
DGKS

**DRUŠTVO GRAĐEVINSKIH
KONSTRUKTERA SRBIJE**

14. KONGRES

NOVI SAD
24-26. SEPTEMBAR

2014.

14

K

O

N

G

R

E

S

2014

U SARADNJI SA:



**GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

**MINISTARSTVOM PROSVETE,
NAUKE I TEHNOLOŠKOG RAZVOJA
REPUBLIKE SRBIJE**



**INŽENJERSKOM KOMOROM
SRBIJE**

**ZBORNİK
RADOVA**



**CHINA ROAD AND BRIDGE
CORPORATION SERBIA BRANCH**

Izdavač: **Društvo građevinskih konstruktora Srbije**
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1

Urednici: prof. dr **Miloš Lazović**
prof. dr **Boško Stevanović**

Tehnička
priprema: **Saška - Stoja Todorović**

Priprema za
štampu: **Nebojša Ćosić**

Štampa: **DC Grafički centar**

Tiraž: **150 primeraka**

Beograd, septembar 2014.

ORGANIZACIONI ODBOR

PREDSEDNIŠTVO DGKS

Prof. dr Miloš LAZOVIĆ, dipl.inž.grad., predsednik
Aleksandar BOJOVIĆ, dipl.inž.grad., potpredsednik
Prof. dr Boško STEVANOVIĆ, dipl.inž.grad., sekretar
Prof. dr Đorđe VUKSANOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Mihajlo ĐURĐEVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Dragoslav STOJIC, dipl.inž.grad.
Prof. dr Đorđe LADINOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Snežana MARINKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Aleksandar RISTOVSKI, dipl.inž.grad.
Doc. dr Bratislav STIPANIĆ, dipl.inž.grad.
Dr Zoran FLORIĆ, dipl.inž.grad.
Mr Slobodan GRKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Branko KNEŽEVIĆ, dipl.inž.grad.
Gojko GRBIĆ, dipl.inž.grad.
Goran VUKOBRATOVIĆ, dipl.inž.grad.
Đorđe PAVKOV, dipl.inž.grad.
Svetislav SIMOVIĆ, dipl.inž.grad.

ČLANOVI ORGANIZACIONOG ODBORA IZVAN PREDSEDNIŠTVA

Prof. dr Zlatko MARKOVIĆ, dipl.inž. grad.
Miroslav MIHAJLOVIĆ, dipl.inž.grad.
Aleksandar TRAJKOVIĆ, dipl.inž.grad.

NAUČNO-STRUČNI ODBOR

1. Prof. dr Radenko Pejović, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
2. Prof. dr Duško Lučić, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
3. Prof. dr Goran Markovski, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
4. Prof. dr Meri Cvetkovska, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
5. Prof. dr Tatjana Isaković, Univerzitet u Ljubljani Fakultet građevinarstva i geodezije, Ljubljana, Slovenija
6. Prof. dr Viktor Markelj, Ponting d.o.o., Maribor, Slovenija
7. Prof. dr Zlatko Šavor, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, Katedra za mostove, Zagreb, Hrvatska
8. Prof. dr Radu Bancila, University "POLYTEHNICA", Temišvar, Rumunija
9. Mr Predrag Popović, Čikago, SAD
10. Prof. dr Kostadin Topurov, Sofija, Bugarska
11. Prof. dr Dušan Najdanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
12. Prof. dr Miloš Lazović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
13. Prof. dr Đorđe Vuksanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
14. Prof. dr Dejan Bajić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
15. Prof. dr Đorđe Ladinović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
16. Prof. dr Dragoslav Stojić, Arhitektonsko-građevinski fakultet, Niš, Srbija
17. Doc. dr Bratislav Stipanić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

14. KONGRES JE ORGANIZOVAN U SARADNJI SA:

GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM UNIVERZITETA U
BEOGRADU

MINISTARSTVOM PROSVETE, NAUKE I TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA REPUBLIKE SRBIJE

INŽENJERSKOM KOMOROM SRBIJE, Beograd

DONATORI SIMPOZIJUMA:

