

**Univerzitet u Nišu**  
**Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš**  
**Nastavno-naučnom veću Fakulteta**

Odlukom Nastavno-naučnog veća Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu broj 8/245 od 28.01.2015. godine imenovani smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije, pod naslovom:

**Teorijska i eksperimentalna analiza armiranobetonskih linijskih nosača sa polukrutim vezama**

koju je 12.01.2015. godine predao kandidat **mr Dragan Zlatkov**, dipl.građ.inž.

U skladu sa navedenom Odlukom podnosimo sledeći

**I Z V E Š T A J**

**I     P O D A C I   O   K O M I S I J I**

Sastav Komisije:

1. dr **Slavko Zdravković**, redovni profesor Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu
2. dr **Danilo Ristić**, redovni profesor Instituta za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju IZIIS u Skoplju
3. dr **Radomir Folić**, profesor emeritus Univerziteta u Novom Sadu, FTN N. Sad
4. dr **Vlado Micov**, redovni profesor Instituta za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju IZIIS u Skoplju
5. dr **Slobodan Ranković**, docent Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu

**II    P O D A C I   O   K A N D I D A T U**

1. Ime, ime jednog roditelja, prezime:  
**Dragan, Marin, Zlatkov**
2. Datum i mesto rođenja, opština, država:  
02.09.1958. god. Gornja Nevlja, Dimitrovgrad, Republika Srbija
3. Datum odbrane, mesto i naziv magistarske teze:  
15.05.1998. Građevinski fakultet u Nišu, "**Analiza linijskih sistema sa polukrutim vezama štapova u čvorovima**"
4. Uža naučna oblast iz koje je stečeno akademsko zvanje magistra nauka:  
Tehnička mehanika i teorija konstrukcija

### III PREGLED DOKTORSKE DISERTACIJE

Istraživanja u ovoj disertaciji kandidat je prezentirao na 283 strana, u 17 (sedamnaest) poglavlja. Disertacija sadrži 284 slika i fotografija, 14 tabela sa 157 bibliografskih podataka od kojih je najveći broj adekvatno citiran u tekstu.

Doktorska disertacija je organizovana na sledeći način:

#### DEO I – LINEARNA ANALIZA NOSAČA SA POLUKRUTIM VEZAMA

1. Uvodne napomene (18 str. od 1-1 do 1-18);
2. Istraživanje veza prema projektu Cost C1 (15 str. od 2-1 do 2-15);
3. Proračun linijskih sistema sa polukrutim vezama štapova metodom deformacije (10 str. od 3-1 do 3-10);
4. Varijaciona formulacija određivanja matrice krutosti i matrice masa (11 str. od 4-1 do 4-11);
5. Primena računara u analizi konstrukcija sa polukrutim vezama (11 str. od 5-1 do 5-11);
6. Eksperimentalna ispitivanja montažnih konstrukcija sa polukrutim vezama (14 str. od 6-1 do 6-14);
7. Eksperimentalna ispitivanja dinamičkih karakteristika montažnih AB konstrukcija MINOMA i AMONT (19 str. od 7-1 do 7-19);

#### DEO II – NELINEARNA ANALIZA NOSAČA SA POLUKRUTIM VEZAMA

8. Oštećenja i rušenja montažnih objekata sa polukrutim vezama i njihovi uzroci (9 str. od 8-1 do 8-9);
9. Eksperimentalna istraživanja ponašanja konstruktivnih veza u prirodnoj veličini pri dejstvu cikličnih opterećenja do loma (21 str. od 9-1 do 9-21);
10. Formulisanje unapređenog koncepta za nelinearnu analizu seizmičkog odgovora hala sa polukrutim vezama (7 str. od 7-1 do 7-7);
11. Formulisanje modela nelinearne analize seizmičkog odgovora okvira sa polukrutim vezama (15 str. od 11-1 do 11-15);
12. Metodološki koncept razvijenog kompjuterskog softvera za detaljnu analizu seizmičkog odgovora kompleksnih sistema koristeći prednosti nelinearnih modela (5 str. od 12-1 do 12-5);
13. Primena formulisanog nelinearnog analitičkog modela za analizu seizmičkog odgovora prototipa hale sa polukrutim vezama (19 str. od 13-1 do 13-19);
14. Analiza nelinearnog seizmičkog odgovora tipske hale za dejstvo zemljotresa različitih intenziteta u poprečnom pravcu (36 str. od 14-1 do 14-36);
15. Analiza nelinearnog seizmičkog odgovora tipske hale za dejstvo zemljotresa različitih intenziteta u podužnom pravcu (34 str. od 15-1 do 15-34);
16. Diskusija rezultata dobijenih na osnovu izvršenih analitičkih istraživanja nelinearnog seizmičkog odgovora hale sa polukrutim vezama (11 str. od 16-1 do 16-11);
17. Završne napomene (5 str. od 17-1 do 17-5);
18. Literatura (9 str. od 18-1 do 18-9).

## IV VREDNOVANJE POJEDINIH DELOVA DOKTORSKE DISERTACIJE

U disertaciji je prikazano teorijsko, eksperimentalno i numeričko istraživanje koje se odnosi na armiranobetonske nosače sa popustljivim-polukrutim vezama (*semi-rigid connections*). Disertacija je podeljena u dva dela. U **prvom delu** disertacije (**poglavljja 1-7**), je uz uvodna razmatranja prikazana linearna analiza nosača sa polukrutim vezama i njeno korišćenje. **Drugi deo (poglavljja 8-17)** odnosi se na nelinearnu analizu nosača sa polukrutim vezama. Ovaj deo sadrži zaključke i odgovarajuće preporuke.

