

# DINAMIČKE KARAKTERISTIKE ARMIRANOBETONSKE STAMBENE ZGRADE SA EKSCENTRIČNO POSTAVLJENIM JEZGROM LIFTA

UDK : 624.012.45  
624.042.7/.8

Andrej Gerov<sup>1</sup>, Dragan Zlatkov<sup>2</sup>, Andrija Zorić<sup>3</sup>

**Rezime:** Položaj vertikalnih konstruktivnih elemenata ima dominantan uticaj na ponašanje konstrukcije pri seizmičkom dejstvu. Neadekvatan položaj krutih elemenata dovodi do neželjenih osobina konstrukcije kao što je pojava torzionih oscilacija u I osnovnom tonu ili pojava velike ekscentričnosti centra krutosti u odnosu na centar masa. U radu je analiziran uticaj ekscentrično postavljenog liftnog jezgra na dinamičke karakteristike armiranobetonske stambene zgrade sa pravougaonom osnovom spratnosti P+6. Dodavanje AB zidova za otvor za lift za posledicu ima pojavu torzije u I i III tonu oscilovanja i značajnu promenu ekscentričnosti centra krutosti i centra masa, što sa konstruktivne tačke gledišta nije dopustivo. Da bi se obezbedio dobar prijem seizmičkih sila i otpornost opisane konstrukcije na seizmička dejstva predloženo je dodavanje AB platna na odgovarajućim mestima. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se dodavanjem AB zidova bitno popravila seizmička otpornost konstrukcije. Seizmički proračun urađen je metodom ekvivalentnog statičkog opterećenja i primenom spektralne analize u skladu sa važećim domaćim propisima. U radu je pokazano da se u slučaju konstrukcije sa neadekvatnim rasporedom krutih vertikalnih elemenata sračunava pomeranje vrha objekta za oko 21% manje primenom metode ekvivalentnog statičkog opterećenja u odnosu na spektralnu analizu, na osnovu čega se izvodi zaključak da primena metode ekvivalentnog statičkog opterećenja ne daje uvek dovoljno tačne rezultate.

**Cljučne reči:** dinamičke karakteristike, seizmički proračun, torzija, ekscentričnost, period oscilovanja

**Summary:** The position of vertical structural elements has a dominant effect on structure behaviour during seismic exposure. The inadequate position of the rigid elements leads to unwanted structural response such as the appearance of torsional oscillations in the first fundamental tone as well as the appearance of the large eccentricity of the center of rigidity with respect to the center of mass. The paper also analyzes the effect of the eccentric positioning of the elevator core on the dynamic characteristics of the reinforced concrete building with the rectangular based floors GF+6. Adding reinforced concrete walls to the elevator opening results in the appearance of torsion in the I and III oscillation tone and a significant eccentricity change of the center of rigidity and the center of mass, which from a structural point of view is not permissible. In order to achieve a good seismic force transfer and the structural resistance to seismic effects of analysed building, the addition of reinforced concrete walls in appropriate places is advised. Based on the results of this paper, it can be concluded that the addition of reinforced concrete walls has significantly improved the seismic resistance of the structure. Seismic calculations are done with the equivalent static load method and also using spectral analysis according to the active domestic regulations. The paper shows that in case the structure has inadequate arrangements of rigid vertical elements, the calculated displacement of the top of the object is 21% less with the usage of the equivalent static load method compared to spectral analysis, based on which it can be concluded that the usage of the equivalent static load method cannot always provide accurate results.

**Keywords:** dynamic characteristics, seismic calculations, torsion, eccentricity, oscillation period

<sup>1</sup> Student master studija, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš

<sup>2</sup> Docent, dr građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš

<sup>3</sup> Asistent, mas. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš

## 1 UVOD

Poznato je da kod seizmičkog dejstva nosivost, duktilnost i krutost predstavljaju osnovne parametre konstrukcije od kojih zavisi njeno ponašanje za vreme zemljotresa [1]. Sa druge strane, položaj krutih vertikalnih elemenata u objektima značajno utiče na ponašanje konstrukcije pri seizmičkom dejstvu i ne sme biti zanemaren, već se detaljno mora obraditi.

