

ПАРАМЕТАРСКА АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ ЧЕЛИЧНИХ РАМОВА ПРИМЕНОМ СОФТВЕРА ABAQUS

PARAMETRIC STABILITY ANALYSIS OF STEEL FRAMES USING ABAQUS SOFTWARE

Јована Никачев, Ђорђе Јовановић, Тања Перчић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област - ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај - Фокус рада је на параметарској анализи стабилности Г и просторног рама са унетом почетном геометријском имперфекцијом. Истражује се утицај различитих типова угаоног укрућења (кутијастог, дијагоналног и комбинованог) и нумеричких фактора (тип елемента мреже и величина мреже у Абакусу) на стабилност ових конструкција, са циљем оптимизације њиховог дизајна.

Кључне речи: Стабилност, имперфекције, челичне конструкције, Абакус

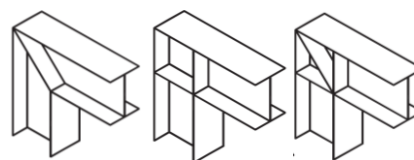
Abstract - The focus of this work is the parametric analysis of the stability of G and spatial frames with an introduced initial geometric imperfection. It investigates the influence of different types of angle stiffeners (box, diagonal, and combined) and numerical factors (mesh element type and mesh size in Abaqus) on the stability of these structures, with the aim of optimizing their design.

Keywords: Stability, imperfections, steel structures, Abaqus

1. УВОД

Параметарска анализа стабилности Г и просторних рамова са унетом почетном геометријском имперфекцијом, представља битан корак у обезбеђивању поузданости ових конструкција. Због специфичне геометрије, рамови могу бити осетљиви на губитак стабилности под оптерећењем, а угаона укрућења се користе за побољшање њихове носивости и отпорности на извијање. Овај рад има за циљ да истражи утицај различитих типова угаоног укрућења (слика 1) (кутијастог, дијагоналног и комбинованог) на стабилност рамова. Поред конструктивних аспеката, анализа узима у обзир и нумеричке факторе, варирајући тип елемента мреже и њену величину у оквиру МКЕ симулација у Абакусу. Увођење почетне геометријске имперфекције, дефинисане преко комбиновања тонова извијања, омогућава реалистичнију процену понашања конструкције. Кроз

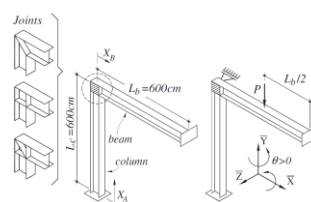
ову параметарску студију, настоји се да се квантификује утицај типа укрућења и карактеристика мреже на стабилност рамова, пружајући основу за оптимизацију њиховог дизајна. Верификација резултата је извршена поређењем предметних модела са линијским моделом из софтвера Matrix 3D.



Слика 1. Врсте угаоног укрућења [2]

2. ГЕОМЕТРИЈА, МАТЕРИЈАЛИЗАЦИЈА И МКЕ МОДЕЛ РАМОВА

Анализирани су челични Г рамови од I профила димензија 200x200x5мм, направљени од челика S235 са модулом еластичности $E=210\text{GPa}$, са укљештеним крајевима и бочно придржаним спојем греде и стуба. Рамови су изложени комбинованом оптерећењу: вертикалној концентрисаној сили од 40kN и хоризонталној сили од 5kN, обе нанете у тежишту попречног пресека на средини распона греде.



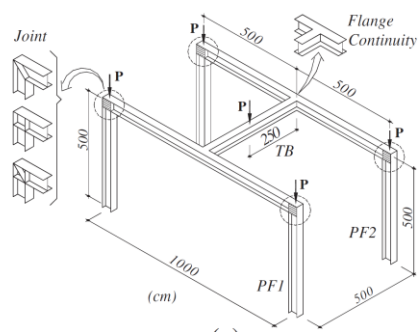
Слика 2. Геометрија Г рама [2]

Предмет анализе био је и просторни рам састављен од два паралелна П рама, међусобно размакнута 5m. Сваки П рам је имао стубове висине 5m и греде дужине 10m, са попречним пресеком од завареног И профила 300x150x8мм од челика S235 са модулом еластичности $E=210\text{GPa}$. Два П рама су била повезана спојном гредом дужине 5m са истим попречним пресеком. Угаона укрућења су постављена на спојевима греда и стубова П рамова. Просторни рам је био оптерећен концентрисаним вертикалним силама на средини спојне греде и на спојевима греда и стубова П рамова. Ослонци су били укљештени на крајевима стубова П рамова, непокретни у Z и Y правцу на спојевима греда

НАПОМЕНА:

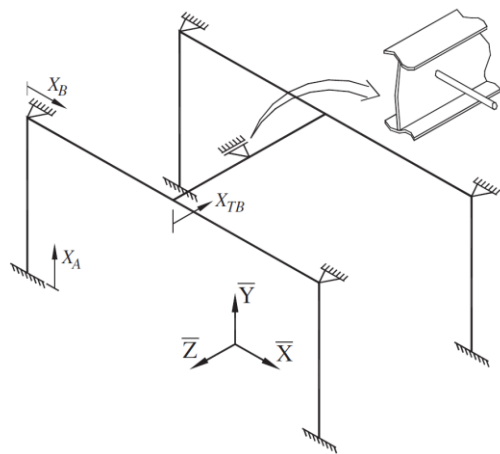
Овај рад је проистекао из мастер рада чији ментор је био др Ђорђе Јовановић, доцент.

и стубова П рамова, и покретни у Х правцу на средини спојне греде.



Слика 3. Геометрија просторног рама [2]

Предмет анализе био је и просторни рам састављен од два паралелна П рама, међусобно размакнута 5m. Сваки П рам је имао стубове висине 5m и греде дужине 10m, са попречним пресеком од завареног И профила 300x150x8mm од челика S235 са модулом еластичности $E=210\text{GPa}$. Два П рама су била повезана спојном гредом дужине 5m са истим попречним пресеком. Угаона укрућења су постављена на спојевима греда и стубова П рамова. Просторни рам је био оптерећен концентрисаним вертикалним силама на средини спојне греде и на спојевима греда и стубова П рамова. Ослонци су били уклештени на крајевима стубова П рамова, непокретни у Z и Y правцу на спојевима греда и стубова П рамова, и покретни у X правцу на средини спојне греде.



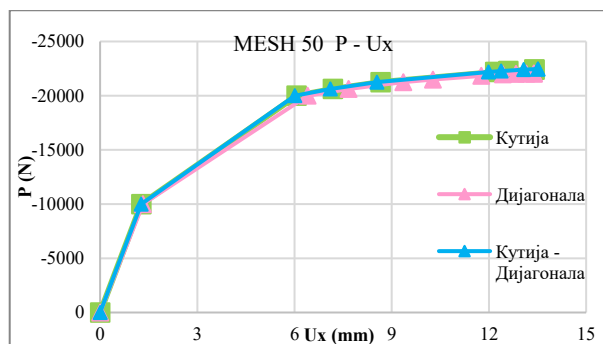
Слика 4. Геометрија просторног рама - ослонци [2]

3. РЕЗУЛТАТИ

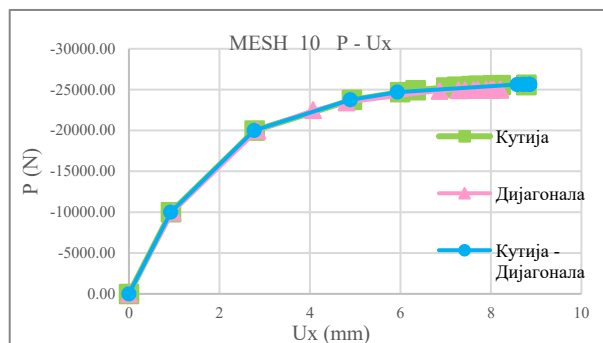
3.1. Резултати г рама

ПОРЕЂЕЊЕ КРИТИЧНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Анализа критичног оптерећења са елементом величине 50mm и типом мреже S4R (слика 5) показује да исто понашање за сва три типа укрућења. Критично оптерећење које је довело до губитка стабилности конструкције је 22,408kN за кутијасто укрућење, 22,039kN за дијагонално, док је критично оптерећење за комбиновано кутијасто-дијагонално укрућење 22,457kN.

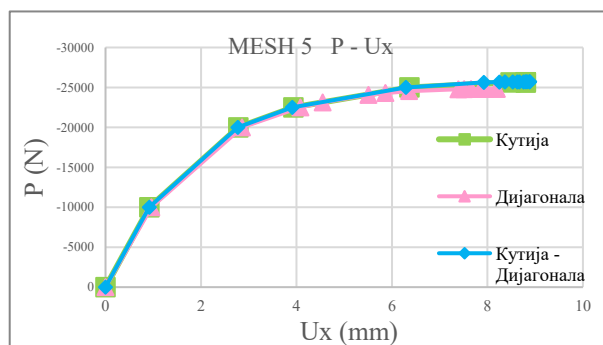


Слика 5. Дијаграм критична сила-бочно померање ($P-U_x$), елемент мреже S4R, величина мреже 50mm



Слика 6. Дијаграм критична сила-бочно померање ($P-U_x$), елемент мреже S4R, величина мреже 10mm

Критично оптерећење које је довело до губитка стабилности (слика 6) конструкције је 25,578kN за кутијасто укрућење, 25,005kN за дијагонално, док је критично оптерећење за комбиновано кутијасто-дијагонално укрућење 25,630kN.



