

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Композитне конструкције

Број индекса: 375/2016

Невена С. Балтић

**Моделирање и структурна анализа лиснате
композитне опруге**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Зорица Ђорђевић, ванр. проф - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да уради анализу утицаја облика просте лиснате опруге на напонско-деформационо стање коришћењем два софтвера (*Autodesk Inventor* и *FEMAP v11 са NX Nastran-ом*). Такође, потребно је и анализирати могућност замене челичног материјала композитним за опруге овог типа.

Препоручена литература:

- [1] Николић, В.: *Машински елементи*, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [2] Глишовић, Ј.: *Конструкција возила – Методичка збирка задатака са изводима из теорије*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2014.
- [3] Ђорђевић З.: *Композитне конструкције*, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2018.

Крагујевац, октобар 2018.

ментор:

др Зорица Ђорђевић, ванр. професор

Резиме

У раду је описано моделирање и структурна анализа лиснате опруге различитих облика, димензија и материјала. Циљ овог рада је био да се покаже које предности поседују опруге од композитних материјала у односу на други материјал, у овом случају челик. Исто тако да ли коришћени софтверски програми поседују поједине разлике у прецизности током анализе. Пре свега је извршен аналитички прорачун напона и деформација, а затим нумерички, у програмском пакету *Autodesk Inventor*. На крају је извршено поређење добијених резултата са резултатима добијеним у програму *FEMAP v11* са *NX Nastran*-ом и указано је на сличности.

Кључне речи: моделирање, структурна анализа, композити, *Autodesk Inventor*, *FEMAP v11* са *NX Nastran*-ом.

Abstract

This work describes the modeling and structural analysis of leaf springs of different kind of shapes, dimensions and materials. The aim of this work was to demonstrate the advantages of springs of composite materials in relation with other material, in this case steel. Also, software programs which are used have certain differences in precision during the analysis. First of all, an analytical calculation of tension and deformation was performed, then numerically, in the *Autodesk Inventor* software package. In the end, a comparison of the results obtained with the results from the program *FEMAP v11* with *NX Nastran* was performed and it was pointed out on similarities.

Key words: modeling, structural analysis, composites, *Autodesk Inventor*, *FEMAP v11* with *NX Nastran*.

Садржај:

1. УВОД	1
2. ЕЛАСТИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ	2
2.1 Основне карактеристике и подела.....	2
3. ОПРУГЕ	3
3.1 Историјат развоја опруга.....	3
3.2 Класификација опруга	3
3.3 Материјал за опруге.....	5
3.4 Карактеристике опруга.....	6
3.5 Опруге изложене савијању.....	7
3.5.1 Просте лиснате опруге.....	7
4. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ	10
4.1 Врсте композитних материјала.....	11
4.1.1 Композити са зрнастим пуниоцима (ојачивачима).....	11
4.1.2 Композити са влакнастим ојачавачима.....	11
5. СТРУКТУРНА АНАЛИЗА ПРОСТЕ ЛИСНАТЕ ОПРУГЕ	14
5.1 Аналитички прорачун просте лиснате опруге различитих облика	14
5.2 Примена CAD софтверског програма- <i>Autodesk Inventor</i>	17
5.2.1 Геометријско моделирање лиснате опруге од челика у <i>Inventor</i> -у	17
5.2.3 Напонско – деформациона анализа просте лиснате опруге различитих облика	19
5.2.4 Приказ резултата анализе напона и деформације.....	23
5.2.5 Табеларни приказ добијених резултата	25
6. Примена CAD софтверског програма- <i>FEMAP v11</i> са <i>NX Nastran</i> -ом	26
6.1 Геометријско моделирање лиснате опруге од челика у <i>FEMAP v11</i> са <i>NX Nastran</i> -ом.....	27
6.2 Напонско – деформациона анализа просте лиснате опруге од челика различитих облика	43
6.3 Напонско – деформациона анализа просте лиснате опруге од композита различитих облика.....	46
6.4 Табеларни приказ добијених резултата	50
7. Закључак	51
Литература.....	52

1. УВОД

Данашње савремене конструкције захтевају примену нових материјала, додатно бољих особина и облика, који могу да одговоре специфичним условима експлоатације: повишеној чврстоћи, отпорности на притисак, брзини, удару, температури, вибрацијама и друго. Примена нових конструкцијских материјала је одговор на све сложеније захтеве који укључују издржљивост и перформансе савремених конструкција, као и све већа ограничења у погледу масе. Како би постављени захтеви били испуњени, неизбежан је компромис у постизању лаке конструкције и високих механичких својстава материјала. Управо зато, при примени композитних материјала, омогућава се испуњење постављених захтева. Вештачки материјали су саставни део композита, састављени од две или више хемијски разнородних и нерастворљивих фаза, који по својим физичко-хемијским и механичким својствима представљају нове материјале, у којима постоје јасно утврђене границе раздвајања међу саставним компонентама [1].

Опруга је машински елемент који се користи за остваривање еластичних спојева. Под деловањем силе долази до деформације опруге, а по престанку деловања силе, опруге се враћају у првобитни положај. Намена опруга је врло разнолика. Могу служити за привремену акумулацију механичке енергије, за ублажавање удара (амортизер), за мерење силе и друге намене [2].

Структура овог рада садржи експериментално моделирање и анализу просте лиснате опруге, која у првом случају моделирања и анализе укључује примену челика, као материјала, а затим понављање операција и поређење резултата са композитом, као материјалом. Притом се поменута анализа врши изменом димензија и облика опруге, као и поређење добијених резултата.

Пре процеса моделирања извршена је аналитичка анализа са усвојеним димензијама опруге правоугаоног облика. Од добијених резултата аналитике очекује се релативно подударање вредности, са вредностима добијеним нумеричким путем, где максимална разлика у добијеним вредностима не би требало да буде већа од 10%.

Моделирање поменуте опруге извршено је у CAD софтверском програму *Autodesk Inventor*, где је након моделирања извршена и анализа челичне опруге. Поређење резултата анализе извршено је у софтверском програму *FEMAP v11 with NX Nastran-ом*, прво са челиком, као материјалом, а затим исти поступак рада поновљен је и за композитне материјале.

Циљ овог рада, како је већ наведено, јесте да се упореде добијени резултати експеримента, тј. аналитичка и нумеричка анализа, као и да се прикажу предности и недостаци примене композита у односу на челик путем поменутих софтверских програма.

2. ЕЛАСТИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

2.1 Основне карактеристике и подела

Еластични елементи служе за остваривање еластичних спојева машинских делова и склопова. При томе, под дејством оптерећења, омогућавају велика међусобна померања у споју, акумулацију енергије и ублажавање удара. Уопштено, функционисање еластичних елемената је засновано на великом деформационом раду који изврши сила или спрег на одређеном путу. Рад се у опрузи акумулира у виду потенцијалне енергије која се користи у различите сврхе:

- за остваривање силе или спрега у краћем или дужем временском интервалу (ударна сила у механизму код наоружања; разне врсте избајача; спрег у сатном механизму и др.);
- за остваривање сталне притискајуће или затежуће силе (опруге у склоповима вентила сигурности, спојница, затварача, брава и др.);
- расподела и мерење сила (динамометри), ограничавање вредности сила и др.;
- за амортизовање удара (еластични спојеви за ослањање друмских и железничких возила, ослонци машина и др.). Код возила, енергија поремећаја, удара и инерцијалних сила преводи се у потенцијалну енергију деформације. Енергија се потом, наизменично преводи у енергију инерцијалних сила до потпуног пригушења, при чему се један део енергије претвара у топлоту. При наиласку на нови поремећај све се понавља. Код машина се, такође, комбинацијом еластичног деформисања и пригушења, енергија поремећаја претвара у топлоту. На тај начин се остали делови машине штите од штетног дејства поремећаја.

Велике деформације еластичних елемената, на којима се заснива функција, остварују се захваљујући специфичном облику и високој еластичности као и применом материјала велике чврстоће. У пракси еластични елементи су познати под именом *опруге* [3].

3. ОПРУГЕ

3.1 Историјат развоја опруга

Прве опруге (слика 1) које су коришћене у историји били су једноставни лукови и њих су користили прадавни ловци за избацивање стрела, док су прве металне опруге направљене од бронзе 1500 година п.н.е., као што су пинцета или клешта. Касније су направљене бронзане опруге са већим садржајем лима, где су тиме побољшана еластична својства. Први завојне опруге настале су у 15. веку, а први сат са торзионим опругом на навијање у 16. веку.

Године 1676., британски физичар Роберт Хук (Robert Hooke), посматрајући рад опруга, открива законитости у њиховом сабијању и истезању, због чега данас постоји *Хуков закон*. Године 1857. Хенри Бесемер (Henry Bessemer) је открио процес израде челика и тада се појављују прве челичне опруге које су и данас у употреби. Примена челичних опруга се нагло повећала око 1880. године, када је настао поступак "*патентирања*" - провлачење жице кроз калибрирани отвор, тако да се добије жица истог попречног пресека. Године 1900. направљен је први аутомат за израду опруга и од тада креће напредовање у развоју опруга [4].



Слика 1. Велски (енглески лук) [8]

3.2 Класификација опруга

Конструкцијски облици опруга веома су различити и прилагођени су намени. У зависности од облика и начина оптерећења, опруге су претежно изложене савијају (флексија), увијању (торзија) или сложенем напрезању. Према томе се деле на:

- флексионе опруге;
- торзионе опруге;
- сложено напегнуте опруге.

Основне врсте флексионих опруга (опруга изложених савијању) приказане су на слици 2. То су:

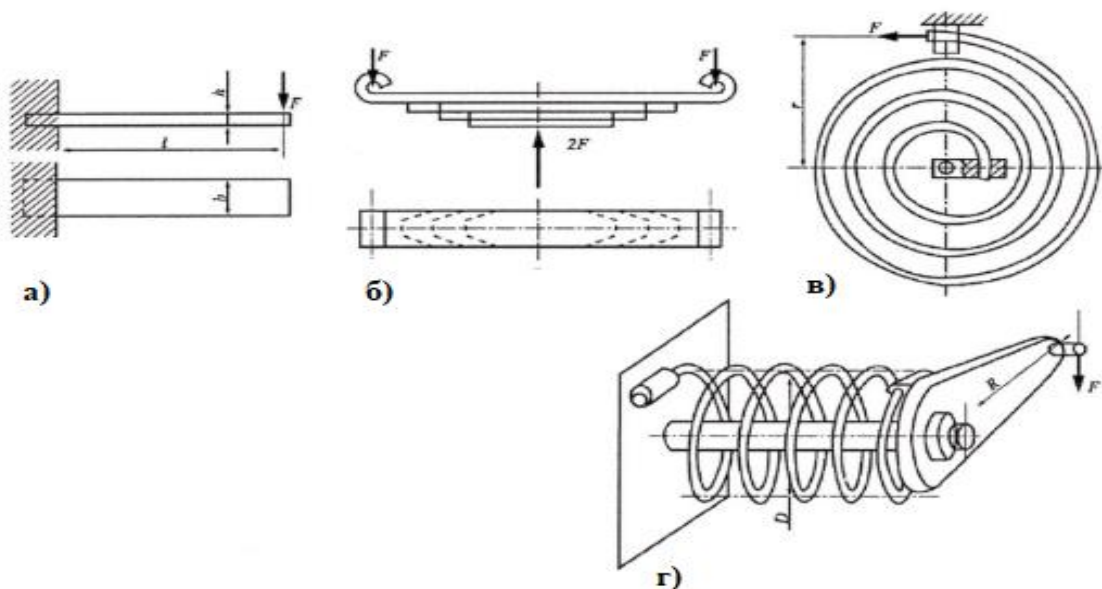
- просте лиснате опруге;
- сложене лиснате опруге (гибњеви);
- спиралне опруге;
- флексионе завојне опруге.

Просте лиснате опруге (слика 2.а) примењују се за мала оптерећења и ако се тражи велика дефомабилност, као што је случај код механизма за пољопривредне и текстилне машине или у прехранбеној и процесној индустрији.

Сложене лиснате опруге или гибњеви (слика 2.б) имају значајну примену у техници. Погодне су за велика оптерећења. Зато се примењују код друмских и шинских возила, код преса, чекића и др. Гибањ се под оптерећењем еластично деформише, на што се троши део рада који акумулише. Мали део рада троши се на трење између листова гибња.

Спиралне опруге (слика 2.в) примењују се, на пример, за сатне механизме.

Завојне флексионе опруге (слика 2.г) имају релативно велику угаону деформацију, која настаје као последица облика и оптерећења (F). Имају примену у апаратима за домаћинство, код пољопривредних, текстилних, штампарских и других машина [9].



Слика 2. – Приказ флексионих опруга: а) Проста лисната опруга; б) Сложена лисната опруга или гибањ; в) Спирална опруга; г) Завојна флексиона опруга [9]

3.3 Материјал за опруге

За израду опруга првенствено се користе челици који имају велику чврстоћу и еластичност. Такви материјали подносе велика напрезања, па опруге могу да буду малих димензија. То су челици са високим садржајем угљеника: легирани челици са силицијумом, хромом, ванадијумом или вишеструко легирани челици. Ови челици користе се и у случају када су опруге изложене високој температури. Опруге које се користе највише у прехранбеној индустрији, израђују се од хром челика или од месинга.

Табеле 1 и 2 садрже механичке карактеристике материјала за опруге [3].

Табела 1. - Механичке карактеристике челика за топло обликоване опруге [3]

Ознака DIN	$R_e, N / mm^2$	$R_m, N / mm^2$	$\delta A_5, \%$	Савијање $\sigma_{D(-1)}, N / mm^2$	Увијање $\tau_{D(-1)}, N / mm^2$
38Si7 (Č2130)	1050...1150	1200...1400	7	550...650	350...400
46Si7 (Č2131)	1100...1250	1300...1500	6	600...700	380...430
51Si7 (Č2132)	1100...1250	1300...1500	6	600...700	380...430
55Si7 (Č2133)	1100...1250	1300...1500	6	620...720	400...470
60SiMn5 (Č2330)	1150...1300	1350...1500	6	700...800	450...500
60Si7 (Č2331)	1150...1300	1350...1500	6	700...800	450...500
65Si7 (Č2332)	1150...1300	1350...1500	6	700...800	450...500
67SiCr5 (Č4230)	1350...1500	1500...1700	5		
50CrV4 (Č4830)	1200...1350	1350...1700	6	750...850	480...530
58CrV4 (Č4831)	1350...1500	1350...1700			
$\sigma_{D(0)} \approx R_e \quad \tau_{D(0)} \approx \tau_T \approx 0,6R_e$					

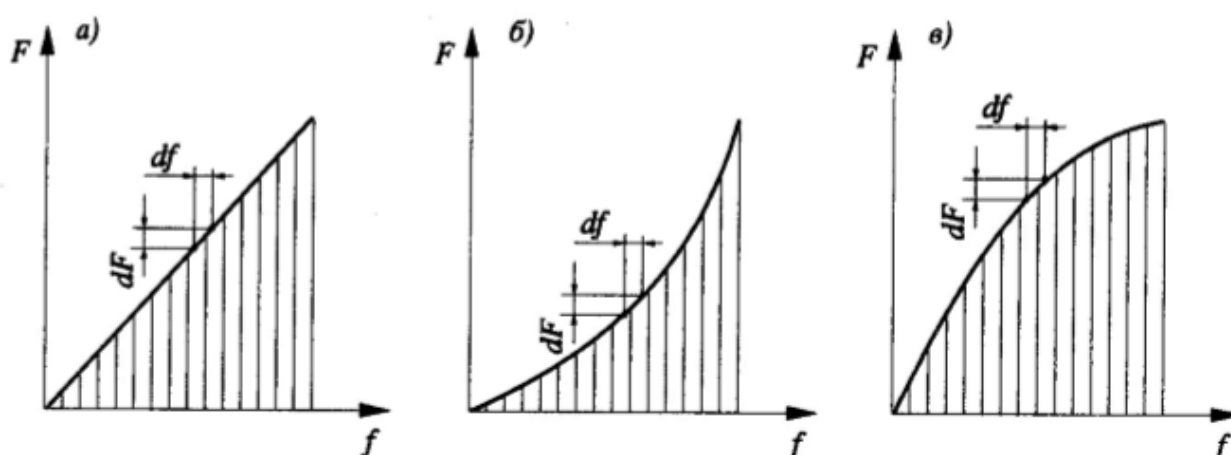
Табела 2. - Модул еластичности и модул клизања челика за опруге [3]

Материјали	$E, N / mm^2$	$G, N / mm^2$
Опруге од хладно вучене жице и хладно ваљаних трака	210 000	83 000
Топло обликоване опруге	210 000	80 000
Опруге од нерђајућих челика	194 000	73 000
Опруге од бронзе	112 000	42 000
Опруге од месинга	94 000	35 000

3.4 Карактеристике опруга

Облик опруга се прилагођава потребном односу силе и деформације који дефинише карактеристику еластичности опруге (слика 3). Зависност између оптерећења F и деформације опруге f је представљена као:

- прогресивна (линеарна) – ($c \neq \text{const}$);
- праволинијска ($c = \text{const}$);
- дегресивна ($c \neq \text{const}$).



Слика 3. – Карактеристике опруге: а) прогресивна, б) линеарна, в) дегресивна [3]

Крутост опруге представља однос између спољашњег оптерећења (сила F , момент савијања M , момент торзије T) потребних за остваривање јединичне деформације (угиб f , углови φ и ψ) [3].

$$c_f = \frac{dF}{df} \quad (3.1)$$

$$c_\varphi = \frac{dM}{d\varphi} \quad (3.2)$$

$$c_\psi = \frac{dT}{d\psi} \quad (3.3)$$

3.5 Опруге изложене савијању

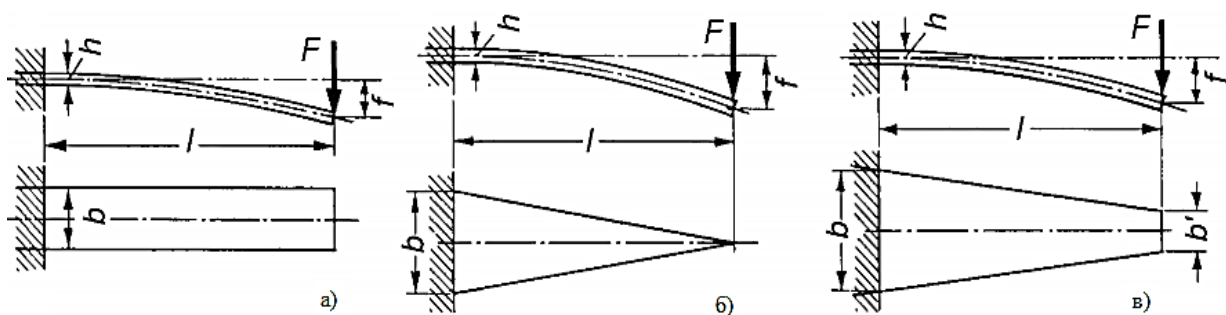
3.5.1 Просте лиснате опруге

Лиснате опруге (Слика 4) представљају један од најраспрострањенијих и у конструкцијама возила најдуже коришћен тип еластичних ослонаца. Користе се за мала оптерећења и остваривање сталне силе притиска код брава, поклопаца, затварача, електричних контакта и др.



Слика 4. – Примери лиснатих опруга [10]

Основни облик просте лиснате опруге је представљен у виду модела конзоле, ширине b , дебљине h , изложеног дејству силе F , на растојању l од уклештења (Слика 5а) [6].



Слика 5. – Модели лиснатих опруга [6]

а) Лисната опруга правоугаоног облика

Угиб на крају лиснате опруге се добија коришћењем израза:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{F}{c} \quad (3.5.1)$$

Одавде се добија **крутост**, за дати модул еластичности материјала E , у облику:

$$c = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} \quad (3.5.2)$$

$$\text{где је } I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.5.3)$$

Напон на савијање на месту уклештења износи:

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{W} = \frac{6 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} \leq \sigma_{doz} \quad (3.5.4)$$

$$\text{где је } W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3.5.5)$$

Максимално оптерећење опруге добија се на основу услова да је $\sigma = \sigma_{doz}$, па је:

$$F_{max} = \frac{b \cdot h^2}{6 \cdot l} \cdot \sigma_{doz} \quad (3.5.6)$$

Степен сигурности против разарања опруге и **дозвољени напон** у критичном пресеку опруге се одређују према изразима:

$$S = [\sigma] / \sigma \quad (3.5.7)$$

$$\sigma_{doz} = [\sigma] / S \quad (3.5.8)$$

$$S = 1,25 \dots 2 \quad (3.5.9)$$

Критични напон $[\sigma]$, при малом броју промена напона у радном веку је $[\sigma] = R_e$, а за опруге изложене динамичком напрезању $[\sigma] = \sigma_{DM}$.

б) Лисната опруга троугластог облика

Овакав облик (слика 5.б) укључује опруге константне дебљине h и променљиве ширине b . Ширина опада до $b = 0$ на крају опруге. Отпорни момент W , такође опада од W_{max} (на месту уклештења) до $W = 0$ (на крају опруге) [6].

Угиб на крају лиснате опруге троугластог облика се добија на следећи начин:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot E \cdot I} \quad (3.5.10)$$

в) Лисната опруга трапезног облика

Код лиснатих опруга трапезног облика (слика 5.в) дебљина је $h = const.$, а ширина се смањује од b на месту уклештења до b' на крају опруге. У пракси се уместо троугаоне лиснате опруге користи опруга трапезног облика [6].

Угиб опруге је:

$$f = 4 \cdot \frac{3}{2+b'/b} \cdot \frac{l^3}{b \cdot h^3} \cdot \frac{F}{E} \quad (3.5.11)$$

4. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

Многе савремене технологије захтевају материјале са комбинацијом својстава коју немају ни легуре, ни керамички материјали, ни полимери. Таква својства имају композити. Под композитним материјалима подразумевају се материјали израђени од две или више компонената које су различите како по хемијском саставу тако и по другим особинама.

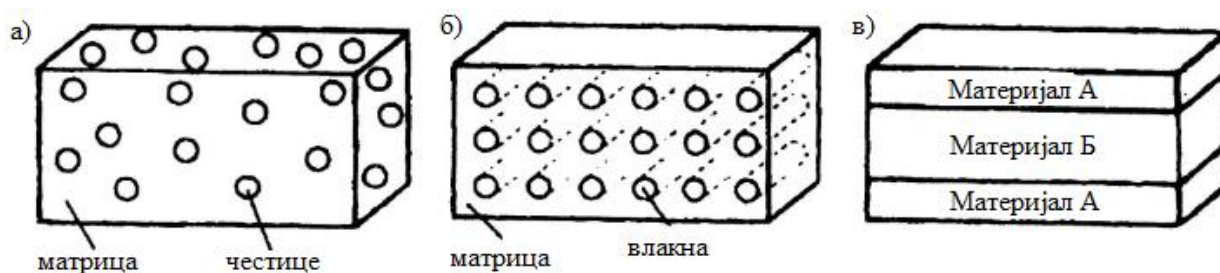
Развој ових материјала настао је из потребе да се код многих конструкција постигне што већа јачина и крутост, а уз то смањи маса. Значајан развој и примена композитних материјала је почела око 1950. године. Данас се годишње производи око 10 милиона тона са повећањем око $5\div 10\%$ годишње.

