

Primljen / Received: 18.4.2021.

Ispravljen / Corrected: 2.11.2021.

Prihvaćen / Accepted: 18.12.2021.

Dostupno online / Available online: 10.2.2022.

# Ocjena ponašanja i prijedlog pojačanja postojeće građevine

## Autori:

Izv.prof.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Odjel za građevinarstvo

[tugrul.erdem@cbu.edu.tr](mailto:tugrul.erdem@cbu.edu.tr)

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Koçali Karal**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Odjel za građevinarstvo

[191292017@ogr.cbu.edu.tr](mailto:191292017@ogr.cbu.edu.tr)

Stručni rad

**R. Tuğrul Erdem, Koçali Karal**

## Ocjena ponašanja i prijedlog pojačanja postojeće građevine

Kao odgovor na pojavu snažnih potresa u seizmičkim se propisima provode revizije metoda za projektiranje građevina otpornih na seizmička djelovanja. Poznato je da su mnoge postojeće građevine smještene u seizmički aktivnim područjima diljem svijeta. Potresi uzrokuju znatna oštećenosti elemenata konstrukcije, te djelomično ili potpuno rušenje građevina. Zbog toga se, u okviru različitih seizmičkih propisa, diljem svijeta provodi ocjenjivanje seizmičkog ponašanja i postupaka pojačanja postojećih građevina. Zahvaljujući razvoju računalne tehnologije, nelinearne metode danas nude sve pouzdanije postupke za određivanje ponašanja građevina. U ovom se radu najprije provodi nelinearna analiza ponašanja postojeće tipične armiranobetonske građevine srednje visine prema turskom seizmičkom propisu – 2018 te prema američkoj normi ASCE. Nakon ocjene oštećenosti konstrukcijskih elementa, građevina je pojačana čeličnim razuporama te je zatim analiza ponovljena. U postupku je korišten računalni program za analizu konačnih elemenata SAP2000. Koeficijenti oštećenosti konstrukcijskih elemenata te modalna svojstva i međukatni pomaci, određeni su i uspoređeni prema oba spomenuta propisa, te je zaključeno da predložena metoda pojačanja može biti prihvatljivo alternativno rješenje za takve građevine.

### Ključne riječi:

armiranobetonska građevina, analiza učinkovitosti, seizmički propisi, pojačanje

Professional paper

**R. Tuğrul Erdem, Koçali Karal**

## Performance assessment and strengthening proposal of an existing building

Due to major-scale earthquakes, revisions of earthquake resistant structural design methods have periodically been made in seismic codes. It is known that many existing buildings are located in active seismic zones in all parts of the world. Severe damage to structural members, with partial or total collapse of buildings, has been observed in past earthquakes. Consequently, the evaluation of seismic performance and strengthening techniques of the existing buildings according to various seismic codes has become a global issue in structural engineering. With the development of computer technology, non-linear methods have been offering increasingly reliable evaluation procedures in the performance-based assessment of buildings. In this study, non-linear performance analysis of an existing typical mid-rise reinforced concrete building is first performed according to Turkish Building Earthquake Code-2018 and American Standard, ASCE. After evaluation of damage to structural members, the building is strengthened by steel braces and the analysis is performed once again. The SAP2000 finite elements analysis software is utilized in the solutions. Damage ratios of structural members as well as modal properties and storey drift ratios are determined and compared according to both codes, and it is concluded that the proposed strengthening method could be a significant alternative in such buildings.

### Key words:

reinforced concrete building, performance analysis, seismic codes, strengthening

## 1. Uvod

Potres nastaje kao posljedica naglog otpuštanja seizmičke energije pohranjene u zemljinoj kori gdje dolazi do formiranja seizmičkih valova. Potresi su jedna od najrazornijih prirodnih katastrofa koje uzrokuju gubitak života i uništenje imovine. Prema Geološkom institutu SAD-a, tijekom 2020. godine u svijetu zabilježena ukupno 122 potresa magnitude 6 ili više. U tim su potresima zabilježene značajne štete, rušenja građevina i gubitak ljudskih života. Takva situacija upozorava na važnost projektiranja građevina otpornih na djelovanje potresa.

Armiranobetonske (AB) građevine čine glavninu cjelokupnog fonda građevina na globalnoj razini. Osnovne prednosti armiranobetonskih građevina su visok stupanj duktilnosti, trajnost i krutost, otpornost na djelovanje požara i jednostavnost izvođenja. Zbog toga se takve građevine sve češće grade u svim dijelovima svijeta. Treba međutim napomenuti da je niska kvaliteta betona značajan razlog oštećivanja konstrukcija postojećih AB građevina koje su izgrađene u vremenu prije usvajanja tehnologije transportnog betona. Snažni potresi dovode do znatnih oštećenosti armiranobetonskih konstrukcija. U literaturi se na bazi različitih propisa analizira seizmička sigurnost AB građevina [1-6].

Projektiranje utemeljeno na ponašanju građevine i nelinearna analiza smatraju se vrlo značajnim temama u graditeljstvu. Ocjena ponašanja uključuje primjenu posebnih postupaka i to već od projektiranja pa do provjere analiza. Kriteriji za projektiranje zadaju u skladu sa specifičnim ciljevima koji se žele ostvariti u smislu osiguranja seizmičke otpornosti. Prema ovom se pristupu ponašanje konstrukcijskog sustava ocjenjuje uspostavljanjem veze između ciljanog ponašanja i odgovarajuće razine oštećenosti. Iako numerička analiza konstrukcija pomoću postupaka nelinearne analize zahtijeva mnogo detaljnija istraživanja, tim se postupcima postižu točniji rezultati nego što je to slučaj u postupcima koji se temelje na linearnoj analizi [7-11]. Prema objavljenim studijama, očekuje se da će projektiranje utemeljeno na analizi ponašanja u bliskoj budućnosti postati još zastupljenije u seizmičkim propisima.

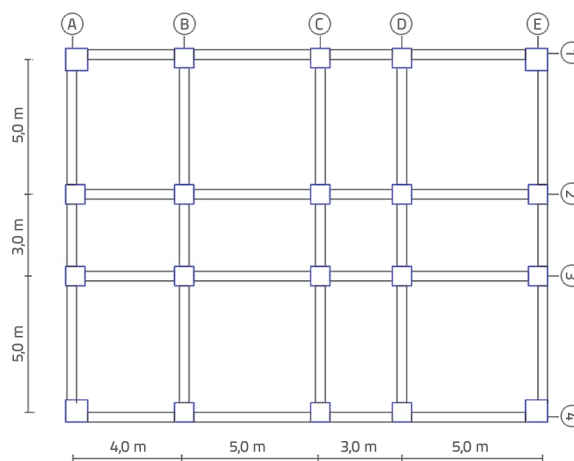
Kako su mnoge postojeće građevine pretrpjele djelovanje nekoliko potresa, razina njihovog ponašanja treba se provjeriti inženjerskim pregledom. Općenito uzevši, seizmički propisi nalažu da se treba zadovoljiti razina sigurnosti ljudskih života te da se treba spriječiti rušenje građevine u slučaju snažnih potresa. Međutim, može doći do štete na elementima konstrukcije. Nakon ocjene razine oštećenosti elemenata konstrukcije, mogu se provesti različiti postupci pojačanja konstrukcijskih sustava [12-16].

