

Primljen / Received: 29.11.2021.

Ispravljen / Corrected: 29.5.2022.

Prihvaćen / Accepted: 12.6.2022.

Dostupno online / Available online: 10.7.2022.

# Seizmički odgovor naknadno prednapetih posmičnih zidova – Outtrigger sustava ukruta

## Autori:



Prof.dr.sc. **Mohamed Husain**, dipl.ing.grad.  
Sveučilište Zagazig, Zagazig, Egipat  
Tehnički fakultet, Odjel za konstrukcije  
[Mo\\_husain2000@yahoo.com](mailto:Mo_husain2000@yahoo.com)



Prof.dr.sc. **Hilal Hassan**, dipl.ing.grad.  
Sveučilište Zagazig, Zagazig, Egipat  
Tehnički fakultet, Odjel za konstrukcije  
[hilalcivil@yahoo.com](mailto:hilalcivil@yahoo.com)



Prof.dr.sc. **Heba A. Mohamed**, dipl.ing.grad.  
Sveučilište Zagazig, Zagazig, Egipat  
Tehnički fakultet, Odjel za konstrukcije  
[hebawahbe@yahoo.com](mailto:hebawahbe@yahoo.com)



**Eman Saeed Elgharbawy**, dipl.ing.grad.  
Viši institut za inženjerstvo i tehnologiju, Belbeis,  
Egipat  
[em412019@gmail.com](mailto:em412019@gmail.com)  
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Mohamed Husain, Hilal Hassan, Heba A. Mohamed, Eman Saeed Elgharbawy**

## Seizmički odgovor naknadno prednapetih posmičnih zidova – Outtrigger sustava ukruta

Ovo je istraživanje nastalo kao kombinacija dvaju konstrukcijskih sustava, a to su naknadno prednapeti zidovi jezgre i sustav ukrute (Outtrigger) u zgradi sa 40 katova. Primijenjen je Vierendeelov sustav ukrute na jednom katu i na dva kata te su uspoređeni modeli kako bi se saznali najbolji položaji ukrutnih sustava. Jednako tako, proučen je utjecaj naknadno prednapetih zidova jezgre na samo 25 % visine zgrade. Usvojen je najbolji položaj Vierendeelovih sustava ukrute s naknadno prednapetim zidovima jezgre na samo 25 % visine zgrade. Rezultati su pokazali poboljšanje lateralne krutosti uporabom sustava ukrute, a pomak vrha se umanjio za 42 %. Utjecaj naknadno prednapetih zidova jezgre na umanjjenje pomaka vrha je 14 %. Utjecaj oba sustava na umanjjenje pomaka vrha je 50 %.

### Ključne riječi:

sustav ukrute (Outtrigger), naknadno prednapeti posmični zidovi, vremenski zapis potresa, seizmički odgovor

Research Paper

**Mohamed Husain, Hilal Hassan, Heba A. Mohamed, Eman Saeed Elgharbawy**

## Seismic response of post-tension shear walls – Outtrigger structure

This research was conducted by combining two structural systems: post-tensioned core walls and an outrigger in a 40-story building. A Vierendeel outrigger system was applied to one and two stories, and a comparison between models was performed to determine the best outrigger locations. In addition, the effect of post-tensioned core walls at only 25 % of the building height was investigated. Subsequently, the best positions of the Vierendeel outrigger system were applied with bonded post-tension core walls at a building height of only 25 %. The results showed an improvement in lateral stiffness using the outrigger, and roof displacement was enhanced by approximately 42 %. The post-tension core walls enhanced roof displacement by approximately 14 %. Both systems worked together to reduce roof displacement by approximately 50 %.

### Key words:

Outtrigger system, post-tension shear walls, time history earthquake, seismic response, Midas-Gen software program

## 1. Uvod

Visoke zgrade, posebno neboderi, imaju svoj vlastiti razvojni konstrukcijski sustav koji se razlikuje od uobičajenih konstrukcijskih sustava. U slučaju kad djeluju lateralna opterećenja na zgradu, zgrada se ponaša kao konzola koja je upeta u temelj, a povećanjem visine, povećava se i deformacija konzole čime se dobiva velik moment pri dnu [1, 2]. Iz tog razloga unutarnja jezgra i posmični zidovi nemaju dovoljno kapaciteta da preuzmu pomak vrha i ne mogu reducirati međukatne pomake. Zbog toga je potrebno ili povećati dimenzije unutarnje jezgre ili povećati broj posmičnih zidova, iako nijedno vjerojatno neće umanjiti štetu izazvanu djelovanjem potresa i bit će skupo. Iz tog razloga idealno rješenje mogla bi biti primjena razvojnih konstrukcijskih sustava ukruta poput "Outrigger" sustava i naknadno prednapetog betona.

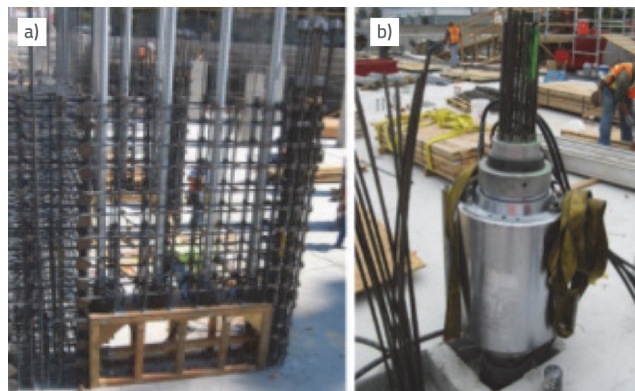
Outrigger sustav ukrute utječe na poboljšanje otpornosti visoke zgrade na djelovanje potresa te smanjuje štetu izazvanu potresom. Taj sustav ukrute povezuje vanjske stupove s unutrašnjom središnjom jezgrom i omogućuje njihovo zajedničko djelovanje. Kad lateralna opterećenja uzrokuju moment i rotaciju središnje jezgre, te sile žele pomicati ukrutni sustav gore i dolje, no vanjski stupovi kontroliraju taj pokret i proizvode suprotne sile. Te sile pomažu da se promijeni smjer pomaka ukrutnog sustava i proizvede reverzibilno posmični utjecaj kata na jezgru, a to rezultira smanjenjem momenta i rotacije jezgre [3].

## 2. Pregled prethodnih istraživanja vezanih uz ukrutne sustave i naknadno prednapinjanje

Dosadašnji istraživači bavili su se sustavima nosača u obliku čeličnih ukruta ili betonskih visokih nosača. Osim toga, sustavi ukrute razlikovali su se cijelom visinom zgrade kada su se primjenjivali na jeda, dva ili tri kata kako bi odredili kat s najboljim položajem sustava ukrute koji bi pružio otpor na djelovanje potresa [4, 5]. U svojem istraživanju 2020. godine, Khandelwal i Singh [6] ispituju ponašanje čeličnog sustava ukrute nosača na djelovanje potresa rešetkastog sustava [X, V i M] te uspoređuju ta tri oblika na više mjesta raspoređenih po čitavoj visini zgrade. Kako bi se otkrio najbolji položaj, koristili su sustav ukrute u obliku rešetkastog nosača i to u različitim položajima na 10., 15. i gornjim katovima zgrade od 30 katova. Osim toga, primijenili su dvostruku rešetkastu ukrutu koji ima funkciju dvostrukog prenošenja opterećenja na zgradi od 45 katova, i to na 15. i 30. katu, te rešetkastu ukrutu koja ima funkciju trostrukog prenošenja opterećenja u zgradi od 60 katova, i to na 15., 30. i 45. katu. Svi su modeli bili istih dimenzija kvadratnoga tlocrta, mjera 35 m x 35 m. Ispitano je ponašanje modela primjenjujući metodu spektralne analize u programu E-tabs. Rezultati istraživanja navedenih autora temeljeni su na vrijednostima maksimalnog pomaka, pomaku pojedinog kata te na rotacijama. Nakon analize zaključili su da je sustav ukrute u obliku rešetkastog nosača, a koji ima funkciju prenošenja opterećenja u obliku slova X, najučinkovitiji oblik čeličnog sustava ukrute. Najbolji položaj za sustav ukrute

s jednim nosačem bio je na 0,5H ili na 15. katu. Kada se broj sustava ukruta povećao, krutost zgrade se povećala zato što je trostruki sustav ukruta pružio najbolje rezultate u rasponu od 33,69 %. Gawate i dr. [7] proširili su istraživanje određivanjem kata s optimalnim sustavom ukruta kada se koristio kao visoki gredni nosač u zgradi ukupne visine 111 m. Primijenili su sustav ukruta na jedan i dva kata u dva slučaja. U prvom slučaju, jedan je sustav ukrute fiksiran na 28. katu, a drugi je mijenjan ovisno o visini. U drugom slučaju, razmak između dvaju sustava ukrute iznosio je 0,333H. Ispitan je odgovor modela na djelovanje potresa primjenom metode spektralne analize u programu E-tabs. Rezultati istraživanja dani su u odnosu na pomak kata. Svi su modeli imali kvadratni tlocrt, a u obzir su uzete promjene u veličinama stupova i posmičnih zidova. Nakon analize otkrili su da je 0,47H najbolja lokacija za sustav s jednim sustavom ukrute. 0,3H i H bili su najbolji položaji za sustav ukrute u prvom slučaju, a 0,333H i 0,666H bili su najbolji položaji u drugom slučaju.

Naknadno prednapeti beton prikladan je sustav za povećanje krutosti visokih zgrada u slučaju potresa. Prijašnji istraživači ispitivali su utjecaj prethodno prednapetih greda i ploča, a samo je nekolicina nedavno ispitala koliko je učinkovito naknadno predapinjanje u posmičnim zidovima. Naknadno predapinjanje posmičnih zidova provodi se ugradnjom vrlo tanke cijevi, promjera neznačajno većega od promjera natege koja će se umetnuti u cijev. Nakon očvršćivanja betona natege se prednapinju do željene razine upotrebom hidrauličnih uređaja te se sidre u beton temelja i krajnjeg kata primjenom sidra. Ta metoda može biti spregnuta i nespregnuta. Kod nespregnutog sustava, naprežanja koja savijanjem natega daju radijalni tlak prenose se krajnjim sidrima, ne sprežanjem, za razliku od spregnutih natega [8]. Stevenson i suradnici [9] dokazali su i prikazali fotografijama s gradilišta tehniku naknadnog predapinjanja. To je dokumentacija o poslovnoj četverokatnici s naknadnim predapinjanjem jezgre u obliku slova C te ploče s naknadnim predapinjanjem. Naknadno prednapete natege primijenjene su na pojasima jezgre. Oni su ugradili natege sidrenim blokom na dnu zidova kao što je prikazano na slici 1a. Nakon predapinjanja natega primjenom hidraulične preše s više natega, kao što je prikazano na slici 1b, betonirali su sidrene blokove i zidovi su postali kompaktni.



Slika 1. a) Sidreni blok u dnu PT jezgre; b) Hidraulična preša s više natega [9]

Shatnawi dr. [10] proveli su istraživanje 2018. kako bi ispitali ponašanje posmičnih zidova u naknadnom prednapinjanju izloženoga potresu i dobili veliku lateralnu deformaciju zgrada bez sloma. Zbog toga su u programu ABAQUS usporedili ponašanje pet tipova betonskih posmičnih zidova izloženih lateralnom cikličnom opterećenju. Prvi je tip zida (zid A) bio običan zid ili s armaturnim čelikom te bez natega za naknadno prednapinjanje. Ostala tri tipa bili su hibridni posmični zidovi s naknadnim prednapinjanjem s istim brojem natega, ali su razlike bile u površini čelika za naknadno prednapinjanje i površini armaturnog čelika. Natege su razreda 270, s nategama od sedam žica i pripadnim karakteristikama prema ASTM-u [11]. Posljednji je tip bio zid s naknadno prednapetim nategama ali bez armaturnog čelika. Svaki je model zida primijenjen na šesterokatni model zgrade čiji je tlocrt bio dimenzija 30 m x 27 m i ukupne visine 18 m. Rezultati istraživanja nastali su na temelju pet graničnih stanja koja su prikazana na grafu posmičnih pomaka vrha u odnosu na bazu za pet zidova, a to su dekompresija, dostizanje granice popuštanja armaturnog čelika i čelika za prednapinjanje, linearnog graničnog pomaka vrha u odnosu na bazu te drobljenje betona. Analizom su otkrili da je nespregnuti naknadno prednapeti posmični zid imao velik nelinearni lateralni pomak bez dostizanja granice popuštanja natega. Povećanjem površine prednapete armature smanjila se elastičnost. Uočeno je također i to da se povećanjem omjera između površine naknadno prednapetih natega i površine armaturnog čelika povećala dekompresija, ali su se smanjile vrijednosti baznog posmika pri dostizanju granice popuštanja meke armature i smanjila se trajna deformacija, a poboljšao se kapacitet.

### 3. Metodologija

Cilj je ovog istraživanja kombinirati dva sustava, tj. sustav ukrute (Outrigger) i sustav naknadno prednapetih posmičnih zidova u 40-katnici kako bi visoka zgrada pretrpjela potrese s minimalnom štetom. Ponašanje na utjecaj potresa ispitan je primjenom nelinearnog dinamičkog postupka ili metode zapisa u vremenu, a to je najtočniji i najpouzdaniji pristup seizmičke analize. Zgrada je izložena stvarnom potresu koji je zabilježen u programu Midas. Postupci pomoću koji se došlo do rezultata istraživanja su slijedeći:

1. Nacrtati konstrukcijski sustav i odrediti materijale referentnog modela koji ima 40 katova u programu MIDAS-GEN.
2. Zadati opterećenja, a to su stalno opterećenje, promjenjivo opterećenje te 0.356g zapisa potresa El-Centro.
3. Analizirati model i pribaviti rezultate modela koji uključuju lateralni pomak vrha, lateralni katni pomak, indeks pomaka, osnovni period i moment na dnu.
4. Dodavati Vierendeelov sustav ukrute modelu na jednom i na dva kata crtanjem greda koje su pričvršćene na zidove središnje jezgre te na vanjske stupove s gredama u sredini, kao što to prikazuje slika 6a. i kako se preporučuje u [12, 13].
5. Analizirati modele sustava ukrute izloženih istim trajnim i

lateralnim opterećenjima.

6. Usporediti referentni model i model sustava ukrute skiciranjem rezultata u obliku grafova i tablica čime se izabire najbolji položaj.
7. Dodati naknadno prednapete spregnute natege u zidovima središnje jezgre na prvih deset katova [25 % visine zgrade] na granice zidova i to određivanjem profila natega, svojstva natega i sile naknadnog prednapinjanja.
8. Analizirati modele s naknadnim prednapinjanjem izložene istim trajnim i lateralnim opterećenjima.
9. Napraviti model kombiniranjem obaju sustava koji će pokazati najbolje položaje za Vierendeelov sustav ukrute i vezane središnje zidove jezgre u naknadnom prednapinjanju na samo 25 % visine zgrade s 40 katova te ga analizirati pod utjecajem istih stalnih i lateralnih opterećenja.
10. Usporediti rezultate referentnog modela s naknadno prednapetim modelom te s modelom koji kombinira sustave.
11. Komentirati sve rezultate.

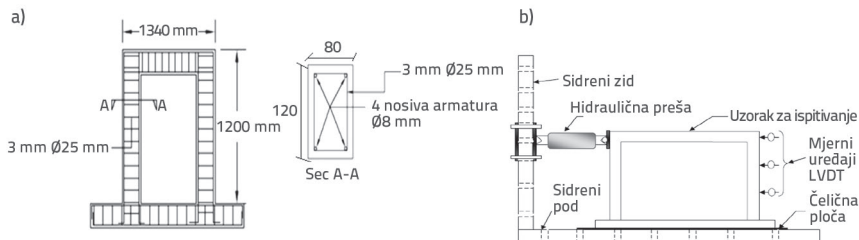
### 4. Analiza u programu Midas-Gen

Midas-Gen je napredni program metodom konačnih elemenata koji raspolaže velikim skupom podataka vezanih uz otprilike 30 zapisa potresa od 1940. do 1990., a korisnik može unijeti bilo koji podatak vezan uz potres u program kako bi se proučio utjecaj stvarnog potresa na visoku zgradu u 3D-u. Program može predvidjeti ponašanje kod velikih pomaka visokih zgrada u 3D-u uzimajući u obzir geometrijsku i materijalnu nelinearnost. Jednako tako, u programu se može analizirati naknadno prednapeti beton određivanjem materijala natega naknadnog prednapinjanja, modeliranjem cijevi u presjeku, određivanjem sile prednapinjanja, određivanjem profila i oblika natega te uzimajući u obzir gubitke koji nastanu kod naknadnog prednapinjanja [14].