U uvodnom delu (**poglavlje 1**) je dat pregled dosadašnjih rezultata naučno-istraživačkog, teorijskog i eksperimentalnog rada iz ove oblasti u svetu, posebno u oblasti armiranobetonskih (AB) linijskih nosača. Prikazan je predmet i problem istraživanja, ciljevi, hipoteze-polazišta i primenjena metodologija istraživanja, sa kratkim prikazom postignutih rezultata. Dat je i pregled razvoja proračuna konstrukcija sa polukrutim vezama u našoj zemlji.

U **poglavlju 2** sažeto su prikazani rezultati međunarodnog projekta COST C1 "Semi-Rigid Behaviour", posebno u sklopu radnih grupa za prethodno napregnute i AB konstrukcije i za aseizmičko projektovanje, tj. projektovanje seizmički otpornih konstrukcija.

U **poglavlju 3** sažeto je prikazan proračun konstrukcija sa polukrutim vezama štapova primenom klasične metode deformacije. U okviru teorijske osnove analize sistema sa polukrutim vezama prikazana je i matrična formulacija analize sistema sa polukruto vezanim štapovima.

U **poglavlju 4** su određene matrica krutosti i matrica masa sistema sa polukrutim vezama korišćenjem varijacionih principa. Prikazani su rezultati sopstvenih teorijskih istraživanja, kojim su određene interpolacione funkcije, matrica krutosti i konzistentna matrica masa štapa sa polukrutim vezama, čije korišćenje omogućava relativno brzu i jednostavnu analizu ovih sistema savremenim metodama proračuna konstrukcija. Rezultati ovih istraživanja predstavljaju značajan teorijski doprinos disertacije.

U **poglavlju 5** je, na bazi rezultata teorijskih istraživanja prikazanih u poglavlju 4, pokazana primena računara u analizi konstrukcija sa polukrutim vezama. Obradena su dva numerička primera uz diskusiju rezultata.

U prvom primeru je dat seizmički proračun okvira sa polukrutim vezama prema EN 1998-1: 2004 objekta industrijske hale "Elektrotehna" u Nišu, izvedene u montažnom AB konstruktivnom sistemu AMONT, koji je u drugom delu disertacije usvojen kao prototip objekat za kvazi-statičko ispitivanje modela karakterističnih veza i za nelinearnu analizu sistema. Proračun je urađen metodom ekvivalentnih bočnih sila, a dinamičke karakteristike konstrukcije, seizmičke sile i pomeranja za oba ortogonalna pravca su određeni programskim paketom SASS. Na osnovu dobijenih rezultata, uzimanjem u obzir stepena krutosti veza, zaključeno je da isti značajno utiče na preraspodelu uticaja. Pokazano je da i mali stepen krutosti veze bitno smanjuje veličinu pomeranja, izaziva preraspodelu uticaja u konstrukciji, i utiče na njene osnovne dinamičke karakteristike. Uzimanjem u obzir realne krutosti veza i seizmički proračun u linearnoj oblasti daje zadovoljavajuće rezultate, što je u ovom primeru pokazano upoređenjem istih sa rezultatima dobijenim nelinearnom dinamičkom analizom, koja je sprovedena u drugom delu disertacije.

U drugom primeru je analizirana konstrukcija objekta fabrike za proizvodnju medicinskih sredstava "Fressenius" u Vršcu izvedena u montažnom AB konstruktivnom sistemu "Putinženjering" iz Niša. Analizirane su promene pomerljivosti sistema, vitkosti stubova i osnovnih dinamičkih

karakteristika sistema, kada se veze glavnih nosača i stubova tretiraju kao polukrute, odnosno sa određenim stepenom uklještenja i/ili popustljivosti. Analiza je sprovedena primenom najnovije verzije programskog paketa TOWER7 koji omogućava analizu sistema sa polukrutim vezama. Sračunate su vrednosti i prikazani dijagrami zavisnosti pomeranja vrha središnjeg stuba usled proračunskih seizmičkih sila, promene vrednosti periode prvog osnovnog tona vibracija i promene vitkosti stubova za različite stepene uklještenja između greda i stubova. Analizom funkcionalnih zavisnosti navedenih veličina uz pokazivanje njihovog brzog opadanja, odnosno da i vrlo mali stepeni uklještenja (5%-10%) povoljno utiču na preraspodelu uticaja u konstrukciji, promenu njenih dinamičkih karakteristika, smanjenje vitkosti stubova i obezbeđuju dodatnu stabilnost i sigurnost objekta. Zaključeno je da je kod dvobrodnih i višebrodnih okvira delimično kontinuiranje konstrukcije na spoju greda i srednjih stubova izvođački relativno jednostavno, a da za realizaciju istog nisu potrebna velika ulaganja.

Matrična formulacija izložena u prethodnim poglavljima disertacije omogućila je da se bez izmena u strukturi programa isti mogu koristiti za proračun konstrukcija sa polukrutim vezama. Izvedeni zaključci o izuzetno povoljnim uticajima čak i malih stepena uklještenja za čiju realizaciju nisu potrebna velika ulaganja predstavljaju značajan doprinos praktičnoj primeni.