Предност композита у односу на класичне конструкционе материјале (метале) јесте у томе што се делови од композита могу пројектовати тако да величина појединих пресека или њихова јачина одговара оптерећењу у тим пресецима [7].

Композити се састоје из основе (матрице) и материјала за ојачавање (ојачавача). Матрица која повезује ојачавач, а он може бити влакнасти или зрнасти, у заједничку структуру обично је направљена од термореактивних смола (епоксидне, полиестарске, фенолне). Ојачавајућа влакна могу бити:

- стаклена;
- угљенична;
- органска (кевлар-арамид);
- борна влакна.

Уколико су честице распоређене равномерно, композити ојачани честицама су *изотропни*. Композити ојачани влакнима су по правилу *анизотропни*, као и ламинатни композити. У пракси се највише примењују композити са ортотропним особинама (Слика 6).



Слика 6. – Композити ојачани: а) честицама; б) влакнима; в) ламинати [11]

4.1 Врсте композитних материјала

4.1.1 Композити са зрнастим пуниоцима (ојачавачима)

Матрица ових композита обично је полимерна материја, али може бити и керамичка или метална. У ту матрицу, са функцијом везивног средства, убацују се честице пуниоца (ојачавача), чије се особине веома разликују од особина основе. Везивна средства (матрице) углавном су термореактивне смоле:

- епоксидна;
- полиестерска;
- фенолна.

Од великог значаја су и пуниоци који омогућавају израду савитљивих (флексибилних) композита. То су углавном честице каучука у облику куглица. Употребљавају се за повећање жилавости кртих аморфних пластика као што је епоксид.

4.1.2 Композити са влакнастим ојачавачима

Применом ових влакана повећа се јачина и крутост (модул еластичности E) пластичне матрице од епоксидне или полиестерске смоле. Процена квалитета коришћених влакана доноси се на основу односа модула еластичности и густине (E/ρ), као и односа јачине на кидање и густине (R_m/ρ). Композити са овим влакнима као пуниоцима употребљавају се за израду неких делова аутомобила, доставних возила, авиона, шинских возила, аутобуса, цистерни и хемијске опреме. Основни циљ је да им се смањи маса и тиме повећа носивост, тј. смањи потрошња горива.

Угљенична влакна → углавном се израђују из полиакрилонитрила (ПАН), или катрана добијеног рафинацијом нафте или сувом дестилацијом угља. Технолошки поступак израде угљеничних влакана веома је скуп и сложен.

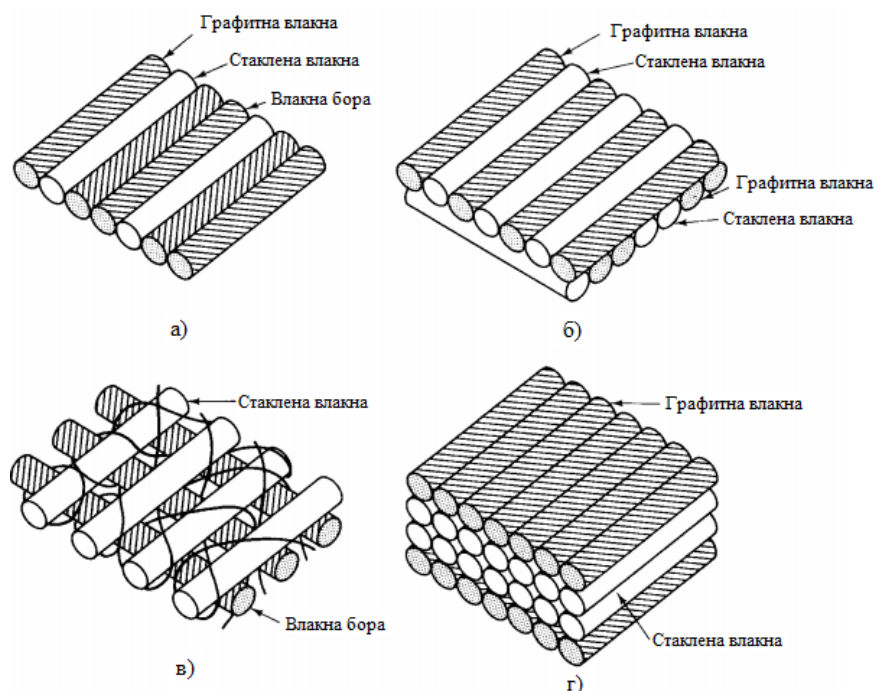
Стаклена влакна → њима се врши ојачавање пластичних смоластих матрица композита. Одликују се добрим односом (R_m/ρ), добро подносе временске промене, влагу и корозију. За разлику од угљеничних влакана, стаклена се лако и економично производе. Стаклена влакна израђују од две врсте стакла: стакло Е-типа (електрично) и S - типа (високе јачине). Стакло типа Е, чији је састав 52-56% SiO_2 , 12-16% Al_2O_3 , 16-25% CaO и 8-13% B_2O_3 , највише се примењује за израду композита. У свежем стању ова влакна имају јачину $R_{m\ max} = 3 - 4\ GP_a$ и модул еластичности $E = 70\ GP_a$. Стакло S је састава 65% SiO_2 , 25% Al_2O_3 и 10% MgO и особина $R_m = 4.5\ GP_a$, $E = 80\ GP_a$. Треба истаћи да је реч о стакленим влакнима веома малог пречника реда величине око 1 mm, јер мањем пречнику одговара већа јачина.

Арамидна влакна за ојачавање је увела фирма Ду Поинт (Du Point) 1972. године, под трговачким називом *Кевлар*. Производ се добија екструзијом воденог раствора полимера кроз машине за предење. Добијена влакна имају одлична својства на затезање, али лоша на притисак. Убацавањем неких других влакана са добром отпорношћу на притисак ова се мана отклања. Композит ојачан са две врсте влакана зове се хибридан композит.

Влакна од бора имају добру јачину на кидање ($R_m^B = 2.4 \text{ GPa}$), скоро као челична, али више од два пута већу крутост јер је $E^B = 450 \text{ GPa}$. Када се влакна бора утисну у смоласту матрицу, добија се композит чија крутост (EI_x) превазилази све постојеће композите. Влакна бора производе се увођењем хемијски чистих пара бора у филамент од волфрама. После хлађења, влакна бора испадају из филамента (лабаво упредених нити волфрама) [1].

4.1.2.1 Структура композита са влакнастим ојачавачима

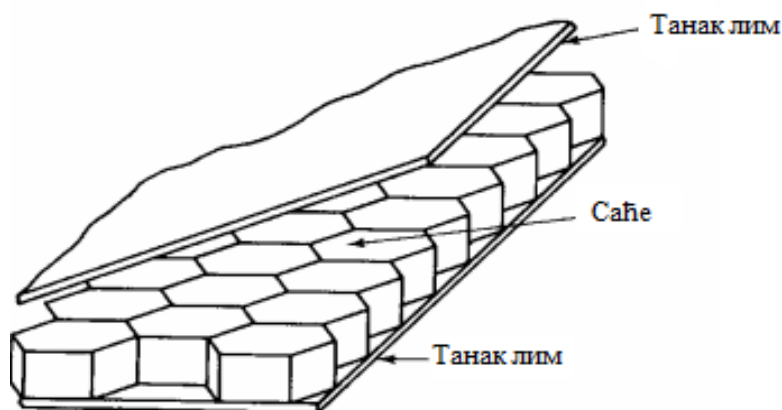
Уколико су особине компонената композита познате, уз одређене претпоставке, могу се прорачунати механичке особине финалног производа. Како би се добиле тражене механичке особине, прописују се технолошки услови производње, уз одговарајући тип влакана, начин њиховог слагања у врсте, број врста као и узајамну оријентацију влакана. Размештање влакана ради доброг ојачања од истих или различитих материјала, приказано је на слици 7.



Слика 7. - Распоред влакана за ојачавање: а) једнослојно слагање, б) слагање у слојевима (ламинат), в) слагање преплетањем, г) селективни размештај [7]

Једнослојно распоређена влакна (слика 7.а) користе се само за производе код којих се правац деловања спољних сила поклапа са оријентацијом влакана (нпр. ојачани штапови).

Вишеслојно распоређена влакна се користе углавном код производа који чине композите, односно у облику ламината (слика 7.б, 7.в, 7.г) или сендвич конструкција (слика 8) [7].



Слика 8. – Сендвич структура композита [7]

Влакна се повезују међусобно као и између слојева помоћу термореактивних смола чијим се очвршћивањем добија матрица, односно основа одговарајућег дуропласта. Поједини слојеви могу бити комбинација два или више материјала (хибридни композити). Структура у облику сендвича има језгро мале масе израђено у облику пчелињег саћа (слика 8). Лимови се најчешће израђују од алуминијума, а саће од стаклених влакана, арамидних влакана и папира, повезаних епокси смолом. Кад се ћелије испуне стакленом вуном или пенастим полиуретаном добијају се облоге за термичку и антизвучну изолацију. Језгро је смештено између лимова од танког материјала велике јачине. Овако комбинована структура има око 4% већу јачину и крутост него челични *I* профил и око 2,5 пута већу јачину од челика пуног правоугаоног попречног пресека. Танки лимови који облажу саћасту конструкцију могу бити од различитих материјала, па и од бора. Језгро мора бити лако и довољно круто да спречи деформације услед деловања спољних сила или момената [7].

5. СТРУКТУРНА АНАЛИЗА ПРОСТЕ ЛИСНАТЕ ОПРУГЕ

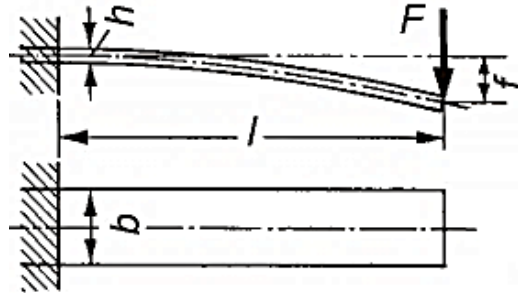
5.1 Аналитички прорачун просте лиснате опруге различитих облика

Модел 1 - Правоугаони облик

$$b = 10 \text{ mm}$$

$$l = 50 \text{ mm}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$



Усвојен челик: **60SiMn5 (Č2330)**

Граница истежања:

$$R_e = 1150 \div 1300 \rightarrow R_e = 1150 \text{ N/mm}^2$$

Усвојен степен сигурности:

$$S = 1.25, \dots 2 \rightarrow S_0 = 2$$

Дозвољени напон:

$$\sigma_{doz} = \frac{R_e}{S_0} = \frac{1150}{2} = 575 \text{ N/mm}^2$$

Максимално оптерећење опруге:

$$F_{max} = \frac{b \cdot h^2}{6 \cdot l} \cdot \sigma_{doz} = \frac{10 \cdot 2^2}{6 \cdot 50} \cdot 575 = 76.667 \text{ N}$$

Усвојена сила: $F = 50 \text{ N}$

Угиб:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{50 \cdot 50^3}{3 \cdot 210000 \cdot 6.667} = 1.488 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

Крутост:

$$c = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l} = \frac{3 \cdot 210000 \cdot 6.667}{50^3} = 33.602 \text{ N/mm}^2$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{10 \cdot 2^3}{12} = 6.667 \text{ mm}^4$$

Напон на савијање:

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{W} = \frac{50 \cdot 50}{6.667} = 375 \text{ N/mm}^2 \leq 575 \text{ N/mm}^2$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{10 \cdot 2^2}{6} = 6.667 \text{ mm}^3$$

Провера степена сигурности:

$$S = \frac{R_e}{\sigma} = \frac{1150}{375} = 3.067$$

$S_0 = 2 \leq S = 3.067$

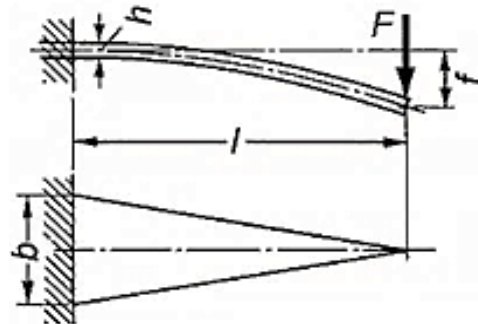
Услов задовољава!

Модел 2 – Троугаони облик

$$b = 10 \text{ mm}$$

$$l = 50 \text{ mm}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$



Усвојен челик: **60SiMn5 (Č2330)**

Граница истегања:

$$R_e = 1150 \div 1300 \rightarrow R_e = 1150 \text{ N/mm}^2$$

Усвојен степен сигурности:

$$S = 1.25, \dots 2 \rightarrow S_0 = 2$$

Усвојена сила: $F = 50 \text{ N}$

Угиб:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{2 \cdot E \cdot I} = \frac{50 \cdot 50^3}{2 \cdot 210000 \cdot 6.667} = 2,232 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

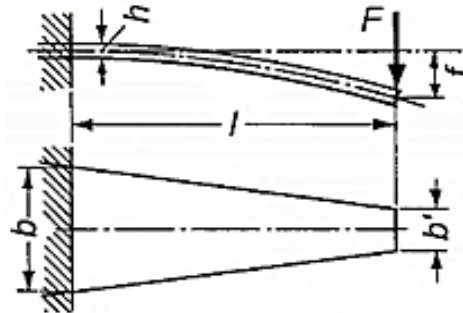
Модел 3 – Трапезни облик

$$b' = 5 \text{ mm}$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

$$l = 50 \text{ mm}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$



Усвојен челик: **60SiMn5 (Č2330)**

Граница истегања:

$$R_e = 1150 \div 1300 \rightarrow R_e = 1150 \text{ N/mm}^2$$

Усвојен степен сигурности:

$$S = 1.25, \dots 2 \rightarrow S_0 = 2$$

Усвојена сила: $F = 50 \text{ N}$

Угиб:

$$f = 4 \cdot \frac{3}{2 + b'/b} \cdot \frac{l^3}{b \cdot h^3} \cdot \frac{F}{E} = 4 \cdot \frac{3}{2 + 5/10} \cdot \frac{50^3}{10 \cdot 2^3} \cdot \frac{50}{210000} = 1.786 \text{ mm}$$

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

5.2 Примена CAD софтверског програма-*Autodesk Inventor*

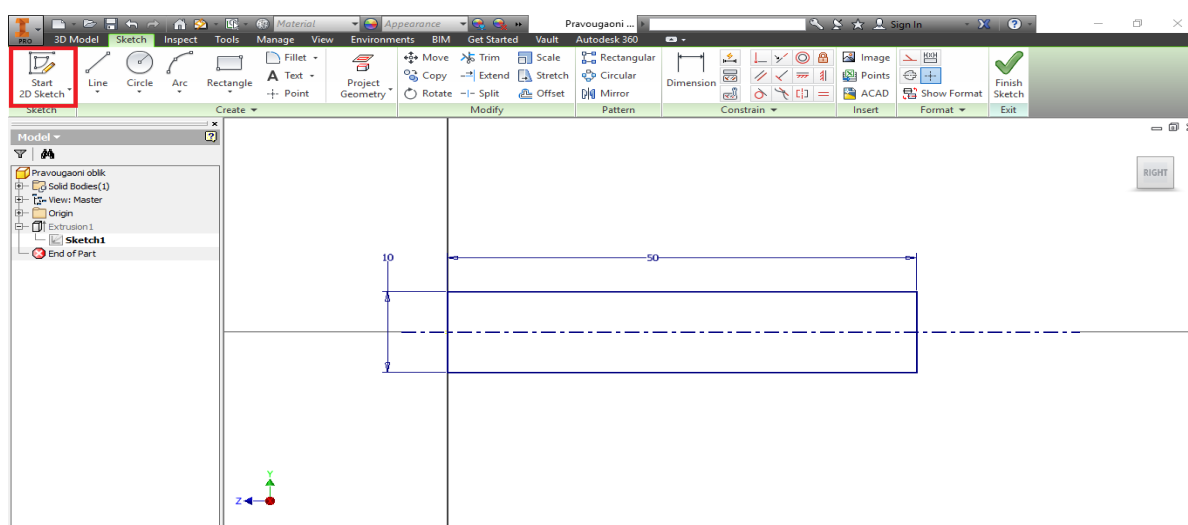
Развојем информационих технологија, постигнут је значајан напредак у пословима пројектовања, анализе и симулације понашања машинских конструкција и апарата. Циљ симулације применом рачунара је смањење трошкова израде физичког прототипа, као и израда симулације ради бољег разумевања система и доношења одлука.

Autodesk Inventor је софтверски програм фирме AUTODESK која је позната и по свом програму *AutoCAD*. *Inventor* је намењен пре свега потребама пројектовања у области машинства. За разлику од *AutoCAD*-а, *Inventor* је програм за параметарско, запреминско моделирање машинских делова и склопова. Осим моделирања делова он омогућава и генерисање техничке документације, а новије верзије програма омогућавају и различита израчунавања и симулације [13].

5.2.1 Геометријско моделирање лиснате опруге од челика у *Inventor*-у

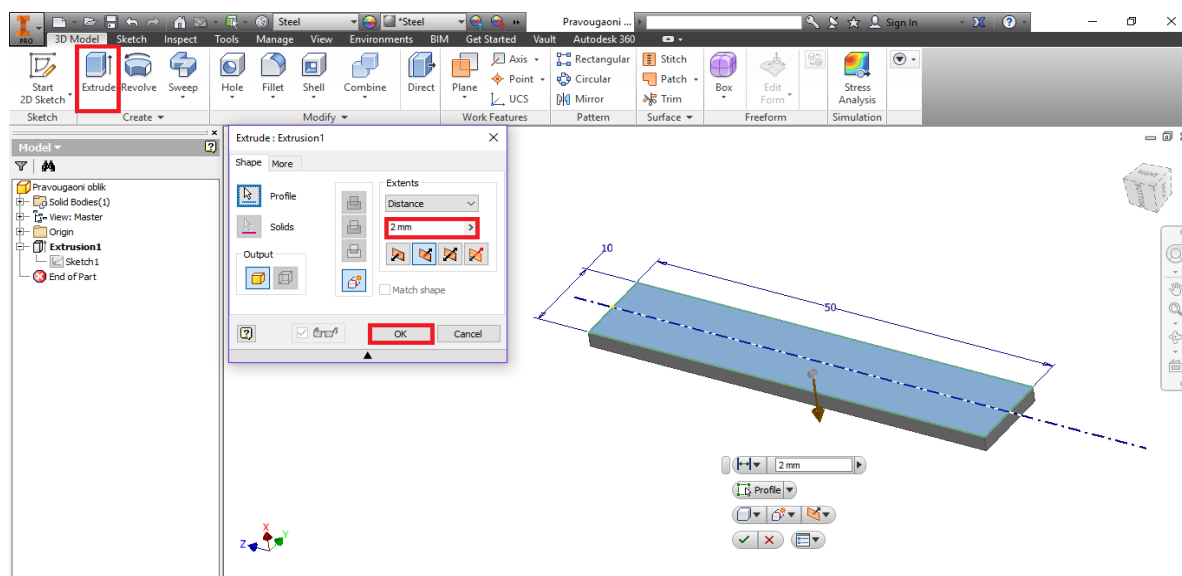
У овом делу рада дата је упоредна анализа напонског стања и деформација различитих облика опруга од челика (правоугаони, троугаони, трапезни). Вредности добијене нумеричким путем (симулацијом рада) коришћењем програма *Autodesk Inventor* упоређене су са аналитички прорачунатим вредностима. Симулација рада наведених облика опруга, обрађајући пажњу највише на деформацију, даје приближно једнаке резултате са аналитичком анализом, што значи да се приказани модели могу користити и у пракси.

Поступак моделирања започиње се покретањем програма *Autodesk Inventor 2015*, одабиром опције за моделирање “*Part design*”, након чега се улази у део за скицирање кликом на иконицу “*Start 2D sketch*”, где се црта скица профила, у првом случају, правоугаоног попречног пресека (слика 9).



Слика 9. – Скица опруге правоугаоног облика

Затим се опцијом “*Extrude*” извлачи на задату дужину (Слика 10).



Слика 10. – 3D модел опруге правоугаоног облика

Поступак моделирања опруга троугластог и трапезног облика се изводи на исти начин.

5.2.2 Метода коначних елемената

Главну предност пројектовања помоћу рачунара представља могућност симулације – некада је било неопходно физички направити модел да би се испитивале његове особине, а данас се највећи део посла обавља у виртуелном свету. Са драстичним растом процесорске моћи рачунара све значајнији постају нумерички прорачуни који се изводе тзв. *методом коначних елемената* (познатом и као **FEM** анализа – *Finite Element Method* или **FEA** - *Finite Element Analysis*).