Torzione uticaje potrebno je smanjiti na najmanju moguću meru da bi se izbegla velika pomeranja i veliki uticaji u konstruktivnim i nekonstruktivnim elementima koji su locirani po obodu osnove objekta [2]. Efekti torzije mogu se javiti i kod simetričnih zgrada npr. kao posledica razlike između projektovanog i izvedenog objekta, a takođe i zemljotresna pobuda može izazvati torzione momente. Iz tog razloga se i kod idealno simetričnih zgrada konstrukciji mora obezbediti otpornost na torzione uticaje.

U ovom radu se razmatra objekat pravougaone osnove sa regularnom vertikalnom konfiguracijom. Pokazano je da zbog nesimetrično postavljenog liftnog jezgra dolazi do pojave neželjenih osobina konstrukcije, pre svega javlja se velika ekscentričnost između centra krutosti i centra masa, a zatim i pojava torzije u I osnovnom tonu oscilovanja.

U radu su prikazana konstruktivna rešenja za poboljšanje dinamičkih karakteristika konstrukcije, a koja se karakterišu pravilnim odabirom položaja vertikalnih elemenata. Upoređeni su rezultati dobijeni na modelima sa ekscentrično postavljenim krutim liftnim jezgrima i rezultati dobijeni nakon dodavanja AB zidova.

Seizmički proračun sproveden je u skladu sa Pravilnikom o tehničkim normativima projektovanja i proračuna inženjerskih objekata u seizmičkim područjima [4] metodom spektralne analize, a proračun metodom ekvivalentnog statičkog opterećenja urađen je poštovanjem Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima [5]. Analiza je sprovedena u softverkom paketu Radimpex Tower 6.

Modalnom analizom dobijene su vrednosti perioda tonova oscilovanja i njihovi dominantni oblici, takođe položaji centra krutosti i centra mase, kao i ukupna masa objekta. Metodom ekvivalentnog statičkog opterećenja dobijene su vrednosti ukupnih seizmičkih sila za dva ortogonalna pravca, a zatim se za anvelopu uticaja došlo do vrednosti pomeranja konstrukcije u oba pravca kao i do statičkih veličina momenata savijanja i normalnih sila u stubovima [3].

## 2 POSTAVKA PROBLEMA

Analizirana je armiranobetonska (AB) stambena zgrada sa AB zidovima (dijafragmama) u dva ortogonalna pravca spratnosti P+6. Za međuspratnu konstrukciju usvojena je monolitna AB ploča debljine  $d_{pl}=18\text{cm}$  koja se oslonja na AB grede koje dalje prenose opterećenje na zidove i stubove.

Usvojene su grede dimenzija 25/45cm, a stubovi su projektovani prema Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima [5] tako da bude ispunjen uslov:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_0}{\beta_B} &\leq 0.35, \\ \sigma_0 &= \frac{P}{F}, \\ \beta_B &= 0.7\beta_K, \end{aligned} \quad (1)$$

gde su:

$\beta_K$  - čvstoća kocke,

$P$  - aksijalna sila od gravitacionog opterećenja,

$F$  - površina preseka stuba.

Na osnovu uslova duktilnosti usvojeni su stubovi kvadratnog poprečnog preseka dimenzije stranice 55cm. Debljina AB dijafragmi iznosi  $d_{zid}=15\text{cm}$ , što predstavlja minimalnu debljinu zida kod AB konstrukcija u seizmički aktivnim područjima.