DIJAMANTSKI

CHINA ROAD & BRIDGE CORPORATION, SERBIA BRANCH,
Belgrade

SREBRNI

SIKA d.o.o., Novi Sad

BRONZANI

"POTISJE KANJIŽA" AD, Kanjiža

Ognjen Mijatović¹, Manuel Desančić², Zoran Mišković³, Ljiljana Mišković⁴

VIBRACIONA PLATFORMA I MODEL VIŠESPRATNE ZGRADE ZA DINAMIČKO ISPITIVANJE

Rezime:

U radu je dat prikaz konstruisane vibro-platforme (dvoosnog mehaničkog pobuđivača vibracija za dinamička ispitivanja modela konstrukcija i elemenata. Prikazani su detalji funkcionisanja vibro-platforme i način generisanja harmonijskih pomeranja. Takođe, prikazano je projektovanje i konstruisanje modela višespratne zgrade sa dinamičkim karakteristikama adekvatnim za ispitivanje na vibro-platformi. Geometrijske karakteristike elemenata kao i način ostvarivanja veza u čvorovima prikazane su u svrhu postizanja odgovarajućih dinamičkih karakteristika modela konstrukcije. Numerička modalna analiza modela višespratne zgrade sprovedena je primenom programa za analizu konstrukcija konačnim elementima SAP2000.

Ključne reči: vibro-platforma, harmonijska pobuda, prostorne konstrukcije

VIBRATION PLATFORM AND MODEL OF MULTI-STOREY BUILDING FOR DYNAMIC TESTING

Summary:

In the paper we present the development of vibration-platform (biaxial mechanical shaker) for vibration testing of spatial structure. Presented are details of platform operation and harmonic displacement generation. Also, design and construction of model of multi-storey building with dynamic properties adequate for testing on vibration platform. Details of member dimensions and node connections are explained to achieved target dynamic properties for testing on vibration platform. Modal analysis of the building model carried out using FEM software for structural analysis SAP 2000.

Key words: vibration-platform, harmonic excitation, spatial structures

¹ dipl.inž.grad., student master studija, mijatovicognjen@yahoo.com

² dipl.inž.grad., student master studija, manueldesancic@yahoo.com

³ V.prof. dipl.grad.inž., mzoran@imk.grf.bg.ac.rs

⁴ dipl.inž.grad., miskoviclj@sicip.co.rs

^{1,2,3} Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bul. kralja Aleksandra 73, Beograd, Republika Srbija

⁴ Institute of Transportation - CIP, Nemanjina 6/IV, Belgrade, Republika Srbija

1 UVOD

Ispitivanjem na vibro-platformama mogu se dobiti važni podaci o dinamičkom odgovoru, krutosti i prigušenju konstrukcije za različite nivoe pobude. Tačna teorijska rešenja koja opisuju ponašanje konstrukcije pri dinamičkom delovanju moguće je dobiti samo za jednostavne i idealizovane slučajeve, [1]. Ispitivanjima na vibracionoj platformi dobijaju se realni podaci koji služe za numeričko modeliranje konstrukcije. Kako bi podaci bili relevantni za poređenje, dinamičke karakteristike modela konstrukcije treba da budu adekvatne, u odgovarajućem frekventnom opsegu, mogućnostima pobude na vibracionoj platformi, [2]. U prvom delu rada je prikazana konstrukcija vibracione platforme koja generiše harmonijska pomeranja u jednom ili dva pravca, što se najčešći zahtevi za konstrukciju vibracionih platformi. S obzirom na visoku cenu na tržištu dostupnih uređaja, autori su samostalno razvili vibro-platformu koja je primenjena za ispitivanje više modela konstrukcija. U drugom delu rada prikazan je model skeletne konstrukcije višespratne asimetrične zgrade sa približno krutim tavanicama i krutim čvorovima, pri čemu su svi stubovi konstrukcije uklješteni.

2 OSNOVNE KARAKTERISTIKE MEHANIČKOG POBUĐIVAČA

Taksativno se daju osnovne karakteristike izvedenog uređaja:

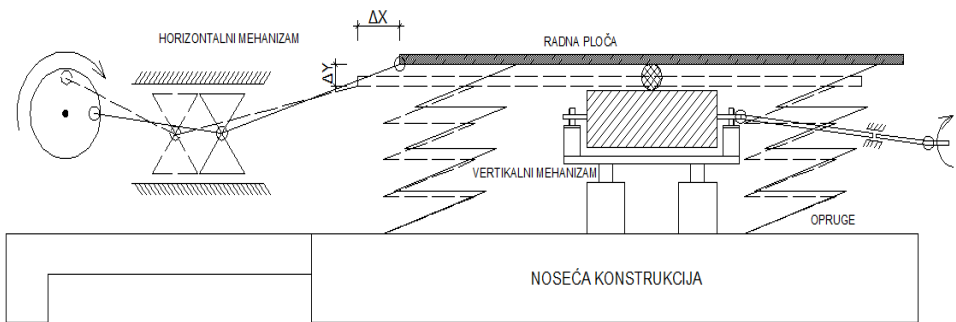
- Težina: 980 kg
- Dimenzije uređaja u osnovi: 310 cm x 250 cm
- Vrsta pogonskih motora: monofazni kolektorski elektromotor
- Broj pogonskih motora: 2
- Elektromotor horizontalnog mehanizma: snaga 2.2 kW, broj obrtaja 6200 obr/min
- Elektromotor vertikalnog mehanizma: snaga 2.0 kW, broj obrtaja 6000 obr/min
- Način veze platforme sa podlogom: četiri opruge u uglovima platforme
- Maksimalna nosivost platforme: 4.50 kN
- Opseg amplitude u horizontalnom pravcu: od 8-45 mm
- Amplituda u vertikalnom pravcu: 10 mm
- Opseg radne frekvencije u horizontalnom pravcu: od 1- 4Hz sa rezolucijom 0.2Hz
- Opseg radne frekvencije u vertikalnom pravcu: od 1 - 4Hz sa rezolucijom 0.2Hz
- Dimenzije vibro-platforme: 106 x 106 cm

3 PRINCIP RADA DVOOSNOG MEHANIČKOG POBUĐIVAČA

Prilikom dejstva harmonijske sile na platformu, realizuje se kretanje "napred-nazad" kretanje oko neutralnog položaja. Takvo kretanje se može svrstati u tzv. periodična kretanja

odnosno harmonijsko kretanje, oscilovanje ili vibriranje. Prilikom tog kretanja u sistemu dolazi do stalnog pretvaranja kinetičke energije u potencijalnu i obrnuto [3]. Pri prolasku kroz neutralni položaj konstrukcija ima maksimalnu kinetičku, a u krajnjim položajima maksimalnu potencijalnu energiju. Najnepovoljniji slučaj za konstrukciju se dešava u stanju tzv. rezonancije kada je frekvencija pobude jednaka sopstvenoj frekvenciji konstrukcije. U tom slučaju, amplitude, u zavisnosti od prigušenja, postaju izuzetno velike, i može doći do sloma konstrukcije. Konstruisani uređaj je moguće koristiti za detektovanje sopstvenih oblika i ispitivanje ponašanja konstrukcije pri delovanju dinamičkog pomeranja osnove – platforme, a za različite frekvencije pobude.

Uređaj se sastoji od dve komponente. Horizontalnog mehanizma koji realizuje horizontalnu harmonijsku pobudu i vertikalnog mehanizma koji realizuje vertikalnu pobudu, pri čemu se obe realizuju na radnoj ploči (vibro-platforni). Konstrukcija uređaja omogućava pobudu u svakom od ova dva pravca posebno, a moguće je izazvati harmonijsku pobudu u oba, vertikalnom i horizontalnom pravcu, istovremeno, kako je prikazano na slici 1 sa šematskim kinematičkim prikazom uređaja.



ΔX HORIZONTALNO POMJERANJE (VERIKALNA AMPLITUDA)

ΔY VERTIKALNO POMJERANJE (HORIZONTALNA AMPLITUDA)

