6.315	1.716	8.031	77.568	48.960	126.528

Tablica 3c. Prikaz utroška armature i betona u svakom koraku - prikaz utroška materijala u četvrtom koraku

Okviri	Četvrti korak							
	Utrošak armature [kg]				Utrošak betona [kg]			
	Stup	Greda	Posmični zid	Ukupno	Stup	Greda	Posmični zid	Ukupno
S2B3	162	144	568	874	3.840	2.880	9.216	15.936
S4B3	308	346	1.136	1.790	9.370	4.608	18.432	32.410
S6B3	463	682	1.704	2.849	14.054	12.960	27.648	54.662
S8B3	859	910	2.272	4.041	18.740	15.840	36.864	71.444
S10B3	1.428	1.137	2.840	5.405	32.640	25.920	46.080	104.640

Iz tablice 2. vidi se da je u drugom koraku  $D_{LS}$  manji od  $D_{pp}$ , a u trećem i četvrtom koraku  $D_{LS}$  je veći od  $D_{pp}$ . U posljednjem stupcu prikazane su vrijednosti  $1,25 \cdot D_{pp}$  tijekom svakog koraka.

### 6. Analiza rezultata

Iz tablice 2. vidi se da je u drugom koraku  $D_{pp}$  veći od  $D_{LS}$ . To znači da nosivost okvira ne ispunjava seizmičke zahtjeve određenog seizmičkog područja. Naprotiv, u trećem i četvrtom koraku  $D_{pp}$  manji je od  $D_{LS}$ . Usto, ako je  $D_{LS} < 1,25 \cdot D_{pp}$ , konstrukcija će podnijeti bočno opterećenje u određenom seizmičkom području ( $a = 0,35$ ) bez mjere sprečavanja urušavanja (2).

Iz slike 6. vidljivo je da u trećem koraku svi okviri odgovarajućih presjeka ispunjavaju seizmičke zahtjeve sukladno izrazu (2), a većina plastičnih zglobova stvara se na gredama i tako je zadovoljeno načelo jakih stupova i slabih greda. Svi su rezultati uvršteni u istu tablicu (tablica 2.).

Iz tablice 2. vidljivo je da je smanjenje  $D_{pp}$  u četvrtom koraku veće od onoga u trećem zbog uvođenja posmičnog zida u zadnjem koraku. Od postojećih metoda konačnih elemenata, za modeliranje posmičnih zidova korištena je bilinearna kvadrilateralna metoda. Učinke mreže s malim elementima može se proučavati na temelju analize površine zida s konačnim elementima prilagodi li se opcija u proračunu. No neka su ograničenja beznačajna. Iako postavljene hipoteze podupire nelinearnost cijelog sustava, nije provedena procjena

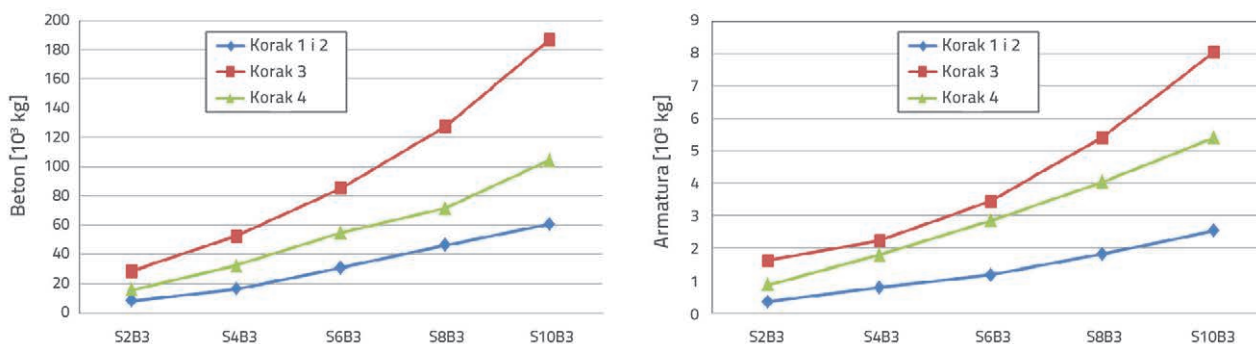
posmičnog zida zbog ograničenih opcija programa. Stoga bi daljnja ispitivanja trebala proučiti nelinearnost posmičnog zida u ovakvim kombiniranim sustavima.

Kako bi se analizirao utjecaj stupnja sigurnosti LS na ukupnu količinu betonskih i čeličnih materijala svakog okvira, u tablici 3. prikazana je masa greda, stupova i cijelih okvira u svakom koraku. Rezultati iz tablice 3. prikazani su linijskim dijagramom na slici 8.

Iz slike 8.a vidljivo je da je utrošak materijala u četvrtom koraku manji od onog u trećem, osobito kad je riječ o okvirima višim od šest katova. Iz slike 8.b vidljivo je da je rezultat isti i za armaturu, uz drukčije vrijednosti. Opisani rezultati upućuju na to da je uporaba posmičnog zida na višim katovima učinkovitija.

Na temelju prikaza iz tablice 3. može se zaključiti da je postotak utroška materijala (armature i betona) veći u trećem nego u četvrtom koraku u odnosu na onaj iz drugog koraka (tablica 4.). Zanimare li se rezultati S2B3, iz tablice 4. vidljivo je da će se, uporabi li se posmični zid umjesto povećanja veličina stupova i greda, uštedjeti 12 % čelika za armiranje i 32 % betona.

Ispitivanja su pokazala da dvojni sustavi (u kojima je dodan posmični zid umjesto da se povećava dimenzija elemenata) smanjuju  $D_{LS}$  i  $D_{pp}$  za 49%, odnosno 67% u odnosu na drugi korak (tablica 5.) Sustavi bez ispune (u kojima su samo povećavane dimenzije elemenata umjesto da je dodan posmični zid) smanjuju  $D_{pp}$  za 49% dok  $D_{LS}$  ostaje nepromijenjen.



Slika 8. Ukupna količina upotrijebljenog materijala: a) beton; b) armatura

Tablica 4. Usporedba utroška armature i betona

Okviri	Beton			Armatura			
	Treći / drugi korak	Četvrti / drugi korak	Usporedba [%]	Treći / drugi korak	Četvrti / drugi korak	Usporedba [%]	
S2B3	2,5	2,0	29	4,6	2,5	85	
S4B3	2,2	2,0	11	2,8	2,3	24	
S6B3	1,8	1,8	0	2,9	2,4	21	
S8B3	1,8	1,5	14	3,0	2,2	34	
S10B3	2,1	1,7	21	3,2	2,1	49	
Prosjeck usporedbe			<b>12</b>	Prosjeck usporedbe			<b>32</b>



Tablica 5. Odnosi  $D_{LS}$  i  $D_{PP}$  u trećem i četvrtom koraku u usporedbi s drugim

Otvori	Treći korak/drugi korak [%]		Četvrti korak/drugi korak [%]	
	$D_{LS}$	$D_{PP}$	$D_{LS}$	$D_{PP}$
S2B3	0	N/A	-33	N/A
S4B3	-25	N/A	-45	N/A
S6B3	0	-48	-48	-74
S8B3	-5	-47	-47	-67
S10B3	5	-52	-52	-61
Prosječno	0	-49	-49	-67

## 7. Zaključak

U radu je analiziran utjecaj ugradnje posmičnih zidova uz primjenu NSPA-a i PBSA-a na utrošak materijala pri nelinearnom ponašanju konstrukcije. Ovo je prvo istraživanje koje rabi jednostavnu formulu za bilježenje štete na konstrukciji na svakoj razini kvalitete svojstava. Jednadžba je analizirana na pet AB otvora otpornih na savijanje. Na oba su kraja greda i stupova pretpostavljeni plastični zglobovi propisanih svojstava, a otvori su podvrgnuti postupnom

povećanju vertikalnog opterećenja. Otvori su imali 4, 6, 8 i 10 katova na 3 polja. Istraživanje je pokazalo da povećanje veličine elemenata konstrukcije (greda i stupova) u svrhu zadovoljenja seizmičkih zahtjeva znatno povećava utrošak materijala. Naprotiv, ugradnjom posmičnog zida u okviru (dvojnim sustavom) unaprijeđeno je ponašanje zgrade u okvirima zahtjeva PBSA-a, osobito na višim katovima, i smanjen je utrošak čelika i betona pri gradnji.

Dvojni sustav smanjuje utrošak materijala za 12% (beton) i 32% (čelik za armiranje), a zadovoljava zahtjeve željenim stupnjem sigurnosti (stupanj sigurnosti LS).  $D_{LS}$  i  $D_{PP}$  u dvojnim sustavima (u kojima je dodan posmični zid umjesto da se povećavaju dimenzije stupova i greda) smanjeni su za 49%, odnosno za 67%. Naprotiv, sustavi bez ispune (u kojima su samo povećane dimenzije stupova i greda umjesto da se dodaje posmični zid) smanjuju  $D_{PP}$  za 49% dok  $D_{LS}$  ostaje nepromijenjen. To znači da kontrola štete konstrukcije zahtijeva ne samo smanjenje  $D_{PP}$ , nego i kontrolu  $D_{LS}$ .

## Zahvala

Zahvaljujemo Centru za upravljanje istraživanjima (RMC-U) UTM-a na podršci pri istraživanju. Autori zahvaljuju i Universitetu Teknologi Malaysia na pruženoj pomoći tijekom istraživanja.

## LITERATURA

- [1] Design of structures for earthquake resistance: BS EN 1998-1, European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium, 2004.
- [2] Habibi, A. R., Izadpanah, M.: New method for the design of reinforced concrete moment resisting frames with damage control, Scientia Iranica A, 19 (2012) 2, pp. 234–241,
- [3] Arjomandi, K., Estekanchi, H., Vafai, A.: Estimation of the seismic demand of the reinforced concrete buildings which do not meet the ductility criteria according to the modern standards, Scientia Iranica A, 16 (2009) 2 pp. 147–155,
- [4] Rofooei, F.R., Imani, R.: Evaluating the damage in steel MRF under near field earthquakes from a performance based design viewpoint, Procedia Engineering 14 (2011), pp. 3111–3118,
- [5] Naresh Kumar, B.G., Gornale, A., Mubashir, A.: Seismic performance evaluation of RC-Framed buildings - an approach to torsionally asymmetric buildings, IOSR Journal of Engineering, 2 (2012) 7, pp. 01-12,
- [6] Inel, M., Ozmen, H.B.: Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings, Engineering Structures, 28 (2006), pp. 1494–1502,
- [7] Applied Technology Council: ATC 40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
- [8] Federal Emergency Federal Agency: FEMA-356, Federal Emergency Federal Agency, Washington DC, 2000.
- [9] Raju, K.R., Cinitha A., Iyer, N. R.: Seismic performance evaluation of existing RC buildings designed as per past codes of practice, Sadhana, 37 (2012) 2, pp. 281–297
- [10] Malekpour, S., Seyyed, P., Dashti, F., Fallah Asghari, J.: Seismic performance evaluation of steel moment-resisting frames using Iranian, European and Japanese seismic codes, Procedia Engineering 14 (2011), 3331–3337,
- [11] Katkhoda, A., Knaa, R.: Optimization in the Selection of Structural Systems for the Design of Reinforced Concrete High-rise Buildings in Resisting Seismic Forces, Energy Procedia 19 (2012), pp. 269 – 275.