U nekim se slučajevima zbog ekonomskih ili tehničkih razloga ne može pristupiti ponovnom građenju građevine čija je seizmička sigurnost bitno narušena nakon potresa. U takvim se slučajevima građevina može pojačati primjenom odgovarajućih sanacijskih postupaka. U svakom slučaju, odabrani postupak treba biti brzo provediv, a pritom se smiju dopustiti samo manja oštećenosti konstrukcijskog sustava građevine. U takvim se okolnostima

pojačanje čeličnim razuporama pokazalo vrlo djelotvornim u poboljšanju seizmičkog ponašanja postojećih građevina [17-21]. U okviru ovog istraživanja najprije se provodi nelinearna analiza postojeće armiranobetonske zgrade srednje veličine, za koju se može reći da po svom tipu predstavlja značajan dio stambenog fonda. Seizmičko ponašanje zgrade određuje se definiranjem razine opterećenosti konstrukcijskih elemenata prema Turskom seizmičkom propisu za građevine – 2018 (TBEC-2018) te prema ASCE 7-16 [22, 23, 29]. Nakon toga se čeličnim razuporama pojačavaju odabrane osi zgrade te se analiza provodi još jednom. U analizi se koristi računalni program za analizu konačnih elemenata SAP 2000 koji često služi za definiranje nelinearnih rješenja [24]. Na kraju se za postojeću i pojačanu zgradu prema oba propisa uspoređuju sljedeći parametri: vrijednosti perioda, koeficijenti mase, situacije u kojima dolazi do oštećenja te katni pomaci. Smatra se da će postignuti rezultati u odgovarajućoj mjeri pridonijeti literaturi u području graditeljstva.

## 2. Opis zgrade

Kao primjer je odabrana peterokatna AB okvirna zgrada. Visina svakog kata iznosi 3 m, a ukupna tlocrtna površina jedne etaže zgrade iznosi 221 m<sup>2</sup>. Ukupna je dužina zgrade 17 m u smjeru x, tj. 13 m u smjeru y. Tlocrt kata postojeće zgrade prikazan je na slici 1.



Slika 1. Tlocrt zgrade

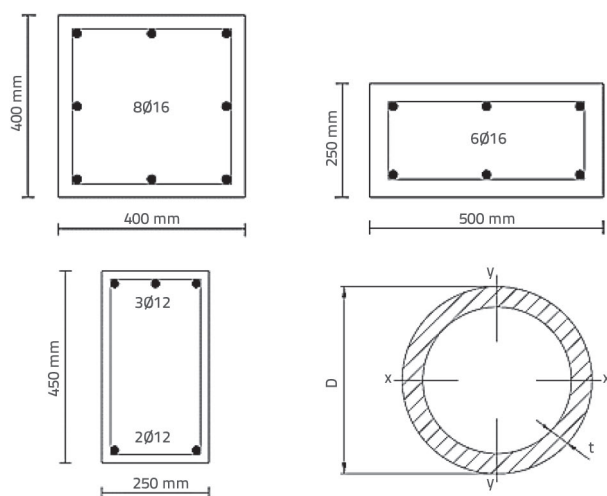
Postojeća zgrada sastoji se od AB stupova, greda i ploča. U dotičnoj AB okvirnoj zgradi koriste se dvije vrste presjeka stupova. Međutim, dimenzije svih greda su jednake. Koeficijenti krutosti raspucalnih presjeka u iznosu od 0,70 i 0,35 primjenjuju se za stupove tj. Grede, kao što se i predlaže u dokumentima TBEC-2018 i ASCE 7-16. Zbog toga dolazi do većih bočnih pomaka, a u analizi se dobivaju veće vrijednosti perioda. Usvojeno je da debljina ploča na svim katovima iznosi 13 cm. Korisno opterećenje od 1,5 kN/m<sup>2</sup> vrijedi za najviši kat, a za ostale je katove usvojena vrijednost od 2,0 kN/m<sup>2</sup> kao što se i navodi u TS-498 [25]. Debljina vanjskih

i unutarnjih zidova iznosi 20 cm tj. 10 cm. Za pojačanje se koriste dijagonalni čelični spregovi. Ukručeni okviri služe za preuzimanje bočnih sila. Presjeci stupova, greda i spregova prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Prikaz dimenzija

Konstruktivski elementi	Postojeća zgrada	Pojačana zgrada
Kutni stupovi	400 x 400 mm	
Ostali stupovi	250 x 500 mm	
Grede	250 x 450 mm	
Čelični spreg	–	CHS 177, 8 x 8 mm

Prema TBEC-2018, minimalna tlačna čvrstoća betona za projektiranje novih AB zgrada iznosi 25 MPa. Međutim, niži razredi betona uočeni su pri ocjenjivanju postojećih zgrada izgrađenih prema prethodnim seizmičkim propisima. U ovom je istraživanju usvojena tlačna čvrstoća betona od 16 MPa. Granica popuštanja uzdužne i poprečne armature iznosi 420 MPa. U pojačanoj je zgradi za elemente spregova korišten čelik klase S235JR. Raspored armature stupova i greda na spojevima, te detalji presjeka spregova, prikazani su na slici 2. Promjer vilica armature iznosi 8 mm za sve stupove i grede.



Slika 2. Detalji presjeka

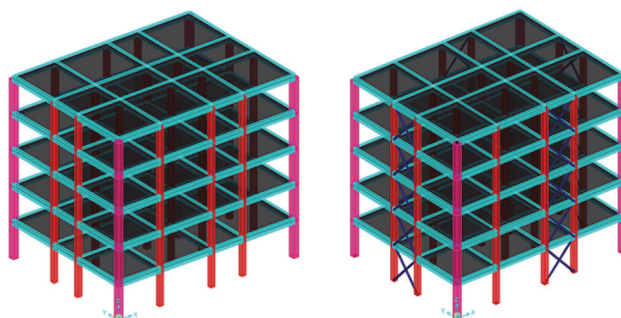
U praksi su sustavi s ukrućenim okvirom uglavnom koncentrični. Stoga se spregovi križaju u čvoru središnje točke. Geometrijska i mehanička svojstva dijagonalnih spregova korištenih u pojačanoj zgradi prikazana su u tablici 2. Za promjer, debljinu zida i površinu koriste se redom kratice D, t i A. Vrijednosti momenta inercije i polumjera tromosti za odgovarajuće smjerove iskazuju se kao mehanička svojstva.

Slika 3. prikazuje trodimenzionalne modele peterokatne AB okvirne zgrade i pojačane zgrade. U pojačanoj se zgradi čelični spregovi, koji se križaju u sredini raspona, simetrično koriste

u oba smjera na svim katovima. Cilj je poboljšati krutost i otpornost postojeće zgrade na deformacije.

Tablica 2. Svojstva razupora

Profil	Geometrijska svojstva	Mehanička svojstva
CHS 177,8x8	D = 177,8 mm	$I_x = I_y = 1541 \text{ cm}^4$
	t = 8 mm	$I_t = 3083 \text{ cm}^4$
	A = 4270 mm <sup>2</sup>	$i_x = i_y = 6,01 \text{ cm}$



Slika 3. Postojeća i pojačana zgrada

Nakon modalne analize obiju zgrada, odgovarajućim se programom definiraju oblici prvih perioda vibracije i koeficijenti aktivacije mase. Rezultati za relevantne smjerove prikazani su u tablici 3.