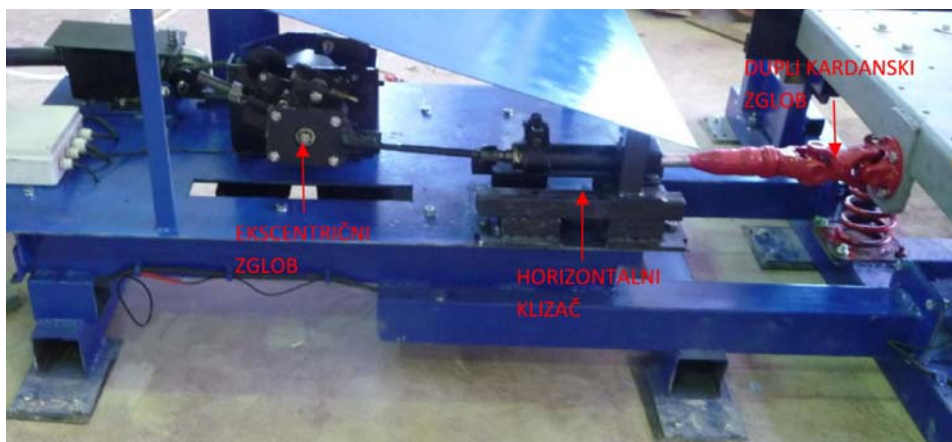
Slika 1 – Kinematička šema dvoosnog mehaničkog pobuđivača vibracija

Mehanički pobuđivač vibracija proizvodi dinamičku pobudu tako što se mehanički rad motora prenosi preko mehaničkih sklopova do radne platforme na kojoj se nalazi element ili model konstrukcije koja se ispituje. Pri dinamičkim ispitivanjima realnih građevinskih konstrukcija horizontalne vibracije su dominantne u odnosu na vertikalne. S obzirom da su stvarna dinamička opterećenja, kao što je pomeranje tla usled zemljotresa, prizvoljnog pravca, postoji i vertikalna pobuda. Ipak, tim komponentama se posvećuje manja pažnja jer objekti koji se dimenzionišu na zanačajnije komponente horizontalnog ubrzanja, obično su u stanju da prihvate uticaje od vertikalnog ubrzanja. Treba imati na umu da su vertikalne oscilacije obično viših frekvencija od horizontalnih. U narednom, s obzirom da ćemo se uglavnom baviti ispitivanjem horizontalnom pobudom, ista će biti uglavnom predmet razmatranja.

3.1 MEHANIZAM ZA HORIZONTALNU POBUDU

Obrtno kretanje elektromotora snage 2 kW i obrtnog momenta 50 Nm, pretvara se u translatorno kretanje. Pogonski elektromotor ima 6200 obr/min i povezan je sa reduktorom prenosa 10:1 i dva lančanika sa prenosom 2:1. Lančanici su povezani dvorednim lanacem, čime se redukuje broj obrtaja, a s njom i izlazna snaga cca. dvadeset puta. Uz ovakvu redukciju, na izlaznoj osovini motora, dobija se 2.2 kW snage, dok na izlaznoj osovini reduktora realizuje približno 40 kW, odnosno 6200 obr/min na osovini motora i 310 obr/min na izlaznoj osovini reduktora.

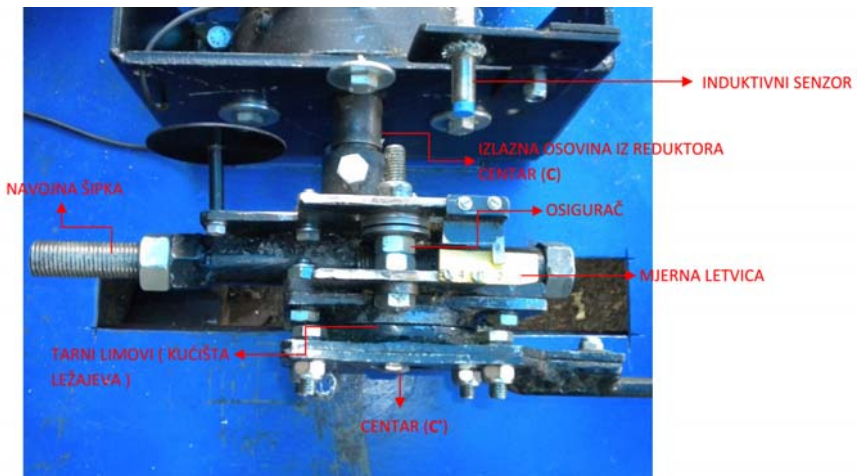
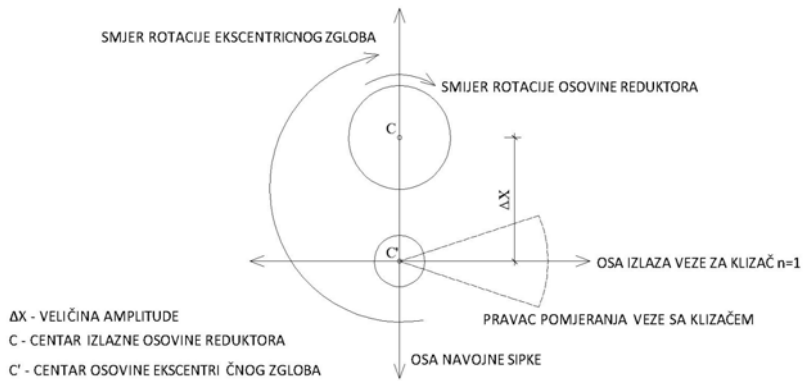
Izlazna osovina reduktora spojena je zglobom sa promenljivim ekscentrom, slika 3, čime se može korigovati amplituda oscilovanja. Zglob sa promenljivim ekscentrom povezan je sfernim zglobom sa klizačem sa jednim stepenom slobode pomeranja u horizontalnom pravcu, slika 2.