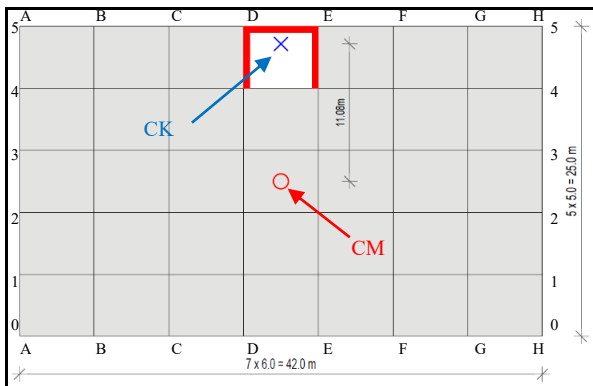
Raster noseće konstrukcije u x-pravcu je 6.0m, dok u y-pravcu iznosi 5.0m. Spratna visina analizirane stambene zgrade je 3.0m. Radi pravilnije raspodele presečnih sila i lakšeg razumevanja analize za komunikacione otvore usvojene su dimenzije jednog polja, odnosno 6.0x5.0m.

Za sve konstruktivne elemente usvojen je beton kvaliteta MB30. U skladu sa Pravilnikom o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima [5] objekat pripada II kategoriji (vrste 1), lociran je u VIII seizmičkoj zoni i fundiran u tlu II kategorije.

Pored sopstvene težine, na konstrukciju deluje i dodatno stalno opterećenje intenziteta  $g=4.0\text{kN/m}^2$ , kao i korisno opterećenje intenziteta  $p=2.0\text{kN/m}^2$ . Poslednja etaža opterećena je snegom intenziteta  $s=1.0\text{kN/m}^2$ . Sva opterećenja deluju po celoj površini međuspratnih konstrukcija.

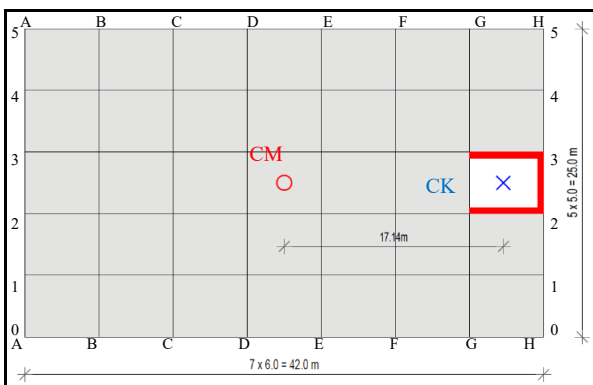
U zavisnosti od položaja jezgra za lift, razmatrana su tri različita modela opisane stambene zgrade. Kod Modela I, otvor za lift je postavljen ekscentrično u odnosu na y-osu, Slika 1. Prikazani su centar krutosti

(CK) i centar mase (CM), a crvenim linijama prikazani su AB zidovi debljine  $d_{zid}=15\text{cm}$ , koji formiraju jezgro oko otvora lifta.

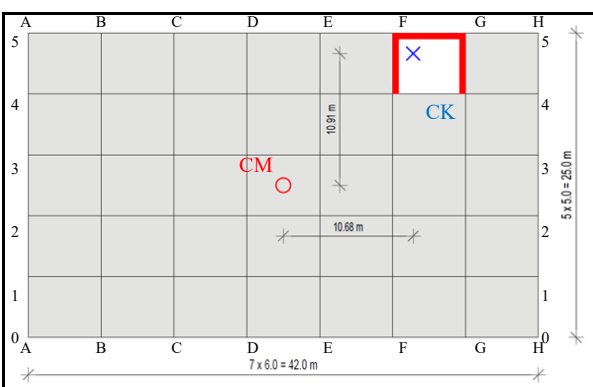


Slika 1 - Položaj jezgra za lift – Model I

Kod Modela II, otvor za lift je postavljen ekscentrično u odnosu na  $x$ -osu kao što je to prikazano na Slici 2, dok je kod Modela III otvor za lift postavljen ekscentrično u odnosu na obe ose, Slika 3.



Slika 2 - Položaj jezgra za lift – Model II



Slika 3 - Položaj jezgra za lift – Model III

Ekscentrično postavljena AB zidna platna značajno utiču na krutost konstrukcije, a samim tim i na odgovor konstrukcije na seizmičko dejstvo.