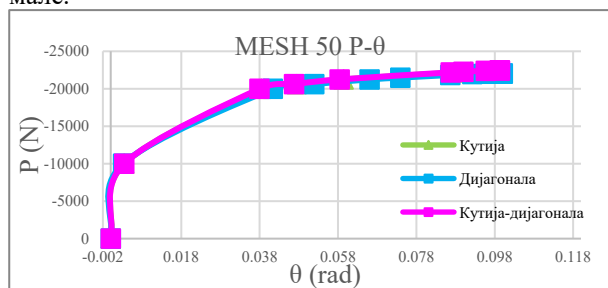
Слика 7. Дијаграм критична сила-бочно померање ($P-U_x$), елемент мреже S4R, величина мреже 5mm

Анализа критичног оптерећења са елементом величине 5mm и типом мреже S4R (слика 7) показује да тип укрућења рама има утицаја на резултате критичног оптерећења. Критично оптерећење које је довело до губитка стабилности конструкције је 25,635kN за кутијасто укрућење, 24,8kN за дијагонално, док је критично оптерећење за комбиновано кутијасто-дијагонално укрућење 25,7kN. Комбиновано кутијасто-дијагонално укрућење је дало највишу силу лома од што је незнатно повећање од око 0.2% у односу на само кутијасто укрућење и за око 3.5% више у односу на само дијагонално укрућење. Ови резултати указују да комбиновано укрућење пружа највећу отпорност на лом у овом случају, док дијагонално

укрућење самостално показује нешто слабије перформансе. Међутим, разлике између кутијастог и комбинованог укрућења су релативно мале.

Анализа резултата торзионе ротације у зависности од типа укрућења.

Анализа торзионе ротације за елемент мреже S4R показује утицај типа угаоног укрућења и величине мреже на стабилност. За најгрубљу мрежу од 50мм (слика 8), највеће ротације су забележене, при чему дијагонално укрућење показује нешто већу ротацију (0,1000rad) у односу на кутијасто (0,0985rad) и комбиновано (0,09930rad). Смањењем величине мреже на 10мм, торзионе ротације се значајно смањују и постају сличније. Грубља мрежа од 50мм може преценити торзиону ротацију. За финије мреже, дијагонално укрућење конзистентно показује нешто мању торзиону ротацију, док комбиновано укрућење генерално даје нешто веће ротације, иако су разлике мале.



Слика 8. Дијаграм сила-торзиона ротација ($P-\theta$) Г рама различитим укрућењем

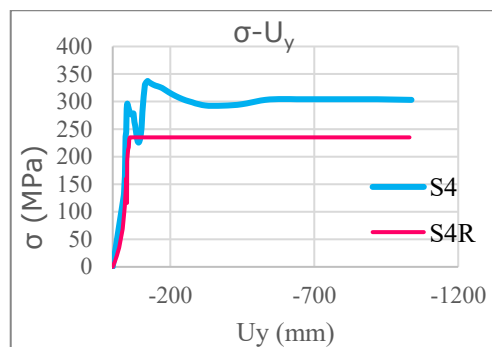
Табела 1: Вредности торзионе ротације за различита укрућења, променом величине коначног елемента

Укрућење	θ (rad) mesh 50	θ (rad) mesh 10	θ (rad) mesh 5
Кутијасто	0,09851	0,06521	0,06551
Дијагонално	0,1000	0,06056	0,06005
Кутијасто-дијагонално	0,09930	0,06583	0,06614

3.2. РЕЗУЛТАТИ ПРОСТОРНОГ РАМА

Резултати напона у зависности од типа елемента мреже

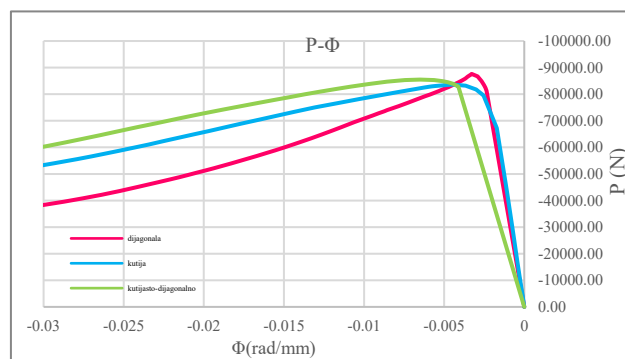
Нелинеарна анализа стабилности просторног рама са почетним имперфекцијама указује на значајан утицај типа елемента мреже. Употреба S4 је довела до смичућег закључавања и нереалних напона, па је прелазак на S4R био неопходан (слика 9).