Slika 2 - horizontalni mehanizam vibracione platforme

Sferni zglob sprečava prenošenje momenta torzije sa konstrukcije platforme na zglob sa promenljivim ekscentrom, slika 3, jer u slučaju prenosa torzionog momenta sa platforme/konstrukcije na zglob, došlo bi do oštećenja istog. Shodno ovome, na izlazu iz klizača realizuje se samo aksijalna sila, koja se potom prenosi na vibro-platformu. Klizač je vezan za vibro-platformu preko dvostrukog kardanskog zgloba koji sprečava prenos poprečne sile sa vibro-platforme na pogonski sistem, slika 2.

Vibro-platforma je oslonjena za osnovni ram preko četiri opruge, čime je omogućeno kretanje u svim pravcima. Translacije upravne na osu glavnog kretanja sprečene su bočnim držačima. Platformi je omogućeno translatorno kretanje samo u podužnom pravcu, pravcu delovanja poremećajne sile. Rotacija je dominantna oko ose upravne na pravac glavnog kretanja, dok postoji izvesna rotacija i oko druge ose, ali je ista značajno manja i može se zanemariti. Ovakvo oslanjanje je bilo neophodno, kako bi se izbeglo oštećenje u slučaju prenošenja transverzalne sile sa vibro-platforme na horizontalni klizač.