Pri analizi modela, korišćena je napredna opcija seizmičkog proračuna u softverskom paketu Tower 6, faktor krutosti horizontalnih ploča na savijanje je redukovana sa automatske vrednosti  $k=1.0$  na vrednost  $k=0.001$  i takođe je sprečeno pomeranje u  $z$ -pravcu, što praktično znači da je krutost horizontalnih ploča na savijanje gotovo neutralisana. U tom slučaju ploča se modelira kao kruta dijafragma u svojoj ravni i nema uticaj na krutost na savijanje celokupnog objekta, što za posledicu ima da ploča svojim savijanjem ne prihvata seizmičke uticaje.

### 3 DINAMIČKE KARAKTERISTIKE ANALIZIRANIH MODELA

Dodavanjem AB zidova za otvor za lift, centar krutosti je značajno pomeren u odnosu na slučaj da na istom mestu nema AB zidova (otvor za stepenište) što se može videti u [3].

Kod Modela I ekscentricitet postoji samo u  $y$ -pravcu i iznosi  $e_y=11.08\text{m}$ , osim na poslednjoj etaži kod koje ekscentricitet iznosi  $e_y=10.9\text{m}$ . Kod Modela II ekscentričnost u odnosu na  $x$ -osu iznosi  $e_x=17.14\text{m}$ . Veličina ekscentriciteta kod Modela III u odnosu na  $x$ -osu je  $e_x=10.68\text{m}$ , a u odnosu na  $y$ -osu je  $e_y=10.91\text{m}$ . Veća ekscentričnost u odnosu na osu  $y$ , kod Modela III, se može objasniti činjenicom da u  $y$ -pravcu postoje dva AB platna koja su zajedno bliže centru mase u odnosu na platno projektovano paralelno globalnoj  $x$  osi.

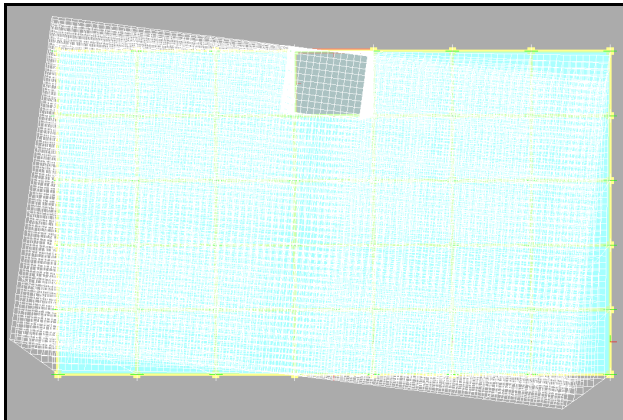
Ekscentrični položaj otvora za lift dovodi do neželjenog efekta odnosno pojave torzije u prvom osnovnom tonu oscilovanja i trećem tonu oscilovanja kod svih Modela.

U Tabeli 1 prikazane su vrednosti perioda oscilovanja prvog tona ( $T_1$ ), drugog tona ( $T_2$ ) i trećeg tona ( $T_3$ ) razmatranih Modela.

Tabela 1- Vrednosti perioda oscilovanja Modela I-III

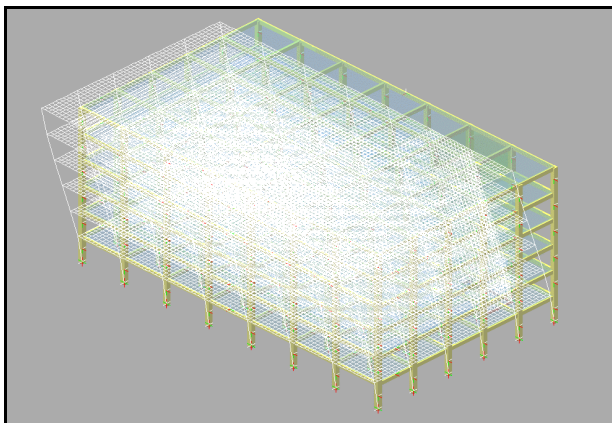
Period [s]	Model I	Model II	Model III
$T_1$	0.8661	0.8801	0.6799
$T_2$	0.5488	0.5037	0.4548
$T_3$	0.4221	0.3692	0.3180

Torzija kod Modela I u prvom tonu oscilovanja prikazana je na Slici 4.