**U poglavlju 6** su prikazani i analizirani eksperimentalni rezultati ponašanja montažnih armiranobetonskih konstrukcija sa polukrutim vezama na izvedenim objektima Minoma i Hladnjača Lovopromet u Nišu u prirodnoj veličini pri statičkom opterećenju. Detaljno je opisana konstrukcija objekata, tok eksperimenata, raspored mernih mesta i mernih instrumenata, korišćena oprema. Kako je cilj eksperimentalnih istraživanja bio određivanje stepena kontinuiranja veza, posebna pažnja je posvećena merenju ugiba i nagiba elastične linije za različite faze opterećenja. Rezultati su prikazani grafički i tabelarno uz diskusiju rezultata na osnovu kojih su formulisani zaključci.

Rezultati eksperimentalnog ispitivanja međuspratnih konstrukcija i primarnih AB nosača, koji su projektovani i izvedeni kao proste grede, a kontinuirani posle montaže i betoniranja "in situ", potvrđuju njihov delimični kontinuitet, što uz pravilno armiranje iznad srednjih oslonaca može bitno uticati na smanjenje armature u poljima, kao i na poboljšanje graničnog stanja upotrebljivosti i ekonomičnosti konstrukcije.

Imajući u vidu da se radi o relativno retkim eksperimentima na izvedenim montažnim AB objektima u prirodnoj veličini, prikazani rezultati u ovom delu disertacije imaju i teorijski i praktičan značaj za projektovanje i izgradnju ovakvih objekata.

**U poglavlju 7** prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja dinamičkih karakteristika dva objekta AB montažnog konstruktivnog sistema MINOMA primenom prinudnih vibracija, slobodnih vibracija i metodom ambijent vibracija i četiri objekta montažnog AB konstruktivnog sistema AMONT metodom ambijent vibracija. Analizirani objekti predstavljaju različite tipove industrijskih hala. U okviru ovih istraživanja opisane su konstrukcije objekata, tok eksperimenata, raspored mernih instrumenata, korišćena oprema i analizirani su rezultati ispitivanja u pogledu dinamičkih karakteristika. Za sve objekte su registrovane dominantne rezonantne frekvencije, odnosno odgovarajući periodi vibracija, određeni su oblici vibracija i koeficijenti prigušenja uz diskusiju dobijenih rezultata.

Od posebnog praktičnog značaja su rezultati na jednom od objekata konstruktivnog sistema AMONT za dve različite faze izgradnje, kada je završena samo skeletna konstrukcija i kada je završen kompletan objekat. Uočena je razlika u sopstvenim frekvencijama, koeficijentima prigušenja i izvedeni su zaključci o uticaju fasadnih i zidova ispune, stolarije, i ostalih nekonstruktivnih elemenata na dinamičke karakteristike predmetne okvirne konstrukcije. Sprovedena dinamička ispitivanja konstruktivnih sistema sa polukrutim vezama u prirodnoj veličini od naročitog su značaja za valorizaciju njihovog ponašanja u seizmičkim područjima, posebno njihovih specifičnih veza i spojeva.

U **drugom delu disertacije** prikazana je nelinearna analiza nosača sa polukrutim vezama, kao i eksperimentalna istraživanja, koja su realizovana u sklopu atestiranja statičke i dinamičke stabilnosti tipskog modula programa hala montažnog AB konstruktivnog sistema AMONT. Data je analiza dobijenih rezultata, numeričko modeliranje i proračun AB linijskih nosača u tom sistemu, sa realnim karakteristikama veza.

U **poglavlju 8** su proučeni realni fenomeni i uzroci oštećenja i rušenja sličnih objekata prilikom dejstva jakih zemljotresa u Americi, Japanu, Kini, Turskoj i Italiji. Prikazana su oštećenja i rušenja konstrukcije hala, montažnih elemenata i veza i naznačeni su ciljevi sprovedenih sopstvenih eksperimentalnih i analitičkih istraživanja.

U **poglavlju 9** su na osnovu odabranog karakterističnog prototipa industrijske hale, koji je široko zastupljen u Srbiji, prikazani rezultati realizovanog veoma obimnog programa eksperimentalnih istraživanja veza koje se primenjuju u praksi, pod dejstvom simuliranog cikličnog i gravitacionog opterećenja do loma. Rezultati ovih eksperimentalnih istraživanja imaju poseban značaj jer su svi ispitivani fizički modeli konstruktivnih veza projektovani i izvedeni u prirodnoj veličini. Svi eksperimentalni rezultati kao i kompletan uvid u nelinearno ponašanje ispitivanih modela, u potpunosti odražavaju realne karakteristike i imaju izuzetan značaj kao sigurna baza podobna za donošenje zaključaka sa praktičnom primenom. Pri tome su istraživane konstruktivne veze u različitim varijantama konstruktivnih sistema primenjivanih pri građenju montažnih objekata sa posebnim naglaskom na objekte industrijskih hala u Srbiji i regionu.

Program realizovanih eksperimentalnih istraživanja obuhvatio je pet najkarakterističnijih konstruktivnih veza i nekonstruktivnih segmenata: veza međuspratne grede sa ugaonim stubom (dva identična modela EM-1 i EM-2), nosivost veze i kontinuitet za prijem negativnog momenta na mestu oslanjanja međuspratnih konstrukcija tipa koritnica iz dva polja (EM-3) i (EM-4), veze stuba sa čašicom temeljne stope (EM-5), veze oslabljenog stuba na mestu oslanjanja međuspratnih nosača iz dva pravca (EM-6) i određivanje kapaciteta nosivosti nosača međuspratnih konstrukcija koji uključuju oslonjene međuspratne koritnice (EM-7).