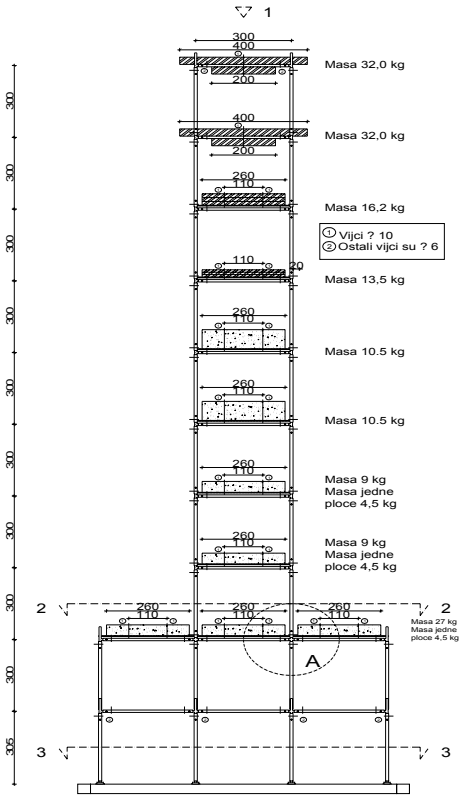


Slika 3 - Zglob sa promenljivim ekscentrom

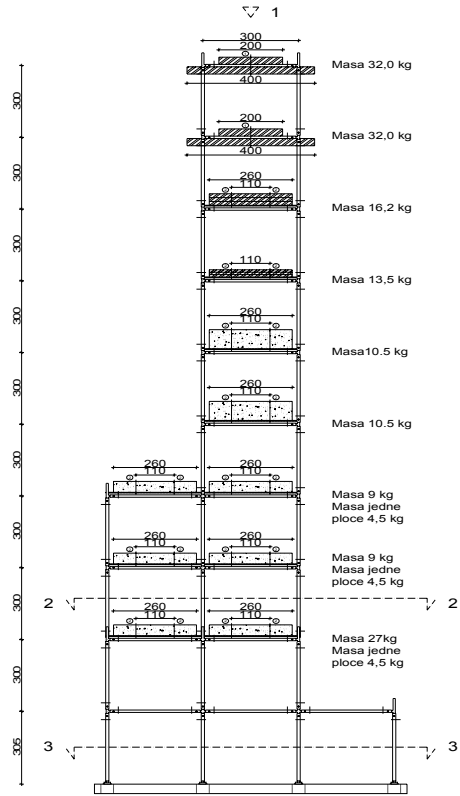
4 MODEL KONSTRUKCIJE VIŠESPATNE ZGRADE

U fazi projektovanja modela za ispitivanje sprovedeno je numeričko modeliranje konstrukcije koja će biti ispitivana. Cilj ovog modeliranja je bio proveriti modalne karakteristike modela, kako bi one odgovarale mogućnostima pobude na vibro-platfomi. Pre početka konstrukcije modela napravljen je numerički model u programskom paketu SAP 2000 za proračun konstrukcija metodom konačnih elemenata. Na osnovu dobijenih rezultata numeričkog modeliranja, ustanovljena je geometrija konstrukcije, sa dimenzijama elemenata i načina ostvarivanja veza, koje je moguće realizovati, a kako bi model bio montažno-demontažan.

Pogled A

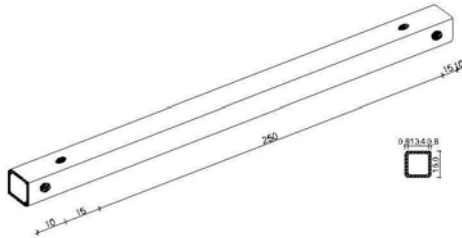


Pogled B



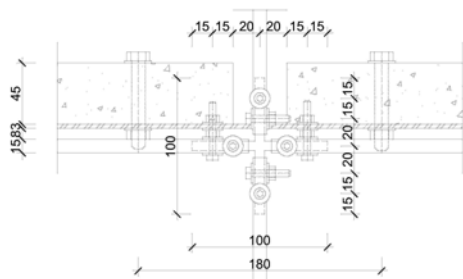
Slika 4 – Geometrija modela višespratne zgrade sa prikazom dodatih masa

Geometrijske karakteristike modela višespratne zgrade, sa odgovarajućim dodatnim masama, prikazane su na slici 4., pri čemu su stubovi i grede istog profila i geometrije, slika 5.



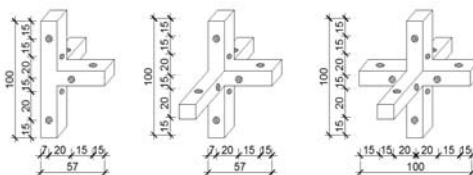
Slika 5 – Geometrija kutijastog elementa od koga su izrađeni stubovi i grede modela

DETALJ (A)



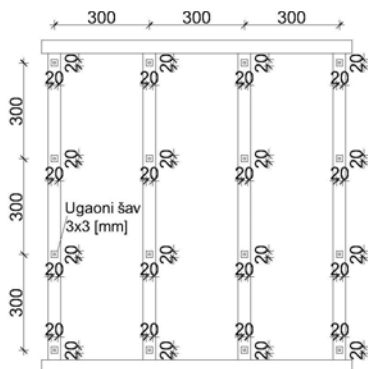
Slika 6 – Detalj veze u jednom od čvorova konstrukcije

Veze greda i stubova ostvaruju se modularnim čvornim čeličnim elementima, slika 7.



Slika 7 – Elementi za vezu stubova i greda pomoću kojih je ostvarena kruta veza

Oslanjanje konstrukcije na podlogu ostvaruje se zavarivanjem, pri čemu su, ispod oslonućih stubova, postavljene čelične pločice debljine 6mm. Ovim je omogućeno solidnije zavarivanje na mestu uklještenja, jer je debljina zida kutijastih profila stubova vrlo mala, 0.8mm, slika 8.