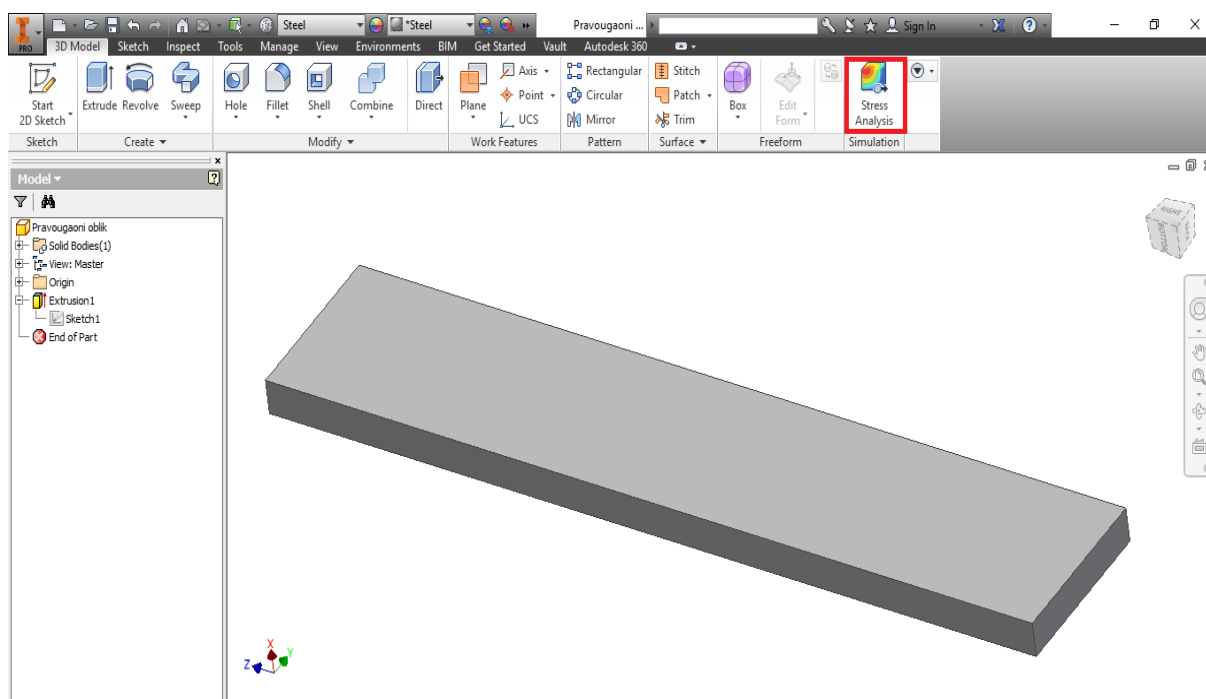
Уколико се захтева прецизна слика онога што ће се дешавати када се модел нађе под механичким оптерећењем, потребно је да се посматра свака тачка модела посебно. Утврђивањем законитости понашања тачака и њихових међусобних интеракција за задата оптерећења, одређује се понашање целог модела. Ово је најчешће немогуће извести, јер је тачка бесконачно мала, па се модел састоји од бесконачно много тачака.

Уколико се жртвује тачност зарад практичности, модел се може изделити на коначан број малих делова, а затим да се спроведе израчунавање за сваки од њих. Преласком из математичког у физички домен читав процес се своди на компликовани (али решиви) систем једначина. Ако је модел издељен на 100.000 елемената, што је реална вредност у пракси, метода коначних елемената захтеваће решавање система од око 100.000 једначина са 100.000 непознатих. Решавање би било неизводљиво без употребе модерног рачунара, али уз његову процесорску моћ се може доћи до резултата. Уз пажљиво одабран број и распоред коначних елемената могу се добити драгоцен подаци о понашању модела са довољно великом тачношћу [12].

Метода коначних елемената се примењује и у многим другим областима, не само приликом прорачунавања оптерећења механичких делова. У машинству се често користи за симулацију динамике флуида: уливања истопљене пластике у калупе, опструјавање ваздуха у авио-индустрији и сл.

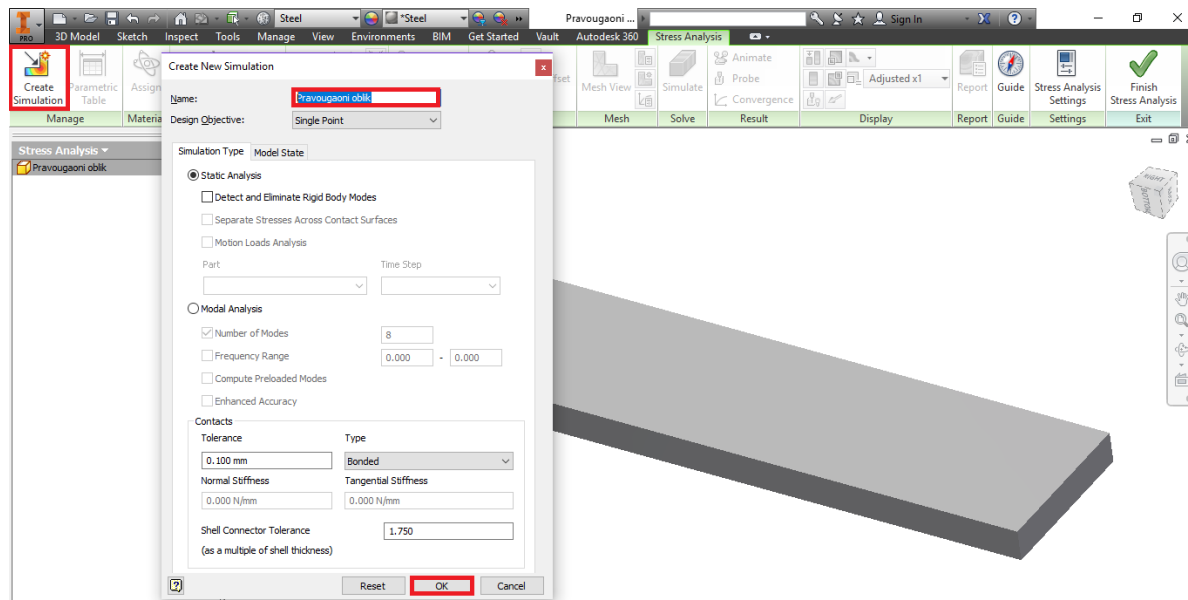
5.2.3 Напонско – деформациона анализа просте лиснате опруге различитих облика

Испитивање опруге се врши у *Inventor*-у помоћу опције *Stress Analysis* (слика 11). На овој картици за испитивање налазе се помоћне команде које се користе приликом испитивања: *Create Simulation*, *Assign*, *Fixed*, *Force*, *Mesh*, *Simulate* и *Report*.



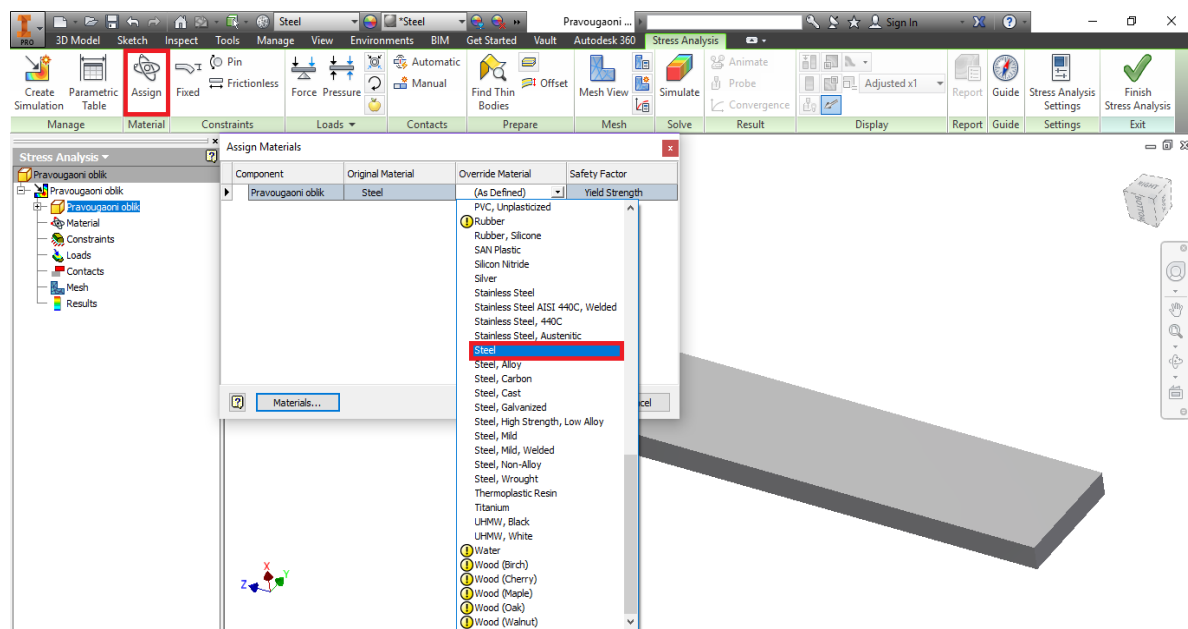
Слика 11. –Приказ команде *Stress Analysis* за симулацију

Кликом на палету алата *Stress Analysis* бира се прва помоћна команда *Create Simulation*, где се након клика на њу, појављује прозор за додељивање назива симулације. Након притиска на команду *OK*, отварају се команде за задавање осталих параметара (слика 12).



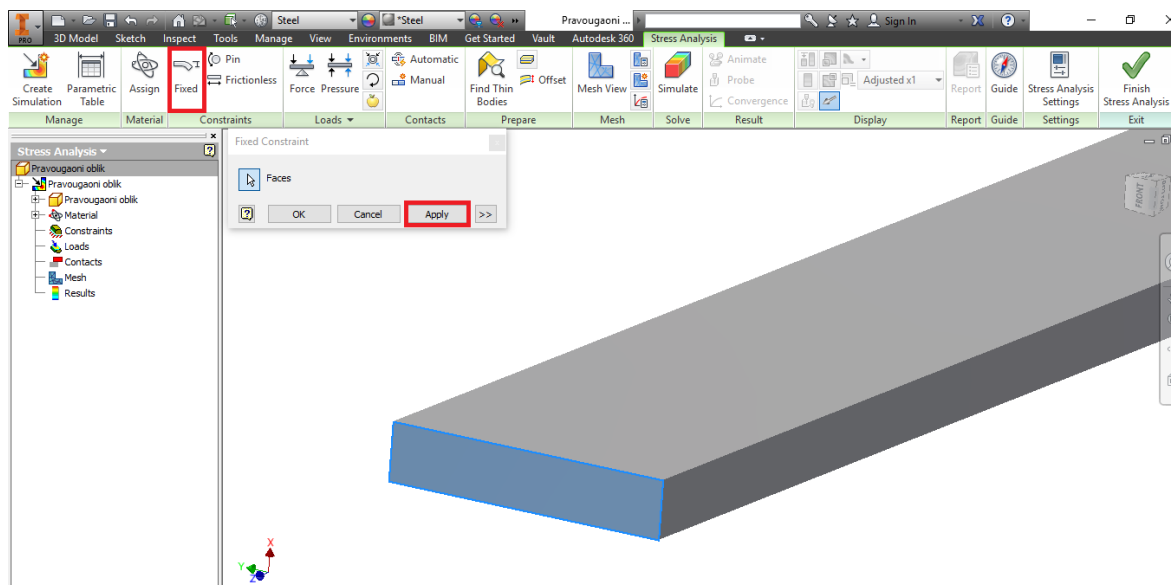
Слика 12. – Покретање симулације-назив симулације

Након креирања назива за симулацију, потребно је задати одговарајући материјал, у овом случају челик (Слика 13).



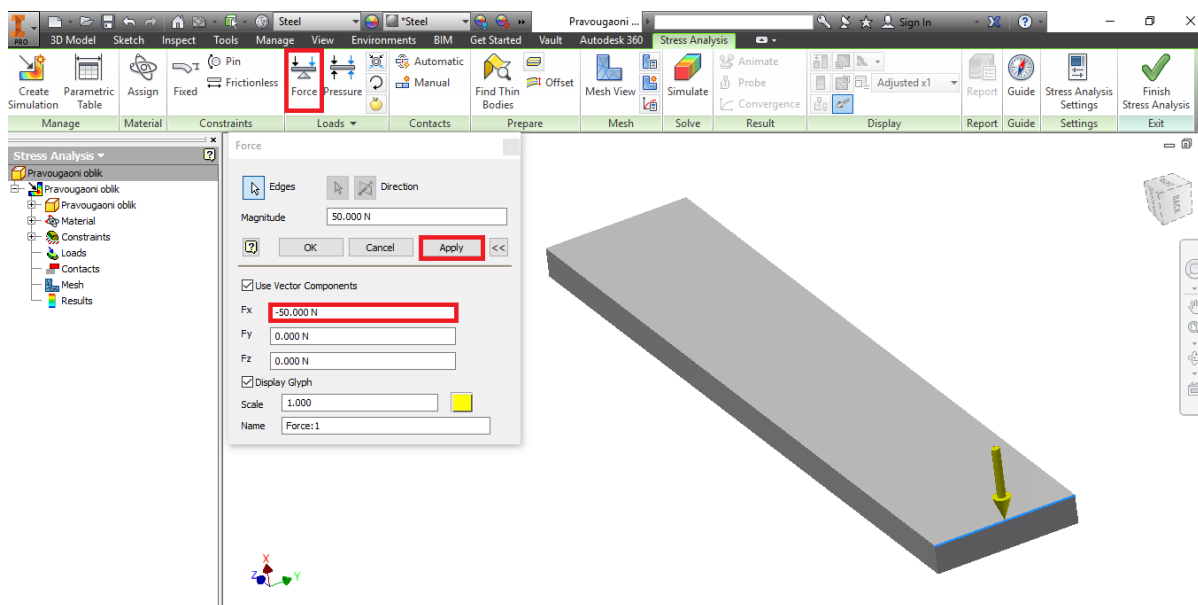
Слика 13. – Задавање материјала

Притиском на команду *Fixed*, потребно је фиксирати један од крајева опруге (Слика 14).



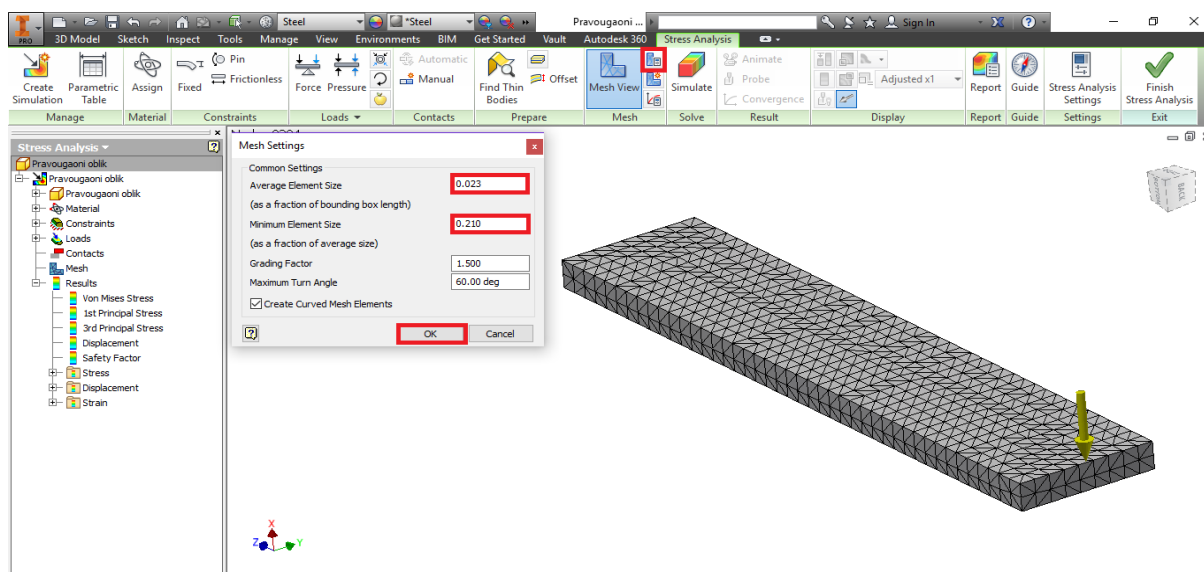
Слика 14. – Фиксирање једне стране опруге

Након фиксирања, на другој страни опруге, помоћу команде *Force*, задаје се сила од 50 N, добијена аналитичким прорачуном (Слика 15).



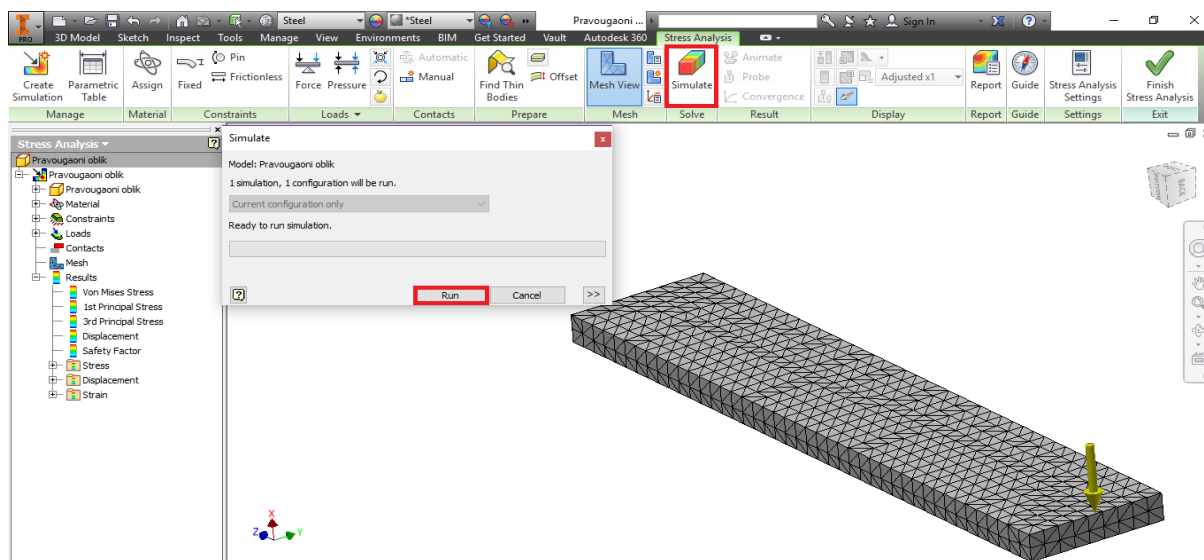
Слика 15. – Задавање силе на другој страни опруге

Велику улогу у добијању што прецизнијих резултата има мрежа (Слика 16), као и њена густина. При задавању густине, за *просечну величину елемената* усвојена је вредност од **0.023**, док је *максимална величина елемента* **0.210**.



Слика 16. – Генерисање мреже коначних елемената

Након задавања свих потребних параметара, симулација може бити покренута (Слика 17).

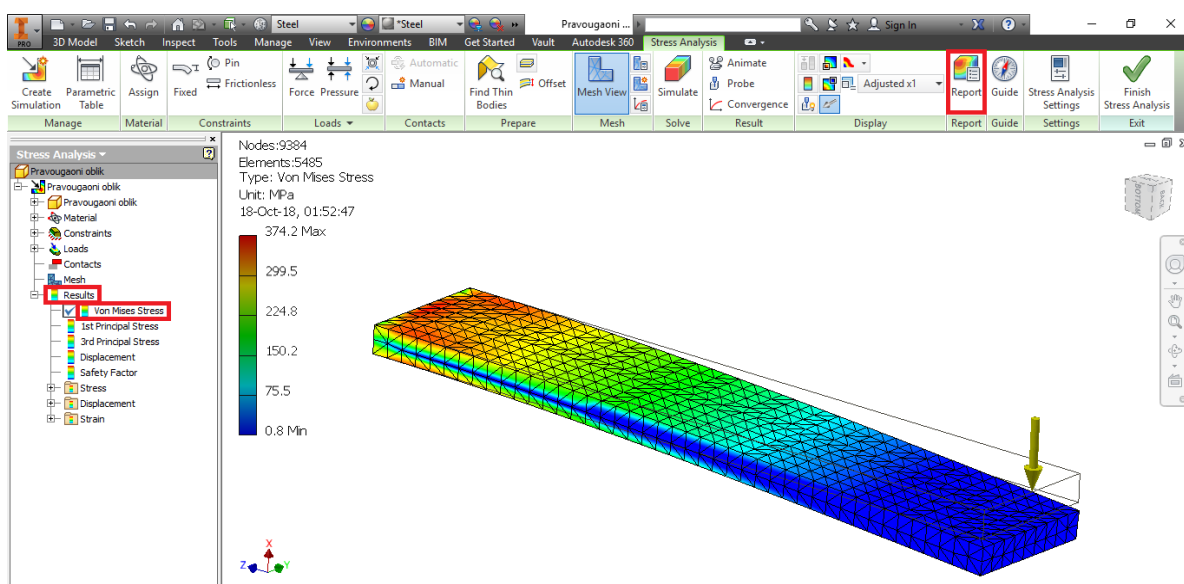


Слика 17. – Покретање симулације

Поступак задавања параметара код троугаоног и трапезног облика је потпуно исти.

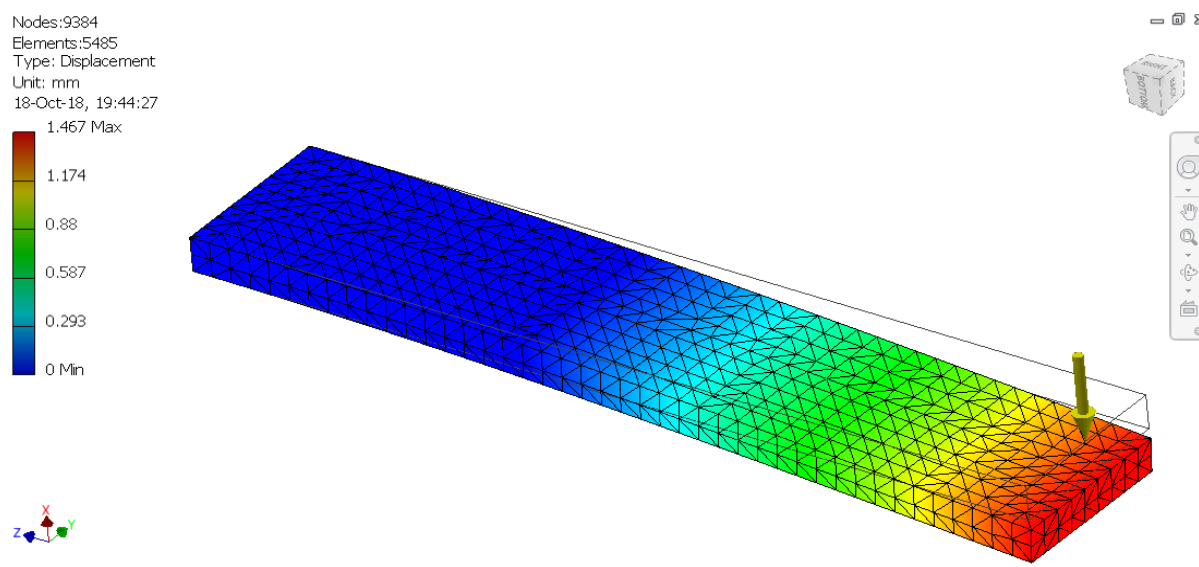
5.2.4 Приказ резултата анализе напона и деформације

Након извршене симулације, команда *Report* даје могућност да се резултати испитивања прикажу као HTML документ и сачувају у PDF формату. Напон је приказан само за случај правоугаоног облика, јер су у остала два случаја максималне вредности напона истих интензитета (Слика 18). Вредност напона добијеног нумеричком анализом, износи **374.2 MPa**.



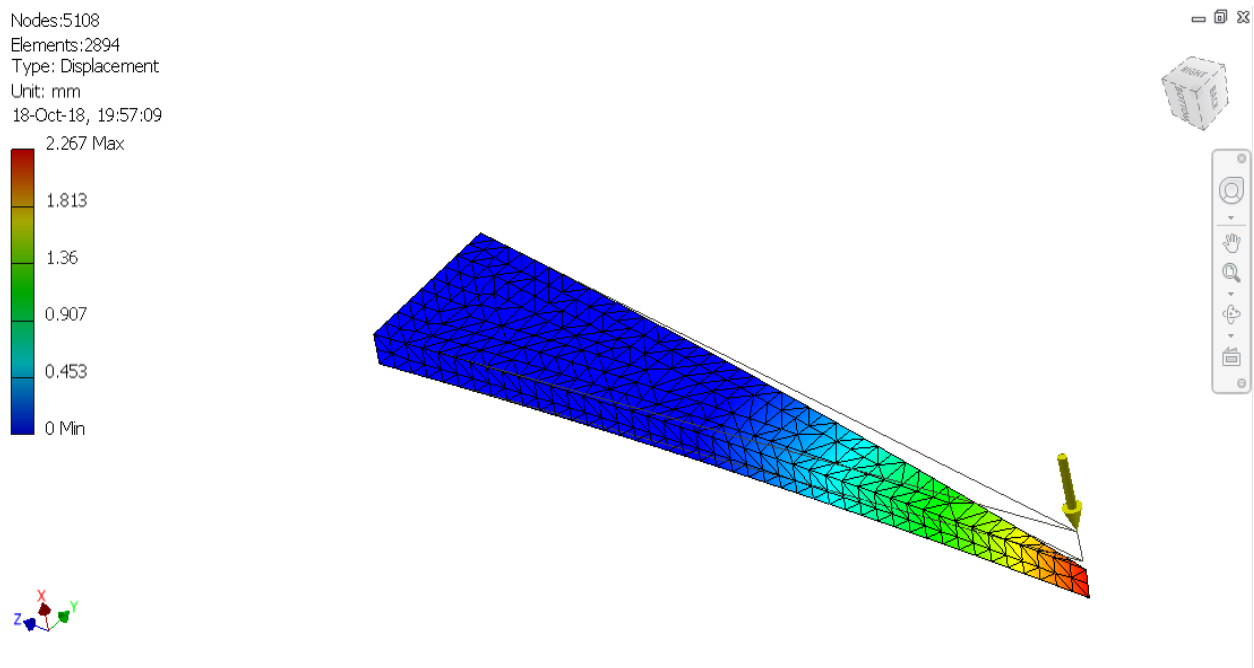
Слика 18. – Приказ добијених резултата напона код опруге правоугаоног облика

Максимална вредност деформације, за опругу правоугаоног попречног пресека, износи **1.467 mm** (Слика 19).



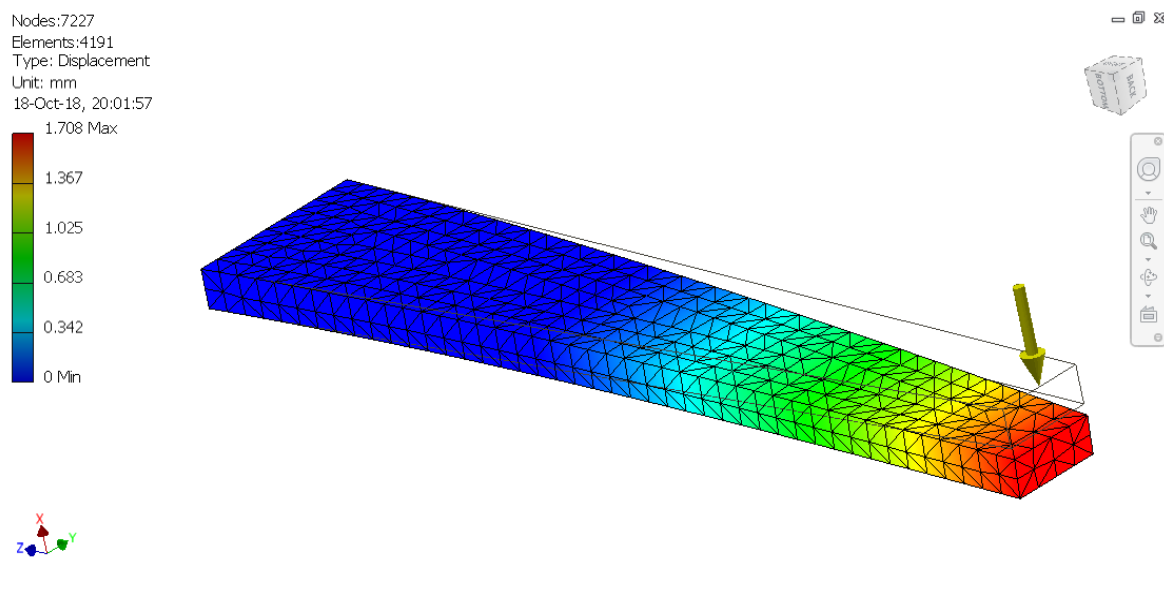
Слика 19. – Приказ резултата деформације код опруге правоугаоног облика

Максимална вредност деформације опруге троугаоног облика износи **2.267 mm** (Слика 20).



Слика 20. – Приказ резултата деформације код опруге троугаоног облика

Максимална вредност деформације опруге трапезног облика износи **1.708 mm** (Слика 21).



Слика 21. – Приказ резултата деформације код опруге трапезног облика

5.2.5 Табеларни приказ добијених резултата

У табели 3 могу се видети аналитичке и нумеричке вредности добијене за напон и деформацију.

Табела 3. – Аналитичке и нумеричке вредности напона и деформација лиснате опруге за правоугаони, троугаони и трапезни облик

		Аналитичке вредности	Нумеричке вредности	Одступање у %
Напон N/mm^2	Правоугаони облик	375	374.2	0.2
Померања mm	Правоугаони облик	1.488	1.467	1.4
	Троугаони облик	2.232	2.267	1.5
	Трапезни облик	1.786	1.708	4.3

Анализирајући добијене аналитичке и нумеричке вредности напона може се закључити да је одступање вредности испод 1%, што значи да су аналитичка и нумеричка вредност готово приближно једнаке.

Добијене вредности померања показују да се највеће одступање јавља код трапезног облика, али да она не прелази одступање веће од 5%.

Добијени резултати напонско-деформационе анализе су потврда исправности формираног нумеричког модела као и потврда чињенице да се софтверски пакет *Inventor* може успешно користити за анализе овог типа.

6. Примена CAD софтверског програма- *FEMAP v11 са NX Nastran-ом*

Femap је напредни инжењерски симулациони пакет (CAE) који служи за креирање мреже коначних елемената сложених техничких производа и састава, као и графичко приказивање резултата анализе. Метод коначних елемената омогућава инжењерима да практично моделирају компоненте, склопове, или системе. *Femap* се може користити без обзира на CAD програм у којем се моделира. Он има уграђене транслаторе за преузимање геометрије из свих водећих CAD програма, као што су Solid Edge, NX, Pro/ENGINEER, CATIA, Solidworks, Autodesk Inventor, AutoCAD итд.

Femap може виртуелно анализирати индивидуалне моделе, склопове или системе и одредити њихово понашање као одговор на задате иницијативе у одређеном радном окружењу. Комплетан приступ резултатима података обезбеђен је кроз табелу која се може користити за прикупљање, сортирање и контролу количине и типа података који је видљив, како би саставили извештај анализе.

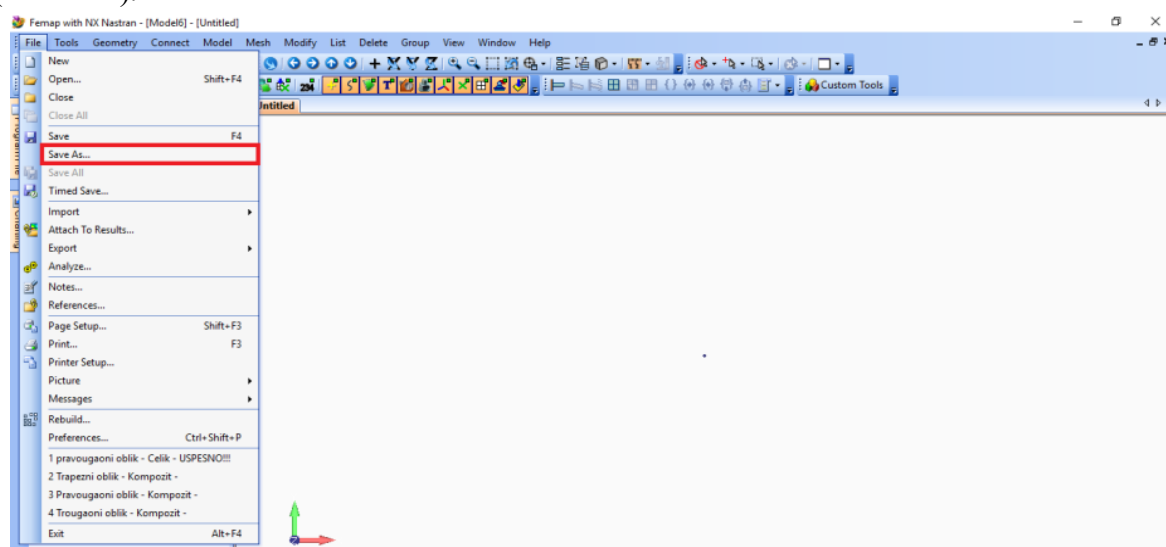
NX Nastran име дугује свом историјском развоју. Прва верзија *Nastran*-а је настала давних седамдесетих, а направила ју је NASA за потребе дизајна космичких ракета *Saturn V*, па име долази од *NAsa STRuctural ANalysis*. Програм је комерцијализован, а данас се користи као *NX Nastran*. Овај програм решава многе врсте проблема, па је у зависности од потреба могуће купити основну или верзију са додатним солверима. *FEMAP v11 са NX Nastran-ом* користи *Linear static*, *Normal modes*, *Buckling*, *Heat transfer*, *Basic nonlinear*, *Spot weld* и *Dynamic response*, док се за сложеније проблеме докупљују солвери *Advanced nonlinear*, *Superelements*, *Direct matrix abstraction programming (DMAP)* и *Design optimization* [12].

6.1 Геометријско моделирање лиснате опруге од челика у *FEMAP v11 са NX Nastran-ом*

У овом делу рада дата је анализа напонског стања и деформација различитих облика опруга од челика (правоугаони, троугаони, трапезни), добијених нумеричким путем, коришћењем софтверског програма *FEMAP v11 са NX Nastran-ом*.

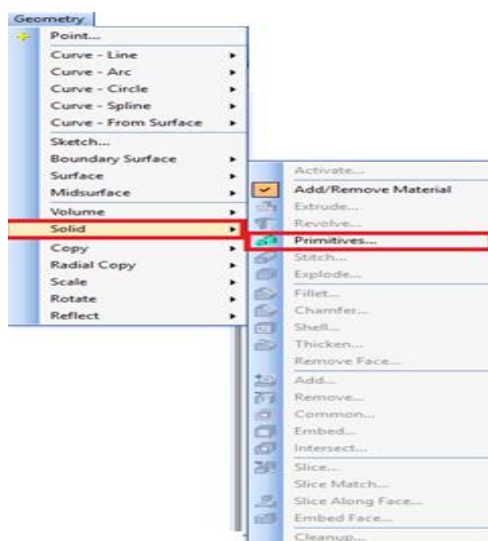
Симулација рада наведених облика опруга, обрађујући пажњу највише на деформацију, даје приближно једнаке резултате са аналитичком анализом, као и сличности са програмом *Inventor*.

При покретању програма и пре почетка рада и задавања било каквих параметара, потребно је сачувати документ притиском на команду *File → Save As* (слика 22).



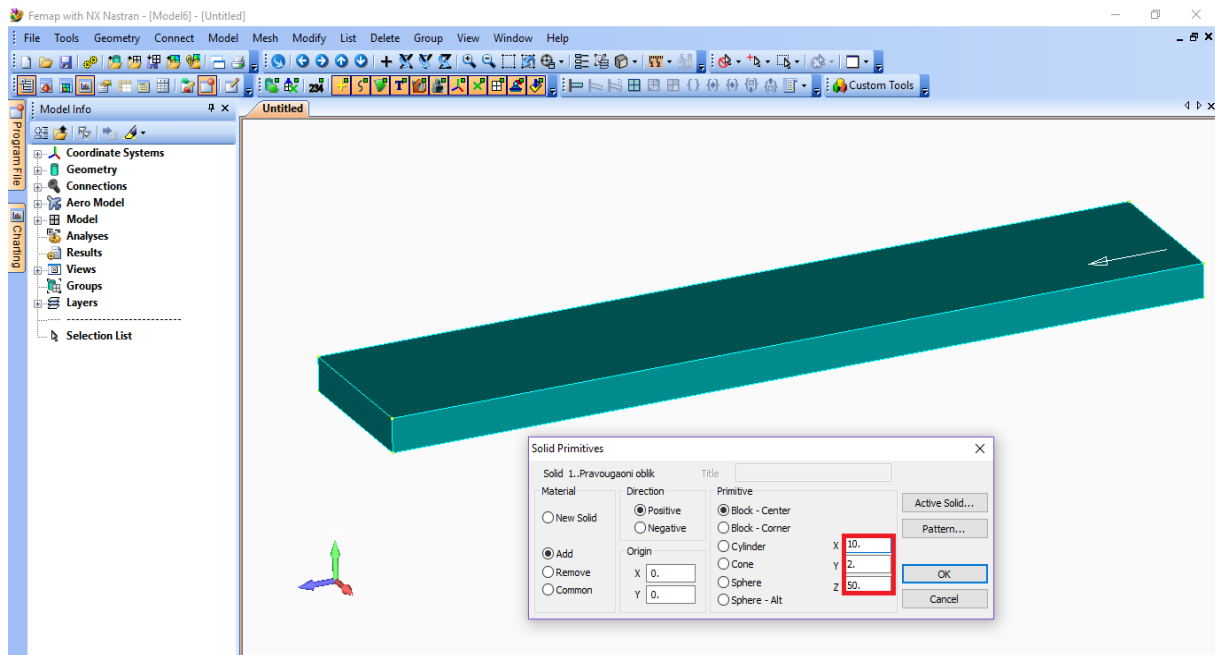
Слика 22. – Чување документа пре почетка рада

Отварањем команде *Geometry*, бира се опција *Solid → Primitives* приказана на слици 23.



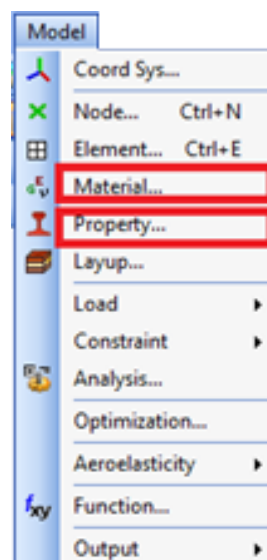
Слика 23. – Креирање модела помоћу иконице *Geometry*

Притиском на опцију *Primitives*, отвара се нови прозор са координатама које треба задати. У овом случају координате су следеће: $X = 10$, $Y = 2$, $Z = 50$. Након задавања координата, добија се правоугаони модел приказан на слици 24.



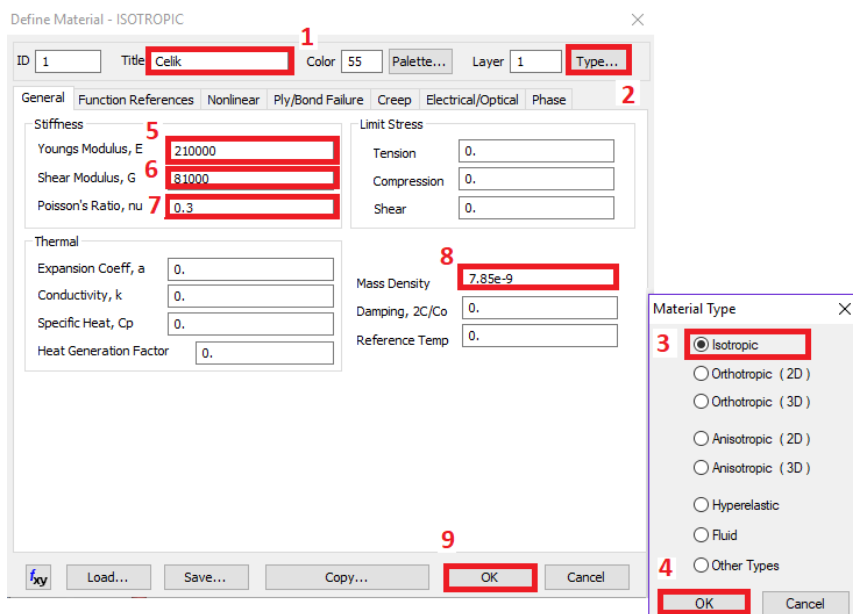
Слика 24. – Приказ модела правоугаоног облика

Након моделирања већ приказаног облика, потребно је задати материјал и дефинисати својство материјала, помоћу опција *Material* и *Property* у падајућем делу команде *Model* (слика 25).



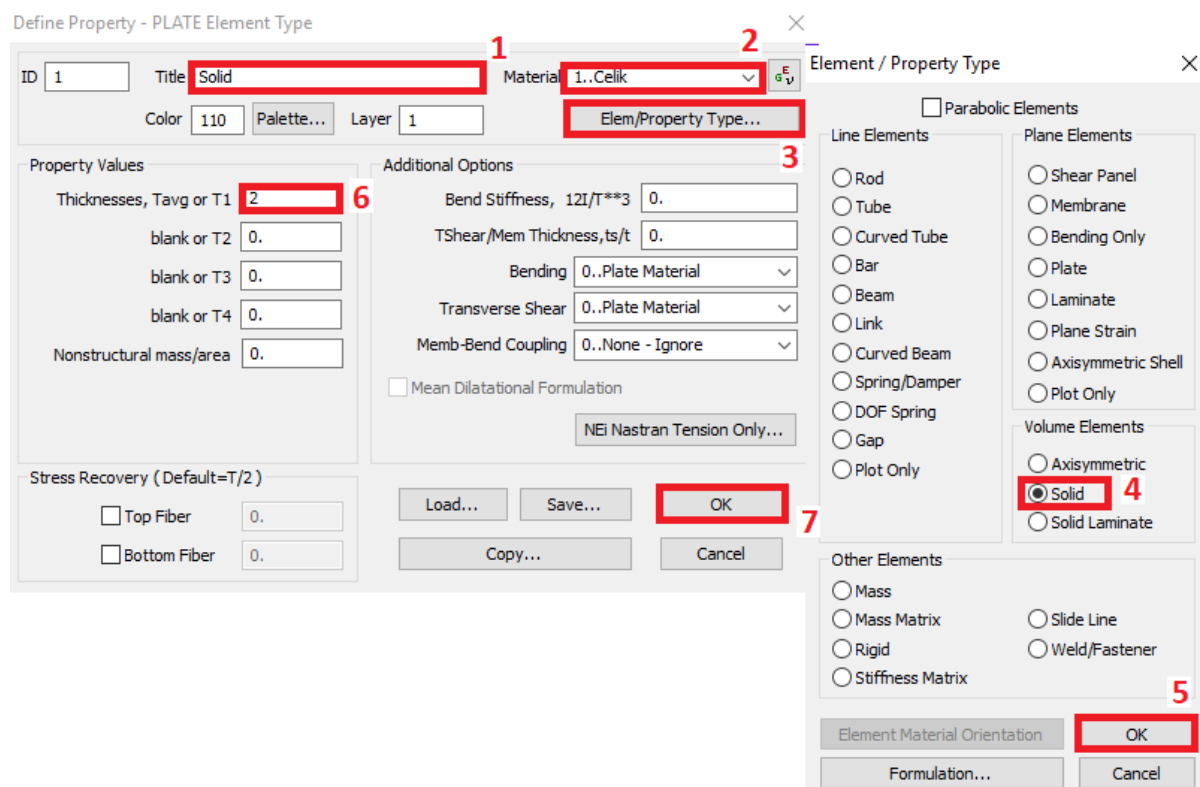
Слика 25. – Задавање материјала и својства

Кликом на опцију *Material*, отвара се прозор за дефинисање материјала који се може видети на слици 26.



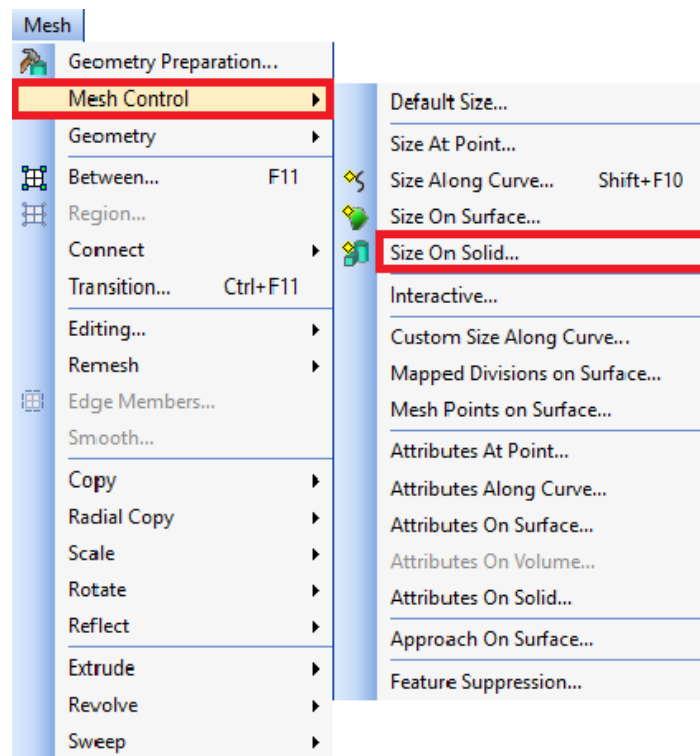
Слика 26. – Задавање материјала

Након задавања материјала, потребно је дефинисати својство материјала помоћу опције *Property*. Поступак рада приказан је на слици 27.



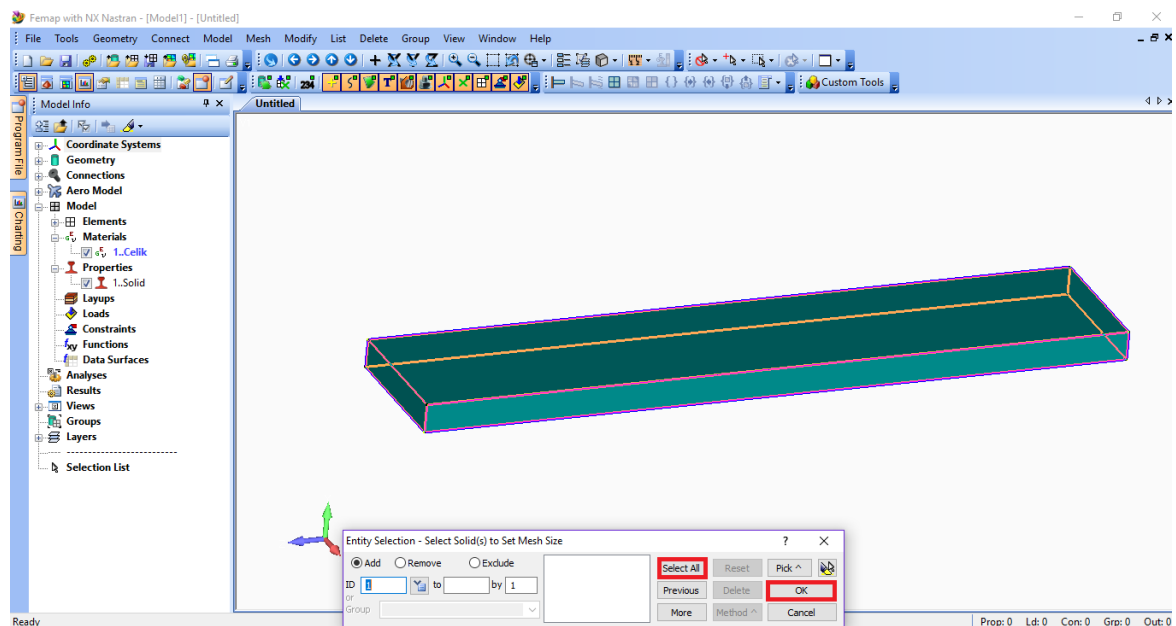
Слика 27. – Дефинисање својства материјала

На добијени модел потребно је поставити мрежу. Први корак пре постављања коначне мреже јесте задавање броја чворова који чине мрежу (слика 28). То се постиже помоћу опције *Mesh control* → *Size on solid*.



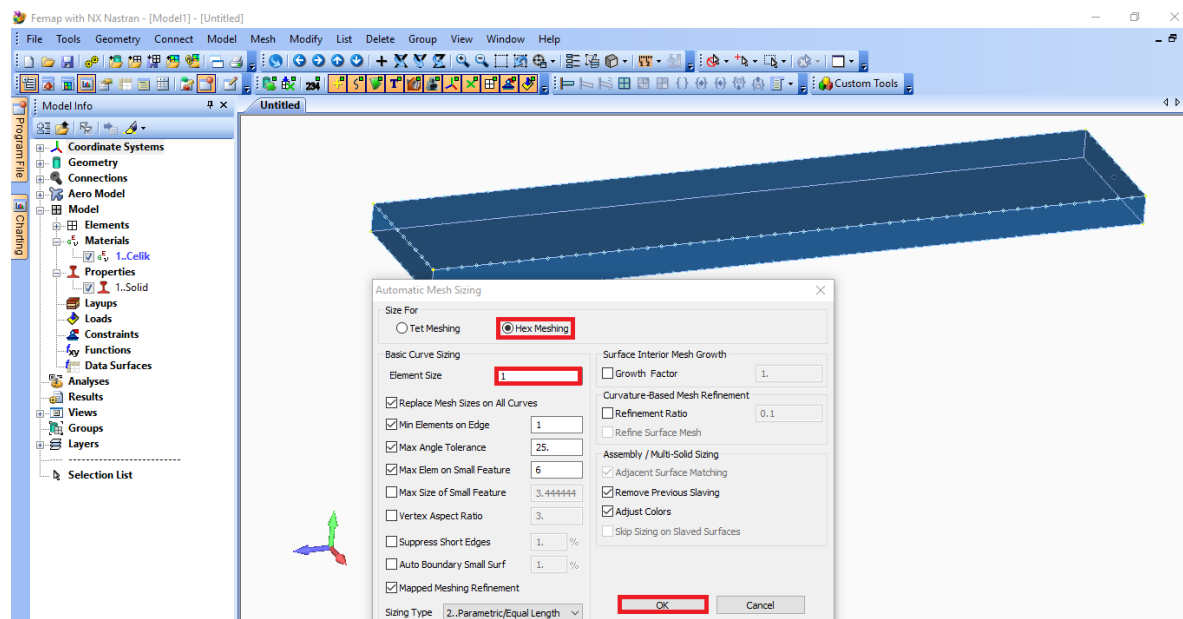
Слика 28. – Постављање чворова

Притиском на опцију *Size on solid*, отвара се нови прозор у коме је потребно селектовати цео модел, помоћу опције *Select all* (слика 29), а затим притиснути ОК.



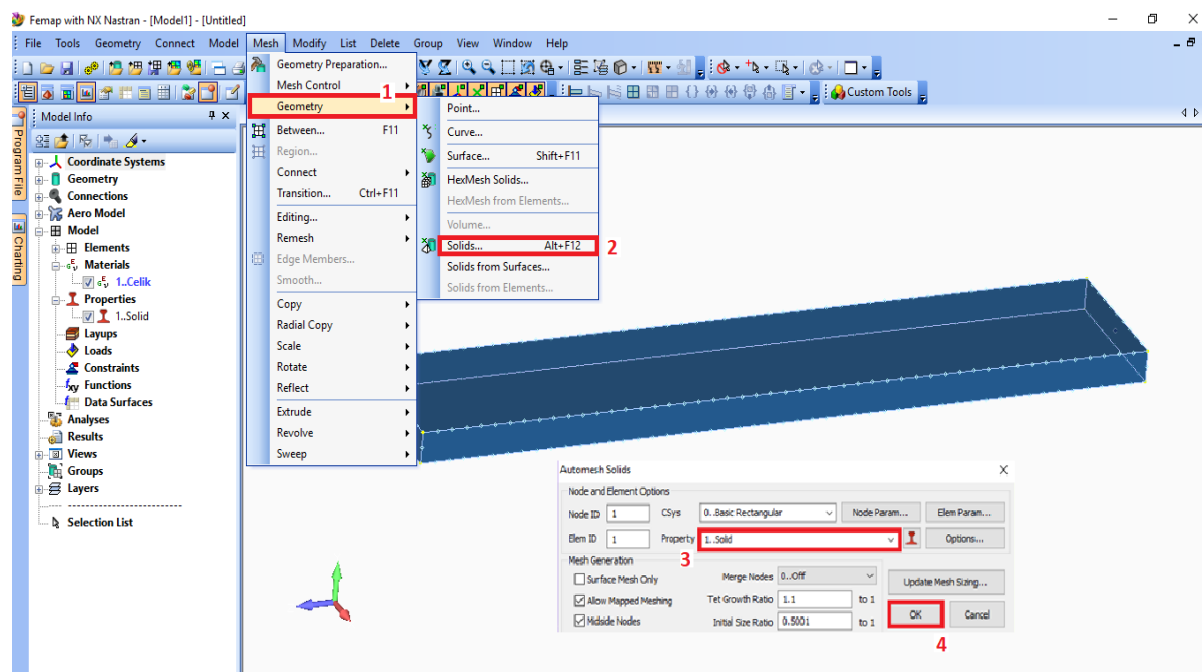
Слика 29. – Селектовање модела

Селектовањем модела, отвара се прозор где се уписује величина елемената мреже, тј. *Element size*. У овом случају ово поље испуњено је вредношћу 1.



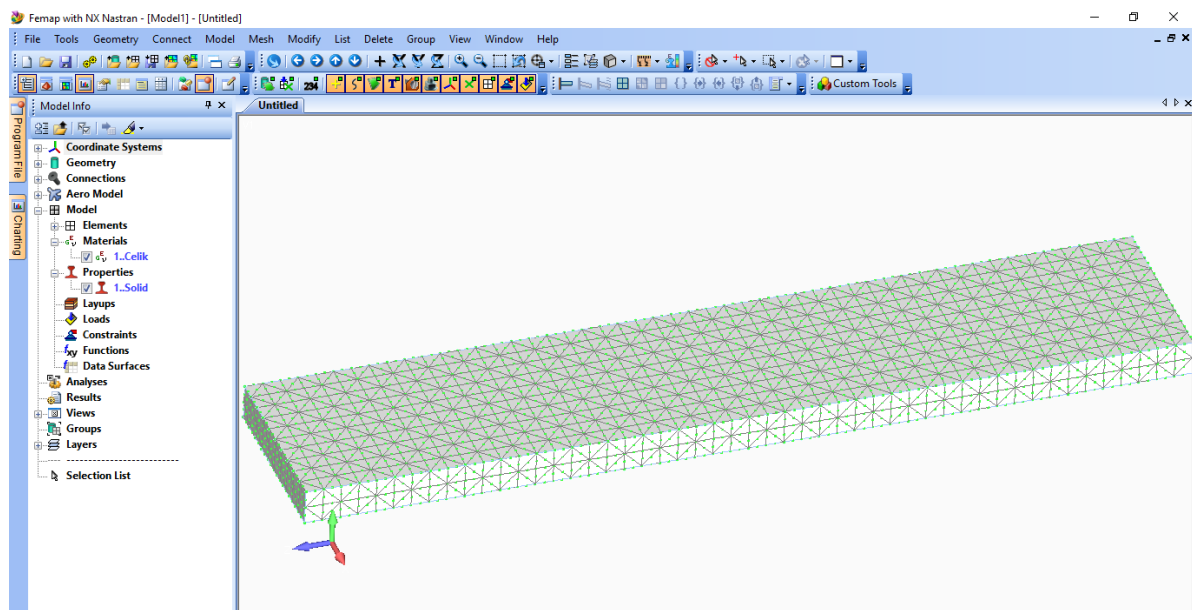
Слика 30. – Величина мреже

Помоћу команде *Mesh* и опције *Geometry* → *Solids* (слика 31), отвара се додатни прозор у којем се избором солида, као понуђеног у падајућем делу, добија изглед модела са мрежом која је приказана на слици 32.



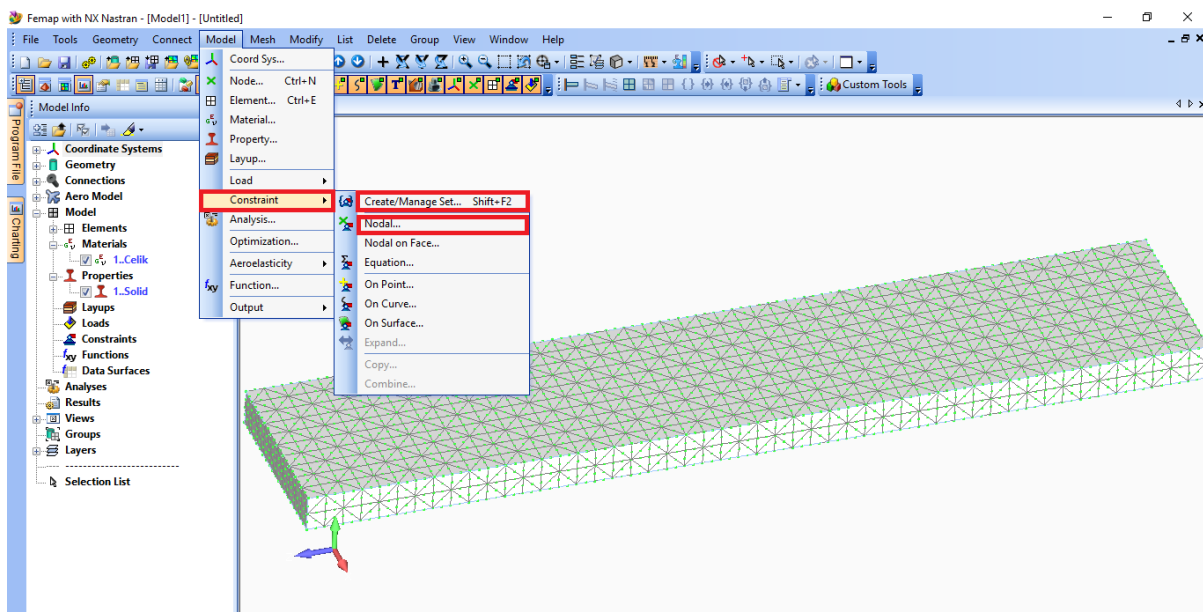
Слика 31. – Поступак добијања мреже

Финални изглед модела са генерисаном мрежом приказан је на слици 32.



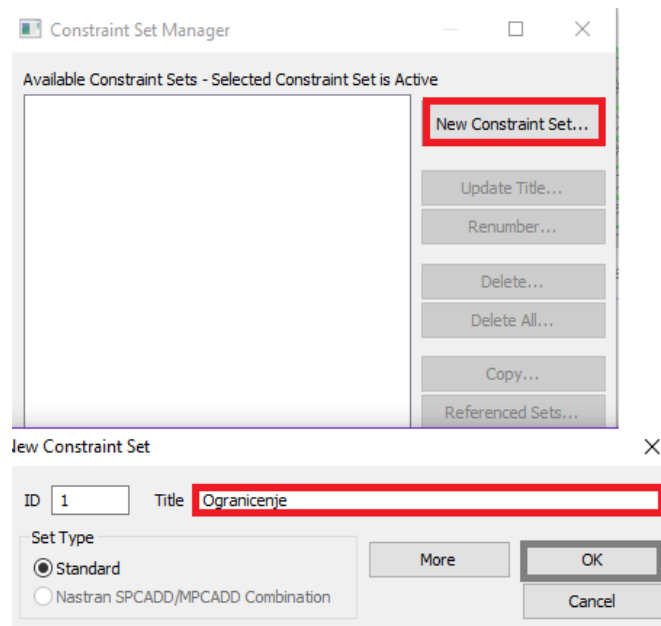
Слика 32. – Финални изглед модела са мрежом

Након постављања мреже, приступа се постављању ограничења. Ограничава се један од крајева опруге, помоћу опције *Constraint* (слика 33).



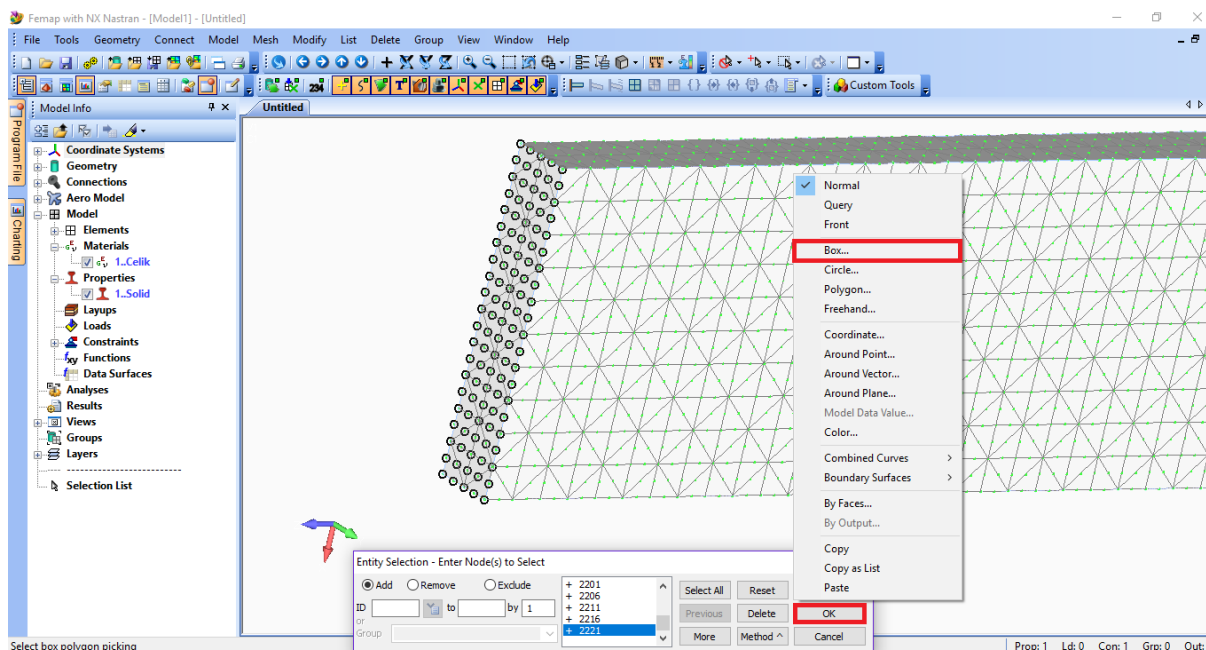
Слика 33. – Опција *Constraint* за ограничење

На слици 34 приказан је прозор за задавање назива ограничења. То се постиже помоћу опције *New constraint set*.



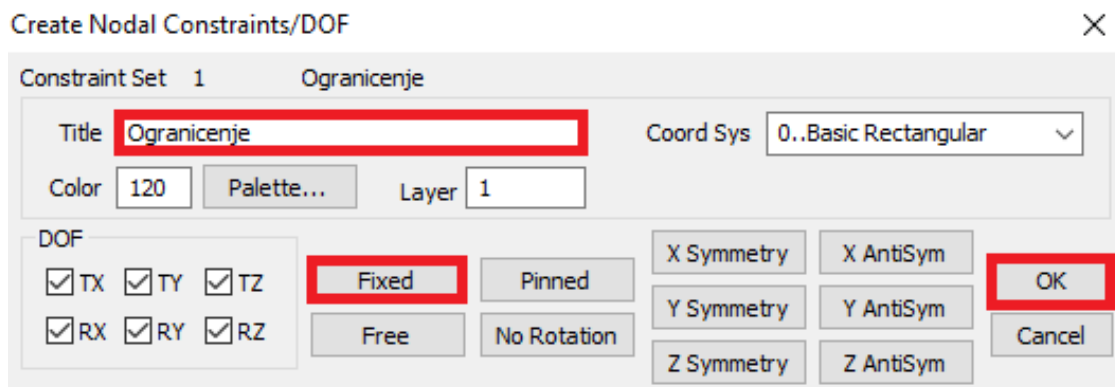
Слика 34. – Назив ограничења

Следи селектовање површине на страни која ће бити уклештена. То се постиже притиском на опцију *Nodal*, већ поменуте команде *Model* → *Constraint*. На слици 35, могу се видети различите опције за селектовање поменуте површине. У овом случају коришћена је опција *Box*.



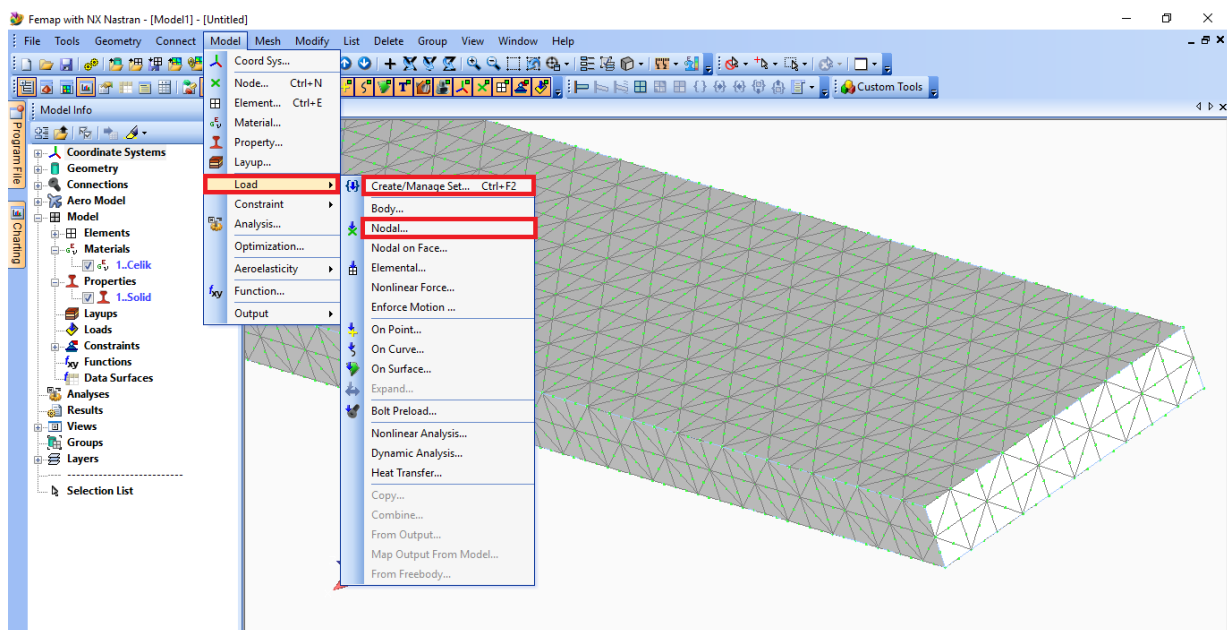
Слика 35. – Селектовање површине за уклештени део

Након селектовања, отвара се прозор *Create nodal*, где се се опет понавља претходни назив и означавају се поља *Fixed* за померање у свим правцима. На слици 36 је приказан прозор са поменутиим опцијама.



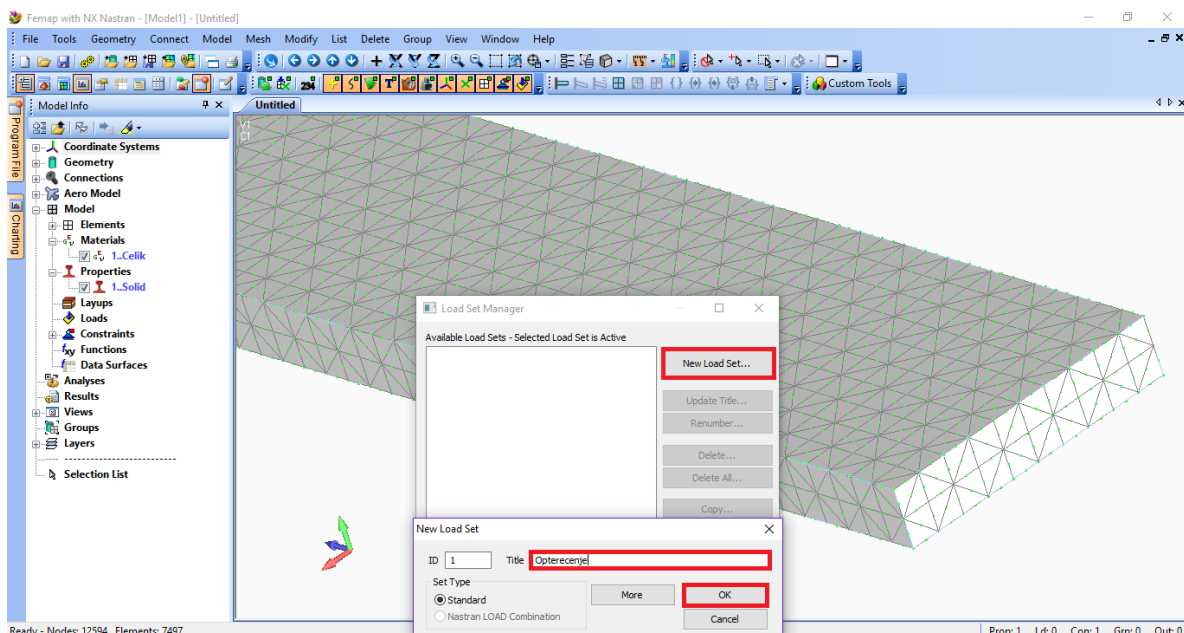
Слика 36. – Назив и фиксирање померања у свим правцима

По завршетку ограничавања, потребно је задати оптерећење. Поступак је сличан претходном. На слици 37 приказане су опције за постављање оптерећења, у овом случају силе.



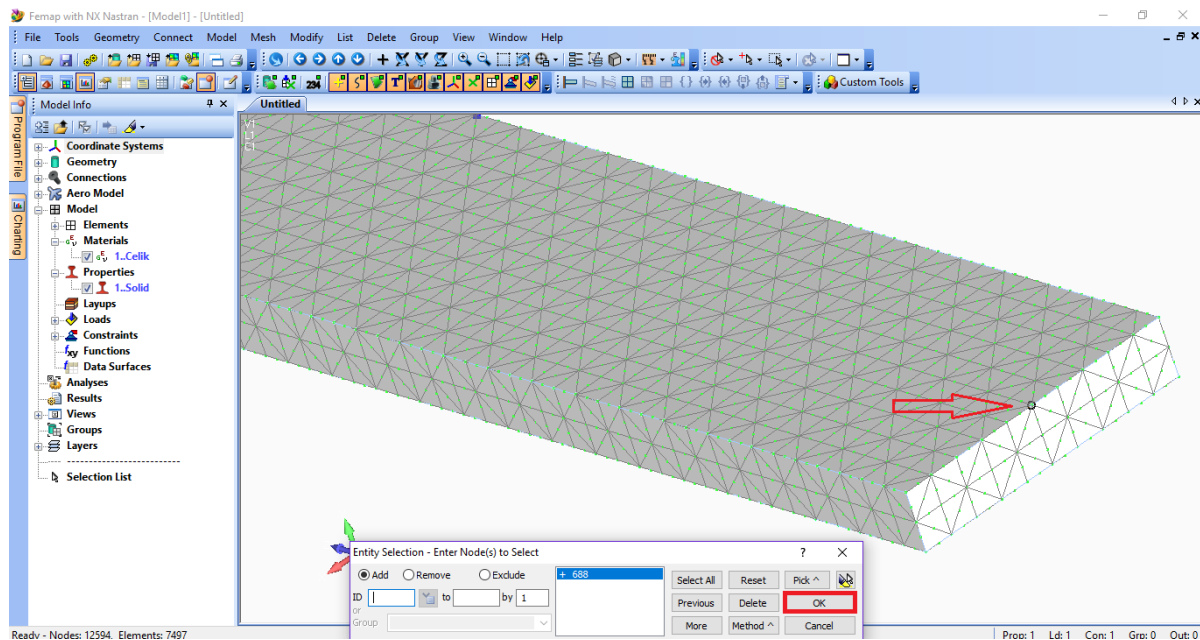
Слика 37. – Постављање оптерећења

Уношење назива помоћу опције *New load set*, приказано је на слици 38.



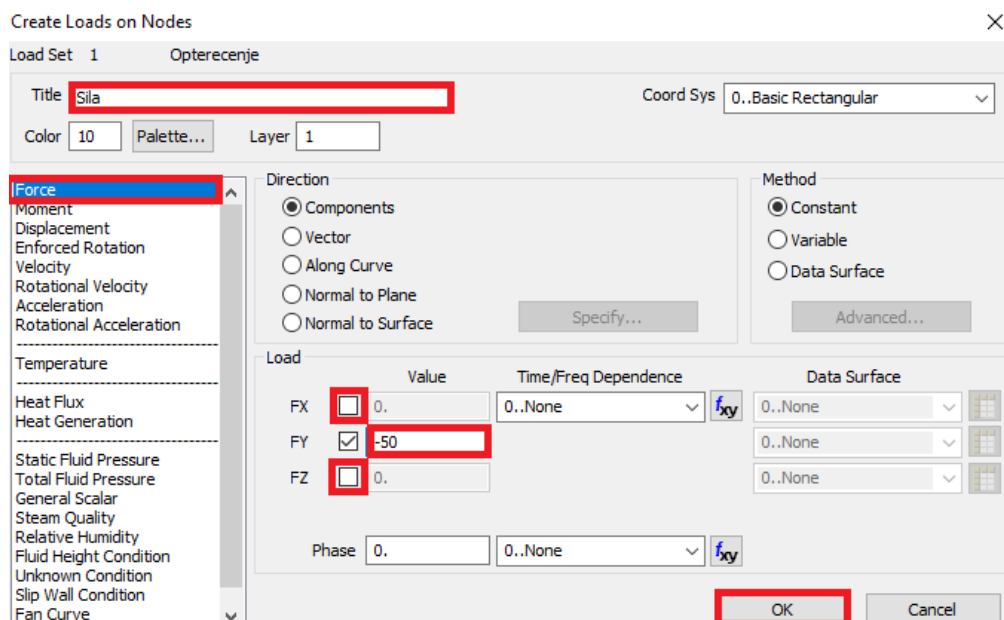
Слика 38. – Назив оптерећења

Селектовањем опције *Nodal*, као и у претходном делу за фиксирање једне стране, у овом делу поставља се сила селектовањем једног од чворова на ободу другог краја моделиране опруге. Поступак се може видети на слици 39.



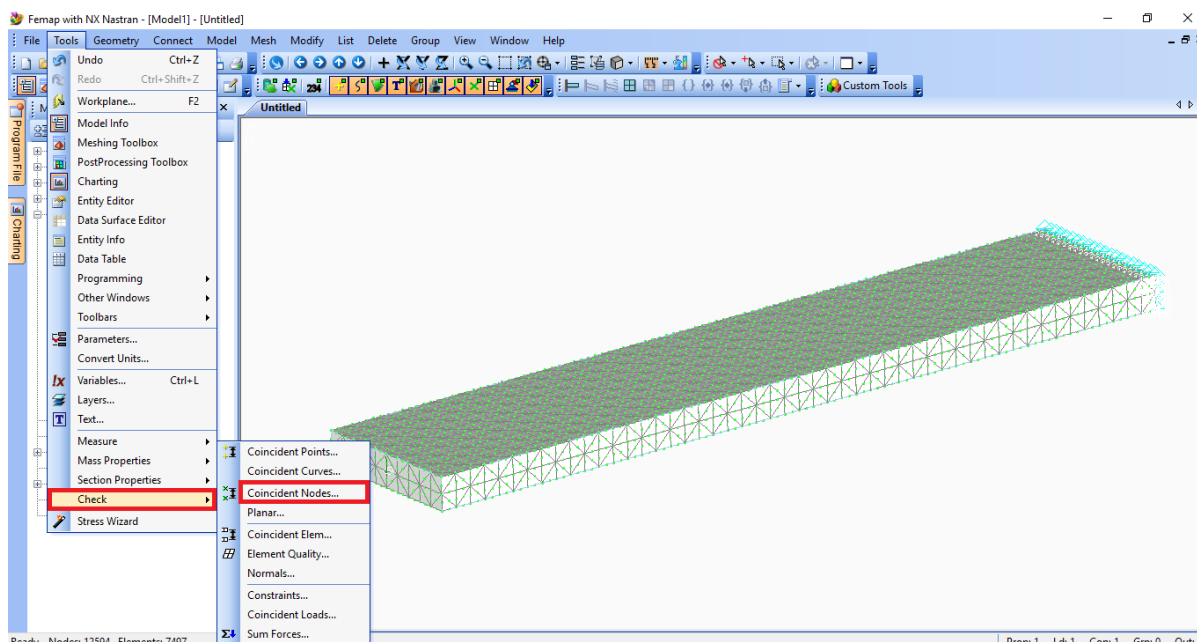
Слика 39. – Означавање поља за постављање силе

Постављањем силе, отвара се прозор *Create load on Nodes*, где се опет задаје назив, селекује сила као команда коју је потребно користити, као и чекирање поља у правцу у којем ће се сила деловати, у зависности од координатног система у којем је модел постављен. У овом случају је коришћена сила од **50 N** у правцу *Y* осе. Ова операција може се видети на слици 40.



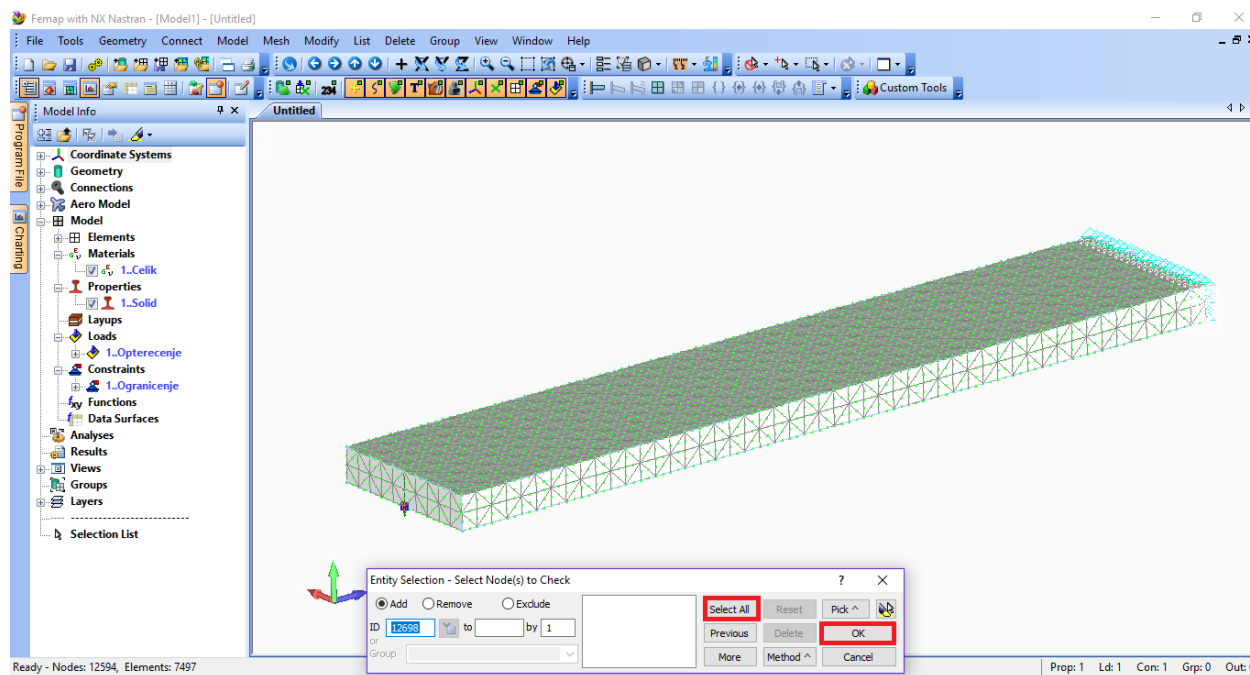
Слика 40. – Задавање силе у *Y* правцу

Конечан изглед модела пре симулације може се видети на слици 41. Пре покретања симулације потребно је извршити проверу постављених чворова за мрежу помоћу опције *Coincident Nodes*.



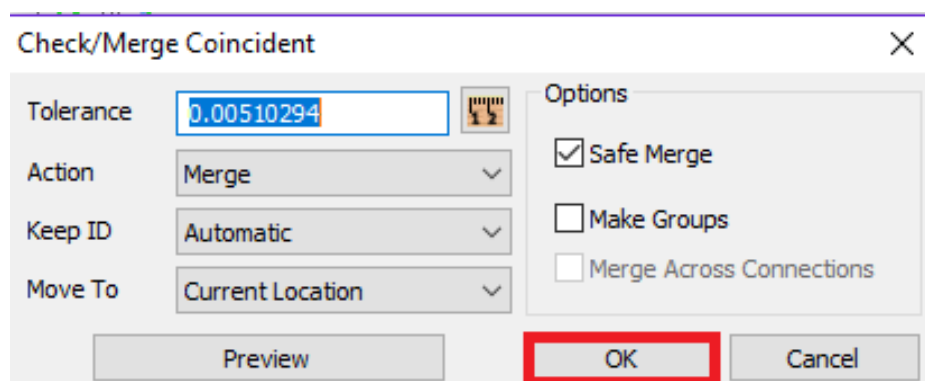
Слика 41. – Провера пре симулације

Такође је потребно селектовати све помоћу опције *Select all*, како би сви чворови били укључени (слика 42).



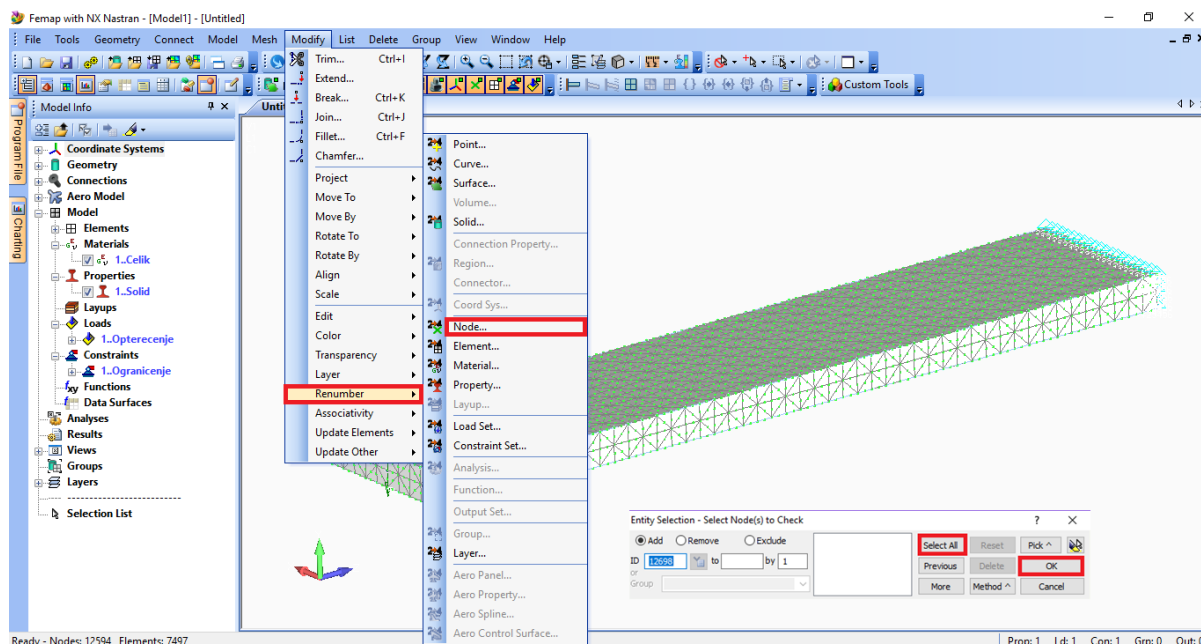
Слика 42. – Селектовање свих чворова

Након селектовања, отвара се прозор приказан на слици 43 *Check / Merge*. Потребно је притиснути опцију *OK*.



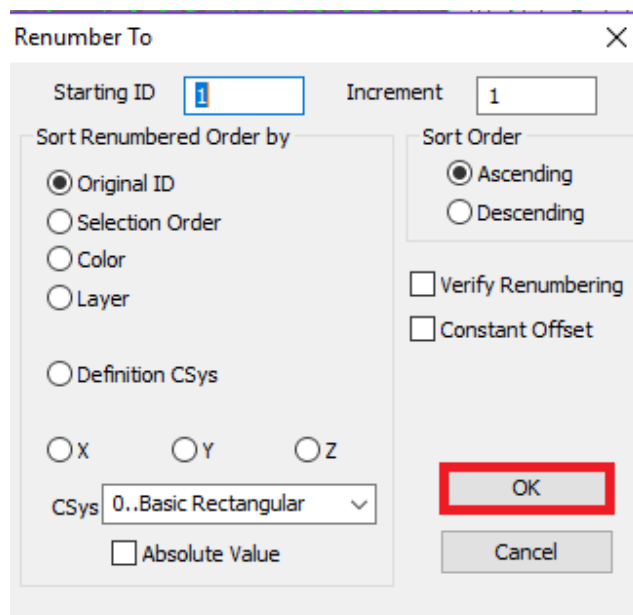
Слика 43. – Провера – спајање чворова

Провера бројева чворова се врши притиском на иконицу *Modify*, на опцију *Renumber* → *Node*, а затим селектовање целог модела и опцијом *OK* (слика 44).



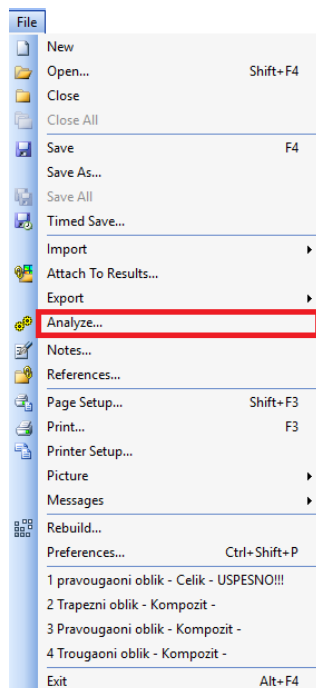
Слика 44. – Провера чворова

Након притиска на опцију *OK*, на слици 45 приказан је прозор за промену броја чворова, уколико је то неопходно.



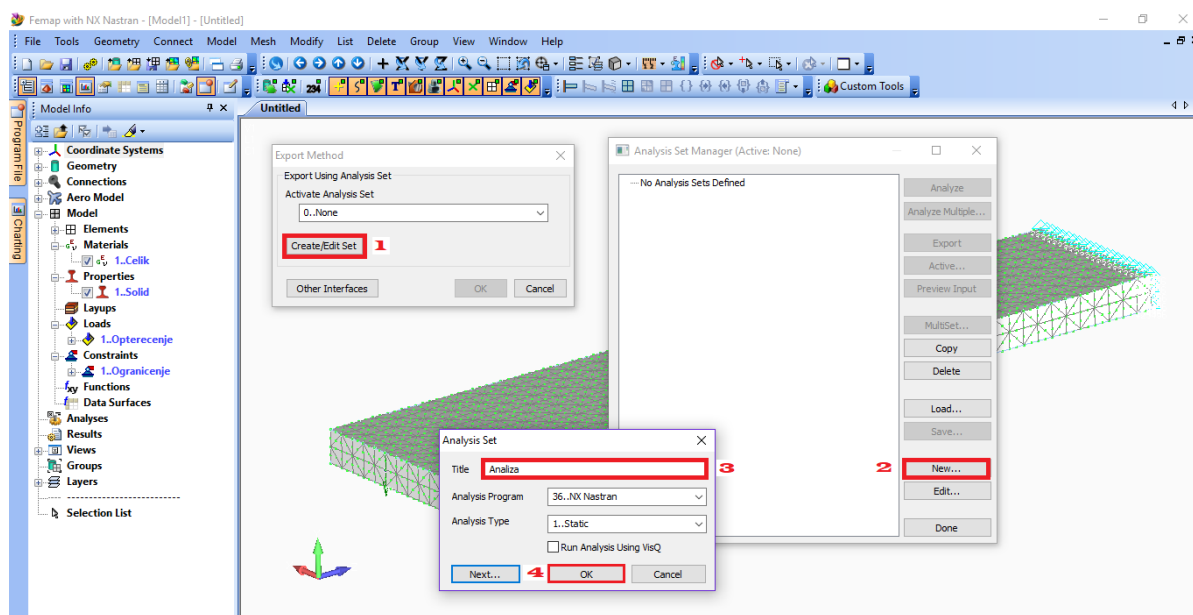
Слика 45. – Промена броја чворова

Након провере, притиском на команду *File*, отвара се прозор који се може видети на слици 46. Притиском на команду *Analyze*, приступа се прозору за симулацију.



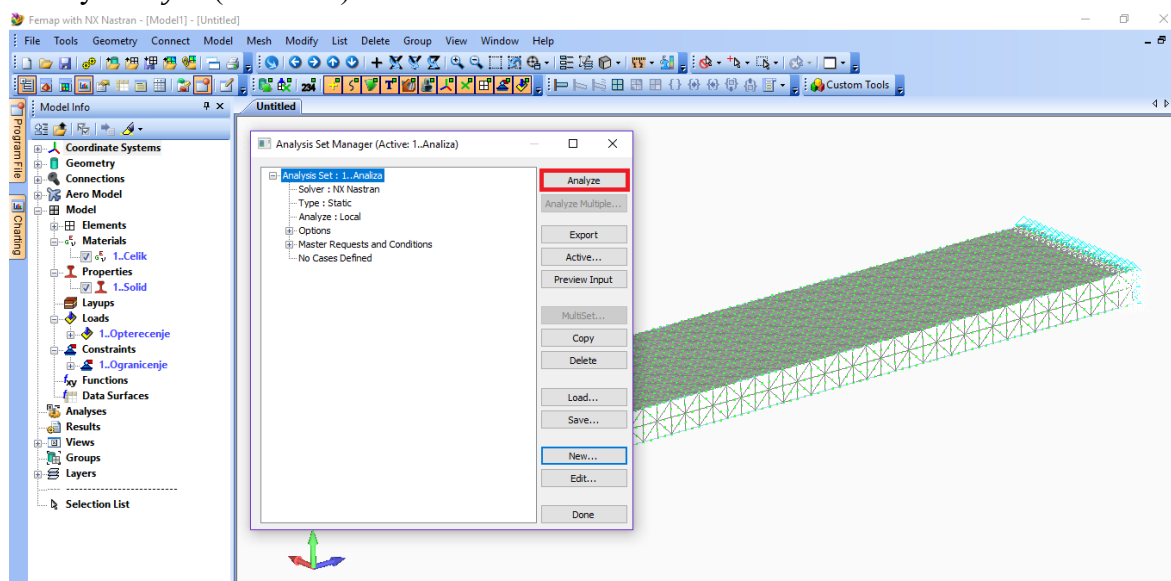
Слика 46. – *Analyze* за симулацију

На слици 47 приказани су кораци који се морају испунити како би се симулација покренула. Приступа се креирању симулације помоћу опције *Create/Edit set*. Притиском на њу, отвара се прозор на ком је потребно изабрати опцију *New*, а онда и дати назив анализи.



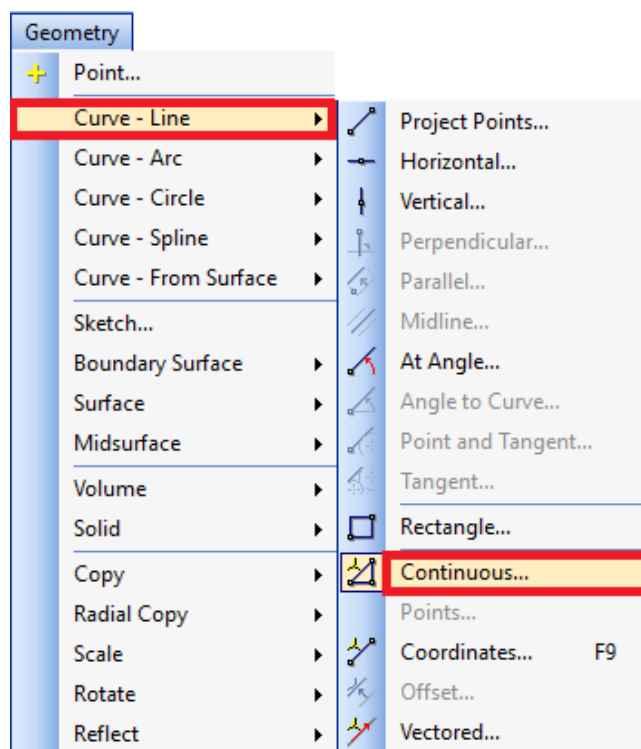
Слика 47. – Креирање анализе

Након потврде притиском на опцију ОК, симулација може бити изведена помоћу *Analyze* (слика 48).



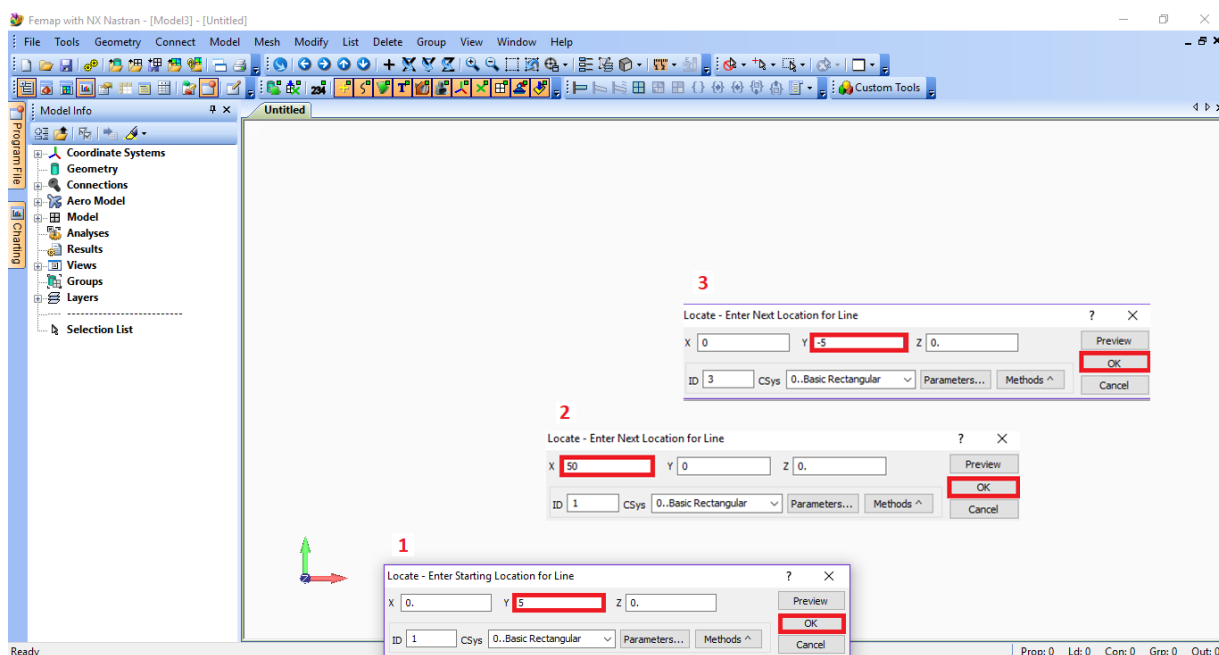
Слика 48. – Покретање симулације

Геометријски параметри модела опруге троугаоног облика се добијају другачије од правоугаоног, што се може видети на слици 49. Притиском на команду *Geometry*, за разлику од претходног поступка, бира се опција *Curve – Line*, а затим *Continuous*.



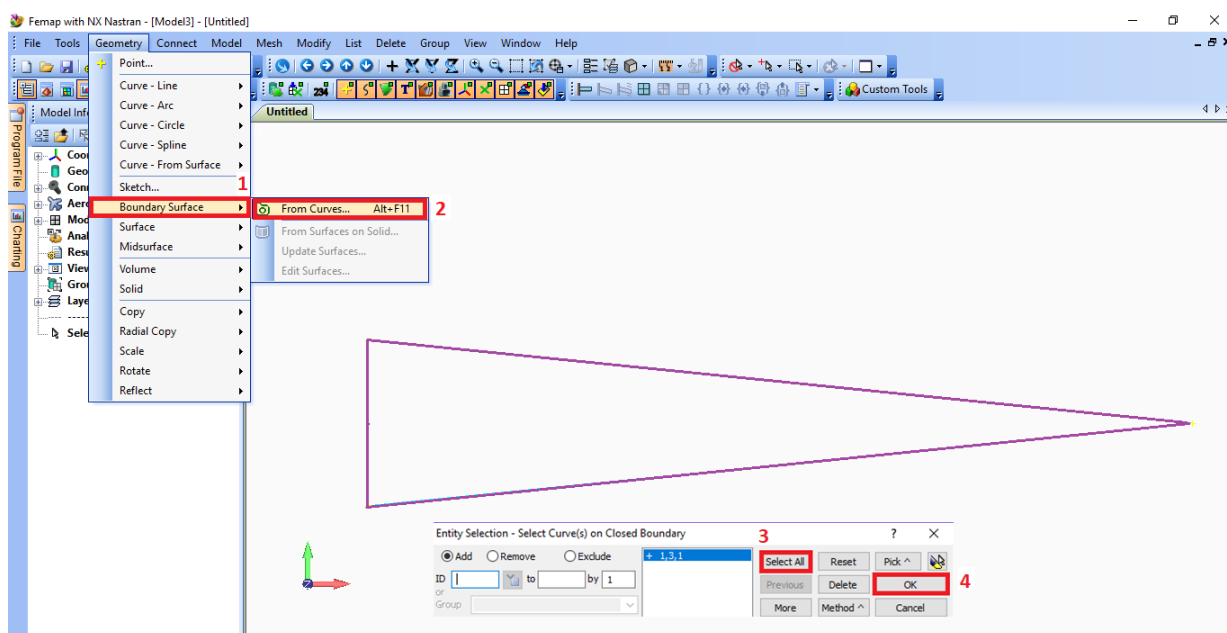
Слика 49. – Геометријски параметри опруге троугаоног облика

Притиском на опцију *Continuous*, отварају се прозори приказани на слици 50. Потребно је задати координате за Y , X , а затим поново за Y , али са знаком минус, како би се добио жељени облик троугла.



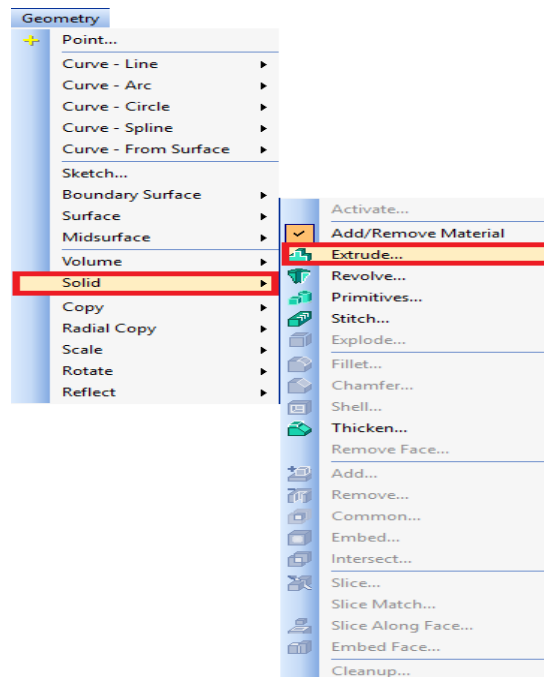
Слика 50. – Задавање координата за троугаони облик модела

Затим је потребно ићи на опцију *Boundary surface* → *From curves*, чиме се обележава гранична површина направљеног облика, а онда се селекује цео троугаони облик приказан на слици 51.



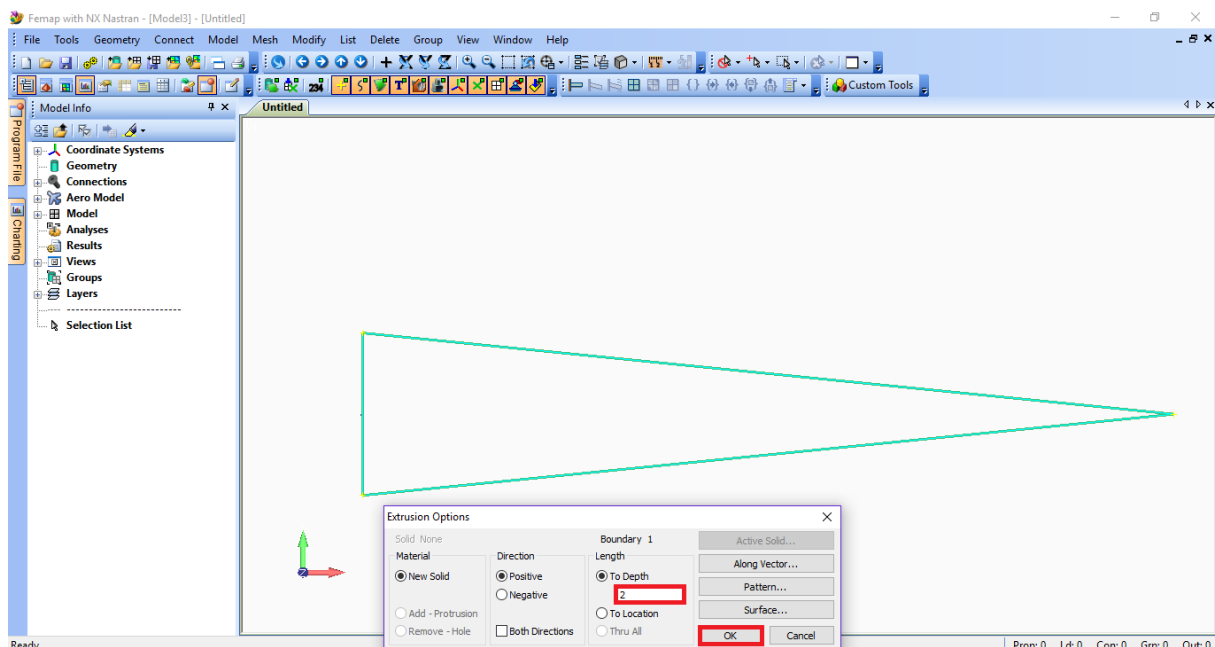
Слика 51. – Гранична површина

Поновним кликом на команду *Geometry*, а затим опцију *Solid* → *Extrude*, добија се пун модел троугаоног облика (слика 52).



Слика 52. – Екструдирање модела

Модел ће се екструдирати за вредност броја 2, што одговара висини опруге, као што је приказано на слици 53.

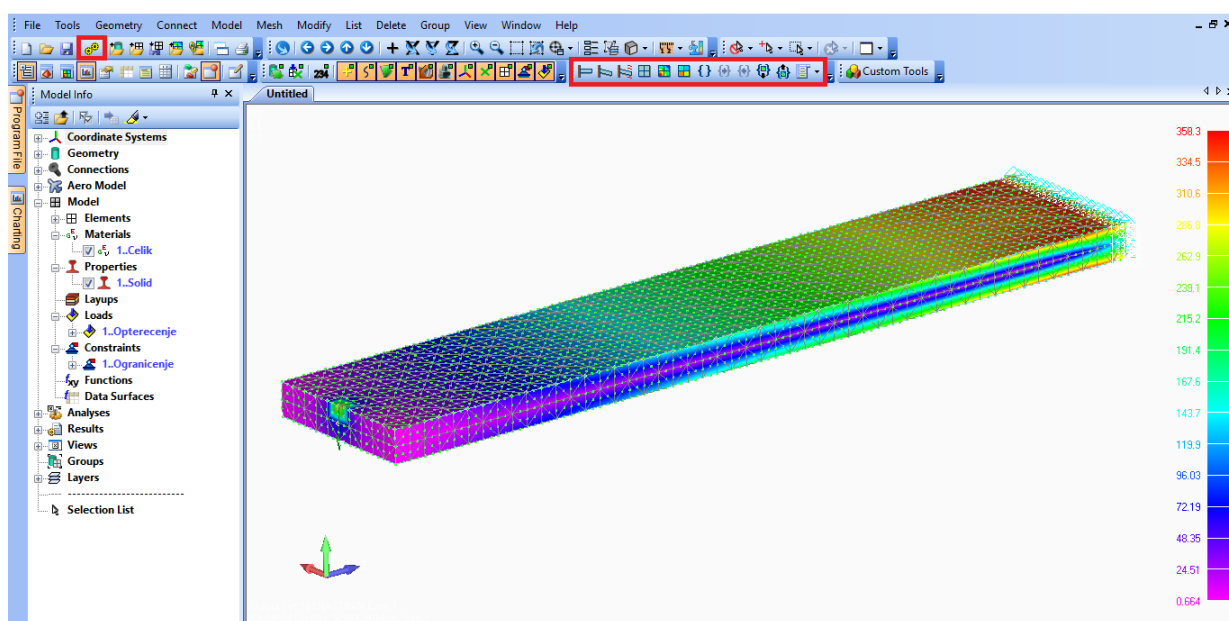


Слика 53. – Екструдирање

6.2 Напонско – деформациона анализа просте лиснате опруге од челика различитих облика

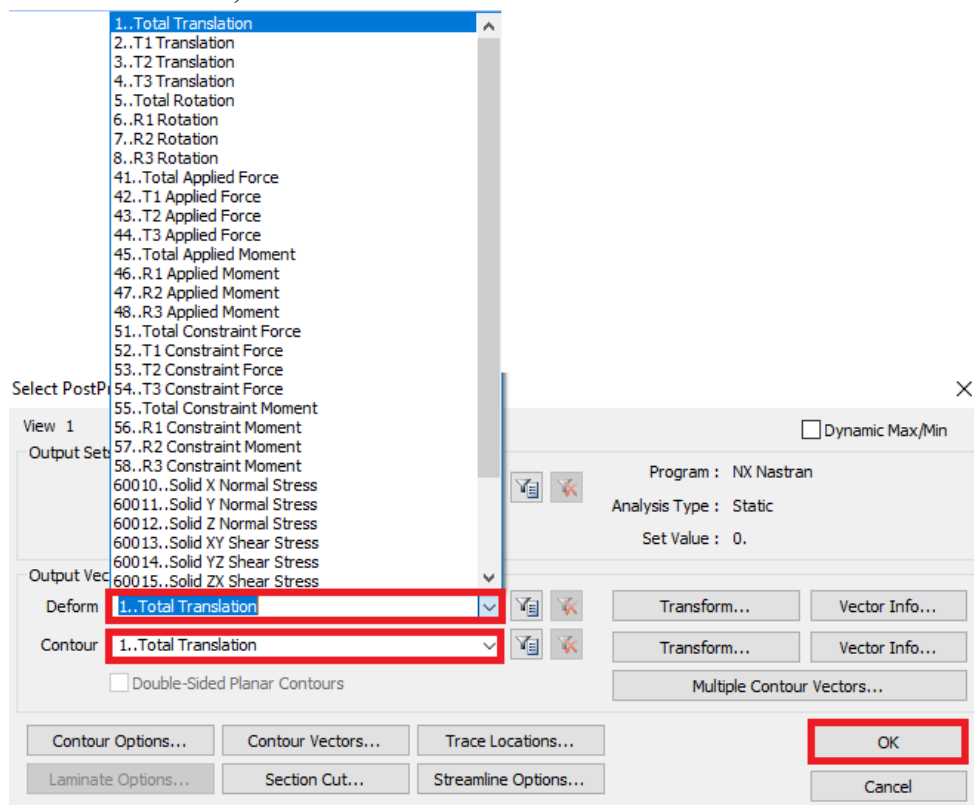
Покретање симулације се изводи помоћу иконице за анализу приказане на слици 54. Уоквирена палета на слици садржи велики број могућности приказа деформисаног облика модела, као и опцију { } - *PostProcessing Data*, у којој се могу мењати типови приказа промена на моделу, у овом случају напона и деформације.

Напон је приказан само за правоугаони облик опруге, јер су и за остала два облика максималне вредности напона истог интензитета. Максимална вредност напона добијеног нумеричком анализом, износи **358.3 МПа**.



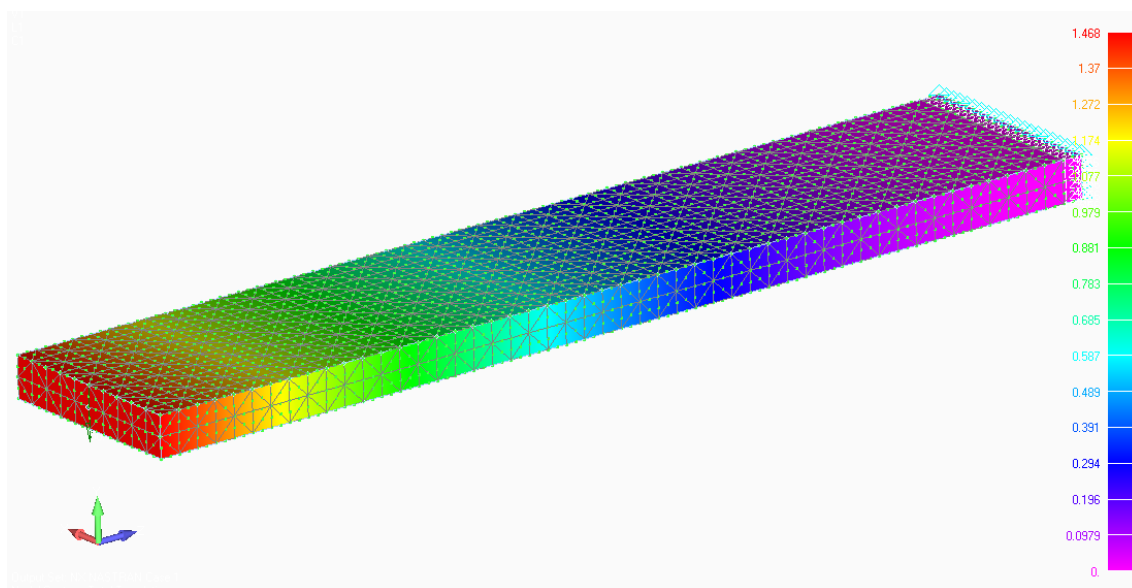
Слика 54. – Приказ добијених резултата напона код правоугаоног облика опруге

Опција { } - *PostProcessing Data* нуди могућност промене типа на моделу (слика 55). У овом случају за деформисани модел (*Deform*) се бира укупно померање опцијом *Total translation*, као и за *Contour*.



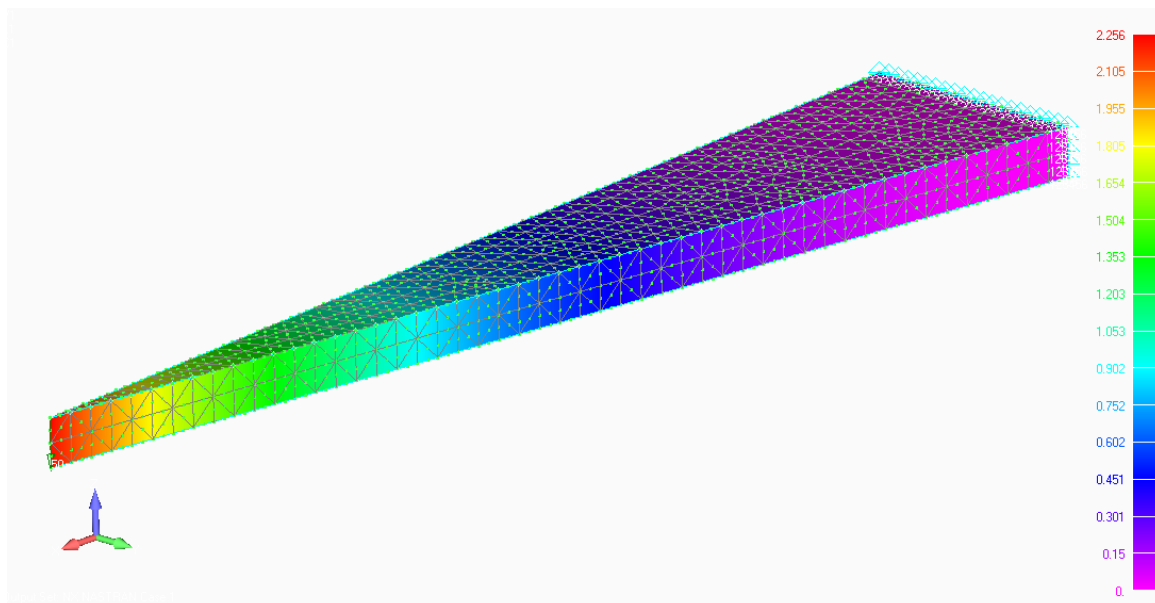
Слика 55. – Преглед добијених резултата анализе

Максимална вредност деформације опруге правоугаоног облика (слика 56) износи **1.468 mm**.



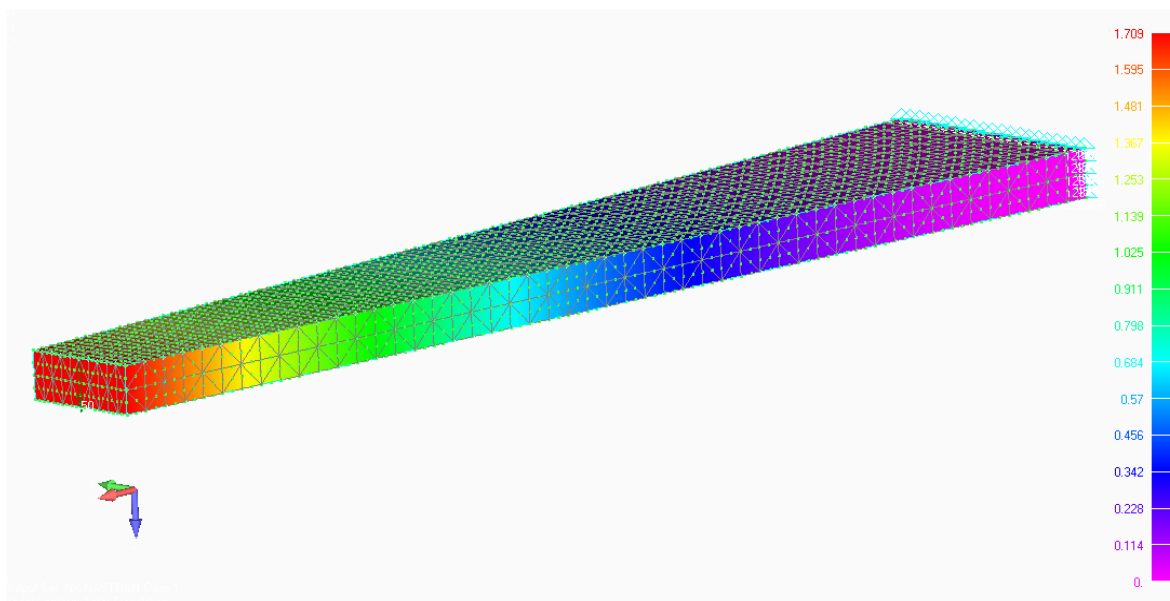
Слика 56. - Приказ резултата деформације код правоугаоног облика опруге

Максимална вредност деформације опруге троугаоног облика износи **2.256 mm** (слика 57).



Слика 57. - Приказ резултата деформације код троугаоног облика опруге

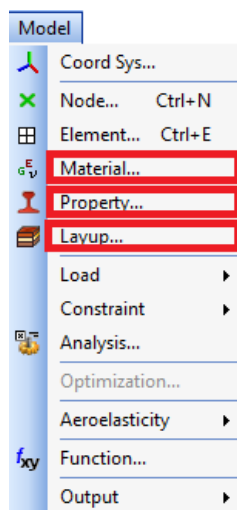
Максимална вредност деформације трапезног облика опруге (слика 58) износи **1.709 mm**.



Слика 58. - Приказ резултата деформације код трапезног облика опруге

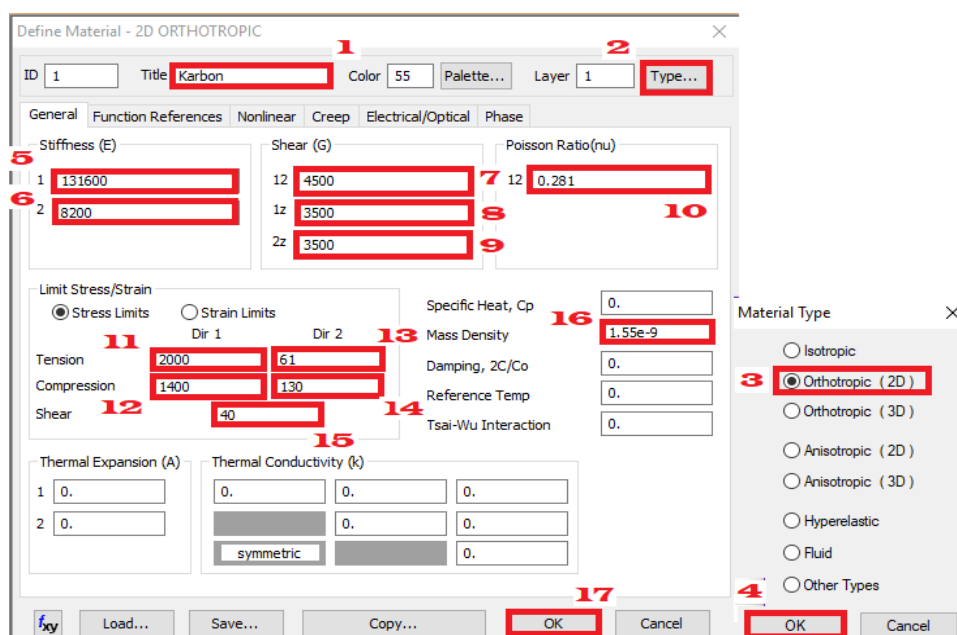
6.3 Напонско – деформациона анализа просте лиснате опруге од композита различитих облика

Што се тиче композита, укључен је исти поступак рада при задавању свих карактеристика, као што је и приказано у досадашњим примерима. Потребно је при уношењу података за материјал унети потребне карактеристике за композит, где поред тога сад у обзир долази и додавање слојева композита помоћу опције *Layup* (слика 59).



Слика 59. – Материјал - композит

При избору материјала, потребно је за тип материјала, кликнути на поље *Orthotropic (2D)*. Карактеристике карбонска влакна/епокси композита приказане су на слици 60.



Слика 60. – Карактеристике карбонска влакана/епокси композита

Карактеристике стаклена влакна/епокси композита приказане су на слици 61.

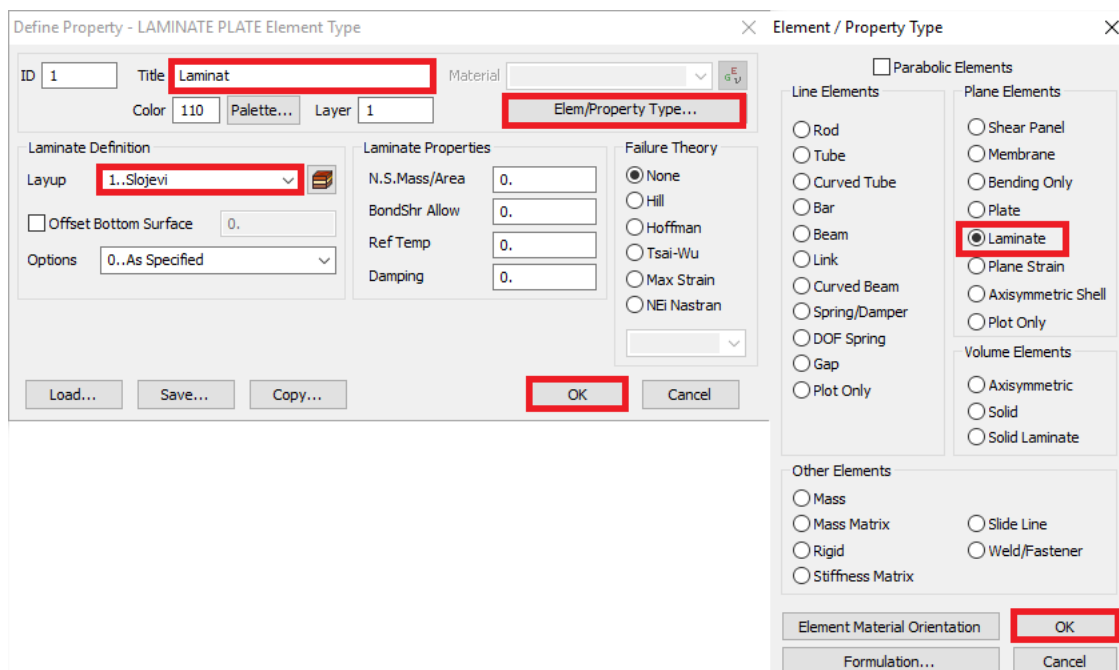
Слика 61. – Карактеристике стаклена влакна/епокси композита

Опција *Layup* даје могућност прављења слојева композита (слика 62). У овом случају то је комбинација слојева карбонских влакана и стакла са епокси смолом.

Ply ID	Global Ply	Material	Thickness	Angle
8		2..Staklo	0.25	45.
7		1..Karbon	0.25	60.
6		2..Staklo	0.25	90.
5		1..Karbon	0.25	30.
4		2..Staklo	0.25	45.
3		1..Karbon	0.25	90.
2		2..Staklo	0.25	60.
1		1..Karbon	0.25	30.

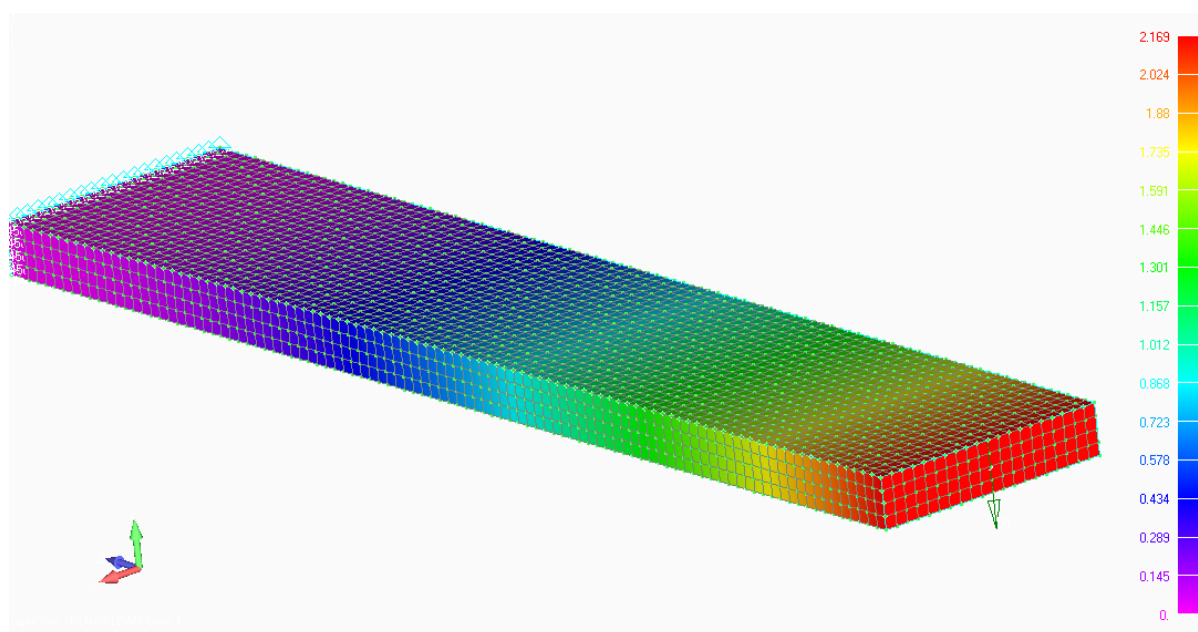
Слика 62. – Слојеви карбонских влакана и стакла са епокси смолом

У прозору за опцију *Property Type*, за тип елемента сада се бира ламинат, притиском на опцију *Laminate* (слика 63).



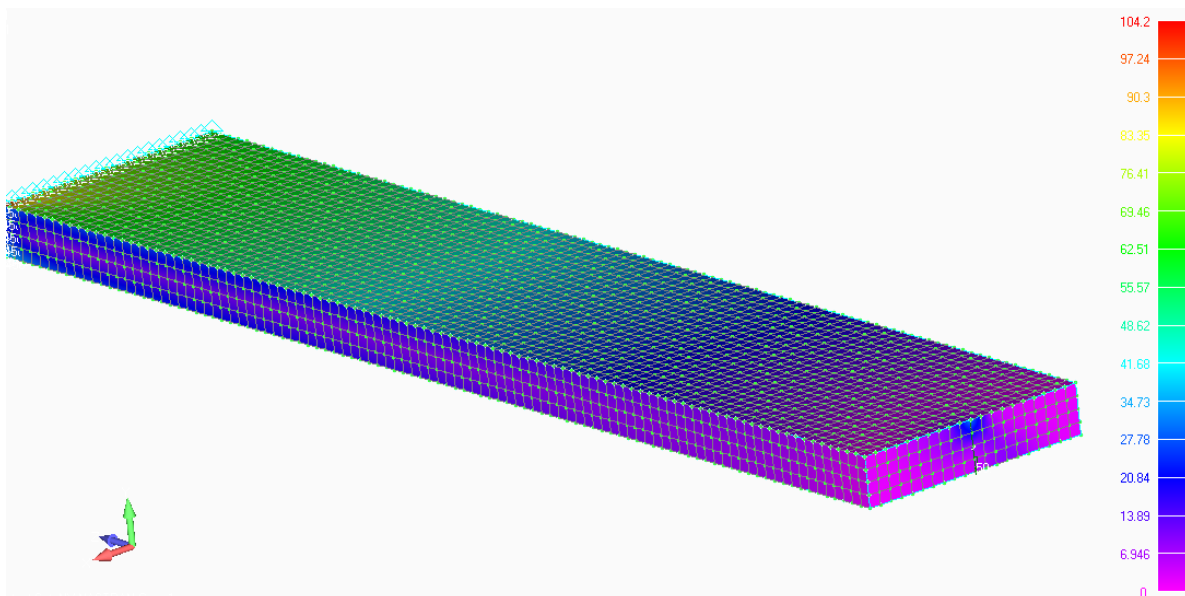
Слика 63. – Тип елемента - ламинат

Максимална вредност деформације (слика 64), добијене нумеричком анализом композита код правоугаоног облика опруге, износи **2.169 mm**.



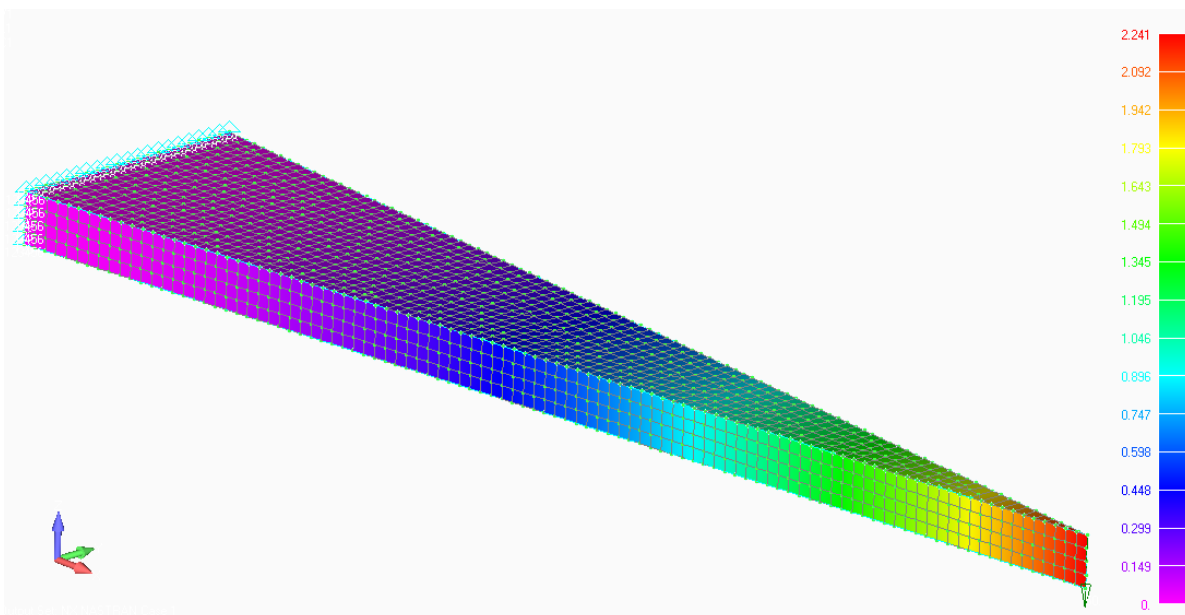
Слика 64. - Приказ резултата деформације код правоугаоног облика опруге од композита

Максимална вредност напона (слика 65), добијена нумеричком анализом композита код правоугаоног облика опруге, износи **104.2 МПа**.



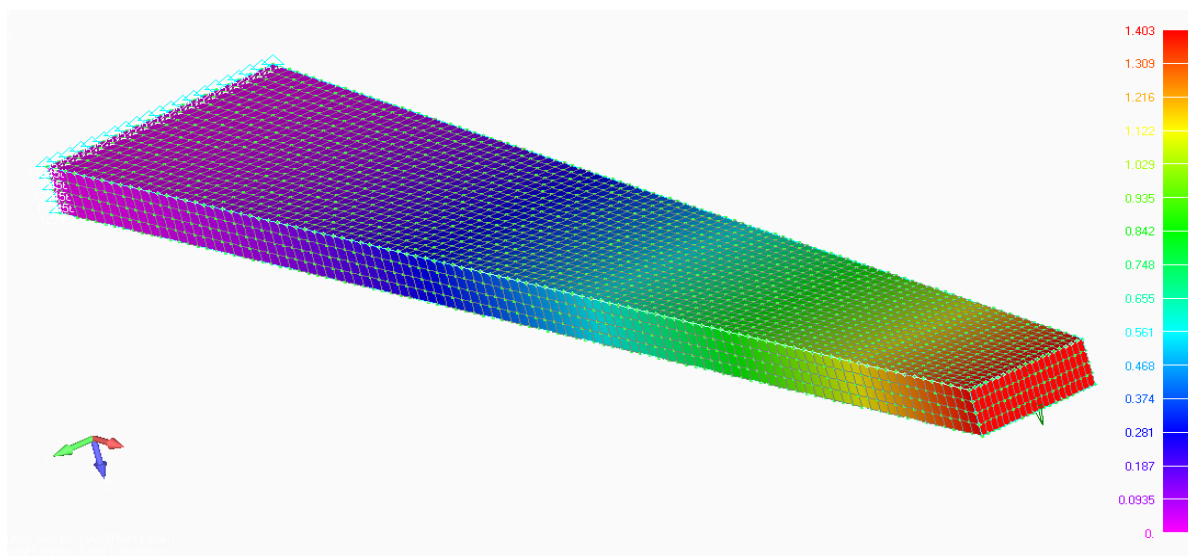
Слика 65. - Приказ резултата напона код правоугаоног облика опруге од композита

Максимална вредност деформације (слика 66), добијене нумеричком анализом композита код троугаоног облика опруге, износи **2.241 mm**.



Слика 66. - Приказ резултата деформације код троугаоног облика опруге од композита

Максимална вредност деформације (слика 67), добијене нумеричком анализом композита код трапезног облика опруге, износи **1.403 mm**.



Слика 67. - Приказ резултата деформације код трапезног облика опруге од композита

6.4 Табеларни приказ добијених резултата

У табели 4 могу се видети вредности напона и деформација опруга различитог облика израђених од различитих материјала, у овом случају челика и композита.

Табела 4. – Вредности напона и деформација лиснате опруге за правоугаони, троугаони и трапезни облик за челик и композит

		Челик (аналитички прорачун)	Челик (Анализа у <i>Inventor</i> -у)	Челик (Анализа у <i>Femap</i> -у)	Композит (Анализа у <i>Femap</i> -у)
Напон N/mm^2	Правоугаони облик	375	374.2	358.3	104.2
Померања mm	Правоугаони облик	1.488	1.467	1.468	2.169
	Троугаони облик	2.232	2.267	2.256	2.241
	Трапезни облик	1.786	1.708	1.709	1.403

Анализом добијених вредности напона може се закључити да се најбољи резултати постижу применом композитних опруга. Такође, резултати померања показују да оба софтвера (*Inventor* и *Femap*) дају приближно исте резултате, где су одступања испод 1%. На основу комплетне анализе може се закључити да се најбољи резултати постижу композитном опругом трапезног облика.

7. Закључак

Појава рачунара у инжењерској пракси изазвала је прелазак са аналитичких на нумеричке методе прорачуна и тиме доста олакшала и смањила утрошено време при извођењу прорачуна. Од свих нумеричких метода, највећу примену у пракси има метода коначних елемената.

За моделирање и анализу просте лиснате опруге у раду коришћени су CAD софтверски програми *Autodesk Inventor* и *FEMAP v11 са NX Nastran-ом*.

Софтверски програм *Inventor* сам по себи представља програм који је, може се рећи, поуздан за моделирање разних врста конструкција, као и за анализу прорачуна, а не обухвата превише захтевне моделе, уколико се акценат стави на тачност извршене анализе. Док програм *FEMAP v11 са NX Nastran-ом* у односу на *Inventor* је намењен симулацији анализе сложенијег прорачунског дела и може да понуди прецизније резултате.

Основни циљ овог мастер рада било је моделирање опруге у горе поменутим програмима, поређење добијених резултата тј. сличности и разлике које ови програми носе за материјале као што су челик и композит. Познато је да се облик опруга прилагођава потребном односу силе и деформације који дефинише карактеристику еластичности опруге. Али, ако се при томе обрати пажња и на материјал, од којег је она направљена, може се рећи да изабрани композитни материјал показује сличне резултате као и челик, с тим што је маса смањена неколико пута, што су показали резултати анализе у програму *FEMAP v11 са NX Nastran-ом*.

Што се тиче облика опруге показано је да се најбоље искоришћење материјала и расподела напона постиже опругама трапезног попречног пресека.

Поређењем добијених вредности напона и деформација у софтверима *Inventor* и *FEMAP v11 са NX Nastran-ом* може се закључити да су резултати приближно исти и да је постигнута велика сагласност са аналитички прорачунатим вредностима (максимално одступање и у случају *Inventor-а* и у случају *FEMAP v11 са NX Nastran-ом* не прелази вредност 4,5%). Дакле, може се закључити када су у питању делови једноставнијег облика (као што је овде био случај), оба софтвера пружају задовољавајућу тачност прорачуна.

На основу свих анализа може се закључити да композитне опруге трапезног попречног пресека показују најбоље особине и могу се препоручити као адекватна замена челичним опругама, при чему би се и маса смањила неколико пута.

Литература

- [1]Ђорђевић З.: *Композитне конструкције*, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2018.
- [2]Булатовић, Р.: *Машински елементи I*, Универзитет Црне Горе, Машински факултет, Подгорица, 2016.
- [3]Николић, В.: *Машински елементи*, Машински факултет, Крагујевац, 2004.
- [4]Орлић Ж., Орлић Г.: *Металне опруге*, Зиго Ријека, 2004.
- [5]Огњановић М.: *Машински елементи*, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2016.
- [6]Глишовић, Ј.: *Конструкција возила – Методичка збирка задатака са изводима из теорије*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2014.
- [7]Јовановић М., Лазић В., Арсић Д.: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [8]http://www.wikiwand.com/sh/Vel%C5%A1ki_luk, приступљено 5. октобра 2018.
- [9]<https://vdocuments.mx/lisnate-opruge-i-gibanjjj.html>, приступљено 5. октобра 2018.
- [10]<http://www.binmetal.co.rs/proizvodi/lisnate-tanjiraste-opruge>, приступљено 9. октобра 2018.
- [11]<https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>, приступљено 11. октобра 2018.
- [12]<http://pc.pcpres.rs/tekst.php?id=6973>, приступљено 11. октобра 2018.
- [13]<https://www.autodesk.com/education/free-software/inventor-professional>, приступљено 11. октобра 2018.