U disertaciji su detaljno prikazane faze programa eksperimentalnih ispitivanja: pripremni radovi, projektovanje modela i sistema za eksperimentalna ispitivanja, izrada svih modela primenjujući autentičnu tehnologiju izvođača u njihovim pogonima, transport modela, projektovanje instrumentalizacije modela, instaliranje i ispitivanje modela, akvizicija eksperimentalnih rezultata, obrada eksperimentalnih rezultata i izrada izveštaja na osnovu podataka iz eksperimentalnih istraživanja.

Svi modeli su izrađeni i unutrašnje instrumentirani u pogonima kompanije MORAVA, Krušce i kao gotovi transportovani u Institut za zemljotresno inženjerstvo i inženjersku seizmologiju (IZIIS) u Skoplju, u laboratoriju za dinamička ispitivanja, gde su izvršena spoljašnja instrumentiranja i obavljena predviđena eksperimentalna ispitivanja svih modela do stadijuma loma.

Izrada modela, dispozicija ispitivanih modela sa instrumentima za akviziciju eksperimentalnih rezultata, kao i nastala oštećenja modela u toku i na kraju ispitivanja prikazani su na fotografijama i slikama. Eksperimentalno određene histerezisne zavisnosti sila-pomeranje su prikazani grafički, sa ciljem da se što vernije predstavi nelinearan odgovor ispitivanih eksperimentalnih modela. Pregled rezultata eksperimentalnih ispitivanja modela dat je tabelarno, zbirno za sve modele i tekstualno za svaki model ponaosob. Na taj način je omogućeno korišćenje dobijenih rezultata za formulisanje realnih analitičkih modela koji će simulirati nelinearne karakteristike ispitivanih veza i konstrukcije u celini.

U disertaciji su analizirani najznačajniji rezultati eksperimentalnih ispitivanja koji su iskorišćeni za formulisanje unapređenog matematičkog modela za nelinearnu analizu seizmičkog odgovora hala sa polukrutim vezama. Ovo je nov teoretski prilaz rešavanju problema seizmičke otpornosti ovde prikazanih specifičnih objekata za slučaj dejstva jakih zemljotresa.

**U poglavlju 10** je korišćenjem eksperimentalnih rezultata formulisan unapređeni metodološki koncept za analizu objekata sa polukrutim vezama primenom modela zasnovanog na nelinearnoj analizi. Ukazano je na potrebu da se u početnoj fazi projektovanja pravilno postavi koncepcija konstrukcije svakog objekta, pa i AB montažnih hala sa polukrutim vezama, koje su u disertaciji detaljnije analizirane. Ovo je od posebne važnosti za odgovor konstrukcije na zemljotresna dejstva, jer se eventualne greške u koncepciji konstrukcije ne mogu ispraviti proračunskim analizama koliko god one bile detaljne. Istaknuto je da za seizmičku otpornost objekta treba obezbediti da konstrukcija bude sa balansom krutosti, nosivosti i duktilnosti. Činjenica je da (se u projektanskoj praksi često konstrukcije hala tretiraju kao standardni objekti visokogradnje. Najčešće se pri projektovanju istih primenjuju propisi za projektovanje seizmički otpornih konstrukcija koji važe za zgrade. S obzirom da se konstruktivni sistemi industrijskih hala razlikuju u odnosu na zgrade u ovom delu disertacije posebno su istaknute razlike koje se odnose na specifičnosti konstruktivnog sistema, montažnih konstruktivnih elemenata, karakteristike konstruktivnih veza i namenu hale. Predloženi metodološki koncept uključuje u proces analize realniji uticaj dinamičkih efekata seizmičkog odgovora i realne nelinearne karakteristike konstruktivnih elemenata i veza, dobijene eksperimentalnim istraživanjima. Konstrukcija objekta mora da bude sposobna da se odupre horizontalnim dejstvima u bilo kom pravcu i da obezbedi slične karakteristike u pogledu otpornosti i krutosti i u poprečnom i u podužnom pravcu.

**U poglavlju 11** je formulisana i izložena konzistentna teoretska procedura primenljiva za detaljnu nelinearnu analizu seizmičkog odgovora sistema sa polukrutim vezama korišćenjem metode konačnih elemenata (MKE) bazirana na metodi deformacije. Konstatovano je da AB konstrukcije izložene seizmičkim uticajima odlikuje promena krutosti sistema usled pojave pukotina u elementima konstrukcije (materijalna nelinearnost) ili usled efekata velikih pomeranja u odnosu na dimenzije elementa (geometrijska nelinearnost), što upućuje na neophodnost primene nelinearne analize kod sračunavanja odgovora konstrukcije pri seizmičkim dejstvima. Prilikom sračunavanja jednačina statičke ravnoteže primenjena je inkrementalna analiza korak po korak. Kompjuterski program NORA2005, koji je u disertaciji korišćen za nelinearnu analizu ramova sa polukrutim vezama, baziran je na stabilnim numeričkim postupcima: Wilsonov- $\theta$  metod i Newmarkov- $\beta$  metod, čija je osnovna suština izložena u ovom delu disertacije.

**U poglavlju 12** je u najkraćem izložen metodološki koncept razvijenog kompjuterskog softvera korišćenog za detaljnu analizu nelinearnog seizmičkog odgovora odabranog prototipskog objekta. Analitički deo predmetnih istraživanja obuhvata realizaciju obimnih analiza nelinearnog seizmičkog odgovora odabranog karakterističnog prototipskog objekta industrijske hale, sa ciljem da se pokažu praktična primenljivost formulisanog analitičkog modela i teoretske procedure za nelinearnu analizu. Sažeto je prikazan kompjuterski program NORA2005, sa svim njegovim opcijama za analizu.