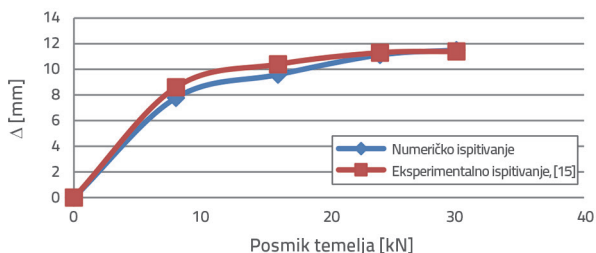
### 5. Verifikacija

#### 5.1. Verifikacija s eksperimentom

Cilj je ove provjere proučiti preciznost ponašanja modela pod utjecajem potresa i to simulacijom i analizom eksperimentalnog rada koji su proveli Paul i Agarwal [15] u programu Midas te su usporedili rezultate programa s rezultatima dobivenim eksperimentom. Oni su eksperimentalno ispitali armirani betonski okvir bez ispune zida pod utjecajem seizmičkog opterećenja metodom postupnog guranja. Okvir je bio pravokutnog oblika čija je visina iznosila 1200 mm, a raspon 1260 mm, kao što prikazuje slika 2a. Koristili su servohidraulične preše kako bi se polako opteretio okvir koji je bio pričvršćen u laboratoriju na čeličnu ploču radi izbjegavanja deformacija materijala. Primijenjen je razmješteni LVDT sustav kako bi se izmjerila krivulja kapaciteta modela izloženog djelovanju opterećenja metodom postupnog guranja, kao što prikazuje slika 2b., [15]. Isti se model analizirao u programu Midas-Gen



Slika 2. a) Detalji armature laboratorijskog modela; b) Postav laboratorijskog modela, [15]



Slika 3. Kombinacija numeričkih i eksperimentalnih krivulja kapaciteta [15]

Tablica 1. Eksperimentalna krivulja kapaciteta dobivena metodom guranja [15] te vrijednosti numeričke krivulje kapaciteta dobivene metodom guranja

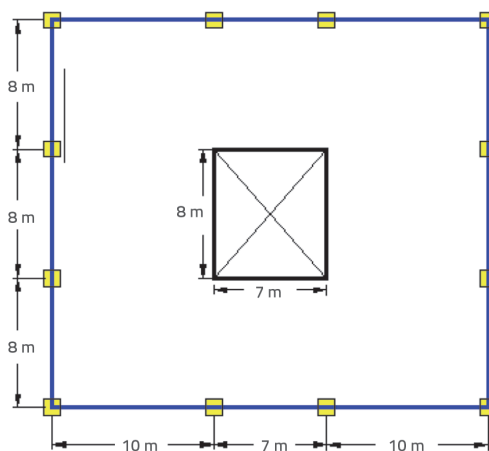
Lateralna sila [kN]	Eksperimentalni pomak [mm]	Numerički pomak [mm]	Razlika između vrijednosti
0	0	0	0
8,2	8,6	7,8	9,5 %
16,3	10,4	9,6	7,8 %
24,5	11,3	11,1	1,5 %

koji je bio izložen djelovanju seizmičkog opterećenja metodom postupnog guranja [16] koja se provela u skladu s ASCE (Američko društvo građevinskih inženjera), a kombinacija opterećenja provedena je u skladu s kodom [15], [17]. Na slici 3. i u tablici 1. prikazana je usporedba eksperimentalne i numeričke krivulje kapaciteta, gdje se vidi 10 % maksimalne razlike između vrijednosti eksperimentalnih i numeričkih krivulja kapaciteta. To znači visoku točnost numeričkih rezultata.

### 5.2. Provjera i numerički rad

Drugu verifikaciju s numeričkim radom proveli su Kamath i suradnici 2012. godine [18]. Oni su u programu E-tabs ispitali visoku zgradu s 40 katova pod djelovanjem zapisa potresa El-Centro s odzivom u vremenu s 0,386g PGA. Referentni model bio je 140 m čija je

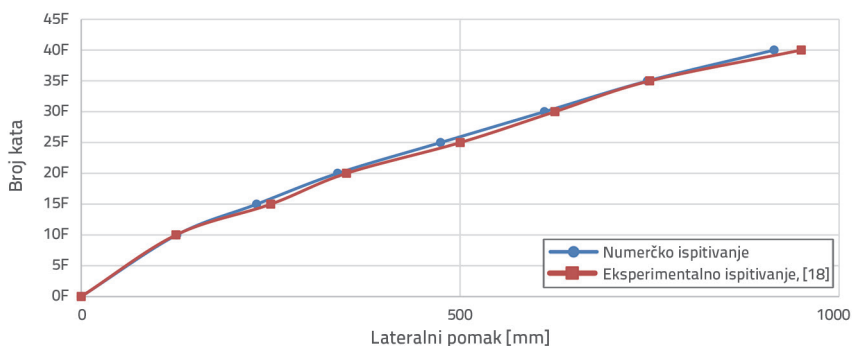
visina kata iznosila uobičajenih 3,5 m. Tlocrtni oblik je 24 x 27 m sa središnjom jezgrom 7 m x 8 m te debljine 300 mm kao što je prikazano na slici 4. Pretpostavlja se da su grede, stupovi i zidovi jezgre betonske konstrukcije C250. Analizom su obuhvaćene veličine stupova 750 x 750 mm, odnosno veličine greda 230 x 450 mm. Isti se model proučava u programu Midas-Gen. Slika 5. i tablica 2. prikazale su usporedbu eksperimentalnog i numeričkog modela pomaka kata. Tablica 2. i slika 5. pokazale su 7,4 % maksimalne razlike između vrijednosti numeričkog pomaka kata.



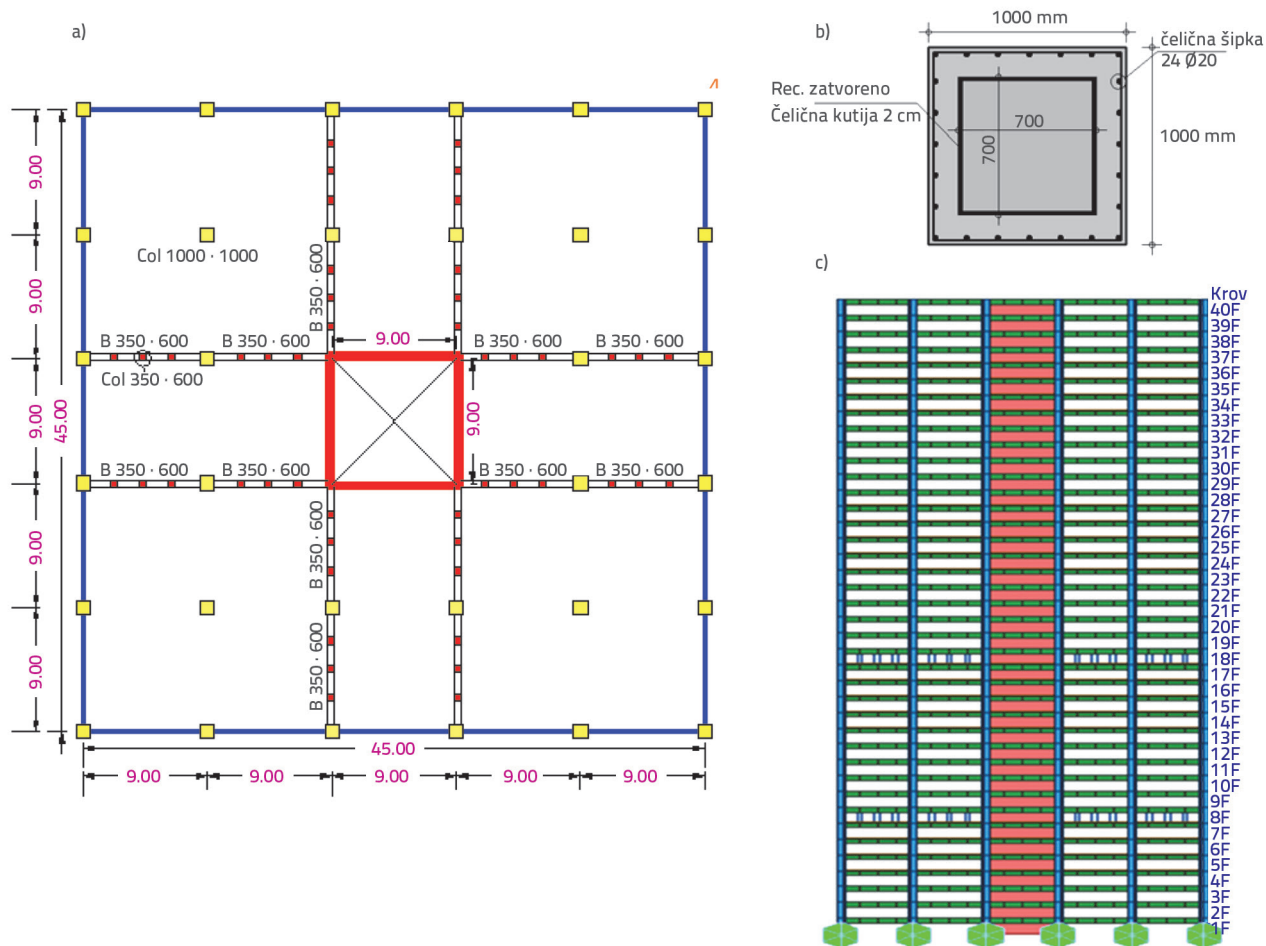
Slika 4. Tlocrt modela autora Kamatha i dr. (2012.) [18]

Tablica 2. Usporedba pomaka kata između numeričke analize i vrijednosti pomaka [18]

Kat br.	Pomak dobiven numeričkom analizom [mm]	Pomak dobiven u istraživanju Kamatha i dr. [18] [mm]	Razlika između vrijednosti
15	231,4	250	7,4 %
20	338,2	350	3,4 %
25	474,1	500	5,2 %
30	611,2	625	2,2 %
40	914,2	950	3,8 %



Slika 5. Usporedba pomaka kata između numeričke studije i vrijednosti pomaka prema istraživanju [18]



Slika 6. a) Tlocrt Vierendeelova sustava ukrute; b) Detalji ojačanja kompozitnih stupova; c) Presjek (8. i 18.) na modelu katnog sustava ukruta

## 6. Izgled modela

Usporedbom 3D modela zgrade s 40 katova utvrđena je razlika u konstrukcijskom sustavu, iako su bile identičnih dimenzija tlocrta koji su iznosili 45 x 45 m. Tlocrt je simetričan, udaljenost između središta stupova i kvadratne središnje jezgre dimenzija 9 x 9 m iznosi 9 m. Ukupna visina modela iznosi 120 m, a svi su katovi visoki uobičajena 3 m. Definirana su četiri materijala modela: beton, armaturne šipke, kompozitni materijal i čelik velike čvrstoće za naknadno prednapinjanje. Tablica 4. prikazuje svojstva materijala. Usvajaju se nelinearna ponašanja materijala u programu Midas-Gen, kao što to prikazuju slike 9. i 10., a koja uvelike variraju zbog opterećenja i svojstava materijala. Izračunan je koeficijent armiranja za svaki element koji je uzet kao stalna vrijednost za sve modele, a to je u skladu s egipatskom normom za armirani beton [19]. Tablica 3. prikazuje veličine presjeka elemenata modela. Modeli su:

- Obični konstrukcijski sustav modela bez sustava ukrute i posmičnog zida s naknadnim prednapinjanjem uzet je u obzir kao referentni model.
- Jednokatni modeli Vierendeelovog sustava ukrute spojen je između zidova jezgre u središtu zgrade i rubnih stupova

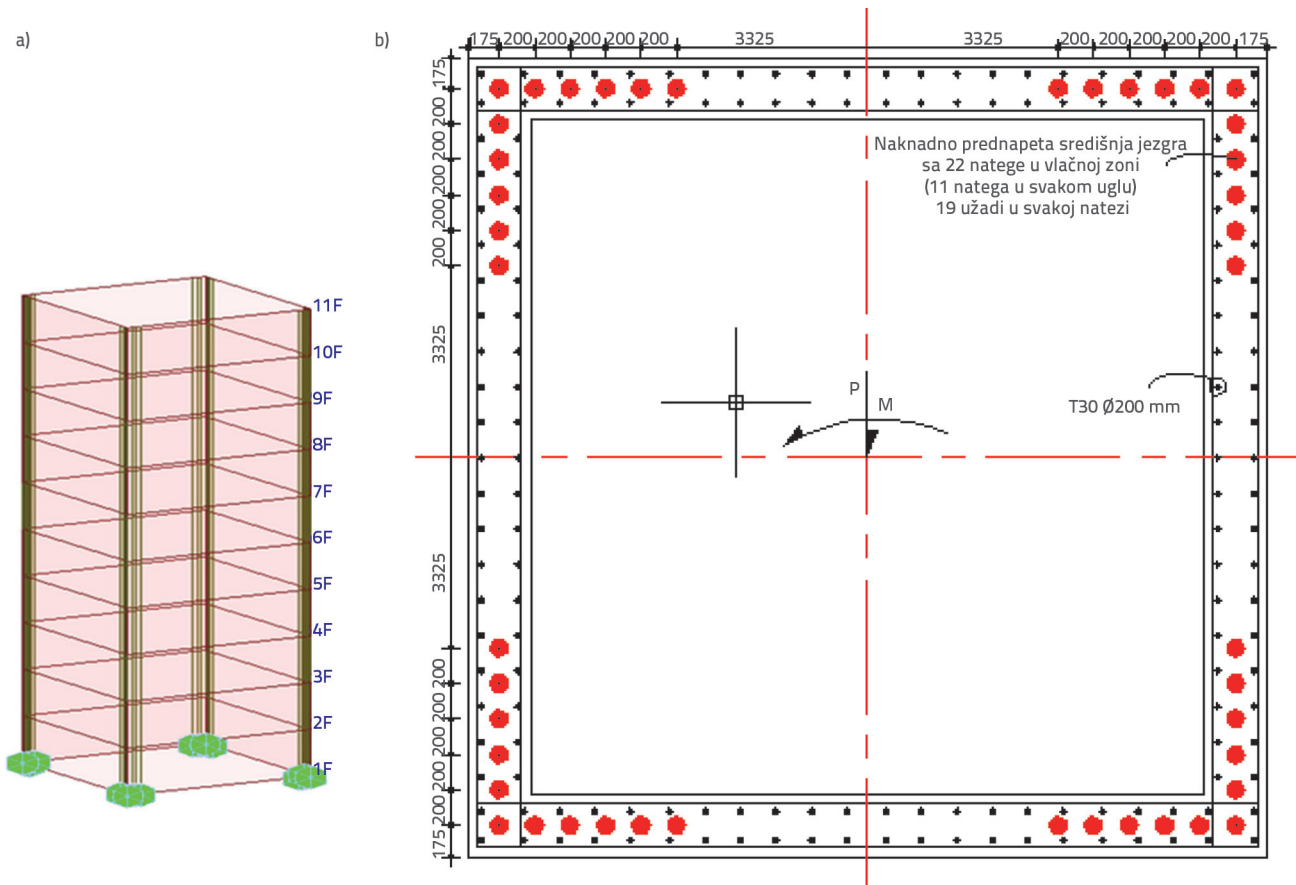
kao što je prikazano na slici 6a. Prema [12, 13], Vierendeelov sustav ukrute dodan je na osmom, 18., 30. i 40. katu. Tablica 3. prikazuje dimenzije elemenata Vierendeelovog sustava ukrute.

- Modeli Vierendeelovog sustava ukrute između dva kata koji povezuju katove na (8. i 18.), (8. i 30.) te (18. i 30.) katu kao što prikazuje slika 6c.
- Modeli Vierendeelovog sustava ukrute između dva kata koji povezuju katove na (8. i 40.), (18. i 40.) te (30. i 40.) katu.
- Model s usidrenim nategama naknadnog prednapinjanja primijenjen je na zidove jezgre na samo 25 % visine zgrade koja ima 40 katova. Usidrene natege naknadnog prednapinjanja kontroliraju se i prednapinju u temeljima i na sidrenim blokovima zidova jezgre na 10. katu upotrebom krajnjih sidara nakon očvršćivanja betona, kao što prikazuje slika 1.a.

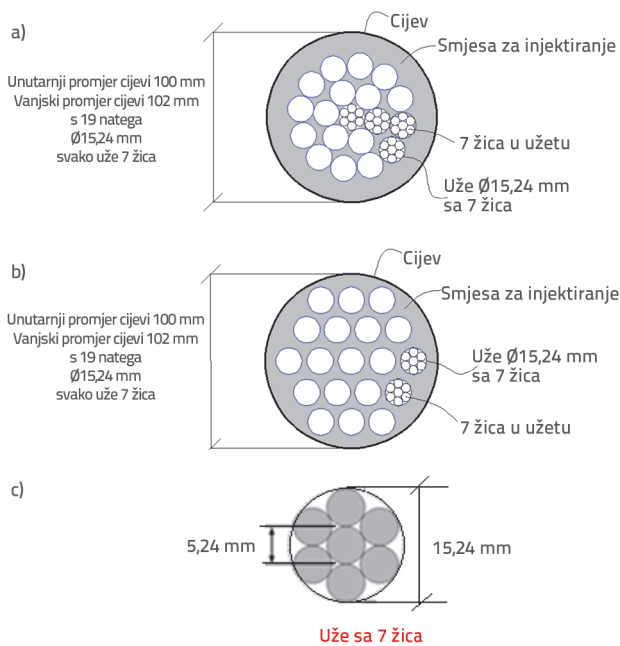
U skladu s egipatskom normom [19] izračunana je ukupna površina natega naknadnog prednapinjanja.

$$A = \frac{P_j \cdot 1000}{\text{jacking stress}} = 52974 \text{ mm}^2$$





Slika 7. a) Prikaz prednapinjanja naknadnog prednapinjanja zida jezgre kroz 10 katova zgrade koja ima 40 katova; b) Prikaz presjeka zidova naknadno prednapete jezgre



Slika 8. a, b): Poprečni presjek natega s 19 užadi, svako uže sa sedam žica; c): Poprečni presjek užeta sa 7 žica, a promjer svake žice iznosi 5,24 mm

Natege su postavljene ravno unutar usidrenih cijevi koje su unutarnjeg promjera 100 mm te vanjskog promjera 102 mm, i to na način da je 11 natega bilo na svakom kutu jezgre kao što prikazuju slike 7.a i 7.b. Svaka je natega imala 19 užadi kao što je prikazano na slikama 8.a i 8.b. Promjer užeta iznosi 15,24 mm, a svako uže ima sedam žica kao što prikazuje slika 8.c. Granična čvrstoća čelika za naknadno prednapinjanje iznosi 1860 MPa, a granica popuštanja 1670 MPa.

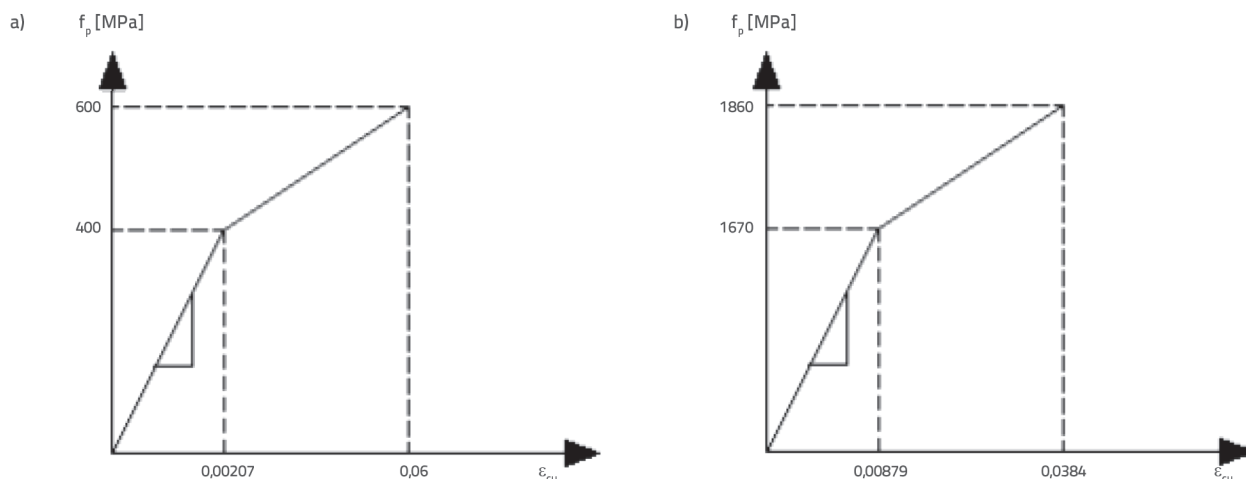
Najbolje rezultate dao je model s kombiniranim konstrukcijskim sustavom te s najboljom lokacijom za Vierendeelov sustav ukruta i naknadno prednapetim nategama kojima se prednapinju zidovi jezgre na samo 25 % visine zgrade koja ima 40 katova.

Tablica 4. Svojstva materijala

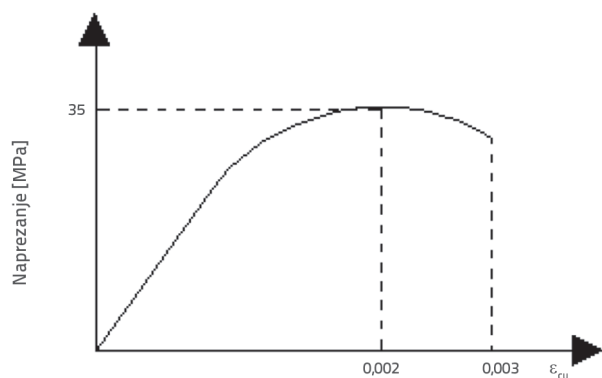
Stupovi		Kompozit 1000 x 1000
Debljina jezgre		350
Debljina ploče		Ravna 250
Rubne grede		300 x 900
Dimenzije sustava ukruta	Vierendeel	Grede 350 x 600 Podupirači 350 x 600
	Visoke grede	350 x 2700

Tablica 3. Dimenzije presjeka elemenata numeričkog modela [mm]

Svojstvo	Beton	Armaturna šipka	Kompozit	Čelik za naknadno prednapinjanje
Modul elastičnosti, E [MPa]	23503	200000	200000	190000
Poissonov koeficijent, $\nu$	0,200	0,303	0,303	0,303
Zapreminska težina [N/m <sup>3</sup> ]	24000	78600	78600	78600
Čvrstoća [MPa]	$f_{cu} = 35$	$f_{py} = 400$	$f_{py} = 360$	$f_{py} = 1670$
Deformacija	$e_{cu} = 0,003$	$e_{cu} = 0,00207$	$e_{cu} = 0,002$	$e_{cu} = 0,00879$



Slika 9. a) Radni dijagram armaturnih šipki; b) Radni dijagram prednapete armature

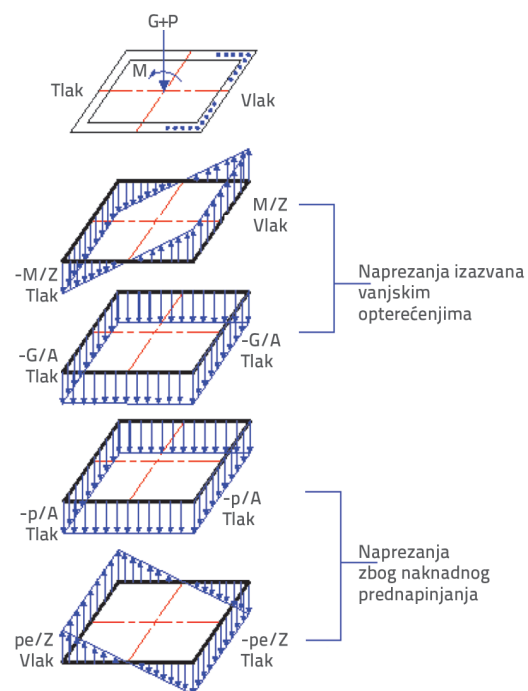


Slika 10. Radni dijagram betona

## 7. Opterećenje

Svi su modeli analizirani pod istim stalnim i horizontalnim opterećenjima. Program je automatski uzeo vlastitu težinu, a zadano je 2,5 kN/m<sup>2</sup> korisnog opterećenja kao površinskog tlačnog opterećenja. Utjecaj dinamičkog opterećenja analiziran je pod djelovanjem 0.356g seizmičkog djelovanja zapisa potresa El-Centro u trajanju od 56 sekundi. Osim toga, sila prednapinjanja ( $P_j$ ) zadana je nategama u modelu zida s naknadnim prednapinjanjem. Sila naknadnog prednapinjanja ( $P_j$ ) i sila naknadnog prednapinjanja nakon završnih gubitaka

( $P_j$ ) izračunane su u skladu s izrazom (1) koji prikazuje potpuno vlačno naprezanje u uporabnoj fazi, slika 11.



Slika 11. Raspodjela naprezanja u dnu prednapetih zidova jezgre s naknadnim prednapinjanjem

Jednadžba naprežanja u fazi uporabe:

$$\left[ \frac{-p_e}{A} - \frac{G}{A} \right] - \left[ \frac{p_e \cdot e}{Z} \right] + \left[ \frac{M}{Z} \right] = 0 \quad (1)$$

$$P_e = 58627,16 \text{ kN}$$

$$\text{Sila prednapinjanja, } P_j = \frac{P_e}{1 - \% \text{ smanjenje}} = \frac{56992,32}{0,85} = 68973,13 \text{ kN}$$

gdje je:

- G sila u jezgri pod djelovanjem gravitacijskih opterećenja [stalno+korisno] opterećenje,  $G = 122243,97 \text{ kN}$
- moment prednapinjanja,  $M = 696973,45 \text{ kN.m}$
- površina presjeka,  $A = (9 \times 0,35 \times 2) + (2 \times 0,35 \times 8,3) = 12,11 \text{ m}^2$
- moment otpora presjeka,  $z = (I_x / \gamma) = (151,26 / 4,5)$
- ekscentričnost,  $e = 3,325 \text{ m}$

## 8. Rezultati i rasprava

### 8.1. Krutost i osnovni periodi

Povećanje krutosti visoke zgrade glavni je zadatak ovog istraživanja kako bi se smanjila šteta na zgradi pod djelovanjem seizmičkog opterećenja. Povećanje i smanjenje krutosti zgrade uočava se određivanjem osnovnog perioda zgrade, na temelju izraza (2) i (3):

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (2)$$

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (3)$$

Kad se osnovni period smanji, krutost zgrade prema [20] povećava, gdje je:

$T_n$  - osnovni period koji je potreban zgradi kako bi dovršila jedan ciklus vibriranja izražen u sekundama pod djelovanjem seizmičkog opterećenja.

K - Krutost zgrade ili otpornost zgrade na deformaciju pod djelovanjem seizmičkog opterećenja kroz osnovni period

$\delta$  - deformacija zgrade ili oblici osciliranja zgrade kroz osnovni period pod djelovanjem seizmičkog opterećenja.

Osim toga, analizirani model ima nekoliko oblika osciliranja; svaki oblik osciliranja pojavljuje se u određenom periodu. Slijedeći analizu, u tablicama je prikazan osnovni period za prvi oblik osciliranja modela. Vrijednosti u tablici 5. i 6. pokazuju da je osnovni period modela koji imaju sustav s jednim sustavom ukrute na 18. katu i sustav ukruta na dva kata (8. i 18.) imaju najniži periodi u odnosu na sve modele koji imaju sustav ukrute. To podrazumijeva povećanje lateralne krutosti u tim modelima. Osim toga, vrijednosti u tablici 7. pokazuju da zgrada s kombiniranim sustavom ima

najniži osnovni period te najveću krutost u odnosu na sve ostale modele.

Tablica 5. Osnovni period modela s jednim sustavom ukrute

Vrsta modela	Osnovni period u sekundama
<b>Referentni model</b>	<b>5,99</b>
Sustav ukrute na 8. katu	5,8
Sustav ukrute na 18. katu	5,69
Sustav ukrute na 30. katu	5,82
Sustav ukrute na krovnom katu	5,92

Tablica 6. Osnovni period modela sa sustavom ukrute na dva kata

Vrsta modela	Osnovni period u sekundama
<b>Referentni model</b>	<b>5,99</b>
Sustav ukruta na (8. i 18.) katu	5,53
Sustav ukruta na (8. i 30.) katu	5,64
Sustav ukruta na (18. i 30.) katu	5,54
Sustav ukruta na (8. i 40.) katu	5,75
Sustav ukruta na (18. i 40.) katu	5,64
Sustav ukruta na (30. i 40.) katu	5,78

Tablica 7. Osnovni period modela različitih konstrukcijskih sustava

Vrsta modela	Osnovni period u sekundama
<b>Referentni model</b>	<b>5,99</b>
Model s naknadnim prednapinjanjem samo u središnjoj jezgri	5,81
Model s kombiniranim konstrukcijskim sustavima	5,38

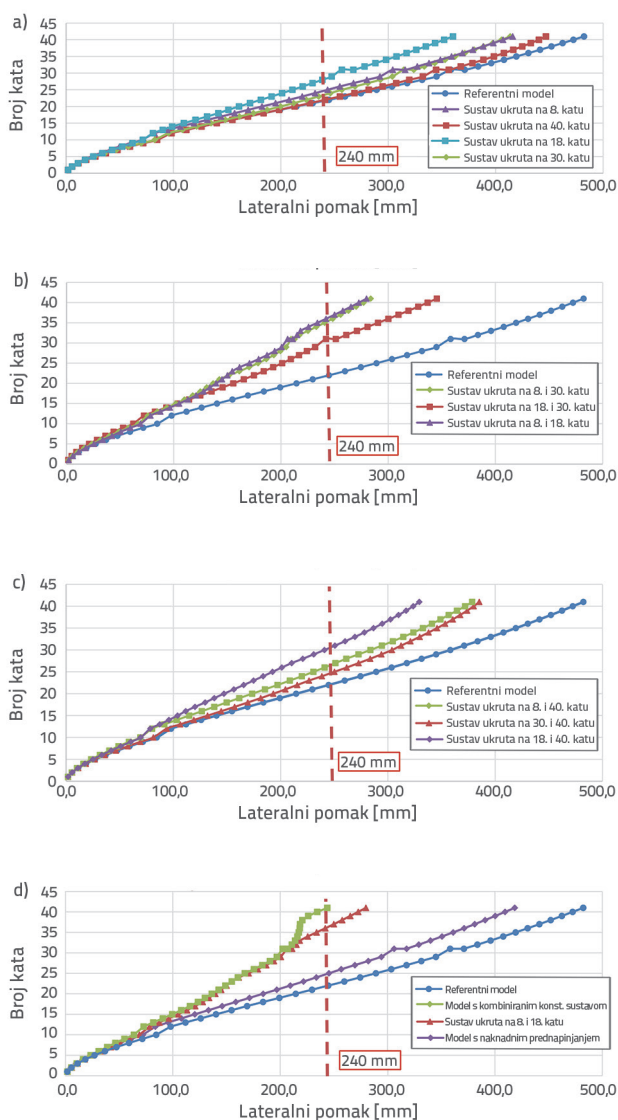
### 8.2. Pomak krova

Prema Indijskoj normi 456:2000 [21], dopušteni maksimalni pomak može se dobiti iz odnosa [visina zgrade od temelja do krovnog kata/500]. Iz toga proizlazi da je dopušteni maksimalni pomak 240 mm za zgradu visoku 120 m. Sustav prednapinjanja konstrukcijski je sustav koji pomaže smanjiti utjecaj bočnih opterećenja na zgrade stvaranjem momenta koji je suprotan momentu od djelovanja potresa. Ovaj postupak pomaže u povećanju krutosti zgrade te umanjuje ukupnu deformaciju zgrade pod utjecajem seizmičkog opterećenja.

Jednako tako, cjelokupni lateralni pomak zgrade umanjuje se primjenom sustava ukruta (outrigger) s jezgrom što povećava krutost zgrade. Prema izrazu (3), u prethodnom tekstu deformacija zgrade smanjuje se povećanjem krutosti zgrade. Nakon analize, a u usporedbi s referentnim modelom lateralnog pomaka kata, tablično je dan lateralni pomak kata za sve modele te je prikazan u obliku dijagrama.



Slike 12.a, 12.b i 12.c te tablice 8., 9. i 10. prikazuju vrijednosti lateralnog pomaka kata za modele sa sustavima ukruta. Usporedba vrijednosti pokazala je smanjenje pomaka vrha u vrijednosti od 25,3 % kad se doda sustav ukruta na 18. katu, odnosno 41,98 % kad se doda sustav ukruta na 8. i 18. katu u odnosu na referentni model. Slika 12.d i tablica 11. prikazuju vrijednosti lateralnih pomaka vrha za različite modele konstrukcijskih sustava. Usporedba vrijednosti pokazala je smanjenje pomaka vrha u vrijednosti od 13,23 % kad se doda naknadno prednapinjanje u zidovima jezgre na samo 25 % visine zgrade. Pomak vrha smanjio se 50 % primjenom kombiniranog konstrukcijskog modela, a čini ga sustav ukruta na 8. i 18. katu te naknadno prednapeti zidovi jezgre na 25 % visine zgrade.



Slika 12. Broj kata nasuprot lateralnom pomaku kata ako su: a) modeli sa sustavom ukrute na jednom katu; b) modeli sa sustavom ukrute na dva kata; c) modeli sa sustavima ukrute na dva kata od kojih je jedan na 40. katu; d) modeli različitih konstrukcijskih sustava

Tablica 8. Vrijednosti lateralnog pomaka vrha izražene u [mm] za modele sa sustavom ukruta na jednom katu

Vrsta konstrukcijskog sustava	Pomak vrha [mm]
Referentni model	482,2
Sustav ukruta na 8. katu	415,8
Sustav ukruta na 18. katu	360,2
Sustav ukruta na 30. katu	413,5
Sustav ukruta na 40. katu	446,7

Tablica 9. Vrijednosti lateralnog pomaka vrha izražene u [mm] za dva kata

Vrsta konstrukcijskog sustava	Pomak vrha [mm]
Referentni model	482,2
Sustav ukruta na [8. i 18.] katu	279,8
Sustav ukruta na [8. i 30.] katu	345,4
Sustav ukruta na [18. i 30.] katu	283,7

Tablica 10. Vrijednosti lateralnog pomaka vrha izražene u [mm] za modele sa sustavom ukruta na dva kata od kojih je jedan

Vrsta konstrukcijskog sustava	Pomak vrha [mm]
Referentni model	482,2
Sustav ukruta na (8. i 40.) katu	378,5
Sustav ukruta na (18. i 40.) katu	329,3
Sustav ukruta na (30. i 40.) katu	385,2

na 40. katu

Tablica 11. Vrijednosti lateralnog pomaka za vrh izražene u [mm]

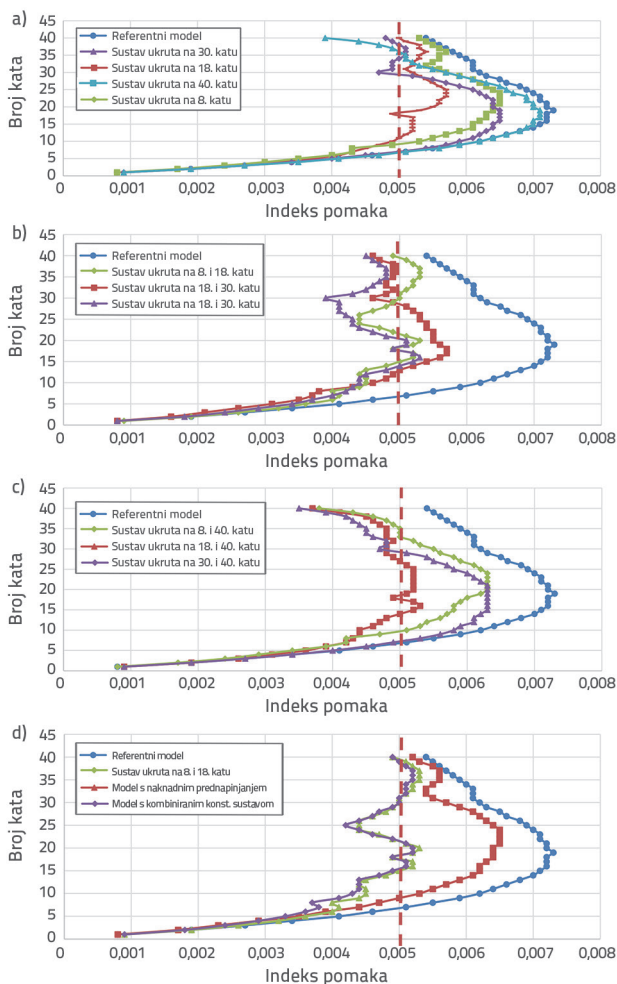
Vrsta konstrukcijskog sustava	Nanosi vjetra na krovu [mm]
Referentni model	482,2
Model sa sustavom ukruta na (8. i 18.) katu	279,8
Model s naknadnim prednapinjanjem	418,4
Model kombiniranog sustava	243,8

različitih konstrukcijskih sustava

### 8.3. Indeks pomaka

Dopušteni indeks pomaka može se izračunati iz odnosa  $[0,005h]$ , gdje je  $h$  visina kata prema Egipatskoj normi [19]. Tom jednadžbom dobiva se dopušteni indeks pomaka od 0,015 za kat visok 3 m.

Nakon analize, grafički su prikazani pokazatelji indeksa pomaka za modele zajedno s vrijednostima koji su pokazatelji referentnog indeksa pomaka. Slika 13. pokazuje cjelovito poboljšanje indeksa pomaka na svim katovima u iznosu 31,94 % kad se doda sustav ukruta na 18. katu, 37,14 % kad se dodaju zidovi jezgre s naknadnim prednapinjanjem na samo 25 % visine zgrade, te 15,25 % primjenom kombiniranog konstrukcijskog sustava koji je model

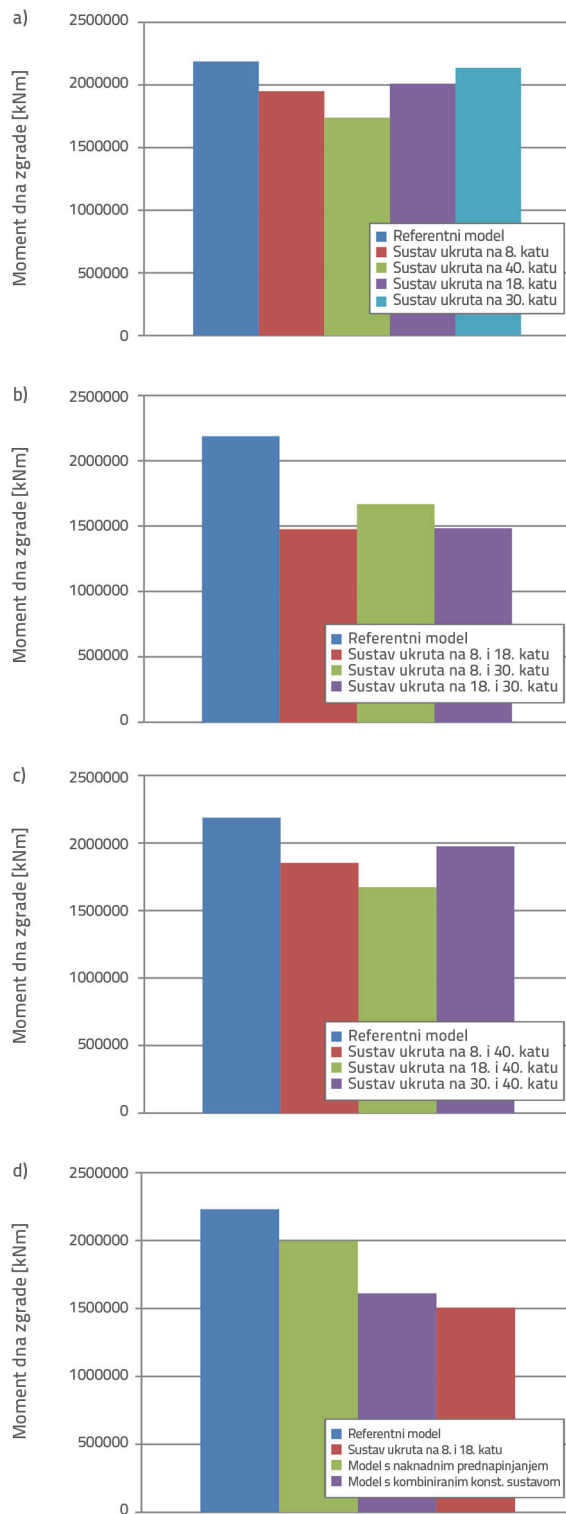


sustava ukruta na 8. i 18. katu, odnosno 39,13 % primjenom zidova jezgre s naknadnim prednapinjanjem na samo 25 % visine zgrade.

Slika 13. Odnos broja kata i indeksa pomaka: a) modela sa sustavom ukruta na jednom katu; b) modela sa sustavima ukruta na dva kata; c) modela sa sustavima ukruta na dva kata od kojih je jedan na 40. katu; d) modela različitih konstrukcijskih sustava

### 8.4. Moment na dnu

Zgrada bez sustava ukruta ponaša se kao konzolni sustav, a svi momenti od djelovanja potresa utječu na središnju jezgru. Međutim, sustav ukruta pomaže smanjiti konzolno djelovanje zgrade spajanjem zidova na središnju jezgru sa stupovima na rubovima zgrade. Momenti jezgre pomiču se do rubnih stupova preko sustava ukruta koji djeluju kao horizontalne sile. Te sile u stupovima pretvaraju se u vertikalne sile tako da se moment od djelovanja potresa smanjuje u središtu zgrade. Jednako tako, beton s naknadnim prednapinjanjem povećava krutost zgrade i smanjuje moment jezgre zato što sila prednapinjanja stvara moment koji je suprotan momentu od djelovanja potresa u jezgri. Nakon analize, moment dna zgrade za svaki konstrukcijski sustav skiciran je u obliku dijagrama u usporedbi s referentnim modelom momenta dna zgrade.



Slika 14. i tablice 12. i 13. pokazuju kako se moment dna zgrade smanjuje u usporedbi s referentnim modelom.

Slika 14. Vrijednosti momenta dna zgrade u slučaju: a) modela sa sustavom ukruta na jednom katu; b) modela sa sustavima ukruta na dva kata; c) modela sa sustavima ukruta na dva kata od kojih je jedan na 40. katu; d) modela različitih konstrukcijskih sustava

Moment dna zgrade smanjio se 20,47 % u usporedbi s referentnim modelom kad mu se doda sustav ukruta na 18. katu, 32,53 % u usporedbi s referentnim modelom kad mu se doda sustav ukruta na 8. i 18. katu, 10,46 % kad se doda naknadno prednapinjanje zidova jezgre na samo 25 % visine zgrade, odnosno 28 % primjenom kombiniranog konstrukcijskog sustava koji čini sustav ukruta na 8. i 18. katu i naknadno prednapeti zidovi jezgre na samo 25 % visine zgrade.

Modeli pojedinog sustava ukruta				
Ref.	8. kat	18. kat	30. kat	40. kat
2186920	1949510	1739170	2010120	2136350
Modeli sa sustavom ukruta na dva kata				
Ref.	(8. i 18.) kat	(8. i 30.)kat	(18. i 30.) kat	
2186920	1475540	1667190	1483360	
	(8. i 40.) kat	(18. i 40.) kat	(30. i 40.) kat	
	1852060	1672850	1975110	

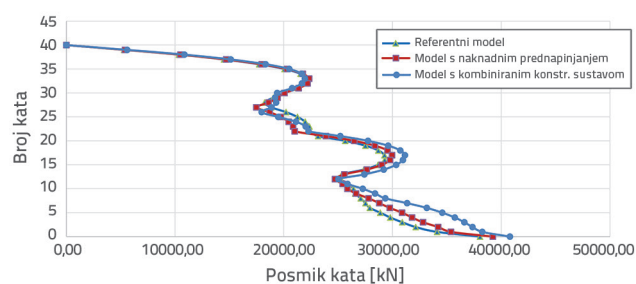
Tablica 12. Moment dna zgrade izražen u [kNm] za sve modele sa sustavima ukruta

Vrsta konstrukcijskog sustava	Moment [kNm]
Referentni model	2186920
Model sa sustavom ukruta na 8. i 18. katu	1475540
Model s naknadnim prednapinjanjem	1958190
Model s kombiniranim sustavom	1575460

Tablica 13. Moment dna zgrade različitih konstrukcijskih sustava izražen u [kNm]

### 8.5. Posmična sila na dnu

Posmična sila dna kata može se povećati ili smanjiti na temelju raspodjele sila između jezgre, a sustav ukruta ovisno o relativnoj krutosti svakog elementa. Osim toga, postoje i parametri koji utječu na posmičnu silu na dnu kao što je ukupna težina zgrade, osnovni period i faktor prigušenja. Sustav ukrutama koji povećava ukupnu težinu zgrade i smanjuje osnovni period povećava vrijednosti posmične sile na dnu. Iako model sa sustavom ukruta povećava duktilnost zgrade, što je proporcionalno faktoru



prigušenja, posmična sila obrnuto proporcionalna faktoru prigušenja, a to znači da se smanjuje vrijednost posmične sile.

Slika 15. Odstupanje posmične sile na dnu različitih konstrukcijskih sustava

Slika 15. i tablica 14. pokazuju kako se posmična sila na dnu povećala za 3 % kad joj se doda naknadno prednapinjanje na samo 25 % visine zgrade u zidovima jezgre, odnosno 6,8 % primjenom kombiniranog konstrukcijskog sustava koji čini sustav s ukrutama na 8. i 18. katu i naknadno prednapeti zidovi jezgre na samo 25 % visine zgrade.

Vrsta konstrukcijskog sustava	Posmična sila [kN]
Referentni model	38040
Model sa naknadnim prednapinjanjem	39226,00
Model sa kombiniranim sustavom	40796,00

Tablica 14. Usporedba posmične sile na dnu izražene u [kN] različitih konstrukcijskih sustava

## 9. Zaključak

Ovim istraživanjem analizirana je učinkovitost kombiniranog konstrukcijskog sustava u pogledu najboljega položaja za Vierendeelov sustav ukruta na 8. i 18. katu, a zid jezgre s naknadnim prednapinjanjem izveden je na samo 25 % visine zgrade koja ima 40 katova. Osim toga, ispitan je učinak svakog sustava posebno za visoku zgradu u slučaju da je izložena jakom potresu. Seizmički utjecaj je analiziran pod djelovanjem 0,356g seizmičkog zapisa El-Centro u trajanju od 56 sekunde u programu Midas. Nakon analize izvedeni su zaključci istraživanja vezani uz osnovni period vibriranja, pomak vrha, katni indeks pomaka, posmičnu silu i moment na dnu.

- Seizmičko ponašanje visoke zgrade različito je za svaki konstrukcijski sustav.
- Naknadnim prednapinjanjem 25 % visine zida jezgre poboljšalo se ponašanje zgrade izloženo seizmičkom opterećenju u usporedbi s referentnim modelom.
- Vierendeelov sustav ukruta vrlo je učinkovit sustav koji poboljšava seizmičko ponašanje visoke zgrade.
- Povećanje dimenzija sustava ukruta i broja katova na koje se primjenjuje sustav ukruta pomoglo je u povećanju seizmičke otpornosti visoke zgrade.
- Kada se uspoređi svaki sustav zasebno, pokazalo se da je kombinirani konstrukcijski sustav učinkovitiji u smanjenju pomaka vrha, indeksu katnog pomaka, momenta na dnu, te u smanjenju osnovnog perioda zbog povećanja krutosti visoke zgrade izložene seizmičkim opterećenjima.
- U analizi slučaja ovog istraživanja vrijednost pomaka vrha umanjila se za 50 %, indeks katnog za 39,13 %, a moment dna za 28 % kada se referentnom modelu dodao kombinirani konstrukcijski sustav koji čine Vierendeelov sustav ukruta na 8. i 18. katu i zidovi jezgre s naknadnim prednapinjanjem na samo deset katova zgrade koja ima 40 katova (25 % visine zgrade).

## LITERATURA

- [1] Hallebrand, E., Jakobsson, W.: Structural design of high-rise buildings, TVSM-5000, 2016.
- [2] Sundar, R.S., Gore, N.G.: Study on Tall RC Structure with Outrigger System Subjected to Seismic and Wind Loading, International Journal of Engineering Research & Technology, 6 (2017) 2, ISSN: 2278-0181.
- [3] Rathore, A., Savita, M.: The behavior of outrigger structural system in high-rise building: reviews, International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 6 (2017).
- [4] Ahmed, J., Sreevalli, Y.: Application of Outrigger in Slender High Rise Buildings to Reduce Fundamental Time Period, 6<sup>th</sup> IRF International Conference, Chennai, India, July, 2014.
- [5] Choi, H. S., Ho, G., Joseph, L., Mathias, N.: Introduction to Outrigger Systems - Outrigger Design for High-Rise Buildings, Routledge, 2017., pp.13–24, DOI: 10.1201/9781315661971-7
- [6] Khandelwal, R., Singh, S.: Optimum Shape and Position of Outrigger System for High Rise Building under Earthquake Loading, Regular Issue, 9 (2020) 3, pp. 3268–3275, DOI: 10.35940/ijitee.c8961.019320.
- [7] Gawate, Alpana L., Bhusari, J.P.: Behavior of Outrigger Structural System for High-rise Building, International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, (2015), e-ISSN: 2349-9745.
- [8] Kurama, Y.C.: Seismic Design of Partially Post-Tensioned Precast Concrete Walls, PCI Journal, 50 (2005) 4, pp.100–125, DOI: 10.15554/pcij.07012005.100.125
- [9] Stevenson, M., Panian, L., Korolyk, M., Mar, D.: Post-tensioned concrete walls and frames for seismic-resistance—a case study of the David Brower Center, Seaoc 2008 Convention Proceedings, 2008., pp. 1-8
- [10] Shatnawi, A., Abdallah, S.G., Tarawneh, B.: Seismic Behavior of Hybrid Post-Tensioned Cast in Place Concrete Shear Walls, Arabian Journal for Science and Engineering, 44 (2018) 5, pp. 4095 – 4109, DOI: 10.1007/s13369-018-3281-4
- [11] American Society for Testing and Materials: Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Pre-stressed Concrete, ASTM (A416/A416M – 12a), DOI: 10.1520/a0416\_a0416m-12a
- [12] Taranath, B.S.: Reinforced Concrete Design of Tall Buildings, 2009., DOI: 10.1201/9781439804810
- [13] Taranath, B. S.: Wind and earthquake resistant buildings: Structural analysis and design, CRC press, 2004., DOI: 10.1201/9780849338090
- [14] Midas, I. T.: Midas Gen on-line manual: general structure design system, MIDAS Information Technology, [http://manual.midasuser.com/EN\\_Common/Gen/855/index.htm](http://manual.midasuser.com/EN_Common/Gen/855/index.htm), 2017.
- [15] Paul, G., Agarwal, P.: Experimental verification of seismic evaluation of RC frame building designed as per previous IS codes before and after retrofitting by using steel bracing, Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 13 (2012) 2, pp. 165-79
- [16] FEMA 356: Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of the Buildings, Federal Emergency Management Agency & American Society of Civil Engineers, 2000.
- [17] BIS, I.: Indian Standard Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures, Bureau of Indian Standards (5<sup>th</sup> Revision), New Delhi, 2002.
- [18] Kamath, K., Divya, N., Rao, A.U.: A study on static and dynamic behavior of outrigger structural system for tall buildings, Bonfring international journal of industrial Engineering and Management Science, 2 (2012) 4, pp. 15-20
- [19] ECP: ECP-201: Egyptian code for calculating loads and forces in structural work and masonry, Housing and Building National Research Center, Ministry of Housing, Utilities and Urban Planning, Cairo; 2008.
- [20] Murty, C.V.R. et al.: Some concepts in earthquake behaviour of buildings, Gujarat State Disaster Management Authority, Government of Gujarat, 2012.
- [21] BIS, I.: Indian Standard Plain and Reinforced Concrete-Code of Practice (4<sup>th</sup> Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2000.