Слика 9. Поређење напона у просторном раму применом S4 и S4R

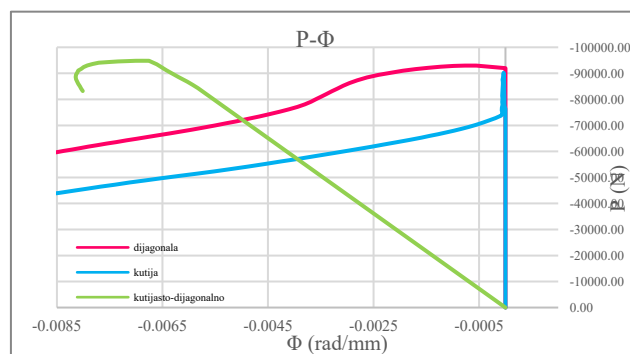
Утицај унетих имперфекција, дефинисаних фактором скалирања као $L/150=33.333$ другог тона извијања, је кључан. Оне смањују критичну силу лома и утичу на путању деформација. Сваки тип рама реагује специфично.

Резултати конфигурације споја на депланацију рама



Слика 10. Дијаграми сила-депланација ($P-\Phi$), величина мреже 50мм

Анализа резултата (слика 10) показује да у овом конкретном случају (просторни рама са имперфекцијама, 50мм мрежа), дијагонално укрућење најбоље балансира постигнуту носивост и контролу деформације увијања при губитку стабилности, док кутијасто укрућење показује најнижу носивост уз највећу деформацију увијања.



Слика 11. Дијаграми сила-депланација ($P-\Phi$), величина мреже 15мм

Анализом резултата депланације (слика 11) попречног пресека да у овом случају (мрежа величине 25мм), комбиновано укрућење обезбеђује најбољи однос између носивости и контроле деформације увијања, а дијагонално је на другом месту.

У целини, резултати показују да тип укрућења утиче на стабилност рама. Комбиновано кутијасто-дијагонално укрућење обезбеђује највишу носивост код најфиније мреже, истовремено пружајући добру контролу деформација увијања и торзионе ротације. Иако кутијасто укрућење може бити веома ефикасно у ограничавању деформације увијања, оно константно показује најнижу носивост. Дијагонално укрућење постиже добру носивост код грубљих мрежа, али уз значајније деформације.

4. ЗАКЉУЧАК

У целини, анализа јасно показује да је пројектовање укрућења и одабир њиховог типа од пресудног значаја за стабилност витких челичних конструкција. Кључно је спроводити реалније нелинеарне анализе које укључују утицај геометријских несавршености, јер оне значајно смањују носивост у односу на идеалне моделе. При избору типа укрућења, комбиновано кутијасто-дијагонално и кутијасто укрућење су генерално најефикаснији у повећању носивости и контроли деформација у поређењу са дијагоналним укрућењем самостално. Коначно, поузданост нумеричких резултата добијених методом коначних елемената директно зависи од пажљивог одабира типа и финоће елемената мреже, што захтева спровођење анализа осетљивости ради обезбеђивања тачне процене стабилности и понашања конструкције. Узимајући у обзир налазе из анализе оба рама, како без имперфекција, тако и са уведеним имперфекцијама, комбиновано кутијасто-дијагонално укрућење се генерално показало као најефикаснији тип укрућења за обезбеђивање високе носивости и добре контроле деформација код испитиваних челичних рамова.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] EN 1993-1-1:2005: Eurocode 3. Design of Steel Structures: General rules and rules for buildings.
- [2] C. Basaglia, D. Camotim *, N. Silvestre: Torsion warping transmission at thin-walled frame joints: Kinematics, modelling and structural response.
- [3] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Vol. 1. The finite element method. The Basis
- [4] Miodrag Sekulović: „Metod konačnih elemenata“ Građevinska knjiga, 1988
- [5] Shabnam Shayan *, Kim J.R. Rasmussen, Hao Zhang: „On the modelling of initial geometric imperfections of steel frames in advanced analysis”

Кратка биографија:



Јована Никачев рођена је у Новом Саду 2000. године. Дипломирала је на Факултету техничких наука 2023. године. Од 2024. године је у звању сарадника у настави на катедри за техничку механику.



Ђорђе Јовановић рођен је у Новом Саду 1988. године. Докторат је одбранио на Факултету техничких наука 2020. године. Од 2020. године је у звању доцента на катедри за конструкције.



Тања Перчић рођена је у Новом Саду 1996. године. Мастер рад је одбранила је на Факултету техничких наука 2021. године. Од 2021. године је у звању асистента на катедри за конструкције.