**U poglavlju 13** je prikazana primena formulisanog nelinearnog analitičkog modela za analizu seizmičkog odgovora prototipa hale sa polukrutim vezama. Detaljno je opisan prototip hale za realizaciju analitičkih istraživanja i analitički su određene i grafički prikazane karakteristike granične nosivosti poprečnih preseka svih konstruktivnih elemenata. Za analitičko definisanje potrebnih relacija kojim se predstavljaju zavisnosti moment krivina ( $M-\Phi$ ) i moment-aksijalna sila ( $M-N$ ) za karakteristične poprečne preseke analiziranog objekta korišćen je kompjuterski program SEKAP (Section Capacity). Dati su nelinearni matematički modeli objekta za poprečni i podužni pravac na osnovu kojih su primenom programa NORA2005 određene periode i forme svojstvenih vibracija.

**U poglavlju 14** su prikazani najznačajniji rezultati analize nelinearnog seizmičkog odgovora u poprečnom pravcu objekta prilikom dejstva realnih registrovanih zemljotresa i to: vremenska istorija ubrzanja tla registrovana na lokaciji Ulcinj-Albatros u toku zemljotresa u Crnoj Gori od 15.04.1979. godine (komponenta N-S) i vremenska istorija ubrzanja tla registrovana za vreme zemljotresa El-Centro od 18.05.1940. godine (komponenta S00E). Za potrebe predmetnih analiza za svaki zemljotres su definisana tri nivoa maksimalnih pik (pick) akceleracija: 0,10g, 0,20g i 0,40g.

Koristeći usvojene akceleroграme kao i definisane nelinearne matematičke modele analizirane konstrukcije, na bazi izvršenih šest nelinearnih analiza objekta za dejstva registrovanih zemljotresa u poprečnom pravcu, dobijen je značajan fond vrednih rezultata. Zbog svoje obimnosti u disertaciji su prikazani odabrani karakteristični rezultati i to u najprikladnijoj grafičkoj formi. Predstavljene su vremenske istorije ubrzanja i pomeranja za karakteristične tačke, kao i vremenske istorije promene momenata savijanja i nelinearni (histerezisni) odgovor karakterističnih poprečnih preseka dat kao zavisnost moment-krivina. Na bazi ovih analiza potvrđeno je da primena nelinearnog matematičkog modela obezbeđuje izvanredan uvid u sve značajne fragmente koje karakterišu realno dinamičko ponašanje sistema za različite intenzitete zemljotresa.

Upoređivanjem intenziteta vibracija sa dobijenim maksimalnim pomeranjima za ova dva zemljotresa, zaključeno je da se oni razlikuju za 20%. Ova razlika pokazuje da frekventni sastav registracije zemljotresa direktno utiče na intenzitet seizmičkog odgovora objekta. Zaključeno je da ova veoma značajna karakteristika zemljotresa nije adekvatno tretirana u propisima za projektovanje seizmički otpornih konstrukcija, ili je tretirana nedovoljno. Zbog toga je kod projektovanja tipskih objekata industrijskih hala veoma važno uključiti u proces projektovanje i amplitudni i potencijalni frekventni sastav očekivanih zemljotresa.

Svi dobijeni rezultati ukazuju da sa povećanjem intenziteta zemljotresa nastaju sve intenzivnije nelinearnosti u poprečnim presecima, koje se veoma lako mogu približiti kapacitetu nosivosti ili čak prevazići kapacitet nosivosti poprečnih preseka konstruktivnih elemenata ili njihovih veza. U tim slučajevima nastaju ili znatna oštećenja ili potpuna rušenja objekata.

Za intenzitete zemljotresa sa pik akceleracijom 0,40g histerezisni dijagrami su dosta otvoreni, što ukazuje na znatno uvećanje nelinearnog ponašanja sistema. Ove analize pokazuju da nelinearni modeli omogućavaju detaljan uvid u karakteristike seizmičkog odgovora analiziranog konstruktivnog sistema sa polukrutim vezama.

**U poglavlju 15** su prikazani najznačajniji rezultati analize nelinearnog seizmičkog odgovora u podužnom pravcu objekta prilikom dejstva istih zemljotresa, sa istim vrednostima pik akceleracija kao za poprečni pravac. Svi rezultati su adekvatno prikazani i analizirani, a izvedeni su skoro identični zaključci kao za poprečni pravac objekta.

Rezultati izvršenih analitičkih istraživanja za oba ortogonalna pravca predstavljaju izvanrednu bazu za sagledavanje specifičnosti od značaja za ocenu realne seizmičke otpornosti ovih objekata.

**U poglavlju 16** su prikazani rezultati do kojih se došlo na osnovu izvršenih analitičkih istraživanja. Koristeći rezultate izvršenih eksperimentalnih istraživanja, kao i mogućnost primene razvijenog kompjuterskog softvera, uspešno su realizovana detaljna istraživanja na bazi kojih su formirani zaključci o stepenu seizmičke otpornosti za tri različite zone seizmičkog intenziteta, respektivno. Ovi zaključci su potkrepljeni tabelarnim prikazom reprezentativnih rezultata. U tabelama su komparativno date maksimalne krivine odgovora konstruktivnog sistema u kritičnim presecima  $\Phi$ (rad/m) za oba zemljotresa i za sve tri pik akceleracije, kao i parametri kapaciteta nosivosti svakog preseka, uključujući granični kapacitet  $\Phi_u$ (rad/m). Ako je  $\Phi_u > \Phi$  to znači da je "odgovor tog preseka po krivini" manji od graničnog kapaciteta i presek je siguran.