Slika 4 - Prvi ton oscilovanja Modela I

Kod Modela I konstrukcija u drugom tonu osciluje u  $y$ -pravcu, kod Modela II u  $x$ -pravcu, a kod Modela III oscilovanje se javlja pod uglom  $\alpha \approx 45^\circ$  u odnosu na  $x$ -osu referentnog koordinatnog sistema, Slika 5.



Slika 5 - Drugi ton oscilovanja Modela III

Kod Modela I nisu uočene oscilacije u  $x$ -pravcu ni pri višim tonovima oscilovanja, što ukazuje da je konstrukcija previše kruta u  $x$ -pravcu u odnosu na  $y$ -pravac, za razliku od Modela II kod koga se ne javlja oscilovanje u  $y$ -pravcu.

Amplituda pomeranja vrha konstrukcije kod Modela III u  $x$ -pravcu je  $X_p^{max} = 5.48\text{mm}$ , dok je maksimalna vrednost pomeranja u  $y$ -pravcu  $Y_p^{max} = 5.34\text{mm}$ . Ukupno pomeranje sračunato je vektorskim sabiranjem vrednosti amplituda pomeranja u dva ortogonalna pravca i iznosi  $U = 7.65\text{mm}$ .

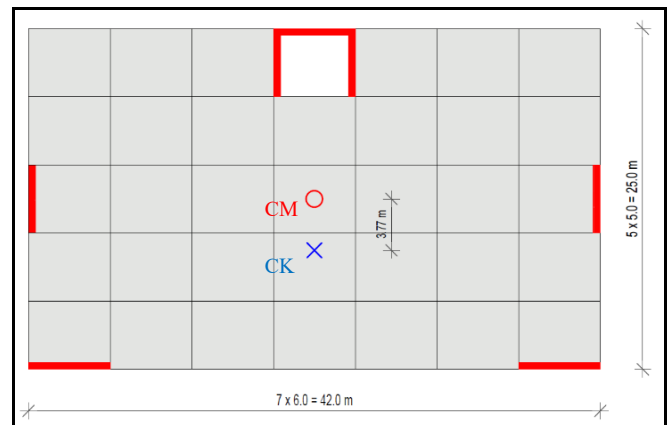
Iz svega napred navedenog može se zaključiti da ovakvim rasporedom AB jezgara dolazi do ozbiljne promene veličine ekscentriciteta, a ujedno i do pojave torzije u prvom tonu oscilovanja, što sa konstruktivne tačke gledišta nije dopustivo.

## 4 DINAMIČKE KARAKTERISTIKE MODELA NAKON DODAVANJA AB PLATNA ZA PRIJEM SEIZMIČKIH SILA

### 4.1 Rešenje problema pojave torzije u Modelu I

Najpre su Modelu I dodana AB platna na suprotnoj fasadi i za takav konstruktivni sistem je posmatran dobijeni Model Ip (međufaza). Poboľšan je odgovor konstrukcije na seizmičko dejstvo u odnosu na Model I, ali nedovoljno. U prvom tonu oscilovanja javlja se pomeranje konstrukcije u  $y$ -pravcu, za razliku od torzije koja se javila u Modelu I. Torzija se javlja kod drugog tona oscilovanja.

Dodatno poboljšanje, odnosno rešenje problema torzije u drugom tonu oscilovanja, dobijeno je dodavanjem AB platana u bočnim fasadama čime se došlo do konačnog konstruktivnog sistema Model Ip, prikazanog na Slici 6.



Slika 6 - Prikaz osnove Modela Ip

Kod Modela Ip, u drugom tonu oscilovanja, dolazi do pomeranja konstrukcije u  $x$ -pravcu, a u trećem tonu oscilovanja, dolazi do pojave torzije. U Tabeli 2 su prikazani periodi oscilovanja Modela I, Modela Ip (među-faza) i Modela Ip.

Tabela 2- Vrednosti perioda oscilovanja Modela I-Ip

Period [s]	Model I	Model Ip (međufaza)	Model Ip
T <sub>1</sub>	0.8661	0.5509	0.4509
T <sub>2</sub>	0.5488	0.4362	0.4272
T <sub>3</sub>	0.4221	0.4224	0.3365

Iz Tabele 2, može se uočiti da se ovim rešenjem period oscilovanja prvog osnovnog tona smanjio za 48%, odnosno sa 0.8661s na 0.4509s.

Dodavanjem AB dijafragmi ekscentricitet u odnosu na  $y$ -osu redukuje se za čak 65% odnosno

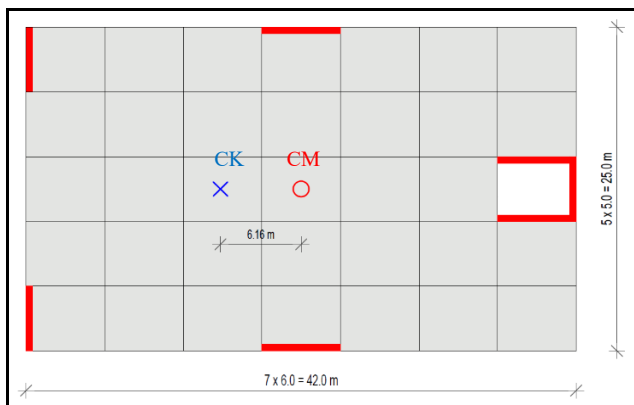
iznosi  $e_y=3.77\text{m}$ , a takođe se smanjuje i pomeranje Sile u presecima usled anvelope karakterističnih kombinacija opterećenja Modela Ip date su u Tabeli 3 za karakteristične stubove, kako u obodnim, tako i u srednjim ramovima.

*Ip*

Presečne sile	Ram 0-0	Ram 3-3	Ram A-A	Ram C-C
$M_3$ [kNm]	156.15	166.43	106.70	164.15
$M_2$ [kNm]	95.40	161.32	169.08	69.48
N [kN]	2151.36	2662.8	2407.68	2674.67

#### 4.2 Rešenje problema pojave torzije u Modelu II

U radu su, radi boljeg uvida u važnost odabira kvalitetnog konstruktivnog rešenja, prikazana dva pristupa rešavanju problema pojave torzije u prvom tonu oscilovanja Modela II. Zajedničko za oba rešenja jesu zidovi koji se nalaze u obodnom ramu A-A, dok je razlika između dva rešenja u položaju AB zidova u pravcu duž fasade. Kod prvog pristupa AB platna su dodana u sredini ramova 0-0 i 5-5 i dobijen je Model IIp-a prikazan na Slici 7.



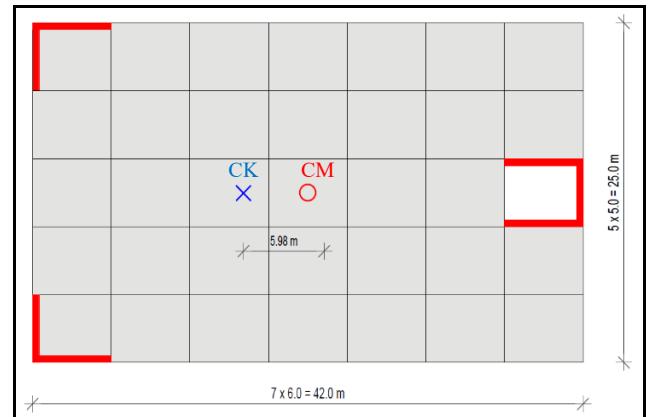
Slika 7 - Prikaz osnove Modela IIp-a

Za razliku od prvog pristupa, kod drugog pristupa AB platna su dodana u uglu obodnih ramova 0-0 i 5-5, čime je dobijen Model IIp-b prikazan na Slici 8.

Period oscilovanja u Modelu IIp-a i Modelu IIp-b značajno se smanjio u odnosu na Model II, čemu najviše doprinose AB zidna platna, a njihov raspored po obodnim ramovima je sporedan. Najmanje pomeranje konstrukcije kao i ekscentricitet su ostvareni konstruktivnim rešenjem u Modelu IIp-b u kojem je pomeranje  $X_p=3.55\text{mm}$ , a ekscentricitet po  $x$ -osi  $e_x=5.98\text{m}$ , što je smanjenje od 65% u odnosu na vrednosti dobijene za Model II. Mase modela se neznatno razlikuju.

konstrukcije u  $y$ -pravcu na  $Y_p^{max}=4.43\text{mm}$ .

Tabela 3- Unutrašnje sile u presecima Modela



Slika 8 - Prikaz osnove Modela IIp-b

Kod oba pristupa rešavanju problema, odnosno kod Modela IIp-a i Modela IIp-b, u prvom tonu oscilovanja konstrukcija se pomera u  $y$ -pravcu, u drugom tonu oscilovanja u  $x$ -pravcu, a u trećem tonu oscilovanja dolazi do pojave torzije. Vrednosti statičkih veličina, momenti savijanja i normalne sile, za Model IIp-a i Model IIp-b navedene su u Tabeli 4 za obodne ramove za dve ortogonalne ose.

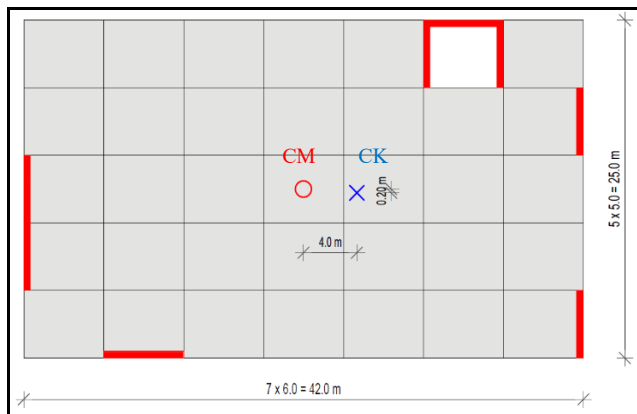
Tabela 4- Vrednosti statičkih veličina za Model IIp-a i Model IIp-b za obodne ramove

Statičke veličine	Model IIp-a		Model IIp-b	
	Ram 0-0	Ram A-A	Ram 0-0	Ram A-A
$M_3$ [kNm]	150.40	108.76	137.23	94.62
$M_2$ [kNm]	88.65	171.97	85.08	168.24
N [kN]	2340.65	2340.6	1919.28	2180.36

Oba konstruktivna rešenja su prihvatljiva i zadovoljavaju sve kriterijume Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima. Može se zaključiti da značajna razlika u datim rešenjima ne postoji, te se položaj AB zidova u pravcu duž fasade može odabrati u skladu sa arhitektonskim rešenjem objekta.

#### 4.3 Rešenje problema pojave torzije u Modelu III

Zbog ekscentričnog položaja jezgra za lift u odnosu na obe ose, predloženo rešenje sadrži platno kroz dva rastera u obodnom ramu. Usvojen je raspored dijafragmi, čime je dobijen Model IIIp prikazan na Slici 9.



Slika 9 - Prikaz osnove Modela IIIp

Ovakvim rasporedom dijafragmi nije se uspeo neutralisati ekscentricitet u jednom od dva ortogonalna pravca, ali je ekscentricitet  $e_y$  smanjen na 20cm, što je veliko poboljšanje ako se uzme u obzir da je u Modelu III iznosio 10.9m. Takođe se i ekscentricitet  $e_x$  smanjio i to sa 10.68m kod Modela III na 4.0m kod Modela IIIp, odnosno za 63%.