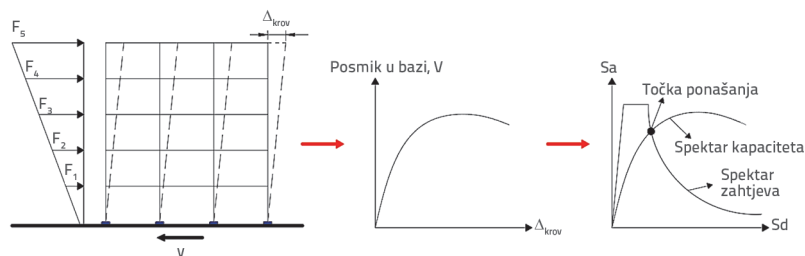
Tablica 3. Vrijednosti perioda i koeficijenta efektivne mase

Vrsta zgrade	Broj oblika	Period [s]		Koeficijent aktivirane mase [%]	
		Smjer x	Smjer y	Smjer x	Smjer y
Postojeća zgrada	1	–	1,22	–	80,01
	2	1,19	–	80,03	–
Pojačana zgrada	1	–	0,69	–	77,1
	2	0,68	–	77,2	–

### 3. Nelinearna analiza

Nakon faze modeliranja i definiranja opterećenja, računalnim se programom provodi nelinearna analiza. Koristi se postupak statičkog naguravanja kako bi se odredilo seizmičko ponašanje obiju zgrada. Smatra se da je taj postupak vrlo djelotvorno sredstvo za graditeljsku analizu ponašanja građevina [26].

Postupak naguravanja sastoji se od serije nelinearnih inkrementalnih analiza koje se povezuju kako bi se odredila bočna deformacija i stanje oštećenosti konstrukcijskih elemenata. Ponašanje konstrukcije ocjenjuje se prema razini ponašanja građevine pri vrijednosti ciljnih pomaka, takozvane točke ponašanja, prema spektru kapaciteta i zahtjeva, kao što se to vidi na slici 4.



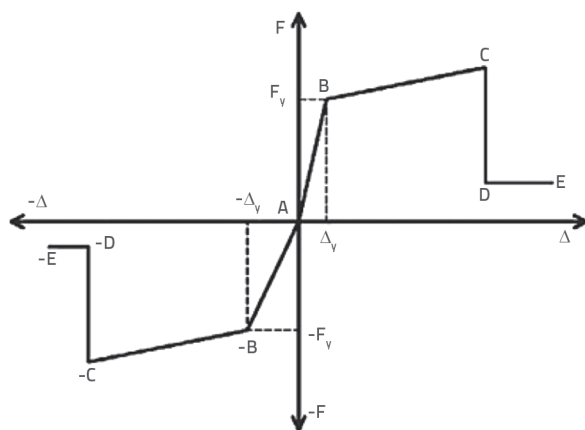
Slika 4. Krivulja naguravanja i točka ponašanja

U analizi naguravanja, odnos između ukupne seizmičke sile i pomaka krova iskazuje se pomoću krivulje kapaciteta. Mnogi istraživači često primjenjuju tu analizu zbog njezinih brojnih prednosti kao što su brza provedba, pouzdani rezultati i minimalni zahtjevi proračunavanja. Kako se odnos između ciljnog ponašanja i razine oštećenosti u analizi ponašanja izravno utvrđuje metodama utemeljenima na pomaku, te se metode u novije vrijeme često primjenjuju umjesto metoda baziranih na sili. Osnovni koraci nelinearne analize prikazani su na slici 5.



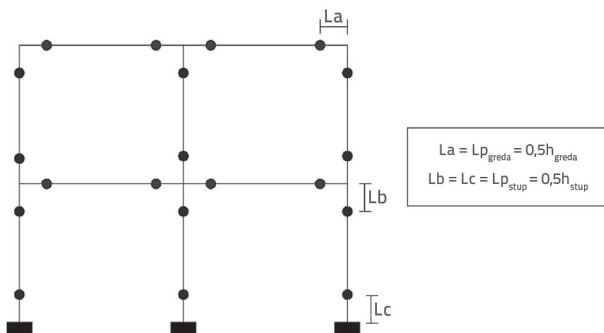
Slika 5. Koraci nelinearne analize

Ponašanje plastičnog zgloba može se u nelinearnoj analizi definirati pomoću pristupa koncentrirane plastičnosti i raspoređene plastičnosti. U tim se pristupima podrazumijeva mogućnost pojave nelinearnog ponašanja na kraju konstrukcijskog elementa u modelu koncentrirane plastičnosti, tj. duž elementa i preko poprečnog presjeka elementa u modelu raspoređene plastičnosti [27]. U ovom se istraživanju za definiranje plastičnog zgloba AB stupova i greda u nelinearnoj analizi koristi pristup koncentrirane plastičnosti uz uporabu odgovarajućeg programa. Dok su prema normi ASCE svojstva zgloba automatski definirana programom, prema propisu TBEC-2018 svojstva plastičnog zgloba mogu se definirati uspostavljanjem odnosa momenta i rotacije konstrukcijskih elemenata [28]. U tom se smislu programom treba definirati idealizirani odnos sile i deformacije u plastičnom zglobu, kao što je to prikazano na slici 6. Krivulja se sastoji od određenih točaka. U krivulji se nalaze četiri linije, tj. AB, BC, CD i DE, a one

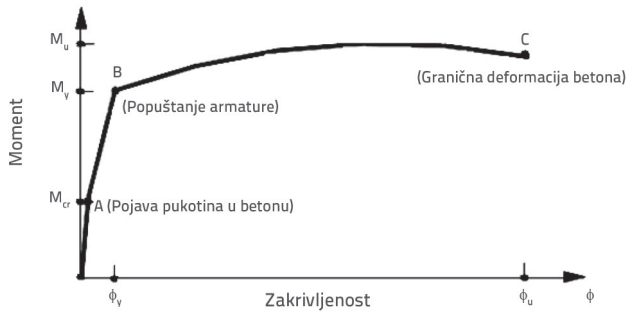


Slika 6. Odnos plastičnog zgloba

Nelinearno ponašanje očituje se samo u plastičnim zglobovima koji su definirani na oba kraja stupova i greda. Lokacija plastičnih zglobova prikazana je na slici 7. Dužina plastičnog zgloba iskazana je oznakom L<sub>p</sub> na toj slici [28]. Program uz to omogućuje definiranje odnosa moment-zakrivljenost presjeka kako bi se dobio moment popuštanja (M<sub>v</sub>), granični moment (M<sub>u</sub>) te zakrivljenost pri popuštanju (φ<sub>v</sub>) i granična zakrivljenost (φ<sub>u</sub>), kao što je to prikazano na slici 8.



Slika 7. Plastični zglobovi



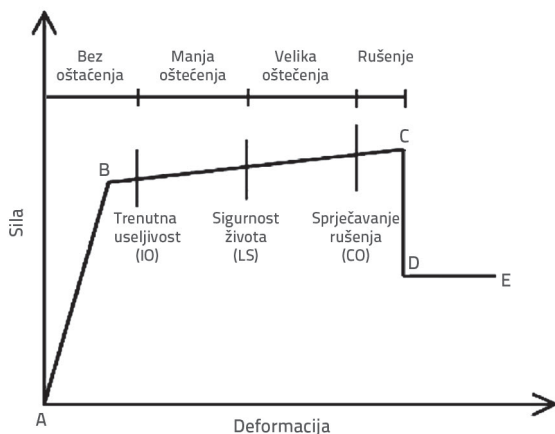
Slika 8. Dijagram moment-zakrivljenost

Nakon određivanja zakrivljenosti pri popuštanju ( $\phi_y$ ) i granične zakrivljenosti ( $\phi_u$ ) presjeka, izračunava se rotacija pri popuštanju ( $\theta_y$ ) prema izrazu (1) na način definiran u propisu TBEC-2018. U tom izrazu uzima se da vrijednost  $\eta$  iznosi 1,0 za grede i stupove. Osim toga, za dužinu plastičnog zgloba, dužinu posmičnog raspona u presjeku, visinu presjeka, prosječni promjer armature u spoju, prosječnu tlačnu čvrstoću betona i prosječnu granicu popuštanja armature upotrebljavaju se istim redom oznake  $L_p$ ,  $L_s$ ,  $h$ ,  $d_b$ ,  $f_{ce}$  i  $f_{ve}$ . Nadalje, plastična rotacija ( $\theta_p$ ) na razini sprečavanja rušenja određuje se prema izrazu (2).

$$\theta_y = \frac{\phi_y L_s}{3} + 0.0015\eta \left( 1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \frac{\phi_y d_b f_{ve}}{8\sqrt{f_{ce}}} \quad (1)$$

$$\theta_p = \frac{2}{3} \left[ (\phi_u - \phi_y) L_p \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (2)$$

Osnovne razine ponašanja konstrukcije prikazane su na slici 9. Te su razine slično definirane u seizmičkim propisima. Ne uočava se nikakvo oštećenost prije razine brze useljivosti.



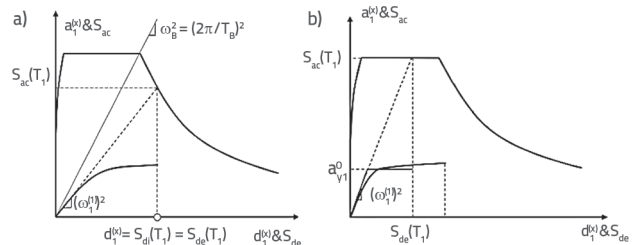
Slika 9. Razine ponašanja

Međutim, na razini brze useljivosti već se uočavaju manja oštećenosti kao što su manje pukotine u nekonstrukcijskim

elementima. Na razini zaštite života uočavaju se niske vrijednosti deformacija i oštećenosti. S druge strane, još uvijek je sačuvana nosivost i bočna krutost konstrukcijskih elemenata. Na razini sprečavanja rušenja dolazi do značajnog neelastičnog izobličenja konstrukcijskih elemenata niske nosivosti i krutosti. Iako se mogu uočiti trajni pomaci, na ovoj razini ipak ne dolazi do potpunog rušenja.

### 3.1. Analiza ponašanja za TBEC-2018

U propisu TBEC-2018 koordinate krivulja kapaciteta transformiraju se u modalno ubrzanje – modalni pomak kako bi se izračunala vrijednost ciljnog pomaka, vidi sliku 10. Nelinearni spektralni pomak,  $S_{di}(T_1)$ , određuje se prema omjeru spektralnog pomaka,  $C_R$ , a proračunski elastični spektralni pomak  $S_{de}(T_1)$  određuje se prema jednadžbi ( $S_{di} = C_R \times S_{de}(T_1)$ ). Vrijednosti  $T_A$  i  $T_B$  predstavljaju kutni periodi proračunskih horizontalnih elastičnih spektara. Vrijednost  $C_R$  mijenja se zbog odnosa između vrijednosti perioda prirodne vibracije zgrade ( $T_1$ ) i vrijednosti kutnog perioda ( $T_B$ ). Dijagram modalnog kapaciteta – prikazan na slici 10.a - koristi se kada je vrijednost  $T_1$  veća od  $T_B$ . S druge strane, dijagram na slici 10.b koristi se kada je vrijednost  $T_1$  manja ili jednaka vrijednosti  $T_b$ .



Slika 10. Dijagrami modalnog kapaciteta

Usvojeno je da lokalno tlo po svom sastavu ulazi u kategoriju D jer se sastoji od šljunka ili vrlo krutih slojeva gline. Prosječna brzina posmičnih valova u gornjih 30 m tla kategorije D varira između 180 i 360, tj. između 183 i 366 m/s prema propisu TBEC-2018, tj. prema normi ASCE 7-16. Osim toga, kategorije tla prema europskim normama (EN) dostupne su u literaturi [30]. Parametri proračunskog spektra određeni u izrazima (3) i (4) prikazani su u tablici 4. U tim su izrazima, vrijednosti  $S_s$  i  $S_1$  koeficijenti spektralnog ubrzanja.

Nadalje, vrijednosti  $F_s$  i  $F_1$  su koeficijenti utjecaja lokalnog tla. Ti se koeficijenti određuju prema karti seizmičkog hazarda. Primjenom koeficijenata  $S_{D5}$  i  $S_{D1}$ , koji predstavljaju koeficijente proračunskog spektralnog ubrzanja za kratki period, tj. za periode od 1,0 s, izračunavaju se na kraju postupka.

$$S_s \cdot F_s = S_{D5} \quad (3)$$

$$S_1 \cdot F_1 = S_{D1} \quad (4)$$

Tablica 4. Proračunski parametri TBEC-2018

Kategorija tla	$T_A$	$T_B$	$S_s$	$S_1$	$F_s$	$F_1$	$S_{DS}$	$S_{D1}$
D	0,095	0,476	1,124	0,274	1,050	2,052	1,181	0,562

Tablica 5. Proračunski parametri za ASCE 7-16

Kategorija tla	$T_0$	$T_s$	$S_s$	$S_1$	$F_a$	$F_v$	$S_{MS}$	$S_{M1}$	$S_{DS}$	$S_{D1}$
D	0,089	0,447	1,124	0,274	1,09	2,0	1,225	0,548	0,817	0,365

### 3.2. Analiza ponašanja za ASCE 7-16

Osnovni koraci analize slični su u propisima TBEC-2018 i ASCE 7-16. Međutim, ipak postoje i neke razlike. Primjerice, u propisu TBEC-2018 korisno se opterećenje množi s određenim koeficijentom kako bi se odredila aktivirana masa, koji iznosi 0,3 za stambene zgrade. S druge strane, aktivirana masa se računa u ASCE 7-16 uzimajući u obzir samo stalno opterećenje. Dakle, masa za zgrade razlikuje se u ta dva propisa. Osim toga, zgrade se u normi ASCE 7-16 kategoriziraju prema kategorijama rizika. Postojeće AB zgrade ubrajaju se u kategoriju rizika II, a u normi su to visoko rizične zgrade i ostale konstrukcije koje u slučaju otkazivanja mogu ugroziti ljudske živote. Usvojeno je da faktor značenja vrijednosti zgrade ( $I_e$ ) u odnosu na kategoriju rizika iznosi 1.00. Vrijednosti  $S_s$  i  $S_1$  su parametri spektralnog ubrzanja određeni pomoću interaktivne internetske aplikacije. Nakon toga se parametri  $F_a$  i  $F_v$  preuzimaju iz odgovarajućih tablica u skladu s kategorijom tla D kojoj, prema normi ASCE 7-16, pripadaju kruta tla. Primjenom tih parametara izračunavaju se

pomoću izraza (5) i (6) vrijednosti  $S_{MS}$  i  $S_{M1}$  za kratko razdoblje i razdoblje od jedne sekunde. Na kraju se prema izrazima (7) i (8) određuju vrijednosti ubrzanja spektralnog odziva  $S_{DS}$  i  $S_{D1}$ . Vrijednosti tih parametara prikazane su u tablici 5.

$$S_{MS} \cdot F_a = S_s \tag{5}$$

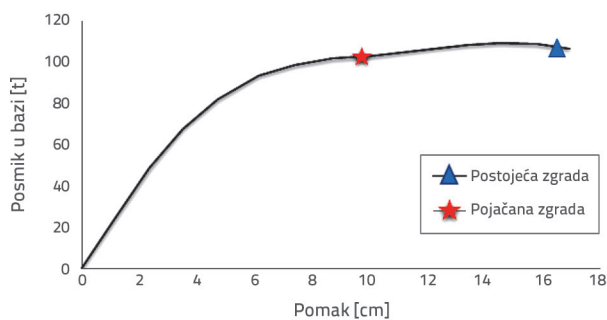
$$S_{M1} \cdot F_v = S_1 \tag{6}$$

$$(2/3)S_{MS} = S_{DS} \tag{7}$$

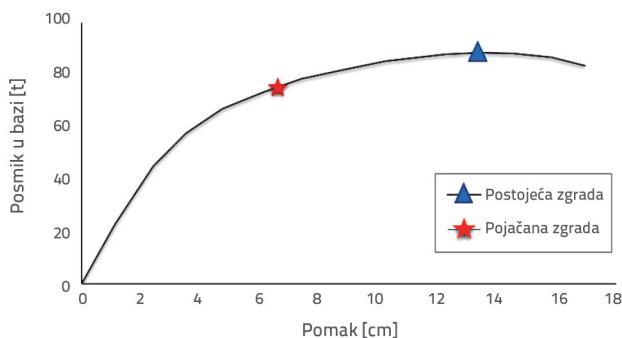
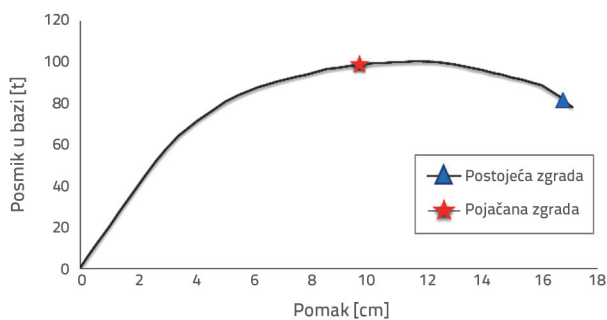
$$(2/3)S_1 = S_{D1} \tag{8}$$

### 4. Rezultati analize

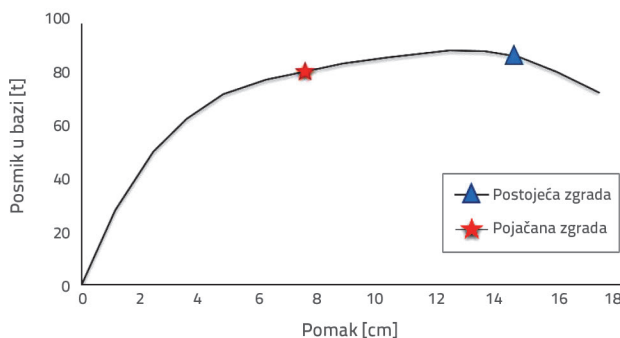
Nakon softverske provedbe nelinearne analize, određuje se ponašanje postojeće i pojačane zgrade pomoću propisa TBEC-2018 i ASCE 7-16. Za te se potrebe koristi inkrementalni statički postupak naguravanja te se postupno nanose bočne sile.

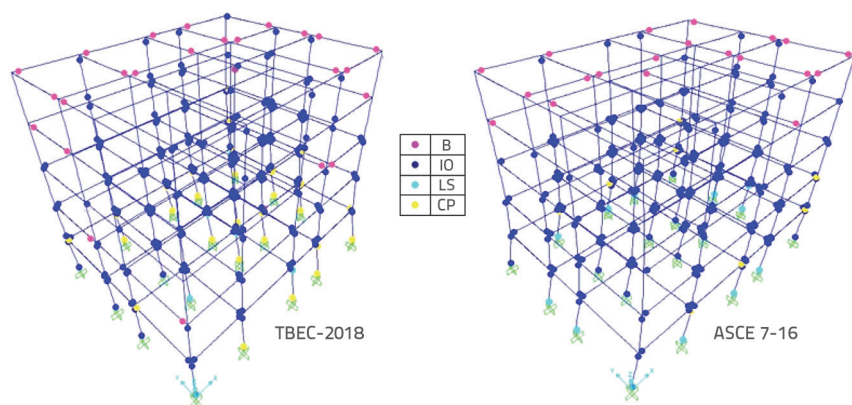


Slika 11. Ciljni pomaci u oba smjera prema propisu TBEC-2018

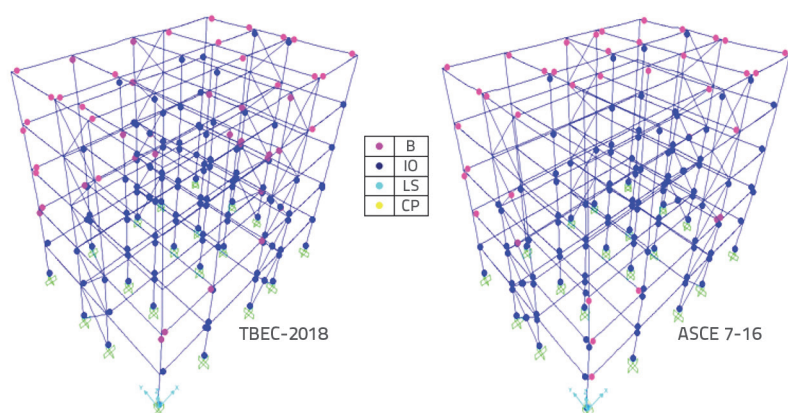


Slika 12. Ciljni pomaci u oba smjera prema normi ASCE 7-16





Slika 13. Plastični zglobovi za postojeću zgradu



Slika 14. Plastični zglobovi za pojačanu zgradu

Analiza se provodi u odgovarajućem seizmičkom smjeru sve do trenutka u kojem zgrada više ne može izdržati daljnje nanošenje sile. Postupkom naguravanja dobiva se krivulja kapaciteta koja pokazuje odnos između ukupne seizmičke sile i pomaka na krovu. Ciljne vrijednosti pomaka postojeće zgrade za smjerove

x i y iznose 16,97 i 17,13 cm prema propisu TBEC-2018, a odgovarajuće vrijednosti prema normi ASCE 7-16 iznose 13,55 i 14,21. Nakon pojačanja čeličnim spregovima, ciljni pomaci se smanjuju na 9,56 i 9,59 cm za TBEC-2018, tj. na 6,52 i 7,54 cm za ASCE 7-16. Na slikama 11. i 12. prikazane su krivulje kapaciteta postojeće zgrade za smjerove x i y, definirane prema korištenim propisima. Na tim su slikama naznačene obje vrijednosti kako bi se uočile razlike između ciljnih pomaka postojeće i pojačane zgrade.

Zgrade su naguravane do proračunskih ciljnih vrijednosti pomaka kako bi se odredilo stanje oštećenosti konstrukcijskih elemenata. Nakon toga su na krajevima konstrukcijskih elemenata zabilježeni plastični zglobovi. Plastični zglobovi za smjer x prikazani su pri ciljnim pomacima na trodimenzionalnim modelima zgrade prema propisima TBEC-2018 i ASCE 7-16, vidi slike 13. i 14.

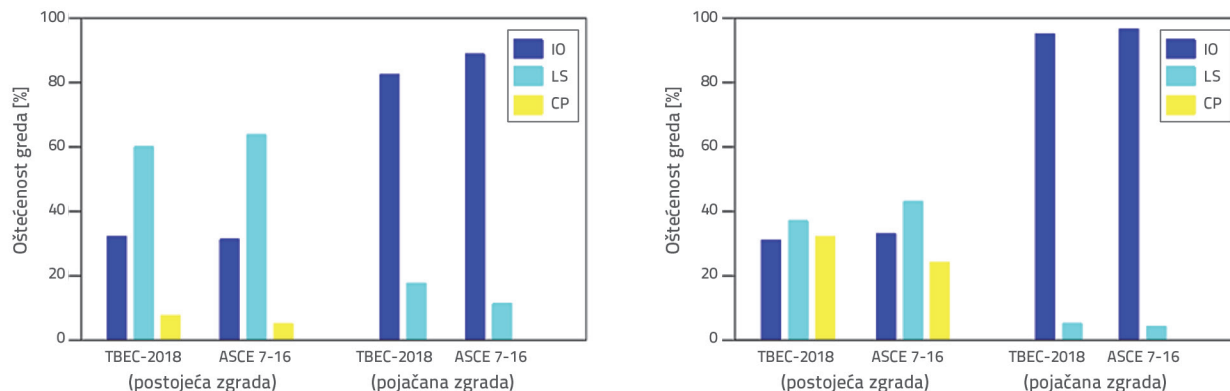
Stupanj oštećenosti konstrukcijskih elemenata ocjenjuje se uzimajući u obzir plastične zglobove za svaki smjer pri ciljnom pomaku. Rezultati dobiveni ocjenjivanjem stupnja oštećenosti prikazani su u tablici 6. prema propisima TBEC-2018 i ASCE 7-16. Razine oštećenosti pojačane zgrade utvrđene prema tim propisima pokazuju da se primjenom spregova učinkovito poboljšava seizmička otpornost postojeće zgrade.

Tablica 6. Razine oštećenosti konstrukcijskih elemenata u smjeru x

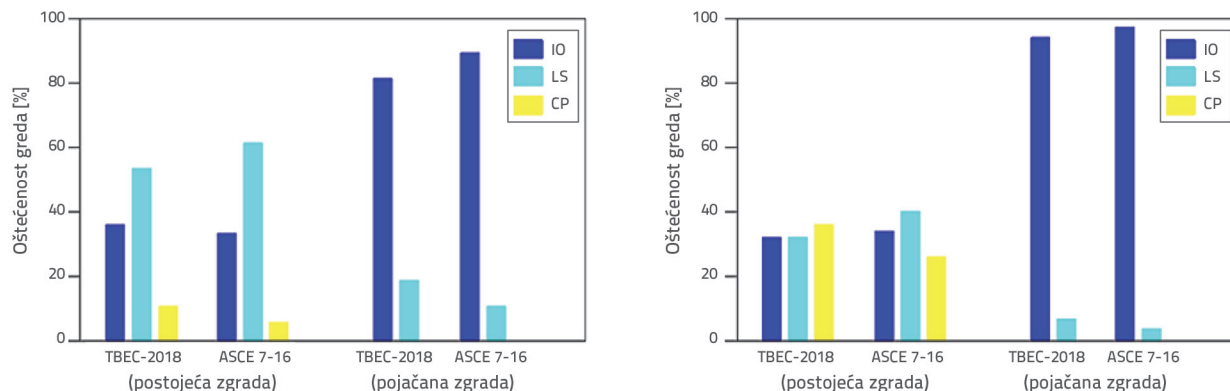
Konstrukcijski elementi	Broj kata	TBEC-2018						ASCE 7-16					
		Postojeća			Pojačana			Postojeća			Pojačana		
		IO	LS	CP	IO	LS	CP	IO	LS	CP	IO	LS	CP
Grede	1	–	12	4	8	8	–	–	13	3	10	6	–
	2	–	14	2	9	7	–	–	15	1	13	3	–
	3	–	16	–	16	–	–	–	16	–	16	–	–
	4	10	6	–	16	–	–	9	7	–	16	–	–
	5	16	–	–	16	–	–	16	–	–	16	–	–
Stupovi	1	–	4	16	17	3	–	–	7	13	17	3	–
	2	–	10	10	19	1	–	–	14	6	20	–	–
	3	–	14	6	20	–	–	–	15	5	20	–	–
	4	11	9	–	20	–	–	13	7	–	20	–	–
	5	20	–	–	20	–	–	20	–	–	20	–	–

Tablica 7. Razine oštećenosti konstrukcijskih elemenata u smjeru y

Konstrukcijski elementi	Broj kata	TBEC-2018						ASCE 7-16					
		Postojeća			Pojačana			Postojeća			Pojačana		
		IO	LS	CP	IO	LS	CP	IO	LS	CP	IO	LS	CP
Grede	1	-	10	5	7	8	-	-	12	3	10	5	-
	2	-	12	3	9	6	-	-	14	1	13	2	-
	3	-	15	-	15	-	-	-	15	-	15	-	-
	4	12	3	-	15	-	-	10	5	-	15	-	-
	5	15	-	-	15	-	-	15	-	-	15	-	-
Stupovi	1	-	2	18	16	4	-	-	6	14	18	2	-
	2	-	9	11	18	2	-	-	12	8	20	-	-
	3	-	13	7	20	-	-	-	16	4	20	-	-
	4	12	8	-	20	-	-	14	6	-	20	-	-
	5	20	-	-	20	-	-	20	-	-	20	-	-



Slika 15. Koeficijenti oštećenosti za smjer x

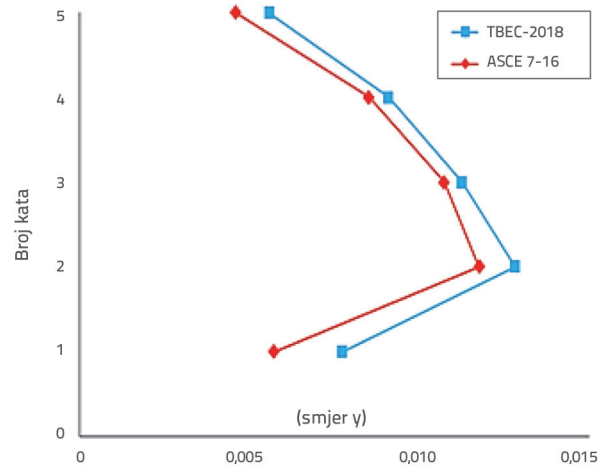
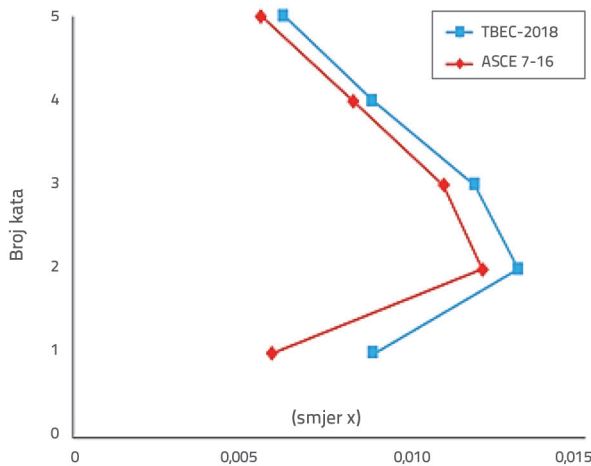


Slika 16. Koeficijenti oštećenosti za smjer y

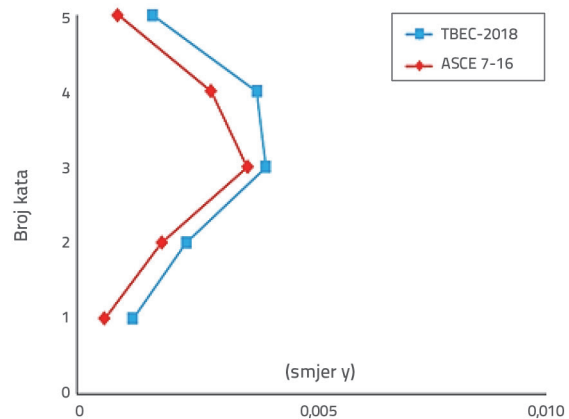
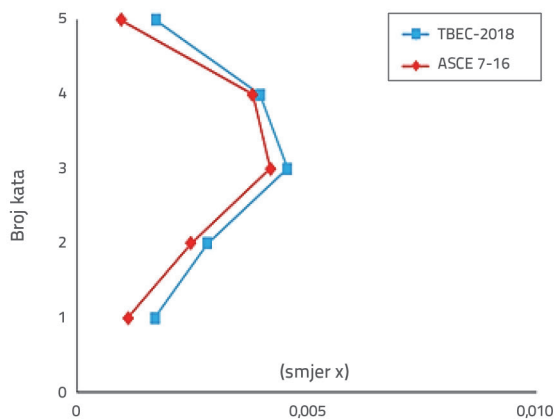
Nakon što je stupanj oštećenosti konstrukcijskih elemenata utvrđen za svaki pojedini kat, izračunani su i koeficijenti oštećenosti za postojeću i pojačanu zgradu. Rezultati su prikazani po smjerovima na slikama 15. i 16. kako bi se vizualno iskazali koeficijenti oštećenosti prema oba propisa. Može se uočiti da se niti jedan konstrukcijski element nakon pojačanja ne nalazi na razini sprečavanja rušenja (CP).

U konačnom koraku analize, prema oba propisa su pri ciljnim pomacima određeni međukatni pomaci koji utječu na ponašanje zgrade. Rezultati su prikazani na slikama 17. i 18. za smjer x i y prema propisima TBEC-2018 i ASCE 7-16. Ocjena rezultata pokazuje da se čeličnim spregovima djelotvorno smanjuju vrijednosti bočnog pomaka.





Slika 17. Relativni katni pomaci za postojeću zgradu



Slika 18. Relativni katni pomaci za pojačanu zgradu

## 5. Zaključak

Potresi uzrokuju različitovrsna oštećenosti konstrukcija i rušenje građevina diljem svijeta. Zbog toga su u seizmičkim propisima definirani odgovarajući postupci projektiranja i ocjenjivanja na bazi ponašanja građevina s osnovnim ciljem da se na minimum svedu štete i gubici uzrokovani potresom. U tom se smislu provode brojna istraživanja kako bi se ocijenilo ponašanje postojećih građevina te pripremili adekvatni projekti pojačanja, tj. kako bi se u tim građevinama osigurala razina sigurnosti života. Nelinearna se analiza može provesti statičkim i dinamičkim metodama. Međutim, kod dinamičkih je rješenja potrebna napredna računalna tehnologija, a i sama analiza duže traje. Zbog toga se za ocjenu seizmičkog ponašanja građevina provodi statička analiza u slučajevima kada su dostupni pouzdani podaci o materijalnim svojstvima i konstrukcijskom sustavu.

Ocjenjivanje bazirano na ponašanju zapravo je kombinacija koraka projektiranja, analize i ocjenjivanja. Metode utemeljene na pomaku pokazale su se uspješnima u iskazivanju odnosa između zahtjeva pomaka i otpornosti građevina na bočnu silu. Krivulja kapaciteta dobiva se u okviru postupka naguravanja,

te se zatim ocjenjuju razine oštećenosti konstrukcijskih elemenata. Najčešće se za poboljšanje seizmičkog ponašanja postojećih građevina provode različiti postupci pojačanja. U tom su smislu sustavi s koncentričnim spregovima postali jedna od najdjelotvornijih alternativa zahvaljujući njihovoj izrazitoj nosivosti i krutosti.

Poznato je da se u današnje vrijeme vrlo često grade AB okvirne građevine te da ih odlikuje dugotrajna uporabljivost trajanja. U ovom se radu na početku provodi nelinearna statička analiza postojeće AB okvirne zgrade srednje visine prema dva različita seizmička propisa. Nakon definiranja granica oštećenosti konstrukcijskih elemenata, zgrada je simetrično pojačana pomoću čeličnih spregova. Ta je radnja provedena kako bi se poboljšala njena seizmička otpornost. Na kraju je ocijenjeno ponašanje obje varijante zgrade te su definirani međukatni pomaci.

Nakon modalne analize određeni su prvi periodi vibracija i odgovarajući koeficijenti aktivirane mase. Kako se moglo i očekivati, vrijednosti perioda smanjile su se nakon pojačanja čeličnim spregovima. Nakon toga su prema oba propisa izračunan ciljni pomaci te je do tih vrijednosti provedeno naguravanje zgrade kako bi se definirale granice oštećenosti konstrukcijskih

elemenata. Prema rezultatima analize provedene primjenom tih propisa, najviše vrijednosti koeficijenta oštećenosti konstrukcijskih elemenata ostvaruju se na prvim etažama. Na višim su etažama zabilježene niže vrijednosti oštećenosti.

Na temelju rezultata nelinearne analize može se zaključiti da propis TBEC-2018 nudi konzervativnije rezultate u usporedbi s normom ASCE 7-16. Kada se ocjenjuju granice oštećenosti prema propisu TBEC-2018, može se uočiti da razina sigurnosti života nije ostvarena za određeni broj konstrukcijskih elemenata. Dok je prema propisu TBEC-2018 za ukupno 36 stupova i 8 greda ostvarena razina sprečavanja rušenja u smjeru  $y$  postojeće zgrade, takva razina oštećenosti ostvarena je za 26 stupova i četiri grede prema normi ASCE 7-16.

Zadatak je bio pojačati postojeću AB okvirnu zgradu čeličnim spregovima kako bi se poboljšalo njeno neelastično ponašanje

te postigla odgovarajuća stabilnost i bočna krutost. Pojačana je zgrada analizirana još jednom kako bi se odredila oštećenost konstrukcijskih elemenata. Kada su koeficijenti oštećenosti konstrukcijskih elemenata ocijenjeni prema oba propisa, za većinu greda i stupova utvrđena je razina brze useljivosti. Osim toga, nakon pojačanja, niti jedan konstrukcijski element nije prekoračivao razinu sigurnosti života.

Kako bočni pomaci dovode do znatnih oštećenosti konstrukcijskih elemenata, analizirani su i međukatni pomaci kao jedan od najznačajnijih parametara u analizi baziranoj na ponašanju. Međukatni pomaci izračunani su za svaki smjer postojeće zgrade i pojačane zgrade. Utvrđeno je da su međukatni pomaci bitno manji nakon primjene čeličnih spregova. U zaključku se može naglasiti da ovaj rad može biti od koristi istraživačima koji proučavaju nelinearno ponašanje i postupke pojačanja građevinskih konstrukcija.

## LITERATURA

- [1] Mosleh, A., Rodrigues, H., Varum, H., Costa, A., Arede, A.: Seismic behavior of rc building structures designed according to current codes, *Structures*, 7 (2016), pp. 1-13.
- [2] Aksoylu, C., Mobark, A., Arslan, M.H., Erkan, İ.H.: A comparative study on ASCE 7-16, TBEC-2018 and TEC-2007 for reinforced concrete buildings, *Revista de la Construcción*, 19 (2020) 2, pp. 282-305.
- [3] Erdem, R.T.: Performance evaluation of reinforced concrete buildings with softer ground floors, *Građevinar*, 68 (2016) 1, pp. 39-49, <https://doi.org/10.14256/JCE.1133.2014>
- [4] Rajendran, R., Sai, K.P., Chandrasekar, B., Gokhale, A., Basu, S.: A comparative study of design base shear for rc buildings in selected seismic design codes, *Earthquake Spectra*, 28 (2012) 3, pp. 1047-1070.
- [5] Santos, C.H.S., Zanaica, L., Bucur, C., Lima, S.S., Arai, A.: Comparative study of codes for seismic design of structures, *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 9 (2013) 1, pp. 5-15.
- [6] Raju, K.M., Cinitha, A., Iyer, N.G.: Seismic performance evaluation of existing RC buildings designed as per past codes of practice, *Sadhana*, 37 (2012) 2, pp. 281-297.
- [7] Zou, X.K., Chan, C.M.: Optimal seismic performance-based design of reinforced concrete buildings using nonlinear pushover analysis, *Engineering Structures*, 27 (2005) 8, pp. 1289-1302.
- [8] Arteta, C.A., Moehle, J.P.: Seismic performance of a building subjected to intermediate seismic shaking, *ACI Structural Journal*, 115 (2018) 2, pp. 299-309.
- [9] Gunes, B., Cosgun, T., Sayin, B., Mangir, A.: Seismic performance of an existing low-rise RC building considering the addition of a new storey, *Revista de la Construcción*, 18 (2019) 3, pp. 459-475.
- [10] Fawad, A.N.: Nonlinear static analysis procedures for seismic performance evaluation of existing buildings – evolution and issues, *International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Technology"*, Egypt, (2017), pp. 180-198.
- [11] Golghate, K., Vijay, B., Amit, S.: Pushover analysis of 4 storey's reinforced concrete building, *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, 2 (2013), 80-84.
- [12] Dumar, R., Rodrigues, H., Varum, H.: Comparative study of seismic strengthening of RC buildings by steel bracings and concrete shear walls, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10 (2018), pp. 439-464.
- [13] Abou-Elfath, H., Ramadan, M., Alkanai, F.O.: Upgrading the seismic capacity of existing RC buildings using buckling restrained braces, *Alexandria Engineering Journal*, 56 (2017) 2, pp. 251-262.
- [14] Furtado, A., Rodrigues, H., Varum, H., Costa, A.: Evaluation of different strengthening techniques' efficiency for a soft storey building, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21 (2017) 4, pp. 371-388.
- [15] Dere, Y.: Assessing a retrofitting method for existing rc buildings with low seismic capacity in Turkey, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31 (2017) 2, pp. 1-17.
- [16] Erdem, R.T.: Non-linear performance analysis of existing and concentric braced steel structures, *Steel and Composite Structures*, 19 (2015) 1, pp. 59-74.
- [17] Karal, K.: Investigation of seismic performance and strengthening of an existing reinforced concrete building according to TBEC-2018, M.Sc. Thesis, (2021), Manisa Celal Bayar University, Manisa, Turkey.
- [18] Brandonisio, G., Toreno, M., Grande, E., Mele, E. and De Luca, A.: Seismic design of concentric braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 78 (2012), pp 22-37.
- [19] Qiu, C.X., Zhu, S.: Performance-based seismic design of self-centering steel frames with sma-based braces, *Engineering Structures*, 130 (2017) 1, pp. 67-82.
- [20] Al-Mashaykhi, M., Rajeev, P., Wijesundra, K.K., Hashemi, M.J.: Displacement profile for displacement based seismic design of concentric braced frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 155 (2019), pp 233-248.
- [21] Karamanci, E., Lignos, D.G.: Computational approach for collapse assessment of concentrically braced frames in seismic regions, *Journal of Structural Engineering*, 140 (2014) 8, pp. 1-15.
- [22] Turkish Building Earthquake Code-2018, Specifications for design of buildings under seismic effects. Ankara, (2018).

- [23] ASCE 7-16, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, (2017).
- [24] SAP2000, Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual, Computers and Structures Inc. Berkeley.
- [25] Turkish Standard-498, Design loads for buildings. Ankara, (1997).
- [26] Alashker, Y., Nazar, S., Ismaiel, M.: Effects of building configuration on seismic performance of rc buildings by pushover analysis. *Open Journal of Civil Engineering*, 5 (2015), pp. 203-213.
- [27] Tran, T.T., Hussan, M., Kim, D., Nguyen, P.C.: Distributed plasticity approach for the nonlinear structural assessment of offshore wind turbine. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12 (2020), pp. 743-754.
- [28] İnel, M., Özmen, H.B.: Effect of plastic hinge properties in non-linear analysis of reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, 28 (2006) 11, pp. 1494-1502.
- [29] ASCE 41-13, Seismic evaluation and retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers, (2014).
- [30] Kovacevic, M.S., Juric-Kacunic, D.: European soil classification system for engineering purposes, *Građevinar*, 66 (2014) 9, pp. 801-810, <https://doi.org/10.14256/JCE.1077.2014>