Za nivo pobude sa pik akceleracijom 0,10g je evidentno da se konstrukcija ponaša skoro linearno i da nelinearnost nije izražena, jer je uglavnom rezultat pojave prve mikro pukotine u betonu na zategnutoj strani preseka. Za nivo pobude sa pik akceleracijom 0,20g, konstruktivni sistem je sa znatno većim stepenom nelinearnih deformacija. To je vidljivo na prikazanim histerezisnim dijagramima odgovora moment-krivina ( $M-\Phi$ ), koji su u ovom slučaju znatno izraženiji. Na osnovu prikazanih rezultata za nivo pobude sa pik akceleracijom 0,40g, evidentno je da je za oba pravca faktor seizmičke sigurnosti  $FSS > 1$  za sve preseke. Time je potvrđeno da je konstruktivni sistem sa zadovoljavajućim stepenom sigurnosti za ovaj intenzitet zemljotresa, ali su histerezisni dijagrami znatno otvoreniji u najkritičnijim presecima.

Ukazano je da je predmetna konstrukcija sa intenzivnim nelinearnim ponašanjem i da u slučaju incidentne pojave zemljotresa sa većom pik akceleracijom od 0.40g, ista može biti dovedena u novo "nelinearno stanje" u kome bi došlo do velikih oštećenja najkritičnijih poprečnih preseka, ili do potpunog rušenja. Ovakve uvećane pik akceleracije su pri jakim zemljotresima veoma česte i zbog toga konstruktivne veze sistema moraju biti dopunski obezbeđene.

U ovom poglavlju su analizirana i spratna pomeranja sistema za poprečni i podužni pravac dejstva zemljotresa. Na osnovu sprovedenih nelinearnih analiza tabelarno su prikazane veličine pomeranja karakterističnih tačaka u nivou prizemlja i na vrhu objekta, kao i razlika u spratnim pomeranjima između njih.

Zaključeno je da za projektni nivo zemljotresa sa pik akceleracijom 0,20g ovaj uslov za poprečni pravac nije zadovoljen, kako za prizemlje tako i za sprat objekta za zemljotres Ulcinj-Albatros, dok za podužni pravac uslov nije zadovoljen za sprat objekta. Za eventualni zemljotres sa pik akceleracijom 0,40g i za zemljotres Ulcinj-Albatros i El-Centro veličina spratnih pomeranja je prekoračena za oba pravca. Ukazano je na potrebu da se u fazi projektovanja takvih konstrukcija mora uzeti u obzir i takozvani P- $\delta$  efekat, pogotovo kod objekata kod kojih su spratne visine nešto veće, što je slučaj kod industrijskih objekata. Tada je i za svakodnevnu inženjersku praksu potrebno proračun sprovedi i po Teoriji drugog reda.

**U poglavlju 17** su formulisani adekvatni zaključci zasnovani na rezultatima sopstvenih teorijskih eksperimentalnih i numeričkih istraživanja. Pored toga, date su preporuke za projektovanje i za dalja istraživanja. Kroz 16 zaključaka prikazani su konkretni rezultati disertacije koji imaju praktičan značaj. Time je dat nesumnjiv doprinos disertacije razvoju teorijske i eksperimentalne analize AB linijskih nosača sa polukrutim vezama i njenoj primeni u građevinskom konstrukterstvu.

**U završnom delu** disertacije dat je spisak objavljenih radova kandidata relevantnih za temu doktorske disertacije, koji sadrži 33 naslova, kao i popis literature koji sadrži ukupno 153 bibliografskih podataka, od kojih je najveći broj adekvatno analiziran i citiran u tekstu.

## V REZULTATI ISTRAŽIVANJA I ZAKLJUČCI

Predmet podnete disertacije je teorijsko, eksperimentalno i numeričko istraživanje koje se odnosi na AB nosače sa popustljivim-polukrutim vezama. Prikazani su rezultati sopstvenih teorijskih istraživanja, kojim su određene interpolacione funkcije, matrica krutosti i konzistentna matrica masa štapa sa polukrutim vezama, čije korišćenje omogućava relativno brzu i jednostavnu analizu ovih sistema savremenim metodama proračuna konstrukcija. Nanumeričkim primerima je pokazana primena računara u analizi konstrukcija sa polukrutim vezama. Pokazano je da se bez izmena u strukturi postojećih programskih paketa isti mogu koristiti za proračun konstrukcija sa polukrutim vezama, čime su kruto i zglobno vezani štapovi zamenjeni štapovi masa realnim vezama. Izvedeni su zaključci o izuzetno povoljnim uticajima čak i malih stepena uklještenja, za čiju realizaciju nisu potrebna velika materijalna ulaganja. U ovom delu su ponovljeni i sumirani rezultati koji su i napred izloženi.

Prikazani su i analizirani eksperimentalni rezultati ponašanja montažnih AB konstrukcija sa polukrutim vezama na izvedenim objektima u prirodnoj veličini pri statičkom opterećenju. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja međuspratnih konstrukcija i AB nosača potvrđuju njihov delimični kontinuitet, što bitno utiče na smanjenje armature u poljima, kao i na poboljšanje graničnog stanja upotrebljivosti i ukupne ekonomičnosti konstrukcije. Imajući u vidu relativno mali broj do sad sprovedenih eksperimenata na izvedenim montažnim AB objektima u prirodnoj veličini, prikazani rezultati u ovom delu disertacije imaju izuzetan teorijski i praktičan značaj za projektovanje i izgradnju ovakvih objekata.