Uzevši u obzir broj dodatnih AB dijafragmi, ukupna masa objekta se sa 7177t povećala na 7690.85t ili samo 6.5% u odnosu na Model III.

Periodi oscilovanja u prva tri tona su smanjeni i iznose:  $T_1=0.4839s$ ,  $T_2=0.3602s$  i  $T_3=0.2530s$ .

Seimički proračun Modela IIIp pored primene metode ekvivalentnog statičkog opterećenja, urađen je i primenom metode spektralne analize po normativima datim u [4].

Primenom metode ekvivalentnog statičkog opterećenja dobijene su ukupne vrednosti seizmičkih sila  $S_x=3748kN$  i  $S_y=3748kN$ , dok su primenom spektralne analize dobijene sledeće vrednosti  $S_x=5966.7kN$  i  $S_y=5673.4 kN$ . Iz date činjenice može se izvesti zaključak da uticaj viših tonova oscilovanja nije zanemarljiv.

U Tabeli 5 navedene su unutrašnje sile u pojedinim ramovima Modela IIIp dobijene metodom ekvivalentnog statičkog opterećenja (MESO) i metodom spektralne analize (MSA).

## LITERATURA

- [1] S. Janković: *Osnove seizmičkog planiranja i projektovanja*, AGM knjiga, Beograd, 2014.
- [2] S. Zdravković: *Dinamika konstrukcija sa zemljotresnim inženjerstvom*, AGM knjiga, Beograd, 2017.
- [3] A. Gerov: *Analiza uticaja promene položaja vertikalnih konstruktivnih elemenata na dinamičke karakteristike AB stambene zgrade*, Diplomski rad, Niš, 2019.
- [4] *Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima*, Beograd, 1981.
- [5] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima*, Beograd, 1981.

Tabela 5- Vrednosti statičkih veličina za Model IIIp

Statičke veličine	MESO		MSA	
	Ram 3-3	Ram C-C	Ram 3-3	Ram C-C
$M_3$ [kNm]	180.15	146.42	184.89	149.48
$M_2$ [kNm]	171.89	125.01	173.64	157.33
N [kN]	2693.66	2758.6	2694.02	3278.59

Iz Tabele 5 može se uočiti da razlika u vrednostima statičkih veličina, dobijenih primenom dve različite metode nije velika. Sa druge strane razlika u sračunatim pomeranjima je značajna. Primenom metode ekvivalentnog statičkog opterećenja dobijeno je pomeranje konstrukcije u  $x$ -pravcu  $X_p=5.87mm$ , dok se korišćenjem spektralne analize dolazi do vrednosti pomeranja  $X_p=7.13mm$ , što predstavlja razliku od 21%.

## 5 ZAKLJUČAK

Na osnovu svega izloženog u radu mogu se izvesti sledeći zaključci:

- nesimetrično postavljanje AB jezgra može loše uticati na odgovor konstrukcije na seizmičko dejstvo, tj. dolazi do pojave torzije u prvom osnovnom tonu,
- pravilnim odabirom položaja dodatnih AB zidova može se značajno poboljšati seizmička otpornost konstrukcije,
- metoda ekvivalentnog statičkog opterećenja neće uvek dati dovoljno tačne rezultate tj. postoji razlika u proračunu pomeranja u odnosu na rezultate dobijene metodom spektralne analize od 21%. Do ovako značajne i nezanemarljive razlike u pomeranjima konstrukcije dolazi usled činjenice da se uticaj viših tonova oscilovanja ne može zanemariti, odnosno uticaj viših tonova se ne može nadomestiti delovanjem 15% seizmičke sile na vrh konstrukcije.

Preporuka za dalja istraživanja je analiza uticaja dodavanja AB zidova samo u donjim etažama objekta na dinamičke karakteristike i seizmičku otpornost objekta.