Slika 8 – Veza konstrukcije za vibro-platfomu (kruta veza - uklještenje)

Model konstrukcije je projektovan i izveden modularno, odnosno da je po želji moguće menjati raspored stubova i greda, čime je moguće ostvariti različite geometrije i dispozicije. Tretirani model konstrukcije se sastoji od 143 elementa (79 greda i 64 stuba) slika 9, koji su međusobno povezani pomoću krutih čvornih elemenata prikazanih na slici 7. Na ovaj način je ostvarena praktično kruta veza u čvorovima, a fiksiranje je izvedeno pomoću 528 imbus vijaka M6 u dva ortogonalna pravca - na obe strane grede/stuba, slika 7.



Slika 9 – Model konstrukcije višespratne zgrade na vibro-plaformi

Dimenzije modela su date u tabeli 1. Model visoke zgrade sastoji iz deset spratova. U osnovi je dimenzija 900x900 mm, a gornji deo se završava tornjem dimenzija 300x300x1800 mm.

Tabela 1 – Dimenzije modela višespratne zgrade

Dimenzija	Oznaka	Veličina
<i>Visina</i>	<i>H</i>	3000 mm
<i>Širina u osnovi</i>	<i>a x b</i>	900 x 900 mm
<i>Širina tornja u osnovi</i>	<i>a x b</i>	300x300 mm
<i>Visina sprata</i>	<i>h</i>	300 mm
<i>Broj spratova</i>	<i>n</i>	10
<i>raster</i>	<i>r</i>	300 mm

Poprečni presek stubova i greda je odabran kao kutijasti profil zbog zadovoljavajuće krutosti i jednostavnijeg spajanja. Dimenzije poprečnog preseka štapova su 15 x 15 mm, dok je debljina zida $t=0.8\text{mm}$.

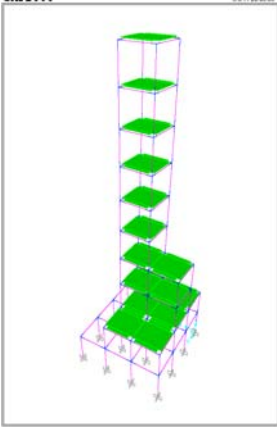
Kako bi se realizovale približno krute tavanice, dodatni čelični limovi su postavljeni u nivou tavanica, slika 6. Čelične tavanice su fiksirane istim vijcima kojima se ostvaruje veza u čvorovima, i iste su odvojene 8 mm od greda, a fiksirane su osam tačaka. Čelične tavanice ujedno služe za fiksiranje dodatnih masa na tavanicama, a u cilju smanjenja sopstvenih frekvencija konstrukcije, kako bi sopstvene frekvencije konstrukcije bile bliske mogućnostima pobude na konstruisanoj vibro-platforni. Napominje se da u nivou I sprata nisu postavljene čelične tavanice, a u cilju da se modelom realizuje i tzv. fleksibilno prizemlje.

Dodatne mase, u cilju obaranja sopstvenih frekvencija modela konstrukcije višespratne zgrade, realizovane su dodavanjem betonskih i čeličnih ploča koje se fiksiraju za čelične tavanice modela konstrukcije. Dodatne mase realizovane su na sledeći način:

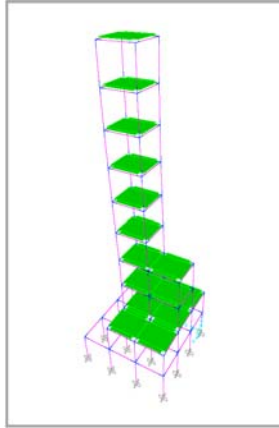
- U nivou I sprata nema dodatnih masa iz razloga njihovog malog uticaja na sostvene frekvencije modela;
- U nivou II sprata, u svakom od 6 polja modela, dodatna masa je realizovana betonskim pločama dimenzija 260x260x30 mm i mase 4.5kg, sa vezom svake betonske ploče sa čeličnom tavanicom sa 4 vijka M10.
- U nivou III i IV sprata, dodatna masa realizovana je, slično kao i u nivou II sprata, betonskim pločama dimenzija 260x260x30mm i mase 4.5 kg uz fiksiranje sa 4 x M10 vijcima.
- U nivou V i VI sprata dodatne mase su realizovane betonskim pločama dimenzija 260x260x50 mm i mase 10.5 kg, pri čemu je veza ostvarena na isti način kao i na nižim etažama.
- U nivou VII i VIII tavanice dodatna masa je realizovana čeličnim elementom mase 13.5 kg i 16.2 kg, respektivno, uz fiksiranje za čelične ploče koje ukružuju tavanice u tim nivoima.
- U nivou IX i X sprata dodatne mase su realizovane sa po dve čelične ploče masa od po 16 kg, odnosno ukupna dodatna masa u nivou ovih tavanica iznosi 32 kg. Veza je ostvarena međusobnim pritezanjem dve ploče postavljene iznad i ispod greda modela konstrukcije, jednim vijkom M10.

5 ZAKLJUČAK

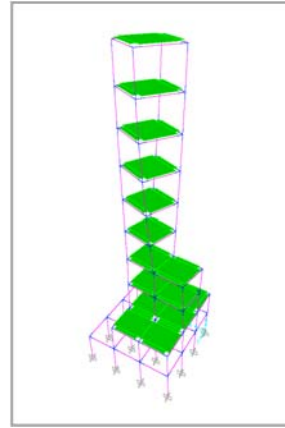
Modalna analiza modela čelične višespratne zgrade, sa karakteristikama koje odgovaraju prethodno opisanoj geometriji i dodatim masama, sprovedena je u programu za numeričku analizu konstrukcija primenom konačnih elemenata SAP2000.



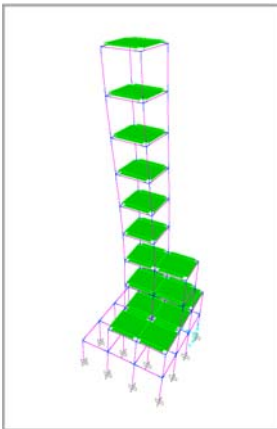
$f_1 = 4.17 \text{ Hz}$ I-x-mod savijanja



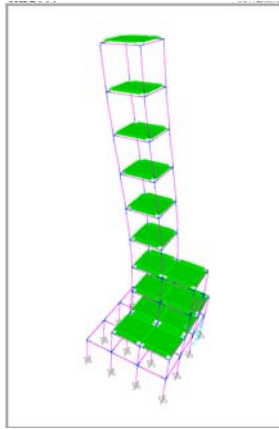
$f_2 = 4.40 \text{ Hz}$ I-y-mod savijanja



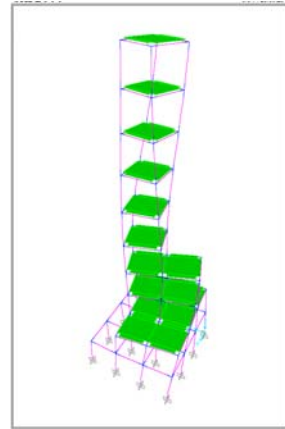
$f_3 = 6.42 \text{ Hz}$ I-torzioni mode



$f_4 = 10.75 \text{ Hz}$ II-x-mod savijanja



$f_5 = 10.85 \text{ Hz}$ II-y-mod savijanja



$f_6 = 14.35 \text{ Hz}$ II-torzioni mode

Slika 10 – Numerički određeni modovi oscilovanja i frekvencije izrađenog modela

Shodno rezultatima ovakve analize, izrađenim modelom je postignut postavljeni cilj, jer su prve tri, na osnovu numeričkog proračuna, sopstvene frekvencije manje od 7 Hz, slika 10. Takođe, evidentno je da su prva ti moda oscilovanja očekivani osnovni modovi oscilovanja višespratnih objekata, savijaje u dva ortogonalna pravca i torzija, shodno prikazanim formama oscilovanja, slika 10.

ZAHVALNOST

Autori se najiskrenije zahvaljuju Ministarstvu obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansijsku podršku ostvarenu kroz projekat Tehnološkog razvoja TR-36048: *Istraživanje stanja i metoda unapređenja građevinskih konstrukcija sa aspekta upotrebljivosti, nosivosti, ekonomičnosti i održavanja*, finansiranom od strane Ministarstva obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Vukotić, R.: *Ispitivanje konstrukcija*, Beograd, Naučna knjiga, **1998**.
- [2] Ančić, D., Fajfar, P., Petrović, B., Szavits, N. A., Tomažević, M.: *Zemljotresno Inženjerstvo*, Beograd, Građevinska knjiga, **1990**.
- [3] Brčić, V.: *Dinamika konstrukcija*, Beograd, Građevinska knjiga, **1981**.