Eksperimentalnim ispitivanjima dinamičkih karakteristika izvedenih montažnih AB objekata primenom prinudnih vibracija i metodom ambijent vibracija registrovane su dominantne rezonantne frekvencije, odnosno odgovarajući periodi vibracija, određeni su oblici vibracija i koeficijenti prigušenja uz diskusiju dobijenih rezultata. Od posebnog praktičnog značaja su rezultati ispitivanja na jednom od objekata za dve različite faze izgradnje, kada je završena samo okvirna konstrukcija i kada je završen kompletan objekat. Izvedeni su zaključci o uticaju fasadnih i zidova ispune, kao i ostalih nenonsećih elemenata na dinamičke karakteristike okvirne konstrukcije.

Od posebnog su značaja rezultati realizovanog programa eksperimentalnih istraživanja veza koje se primenjuju u praksi, pod dejstvom simuliranih cikličnih i gravitacionih opterećenja do loma. Ovi rezultati imaju naročit značaj zbog toga što su svi ispitivani fizički modeli veza projektovani i izvedeni u prirodnoj veličini. Kompletan uvid u nelinearno ponašanje ispitivanih modela, odražavaju realne karakteristike i imaju izuzetan značaj kao sigurna baza podobna za donošenje zaključaka sa praktičnom primenom, čime je omogućeno njihovo korišćenje za formulisanje realnih analitičkih modela koji će simulirati nelinearne karakteristike ispitivanih veza i konstrukcije u celini. Istraživane su veze konstruktivnih sistema koji se primenjuju pri građenju montažnih AB objekata industrijskih hala u Srbiji i regionu.

Koristeći eksperimentalne rezultate formulisan je unapređeni metodološki koncept za analizu objekata sa polukrutim vezama primenom modela zasnovanog na nelinearnoj analizi. Posebno su istaknute razlike koje se odnose na specifičnosti konstruktivnog sistema, montažnih konstruktivnih elemenata, karakteristike konstruktivnih veza i namenu hale. Predloženi metodološki koncept uključuje u procesu analize realniji uticaj dinamičkih efekata seizmičkog odgovora i realne nelinearne karakteristike konstruktivnih elemenata i veza, dobijene eksperimentalnim istraživanjima.

Analitički deo predmetnih istraživanja obuhvata realizaciju obimnih analiza nelinearnog seizmičkog odgovora odabranog karakterističnog prototipskog objekta industrijske hale, sa ciljem da se pokaže praktična primenljivost formulisanog analitičkog modela i teoretske procedure za nelinearnu analizu. Sažeto je prikazan kompjuterski program NORA2005, koji je u disertaciji korišćen za nelinearnu analizu ramova sa polukrutim vezama sa njegovim opcijama za analizu. Detaljno je opisan prototip hale za realizaciju analitičkih istraživanja i analitički su određene i grafički prikazane karakteristike granične nosivosti poprečnih preseka svih konstruktivnih elemenata.

Za usvojene akceleroگرامe i tri nivoa pik akceleracije, kao i definisane nelinearne matematičke modele analizirane konstrukcije, na bazi izvršenih nelinearnih analiza objekta za dejstva registrovanih zemljotresa u poprečnom i podužnom pravcu, dobijen je značajan fond rezultata. U disertaciji su odabrani samo neki karakteristični rezultati i prikazani u grafičkoj formi. Predstavljene su vremenske istorije ubrzanja i pomeranja za karakteristične tačke, kao i vremenske istorije promene momenata savijanja i nelinearni (histerezisni) odgovor karakterističnih poprečnih preseka dat preko zavisnosti moment-krivina sila-pomeranje. Na bazi ovih analiza nedvosmisleno je potvrđeno da primena nelinearnog matematičkog modela obezbeđuje adekvatan uvid u realno dinamičko ponašanje sistema za različite intenzitete zemljotresa.

Upoređivanje intenziteta vibracija sa dobijenim maksimalnim pomeranjima za dva zemljotresa, pokazuje da amplitudni i frekventni sastav registracije zemljotresa direktno utiče na intenzitet seizmičkog odgovora objekta. Zaključeno je da ova veoma značajna karakteristika zemljotresa nije adekvatno tretirana u propisima za projektovanje seizmički otpornih konstrukcija, te se preporučuje da se kod projektovanja tipskih objekata industrijskih hala u proces projektovanja uključi i frekventni sastav očekivanih zemljotresa.

Dobijeni rezultati ukazuju da sa povećanjem intenziteta zemljotresa nastaju sve izraženije nelinearnosti u poprečnim presecima, koje se veoma lako mogu približiti kapacitetu nosivosti ili je čak prevazići za poprečne preseke konstruktivnih elemenata i/ili njihovih veza. Za zemljotrese sa pik

akceleraciom 0,40g histerezisni dijagrami su dosta otvoreni, što ukazuje na izraženo nelinearno ponašanja sistema. Ukazano je da je predmetna konstrukcija sa intenzivnim nelinearnim ponašanjem i da u slučaju incidentne pojave zemljotresa sa većom pik akceleracijom od 0.40g, ista može biti dovedena u novo "nelinearno stanje" u kome bi došlo do velikih oštećenja najkritičnijih poprečnih preseka ili do potpunog rušenja. Ovakve uvećane pik akceleracije su pri jakim zemljotresima veoma česte i zbog toga konstruktivne veze sistema moraju biti dopunski obezbeđene. Analizirana su i spratna pomeranja sistema za poprečni i podužni pravac dejstva zemljotresa i prikazane su veličine pomeranja karakterističnih tačaka u nivou prizemlja i na vrhu objekta, kao i razlika u spratnim pomeranjima između njih. Ukazano je na potrebu da se u fazi projektovanja takvih konstrukcija mora uzeti u obzir i takozvani P- $\delta$  efekat, kada je i za svakodnevnu inženjersku praksu potrebno proračun sprovediti i po Teoriji drugog reda.

## VI OCENA DOKTORSKE DISERTACIJE

Na osnovu vrednovanja pojedinih delova disertacije konstatovali smo da je kandidat u rešavanju savremenog naučnog problema koristio poznate i priznate naučne metode (eksperimentalna analiza, numeričko modeliranje, komparativna analiza itd.). Rezultati istraživanja prikazani su na jasan i razumljiv način. Formulirani zaključci u radu su potkrepljeni odgovarajućim analizama i rezultatima eksperimentalnih istraživanja, kao i numeričkim simulacijama. Istraživanja su pokazala da ponašanje veza mora biti uzeto u proračun prilikom najranije faze projektovanja konstrukcije. Da bi se obuhvatilo ponašanje veza mnogi postojeći programski paketi za proračun konstrukcija pored već poznatih konačnih elemenata, su dopunjen i elementima sa konstitutivnim jednačinama koje uzimaju u obzir realno ponašanje veza.

Tačnost pojedinih parametara matematičkih modela je verifikovana i eksperimentalnim putem. Pokazano je da montažna gradnja zahteva neizbežno proučavanje problema spojnih sredstava i način spajanja montažnih elemenata u konstruktivnu celinu. Zbog toga su u disertaciji rezultati teorijskih odnosno analitičkih rešenja verifikovani eksperimentalnim ispitivanjima na objektima u prirodnoj veličini. Značajan naučni doprinos predstavljaju rezultati eksperimentalno određenih osnovnih dinamičkih karakteristika metodom ambijent vibracija na većem broju objekata montažnih sistema u prirodnoj veličini, sa posebnim osvrtom na uticaj krutosti veza i krutosti ispune kod ovih AB konstrukcija sa polukrutim vezama.

Pokazano je da su AB linijski nosači, koji su međusobno povezani polukrutim vezama u konstruktivni sistem sa veoma specifičnim naponsko-deformacijskim karakteristikama, a koje su detaljno istražene i potvrđene eksperimentalnim putem, ispitivanjem fizičkih modela u prirodnoj veličini kvazi statičkim i gravitacionim opterećenjem do loma. Za najkarakterističnije veze određene su histerezisne veze moment-krivina i sila-pomeranje u cilju pouzdanije praktične primene istih, posebno u seizmički aktivnim područjima.

Analitička i numerička istraživanja izvršena u okviru ove disertacije svojim rezultatima su doprinela formulisanju proračunskih modela koji sagledavaju stvarno nelinearno ponašanje montažnih AB industrijskih hala, posebno pri dejstvu jakih zemljotresa. Primenom kompjuterskog programa NORA2005 sprovedene su obimne nelinearne analize na numeričkom modelu prototipa objekta, koristeći standardni metod konačnih elemenata, čime je dobijen obiman fond numeričkih rezultata koji imaju izvanredan istraživački značaj.

Primenjeni postupci i izvedeni zaključci su dovoljno opšti da se mogu primeniti i u drugim, sličnim, istraživanjima i analizama. Korektno su formulirani zaključci i predlozi za projektovanje i dalja istraživanja. Podaci kojima se kandidat služio su relevantni i uverljivi, a tumačenje rezultata jasno i korektno prezentovano. Rezultati su pregledno prikazani sa velikim brojem tabela, slika, grafikona i autorskih fotografija. Disertacija sadrži sve bitne elemente i predstavlja originalan doprinos proučavanju AB nosača sa popustljivim-polukrutim vezama.

U disertaciji su definisani predmet, polazne pretpostavke i metode istraživanja. Sprovedeno istraživanje i analize su samostalne i originalne. Navedeni rezultati istraživanja imaju širi naučni i stručni značaj za eksperimentalno i numeričko istraživanje AB nosača sa popustljivim-polukrutim vezama. Rezultati istraživanja imaju teorijski i praktičan značaj za projektovanje i izgradnju ovakvih objekata. Dobijene rezultate moguće je koristiti u naučne i edukativne svrhe, kao i u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

## VII PREDLOG

Imajući u vidu prethodno izvedenu analizu i zaključke, komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu da prihvati pozitivnu ocenu i odobri usmenu odbranu doktorske disertacije pod naslovom "**Teorijska i eksperimentalna analiza armiranobetonskih linijskih nosača sa polukrutim vezama**" kandidata mr Dragana M. Zlatkova, dipl. građ.inž.


U Nišu,  
februara 2015. godine

Članovi Komisije:



1. \_\_\_\_\_

dr **Slavko Zdravković**, red. prof. (mentor)  
Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu



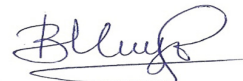
2. \_\_\_\_\_

dr **Danilo Ristić**, red. prof. Institut za zemljotresno  
inženjerstvo i inženjersku seizmologiju IZIIS u  
Skoplju



3. \_\_\_\_\_

dr **Radomir Folić**, profesor emeritus  
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu,



4. \_\_\_\_\_

dr **Vlado Micov**, red. prof. Institut za  
zemljotresno inženjerstvo i inženjersku  
seizmologiju IZIIS u Skoplju



5. \_\_\_\_\_

dr **Slobodan Ranković**, docent  
Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu