

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Коначни елементи 1

Број индекса: 19/2012

Марко М. Јовановић

**Начини испитивања завртањских веза применом
методе коначних елемената**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Мирослав Живковић, проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да опише и анализира:

- завртње и завртањске везе
- начине моделирања завртња применом методе коначних елемената
- алат за испитивање завртња
- резултате услед статичког испитивања модела затезањем у софтверском пакету „Femap”

Препоручена литература:

1. Др Вера Николић: Машински елементи (теорија, прорачун, примери), Машински факултет у Крагујевцу, 2004.
2. Др Милош Којић, Др Радован Славковић, Др Мирослав Живковић, Др Ненад Грујовић: Метод коначних елемената 1 (линеарна анализа), Машински факултет у Крагујевцу, 2010.

Садржај

1. Увод.....	5
2. Завртњи и завртањске везе.....	6
2.1 Завојница и навој	8
2.2 Профили навоја	9
2.3 Облици завртња и навртки.....	11
2.4 Материјали и израда навојних делова	13
2.5 Стандарди завртња и навртки.....	15
2.6 Напрезања и напони у навојном пару	17
3. Начини моделирања завртња применом МКЕ.....	19
3.1 Резултати према врстама моделирања.....	22
4. Опис модела	30
4.1 Списак и опис компоненти модела	30
4.2 Формирање анализационог модела.....	31
5. Резултати.....	32
6. Закључак	37
Додатак.....	39
А. Фемап упутство	39
В. Техничка документација модела	56
Литература.....	61

Резиме:

У овом раду су објашњене завртањске везе, начини моделирања завртња применом методе коначних елемената као и њихове врсте моделирања. Коришћењем софтверског пакета „Femap“ одрађена је и анализа затезања на конкретном примеру модела алата који служи за испитивање завртња. Суштина због којег је испитивана завртањска веза је њихова широка примена, приступачна цена и жеља за што већом прецизношћу при моделирању.

Кључне речи: Завртањска веза, начини моделирања, затезање

Abstract:

This paper explains the bolted connection, screw ways of modeling using finite element method and their types of modeling. Using Femap software package worked out the analysis of straining on the concrete example of the tools that is used to test the screw. The essence of why the bolted connection tested is their widespread use, affordable price and the desire for greater precision in modeling.

Key words: Bolted connection, methods of modeling, straining.

1. Увод

Предмет овог рада је статичко испитивање епрувете затезањем, узорак који се испитује оптерећује се силом на једном крају док је други крај непокретан (фиксиран). Помоћу испитивања затезањем одређују се својства отпорности (напони) и својства деформације. Резултатима треба да се прикаже напонско стање деформација у зависности од оптерећења.

Софтвери који се користе у раду су „CATIA” (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) компјутерски подржан, тродимензионалан интерактивни програмски пакет и „Femap” (Finite Element Modeling And Postprocessing) моделирање коначних елемената и постпроцесирање. „CATIA“ је програм који је развила француска компанија „Dassault Systems“ и који нуди иновативну технологију за постизање максималне продуктивности, од израде пројектног концепта до готовог производа. „CATIA“ највећу примену има у аутомобилској и авио индустрији за чије пројекте је неопходан квалитет. „Femap“ је инжењерски програм за анализу сложених конструкција методом коначних елемената и за приказ резултата анализе. Користи се због потребе смањења трошкова, те повећање квалитета и сигурности конструкција и производа, што представља разлоге за ширу употребу.

Стандарди су техничка правила и постоје различите ознаке за њих. Стандарди који ће се користити су DIN и ISO. Опис стандарда је дат у теоријском делу завртња и завртањских веза.

2. Завртњи и завртањске везе

Веза два или више машинских делова остварена посредством навоја представља навојни спој. Навојни спојеви су најчешће коришћена врста раздвојивих машинских спојева, а то значи да спојени делови могу да се раздвајају и поново спајају без оштећења. Навојни спој обезбеђује жељени положај спојених делова и преношење оптерећења. Навој се може одвијати са спољашње или унутрашње стране, он може бити леви или десни, али у већини случајева се користи десни, а леви навој се поставља само у специјалним случајевима, (као на пример на резервоарима или боцама за гас). Основна функција навојних спојева је преношење оптерећења са спољашњег на унутрашњи навој и обрнуто. Подела навојних спојева:

- Непокретни (чврсти навојни спојеви)
- Покретни (навојни преносници)

Непокретни навојни спојеви имају велику примену, јер обезбеђују преношење оптерећења са једног машинског дела на други. Спојени делови су међусобно непокретни и веза се може расклапати без разарања.

Покретни навојни спојеви служе за претварање обртног кретања у праволинијско, односно претварање обртног момента у аксијалну силу. Њима се врши позиционирање алата у односу на радни предмет код машина за обраду резањем, успостављање тачног међусобног односа делова код мерних инструмената и др.

Главни елементи навојног споја:

- Завртањ на којем је израђен спољашњи навој.
- Навртка или цилиндрични отвор на машинском делу у којем је направљен унутрашњи навој.
- Подлошка или подложна плошица, тј осигурач (по потреби).

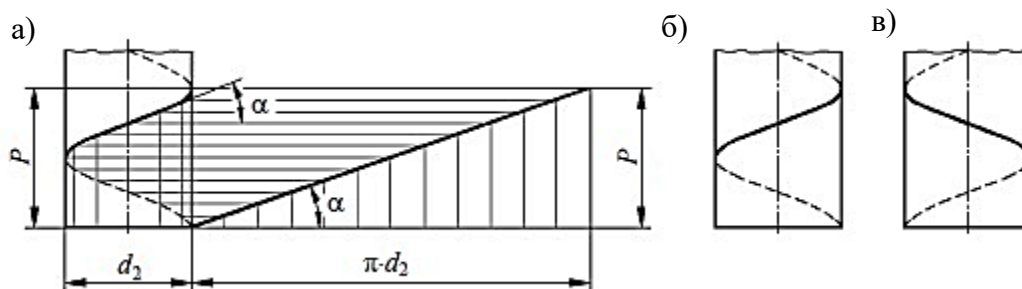
Завртањ (шраф) је један од једноставнијих конструкцијских елемената. То је цилиндричан предмет са навојем који служи у машинству или индустрији као елемент за растављање и спајање. Завртањ има спољашњи навој, преко којег се преносе спољашње силе, а темељ навоја је завојница. Углавном има главу која пружа могућност одвијања или завијања уз помоћ одговарајућег алата као нпр. одвијач или кључ (за шестостране главе). Глава завртња је углавном већа од тела, да би се завртањ зауставио код завијања, али и да преноси силу на носивој површини. Тело завртња има на себи навој који може бити пун или делимичан.

Навртка (матица) је машински елемент који има отвор или рупу са навојем. Навртка се у већини случајева користи у комбинацији са одговарајућим завртњем како би се спојили различити машински елементи. Ова два елемента су спојена заједно захваљујући сили трења између завртња и навртке и површинском притиску између навртке и елемента који се спаја овом везом. Уколико су завртањ и навртка изложени вибрацијама често се користе додатни машински елементи како би се спречило нежељено отпуштање ових навојних елемената (подлошка). Као и код завртња и навртка може имати леви или десни (најчешће у употреби) навој.

Подлошка (подметач) је машински елемент који се користи у навојним спојевима. У већини случајева је то плочица кружног облика са отвором у средини. У зависности од конструкције, може имати различите функције, и то: осигурање навојних спојева од одвртања, равномернија расподела површинског притиска, преднапрезање навојног споја, изолација, заптивање и сл. Подлошке се израђују од различитих материјала у зависности од намене, али се најчешће користи челик, пластика и бакар.

2.1 Завојница и навој

Навој је основни део завртња и навртке преко којег се преносе спољашње силе. Завојница је крива која се добија обавијањем косог правца око цилиндра пречника d_2 , слика (1.а). Смер обавијања правца може бити леви или десни, па се разликују лева и десна завојница. Десна завојница се добија обавијањем правца око ротационог тела у смеру казаљке на сату, слика (1.б), док се лева завојница добија обавијањем у супротном смеру од казаљке на сату, слика (1.в).



Слика 2.1. а) настанак завојнице (формирање навоја),
б) десна завојница, в) лева завојница

Ако се око ваљка обавија две, три или више паралелних завојница добије се двострука, трострука или вишеструка завојница. Удаљеност између две тачке исте завојнице које леже на истој оси назива се висина завоја или корак завојнице P . Нагиб завојне линије се дефинише углом α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P}{\pi \cdot d_2}$$

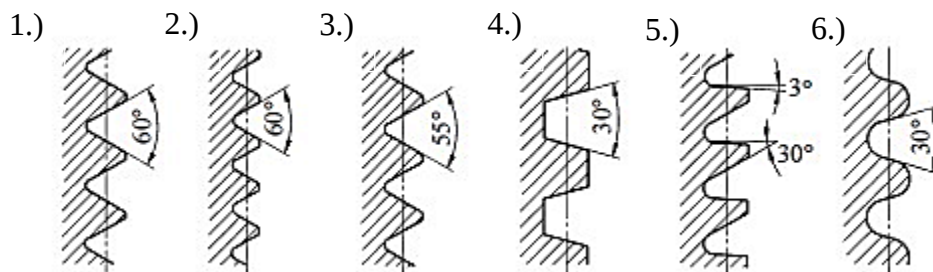
α - [°] угао успона завојнице (навоја)

P - [mm] корак завојнице (навоја)

d_2 - [mm] пречник завојнице (средњи пречник навоја)

2.2 Профили навоја

Према облику профила, теоријски, постоји врло велики број разноврсних навоја. Међутим, да би се обезбедила заменљивост навојних парова и економичност израде, број разноврсних профила је смањен и њихове димензије су прописане стандардима.



Слика 2.2. Стандардни профили навоја

1. Метрички навој – навој са ИСО троугластим профилем
2. Метрички фини навој
3. Витвортов (Whitworth) навој (цоловни навој)
4. Трапезни метрички навој
5. Коси метрички навој
6. Обли навој

1. Метрички навој – навој са ИСО троугластим профилем је први навој (најстарији навој) чије су димензије стандардизоване у метричком систему јединица по чему је и добио назив метрички навој. Теоријски профил навоја је једнакостраничан троугао, па је угао прифила навоја $\alpha = 60^\circ$.

2. Метрички фини навој је навој који се користи у случајевима када се тражи што мање слабење елемената навојног споја, велика сигурност од одвијања, као мали и тачни помаи завртња или матице у аксијалном смеру.

3. Витвортов (Whitworth) навој (цоловни навој) је навој који има теоријски профил једнак једнакокраком троуглу са углом профила навоја $\alpha = 55^\circ$. Основна јединица димензија навоја је у цолима (1 цол = 25.4 mm).

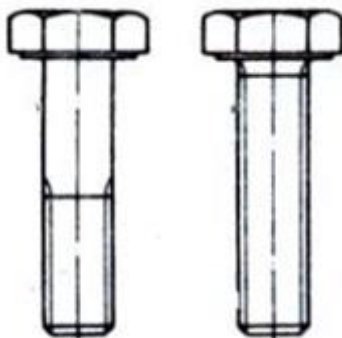
4. Трапезни метрички навој је добио име према свом облику (трапез). Теоријски профил овог навоја је једнакокраки троугао са углом профила $\alpha = 30^\circ$. Овај навој није погодан за велика оптерећења, нарочито ако су променљива током времена.

5. Коси метрички навој је несиметричан. Теоријски профил навоја је приближно правоугли троугао са углом профила $\alpha = 30^\circ$. Коси метрички навоји се примењују код јако оптерећених навојних вретена и подесни су за пренос великих аксијалних сила.

6. Обли навој се одликује малом дужином ношења. Теоријски профил је једнакокраки троугао са углом при врху од $\alpha = 30^\circ$. Стварни профил је добијен великим заобљењем врхова и корена навоја, тако да је добијени облик приближно полукруг. Овај навој је отпоран на прашину, песак и уопштено прљавштине, па се примењује код ватрогасног прибора, црева, цревне арматуре и др.

2.3 Облици завртња и навртки

Облик завртња је условљен наменом и условима рада. Завртањ има главу и стабло (тело). Обично је само на једном делу стабла урађен навој (навојни део), други део завртња је без навоја и тај део се често зове врат завртња. Завртњи се међусобно разликују према облику главе која може бити шестоугаона (најчешће), четвороугаона, округла, конусна и др.



Слика 2.3. Завртњи шестоугаоне главе са делимичним навојем и навојем по целој дужини [2]

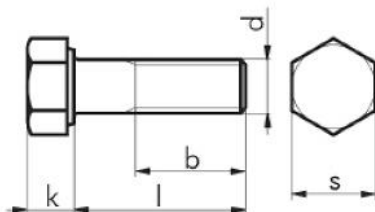
Највећи број различитих облика завртња је стандардизован. Стандардима је прописан облик, димензије, материјал, квалитет и др. У зависности од квалитета израде постоје три класе: фина, средња и груба.

Навртке по облику и димензијама су прописане стандардима. Према облику се деле на: шестостране, крунасте, четвртасте, цилиндричне, троугласте, криласте и др.



Слика 2.4. Шестоугаона навртка (висока, нормална и ниска) [2]

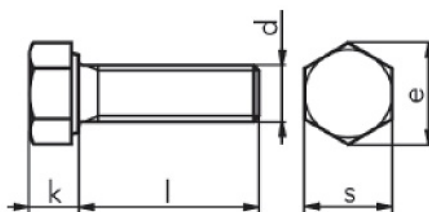
Завртањ са делимичним навојем (DIN 960, ISO 8765)



d	M 8	M 10	M 12	M 14	M 16	M 18	M 20
l (mm)	≤ 125						
b (mm)	22	26	30	34	38	42	46
k (mm)	5.3	6.4	7.5	8.8	10	11.5	12.5
s (mm)	13	17	19	22	24	27	30

Табела 2.1. Димензије завртња са делимичним навојем у односу на пречник

Завртањ са пуним навојем (DIN 961, ISO 8766)



d	M 8	M 10	M 12	M 14	M 16	M 18	M 20
l (mm)	≤ 125						
e (mm)	14.38	18.9	21.1	24.49	26.75	30.14	33.53
k (mm)	5.3	6.4	7.5	8.8	10	11.5	12.5
s (mm)	13	17	19	22	24	27	30

Табела 2.2. Димензије завртња са пуним навојем у односу на пречник

2.4 Материјали и израда навојних делова

Основна својства материјала за израду навојних делова, с обзиром на напонска стања која у њима владају су:

- Велика издржљивост, чврстоћа и жилавост.
- Велика чврстоћа на повишеним и сниженим температурама.
- Отпорност на хемијска и електрохемијска дејства, итд.

Наведене особине поседују конструкциони, угљенични, легирани челици и челици за побољшање. Поред челика се користе месинг, бронза, бакар, алуминијум, легуре алуминијума, пластика, најлон и др.

Стандардима ИСО (ISO) 898 и према ЕН (EN) 20898 прописано је за готове навојне делове означавање материјала бројевима:

- Код завртња се ознака састоји од два броја раздвојена тачком (4.6, 5.6, 6.8, 8.8, ...)
- Код навртке бројевима (4, 5, 6, 8, 10, 12 и 14)

Бројна ознака материјала код навртке и први број ознаке материјала завртња помножен са 100 представља затезну чврстоћу материјала R_m . Чврстоћа је механичко својство материјала да пружа отпор деловању неког оптерећења (силе). Затезна чврстоћа материјала је максималан напон којим се материјал може оптеретити затезањем, а да притом не дође до лома. Производ првог и другог броја ознаке материјала завртња помножен са 10 даје границу течења материјала R_e . Граница течења материјала представља величину оптерећења када наступа пластично деформисање материјала.

Пример за класу чврстоће (ознака материјала завртња) 5.6:

$$R_m = 5 \cdot 100 = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$R_e = 5 \cdot 6 \cdot 10 = 300 \text{ N/mm}^2$$

Пример за класу чврстоће (ознака материјала навртке) 5:

$$R_m = 5 \cdot 100 = 500 \text{ N/mm}^2$$

Механичке и физичке особине		Класа чврстоће							
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
Номинална затезна чврстоћа R_m	N/mm ²	300	400		500		600	800	1000
Минимална затезна чврстоћа $R_{m \min}$	N/mm ²	330	400	420	500	520	600	800	1040
Тврдоћа по Викерсу HV $F \geq 98N$	min	95	120	130	155	160	190	250	320
	max	220					250	320	380
Тврдоћа по Бринелу HB $F = 30D^2$	min	90	114	124	147	152	181	238	304
	max	209					238	304	361
Доња граница пластичне деформације R_{eL} у N/mm ²	nominal	180	240	320	300	400	480	-	-
	min	190	240	340	300	420	480	-	-
0.2 % сталне пластичне деформације $R_{p0.2}$ у N/mm ²	nominal	-						640	900
	min	-						640	940

Табела 2.3. Механичка и физичке особине у односу на класу чврстоће према стандарду DIN EN ISO 898-1 [4]

2.5 Стандарди завртња и навртки

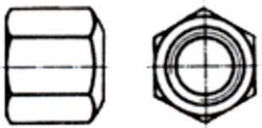
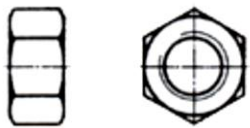
Многи машински делови могу се употребљавати на великом броју различитих машина. Због тога је неопходно велики број унификација машинских елемената. Сви једнообразни прописи унификације, сачињавају стандарде.

Ознаке стандарда:

- СРПС (SRPS) је ознака за Српски Стандард
- ДИН (DIN) је ознака за Немачки Институт за Стандарде
- ИСО (ISO) је Интернационална Организација за Стандардизацију
- ЕН (EN) је Европски стандард
- Постоје и верзије непромењених стандарда као што су (DIN ISO, DIN EN, EN ISO)

Завртњи			
Изглед	Стандард	Назив	Материјал
	ИСО 8765 DIN 960	Завртањ са шестостраном главом, класе израде А, са навојем ситног корака	челик
	ИСО 8676 DIN 961	Завртањ са шестостраном главом, класе израде А, са навојем ситног корака по целој дужини стабла	челик

Табела 2.4. Примери стандардизованих завртња [3]

Навртке			
Изглед	Стандард	Назив	Материјал
	DIN 6330	Висока шестострана навртка средње класе израде са финим навојем	челик
	ИСО 4032 DIN 934	Шестострана навртка средње класе израде са финим навојем	челик
	DIN 936	Ниска шестострана навртка средње класе израде са финим навојем	челик

Табела 2.5. Примери стандардизованих навртки [3]

Према табелама 2.4. и 2.5. можемо видети основне примере стандардизованих завртња и навртки. У односу на изглед, стандард, назив и материјал завртњи и навртке имају доста ширу поделу али моделирање овог модела је сачињено од основних.

2.6 Напрезања и напони у навојном пару

Под дејством аксијалне (уздужне) силе F у језгру завртња јавља се напрезање на затезање. Одговарајући нормални напон на затезање је:

$$\sigma_z = F/A$$

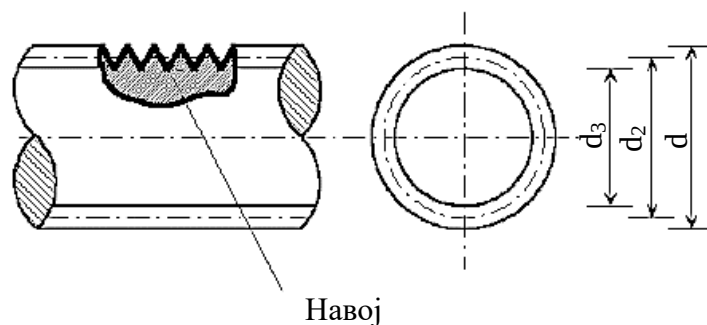
σ_z - напон на затезање

F – оптерећење (сила)

A - површина попречног пресека стабла завртња

Како је граница течења навојног дела завртња виша него код ненавојног дела, напон на затезање при статичком оптерећењу се прорачунава у пресеку који преузима напрезање, односно према ефективној површини попречног пресека навојног дела завртња A_s (носећа површина – површина језгра увећана за утицај навојака). Код крутих (обичних) завртања у случају статичког оптерећења:

$$A = A_s = \frac{\pi d_s^2}{4}; \quad d_s = (d_2 + d_3)/2$$



Слика 2.5. Навојни пречници

d – пречник навоја

d_2 – средњи пречник навоја

d_3 – пречник језгра навоја

Навој	Површина попречног пресека A (mm ²)	Носећа површина A_s (mm ²)
М 8	50.3	36.6
М 10	78.5	58
М 12	113	84.3
М 14	154	115
М 16	201	157
М 18	254	192
М 20	314	245

Табела 2.6. Попречни пресеци према пречнику завртња

Навој	Класа чврстоће								
	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9
	Препоручена сила (N)								
М 8	6590	8240	11400	10200	13900	16100	21200	23800	30400
М 10	10400	13000	18000	16200	22000	25500	33700	37700	48100
М 12	15200	19000	26100	23600	32000	37100	48900	54800	70000
М 14	20700	25900	35600	32200	43700	50600	66700	74800	95500
М 16	28300	35300	48700	44000	59700	69100	91000	102000	130000
М 18	34600	43200	59500	53800	73000	84500	11500	-	159000
М 20	44100	55100	76000	68600	93100	108000	147000	-	203000

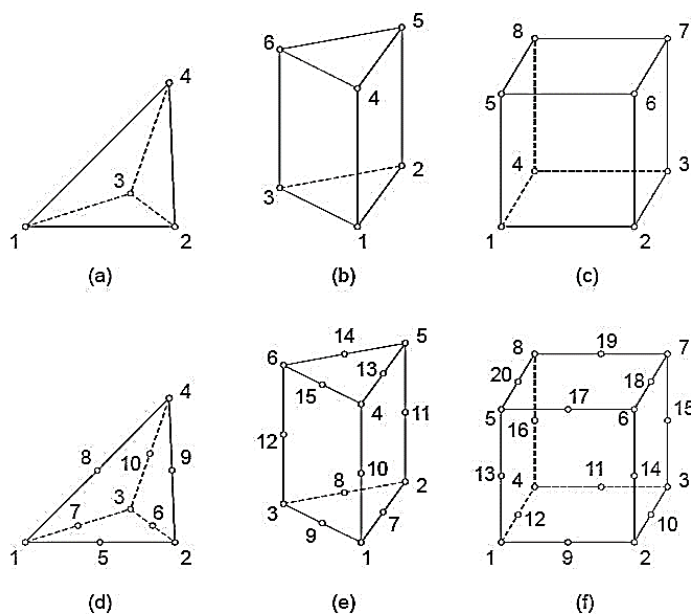
Табела 2.7. Препоручена сила завртња према класи чврстоће у зависности од пречника

Према табелама 2.6. и 2.7. можемо видети које су површине попречних пресека навоја завртњева и које су препоручене силе за поједине пречнике навоја према класама чврстоће.

3. Начини моделирања завртња применом МКЕ

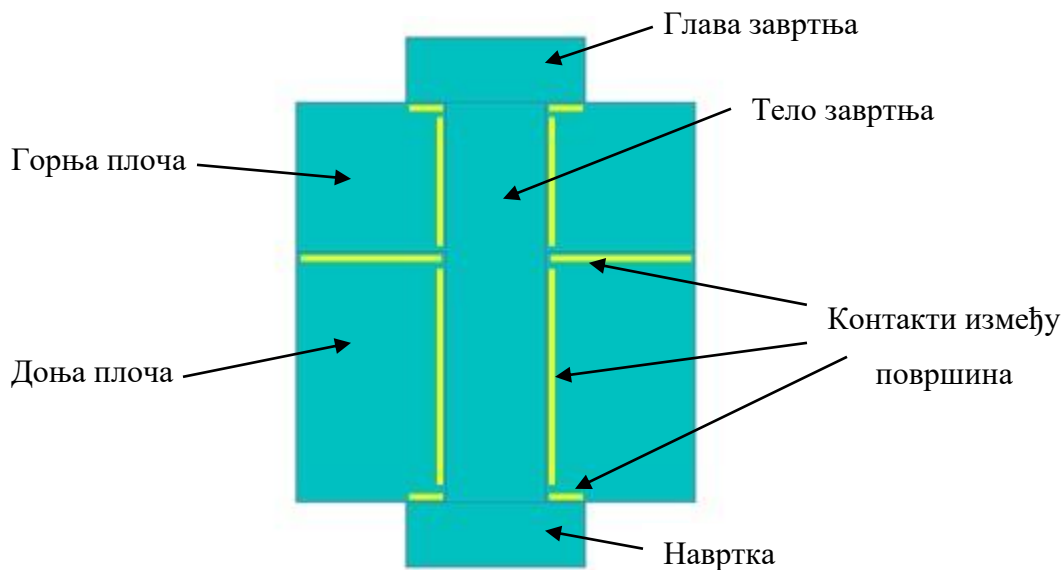
Метода коначних елемената (МКЕ) спада у савремене методе нумеричке анализе. Њена примена прво је почела у области прорачуна инжењерских конструкција. Основни принцип на којем се заснива МКЕ, састоји се у подели разматраног подручја на коначан број мањих подручја, односно елемената, тако да се анализом појединих елемената, уз претпоставку о њиховој међусобној повезаности, анализира целина.

Типови елемената који се користе у раду су тродимензионални и ови типови елемената се користе за моделирање тродимензионалних тела. Елемент може имати различит број чворова – уобичајен је број од 8 до 21. Овакав елемент се назива основним и ограничен је са шест површи. Од оваког елемента се могу формирати и други просторни облици, као што су призма, тетраедар или четворострана пирамида. У актуелној верзији програма подржани су следећи елементи:



Слика 3.1. Типови тродимензионалних елемената (a) Тетраедар. (b) Призма. (c) Основни 3Д елемент (d) Тетраедар са међучворовима. (e) Призма са међучворовима. (f) Основни 3Д елемент са међучворовима.

Тип елемента којим је измоделиран модел овог рада је тетраедар са међучворовим који као што се и на слици (3.1) може видети садржи укупно 10 чворова.

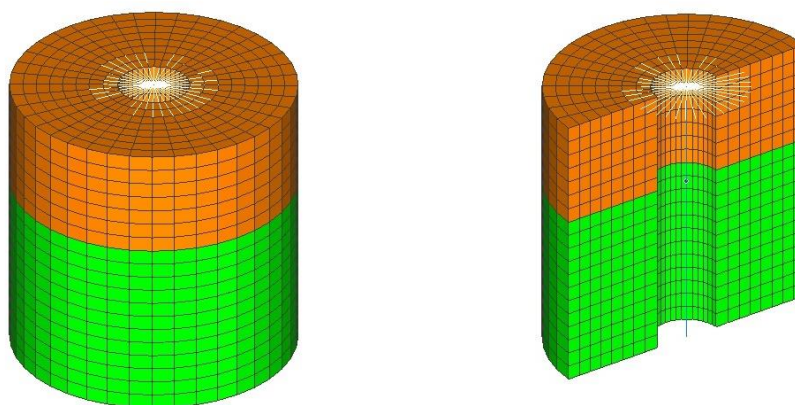


Слика 3.2. Модел навојног споја

Навојни спојеви се састоје од завртањске групе (главе, тела и навртке) и плоче (горња и доња) као што је приказано на слици (3.2). Завртањске везе служе да споје два или више дела заједно како би формирали склоп. Услед широке примене, и значаја завртањских веза битно је на правилан начин одредити карактеристике вијака и навртке како би конструкција задовољила захтеве. Анализа склопова са завртањским везама је могућа применом методе коначних елемената. Постоји неколико врста моделирања завртња помоћу МКЕ а то су:

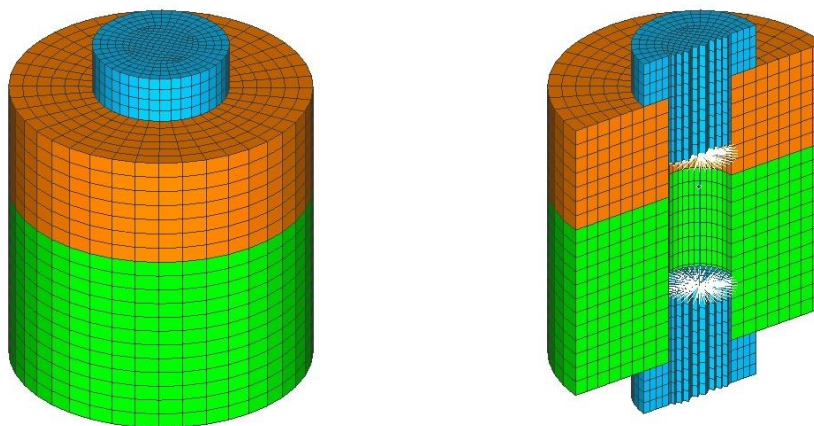
- Spider bolt
- Hybrid bolt
- Solid bolt

Spider Bolt – симулација се састоји од линијских, гредних елемената за тело и RB2 елемената за главу вијка. Низ линијских RB2 елемената представљају главу и навртку као паукову мрежу, по томе је и добијен назив, „*Spider Bolt*“. То је најједноставнији начин моделирања вијчане везе, са најмањим бројем потребних елемената.



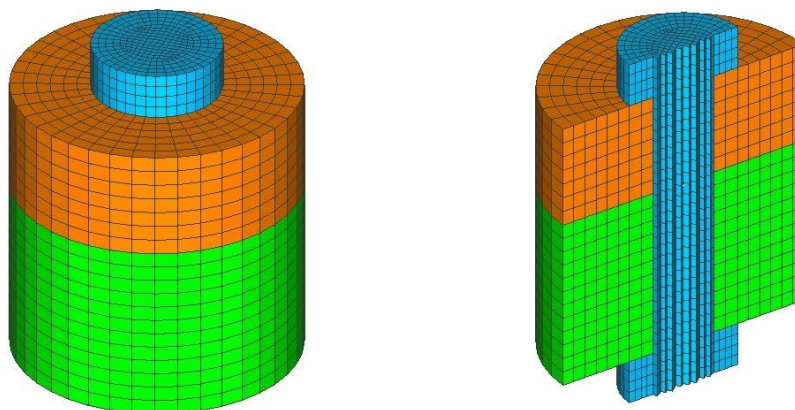
Слика 3.3. *Spider bolt* модел

Код *Hybrid bolt* симулације, глава и навртка су моделиране као солид елементи, а тело је моделирано као линијски гредни елемент. Веза између гредног елемента и 3Д елемената је остварена коришћењем RB2 елемената. У случају постојања преднапрезања, сила преднапрезања се задаје на гредни елемент што олакшава процес задавања преднапрезања у односу на то када је цео вијак моделиран са 3Д елементима.



Слика 3.4. *Hybrid bolt* модел

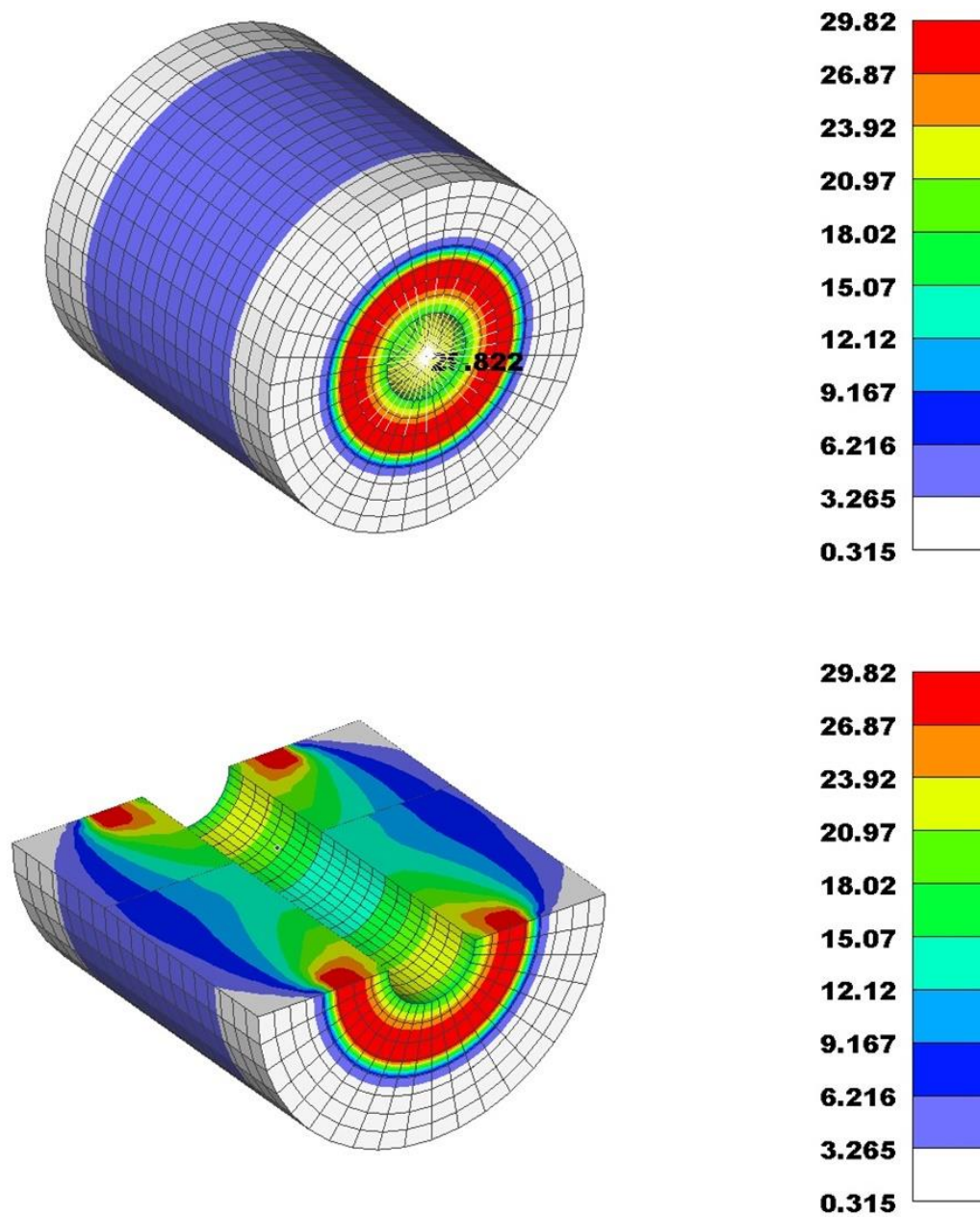
Solid bolt је најреалнији симулациони приступ који се користи за моделирање завртњева. То је најприближнија симулација стварног завртња али постоје неке карактеристике које су занемарене да би се поједноставила симулација. Једна од тих карактеристика је ефекат навоја који се не узима у обзир при анализи завртња. И ова врста симулационог приступа је изабрана за моделирање овог рада.



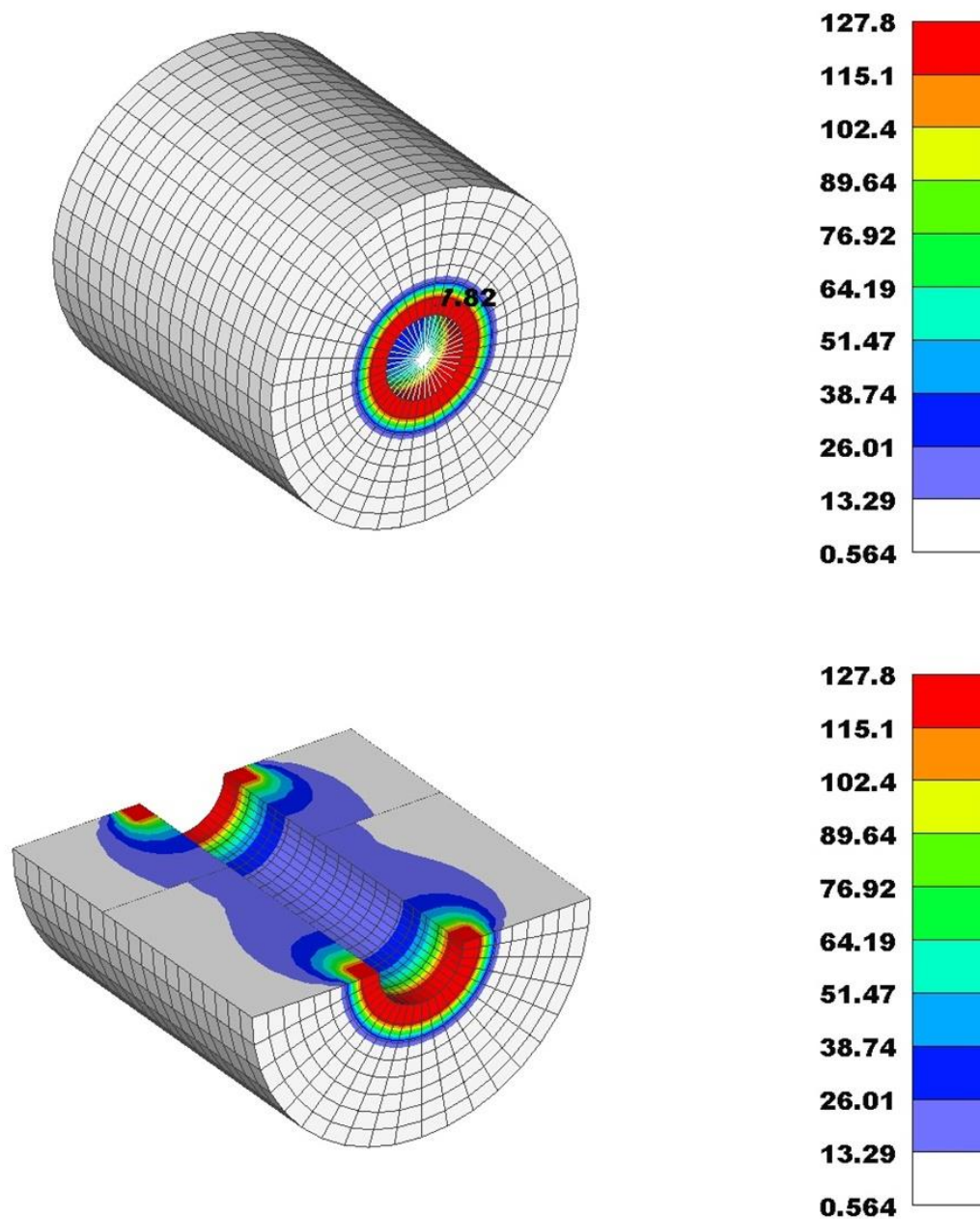
Слика 3.5. *Solid bolt* модел

3.1 Резултати према врстама моделирања

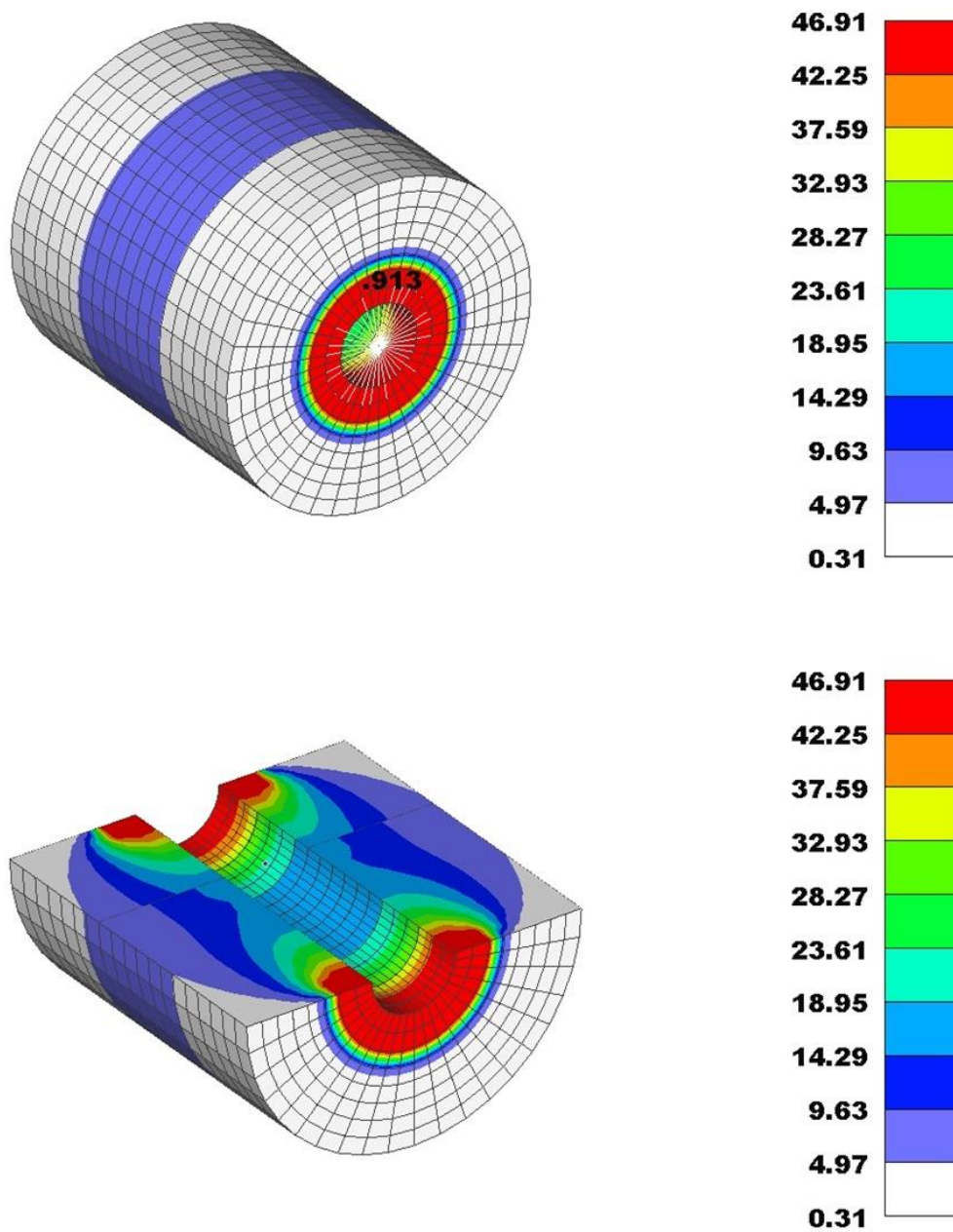
Извршене су анализе за сва три случаја моделирања како би проверили да ли ће се њихови резултати подударати. За први случај *Spider bolt* су одрађене три анализе, слике 3.6 – 3.8 јер вредности напона одступају у зависности од површине обухваћеном RB2 елементима, за навртку и главу, па су узете различите вредности за креирање те мреже. За први начин пречник мреже има исту вредност као пречник навртке, код другог начина пречник мреже има вредност као пречник тела завртња и трећи начин има средњу вредност та два пречника. Остала два случаја *Hybrid bolt* (Слике 3.9 – 3.10) и *Solid bolt* (Слике 3.11 – 3.12) садрже по једну анализу јер су глава и навртка моделиране као солид елементи па вредности напона њихових резултата незнатно одступају.



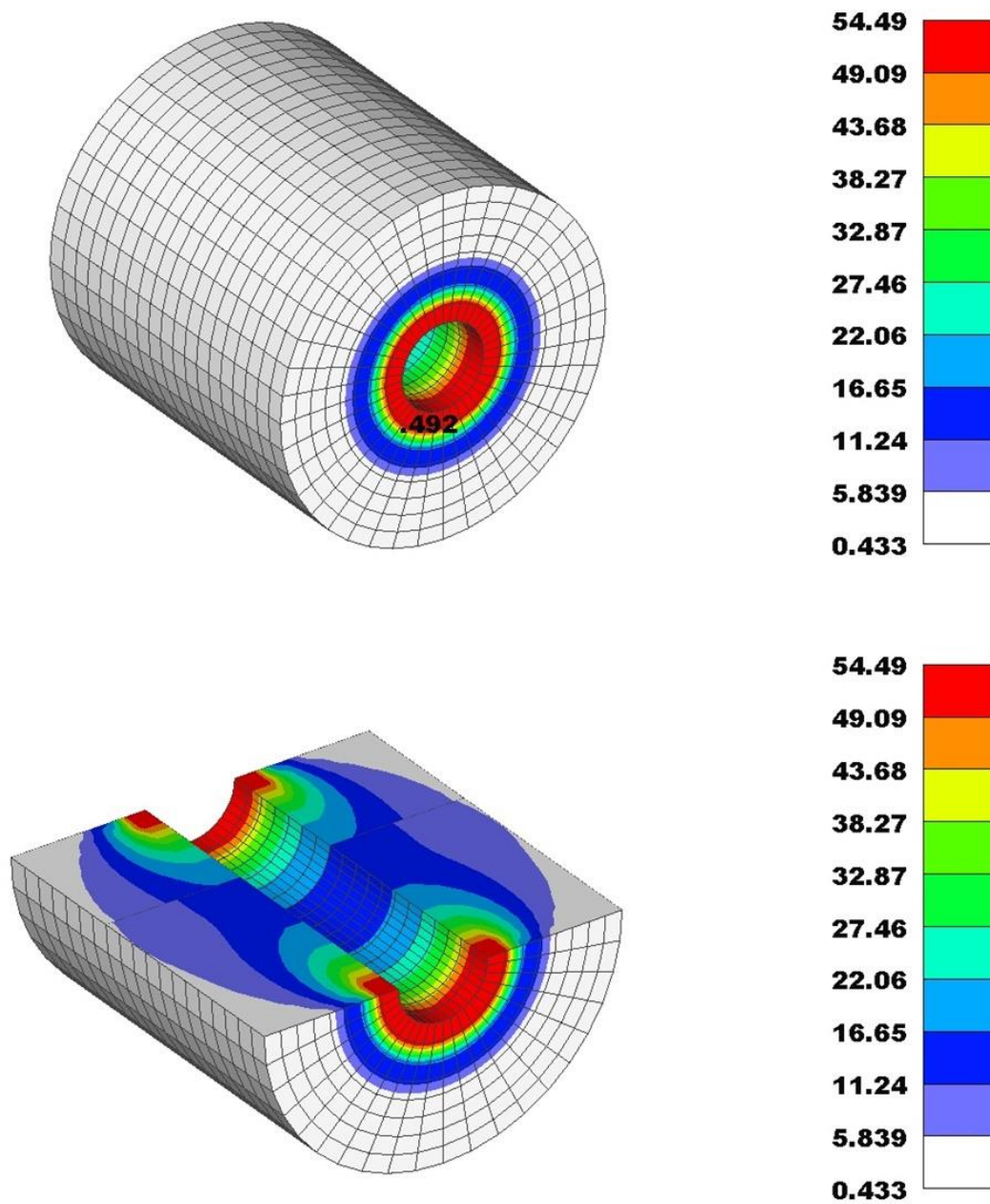
Слика 3.6. *Spider bolt* анализа за први начин где пречник мреже има вредност пречника навртке



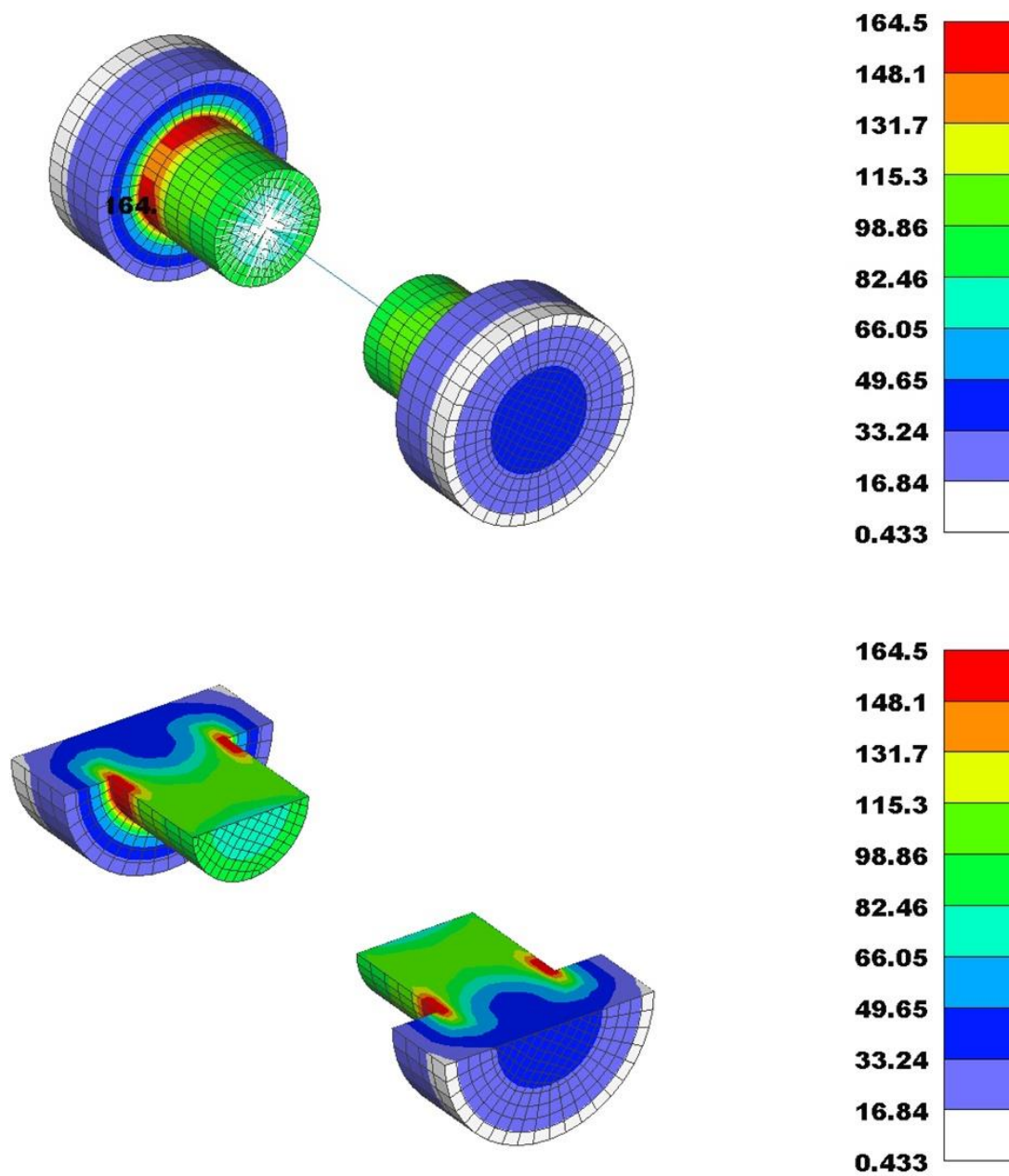
Слика 3.7. *Spider bolt* анализа за други начин где пречник мреже има вредност пречника тела завртња



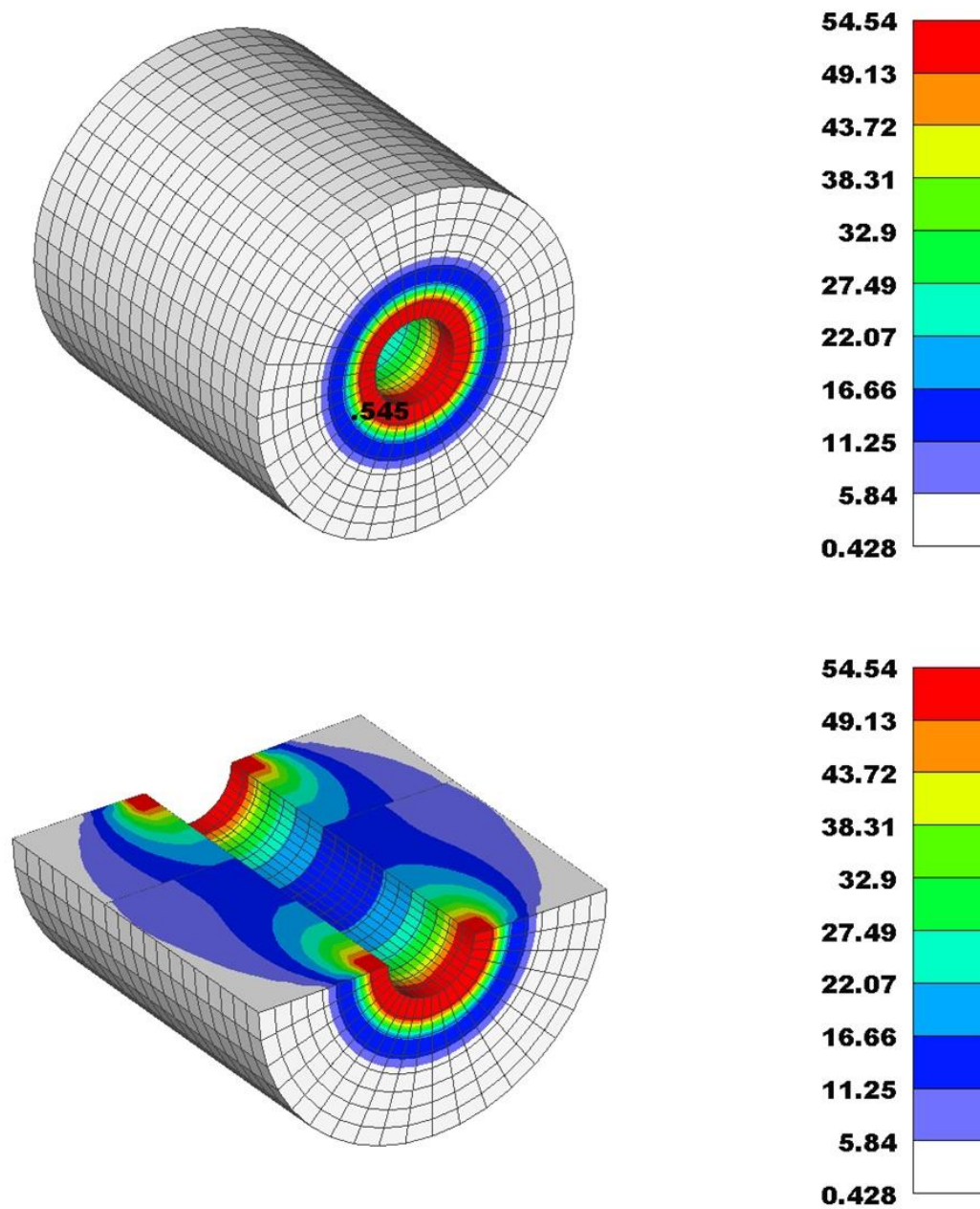
Слика 3.8. *Spider bolt* анализа за трећи начин где пречник мреже има средњу вредност пречника навртке и тела завртња



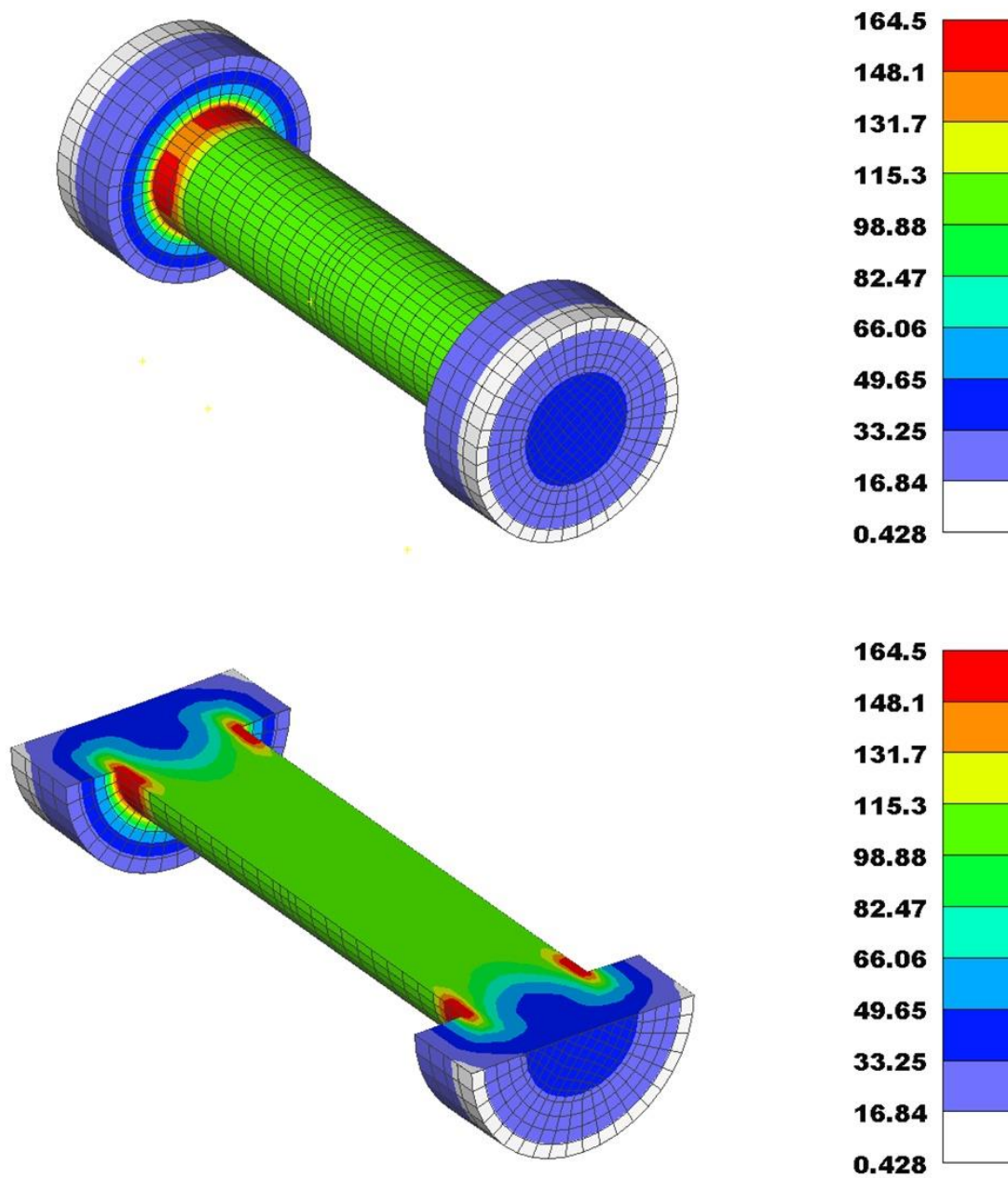
Слика 3.9. *Hybrid bolt* анализа и вредности напона у плочама



Слика 3.10. *Hybrid bolt* анализа и вредности напона у завртњу



Слика 3.11. *Solid bolt* анализа и вредности напона у плочама



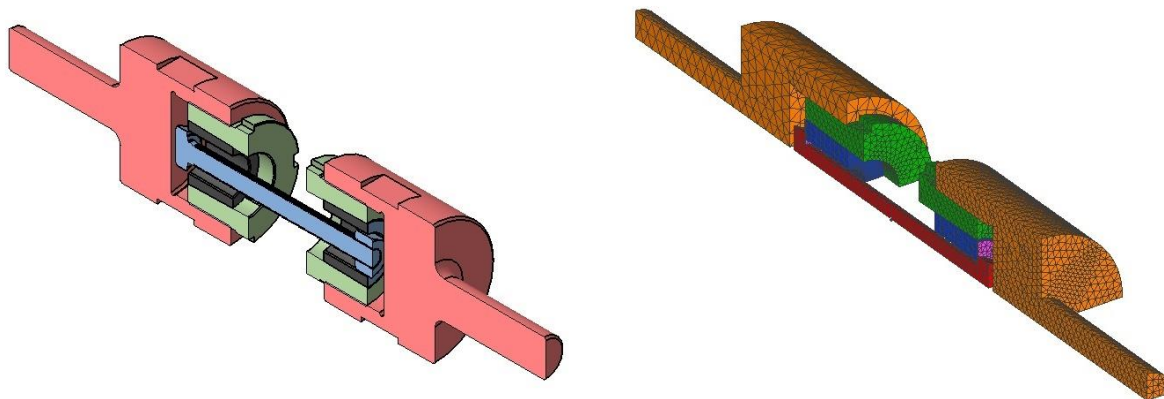
Слика 3.12. *Solid bolt* анализа и вредности напона у завртњу

4. Опис модела

4.1 Списак и опис компоненти модела

Модел се састоји од носача, чауре и два полупрстена који су направљени од истог материјала и који уједно чине стезну главу модела. Стезна глава нам служи да причврстимо епрувету коју испитујемо и пошто је потребно да је причврстимо обострано како би смо извршили испитивање наш модел се састоји из две стезне главе (горње и доње). Горња стезна глава је при испитивању непокретна (фиксирана) док је на доњој стезној глави задато оптерећење. Епрувета коју испитујемо је завртањска веза између завртња и навртке. При испитивању затезањем доња стезна глава се помиче на доле у правцу осе епрувете (аксијална сила) док је горња стезна глава фиксирана.

- Стезна глава (носач, чаура, полупрстен)
- Епрувета (завртањ, навртка)



Слика 4.1. Анализациони модел CAD и FEM

4.2 Формирање аналитичког модела

Физичке карактеристике			
Ознака челика	E [N/mm ²]	ρ [kg/mm ³]	ν
S355	2,1 · 10 ⁵	7,85 · 10 ⁻⁹	0,3

Табела 4.1. Физичке карактеристике материјала

За анализу је коришћен вијак класе 5.6 и навртка класе 5, чије су карактеристике:

Вијак класе 5.6:

$$R_m = 5 \cdot 100 = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$R_e = 5 \cdot 6 \cdot 10 = 300 \text{ N/mm}^2$$

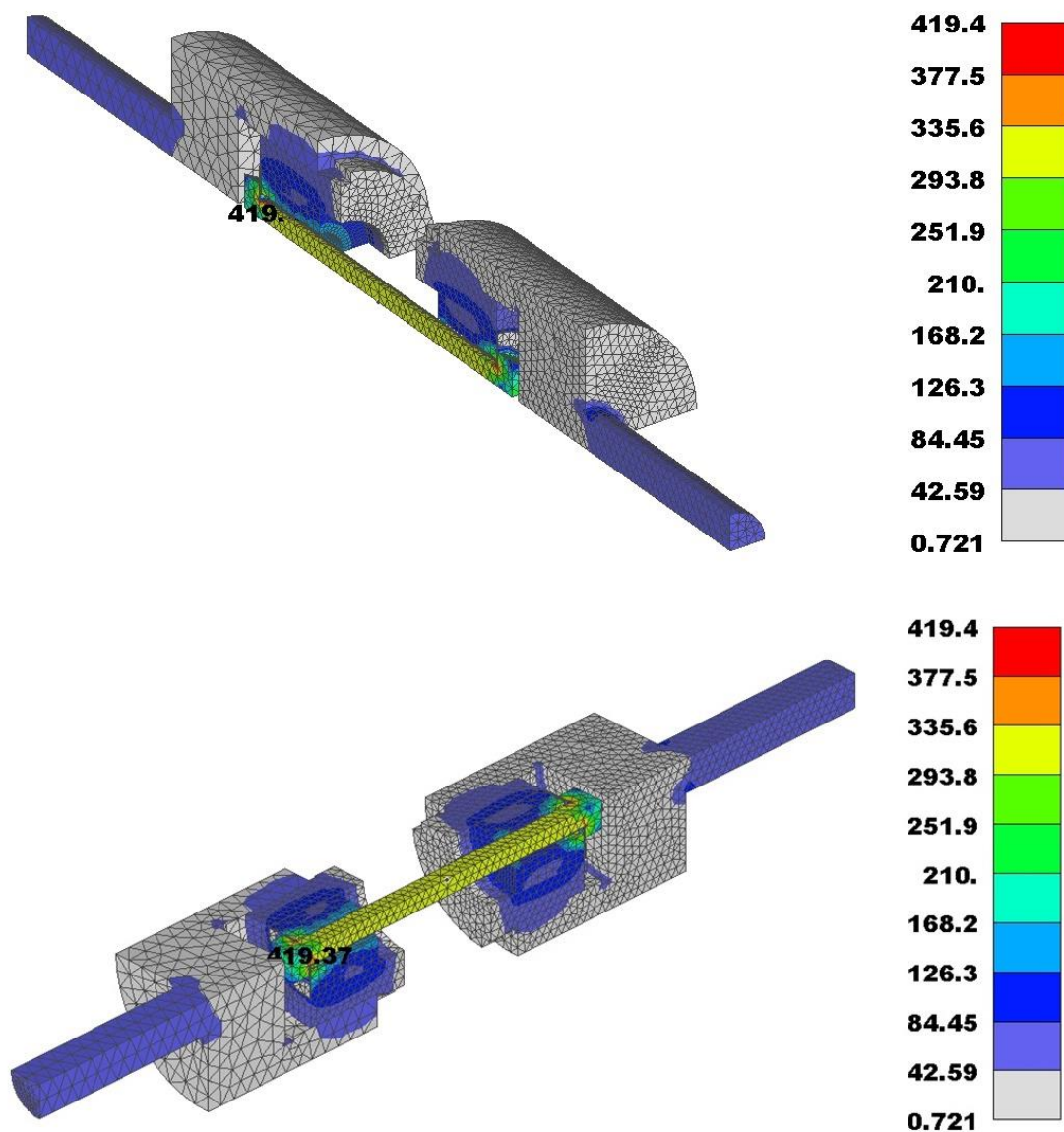
Навртка класе 5:

$$R_m = 5 \cdot 100 = 500 \text{ N/mm}^2$$

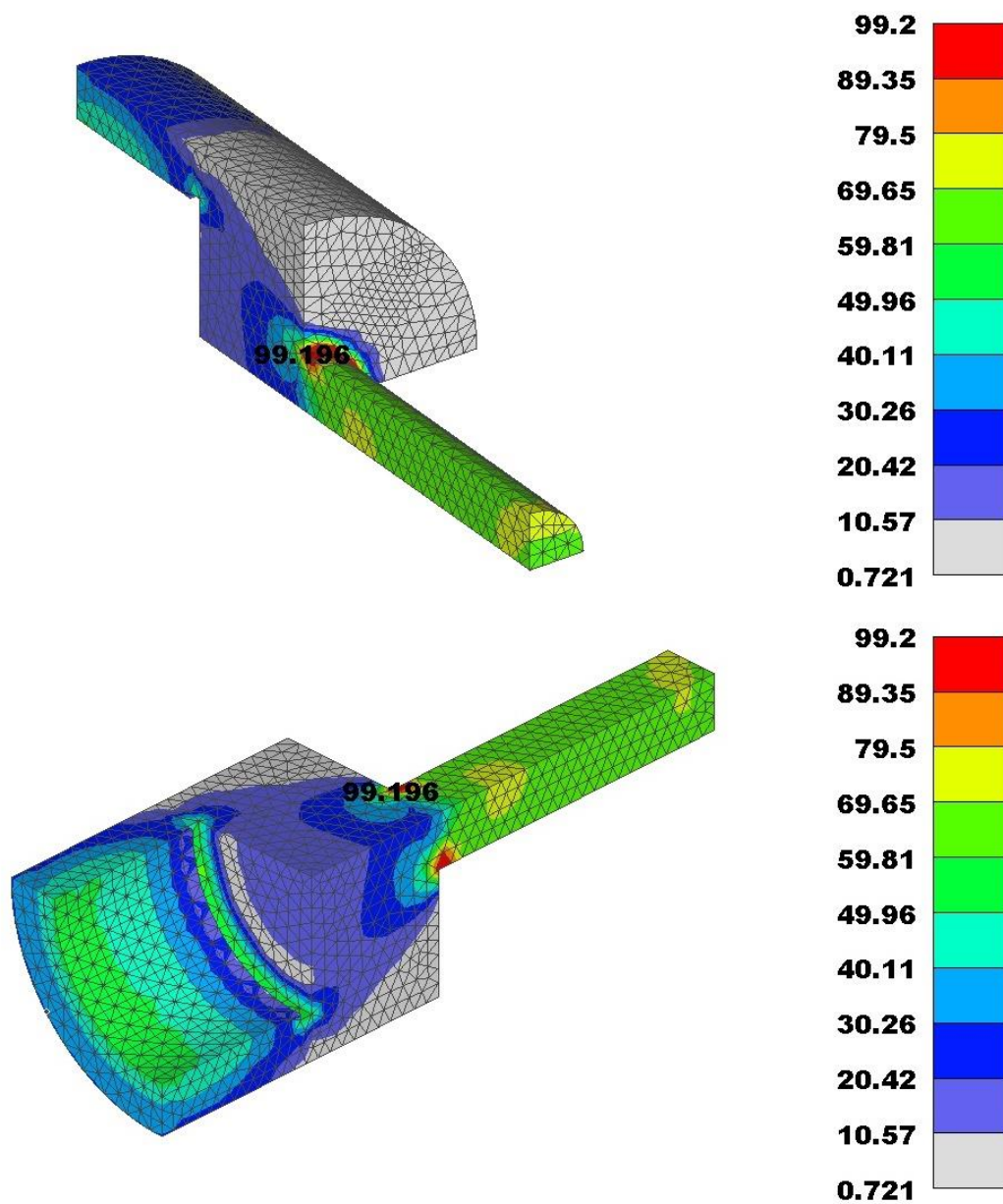
Циљ овог испитивања је провера алата. Услед сложености моделирања и услед уситњавања мреже навоји нису моделирани већ је веза између завртња и навртке идеализована и коришћен је контакт. Укупно модел има 40577 елемената и 65298 чворова. Опис коришћених контакта, граничних услова и оптерећења је дат у додатку А. – Femap упутство.

5. Резултати

Пуштено је једанаест анализа са инкрементом померања од 0.1mm до максималног померања од 1.15mm. Пошто је систем линеаран и линеарно се мењају вредности напона довољно је приказати резултате за само један случај и то при померању од 1.15mm. Максимална вредност напона модела се налази на епрувети између завртња и навртке. Услед симетричности модела довољно је приказати резултате за сваки део појединачно са једне стране.

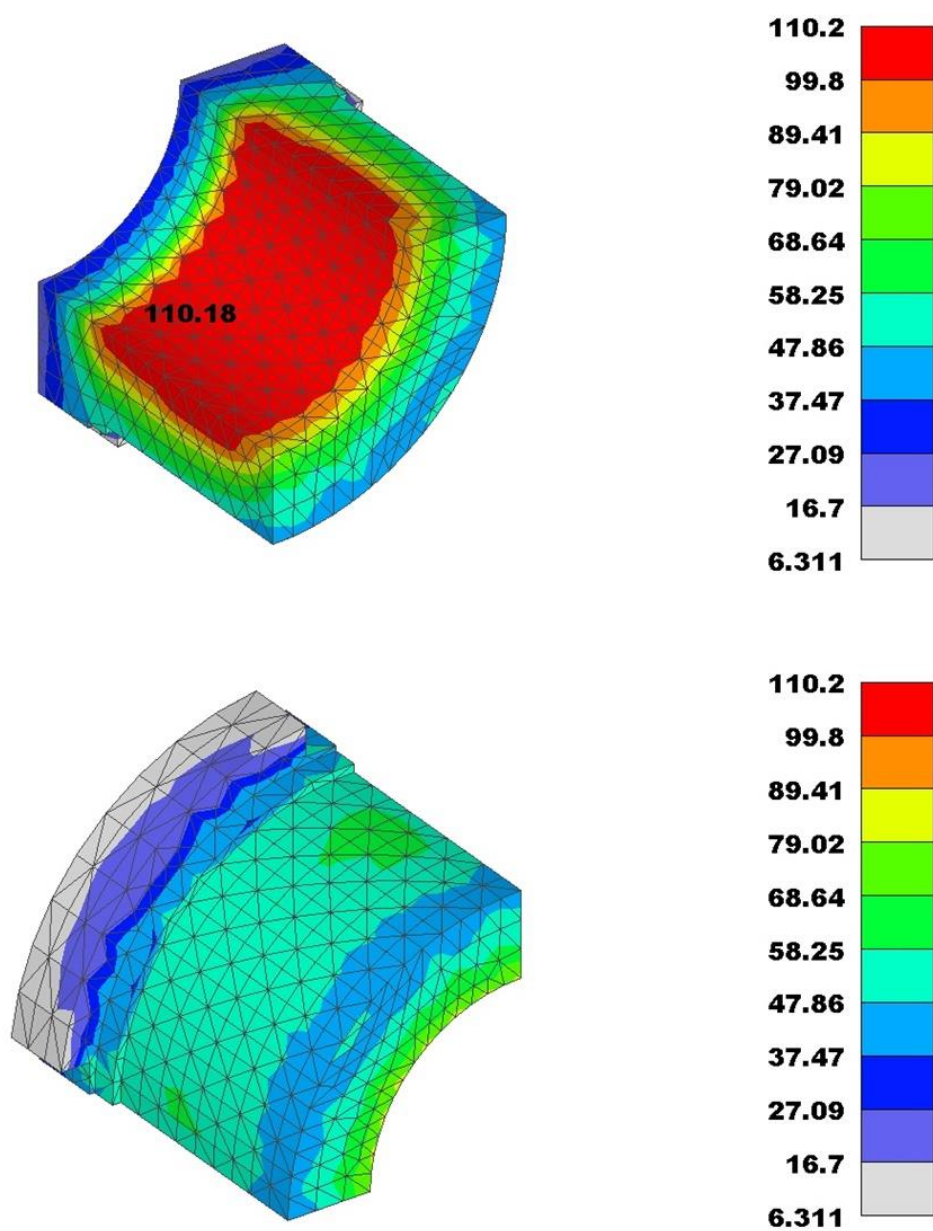


Слика 5.1. Максимална вредност напона модела



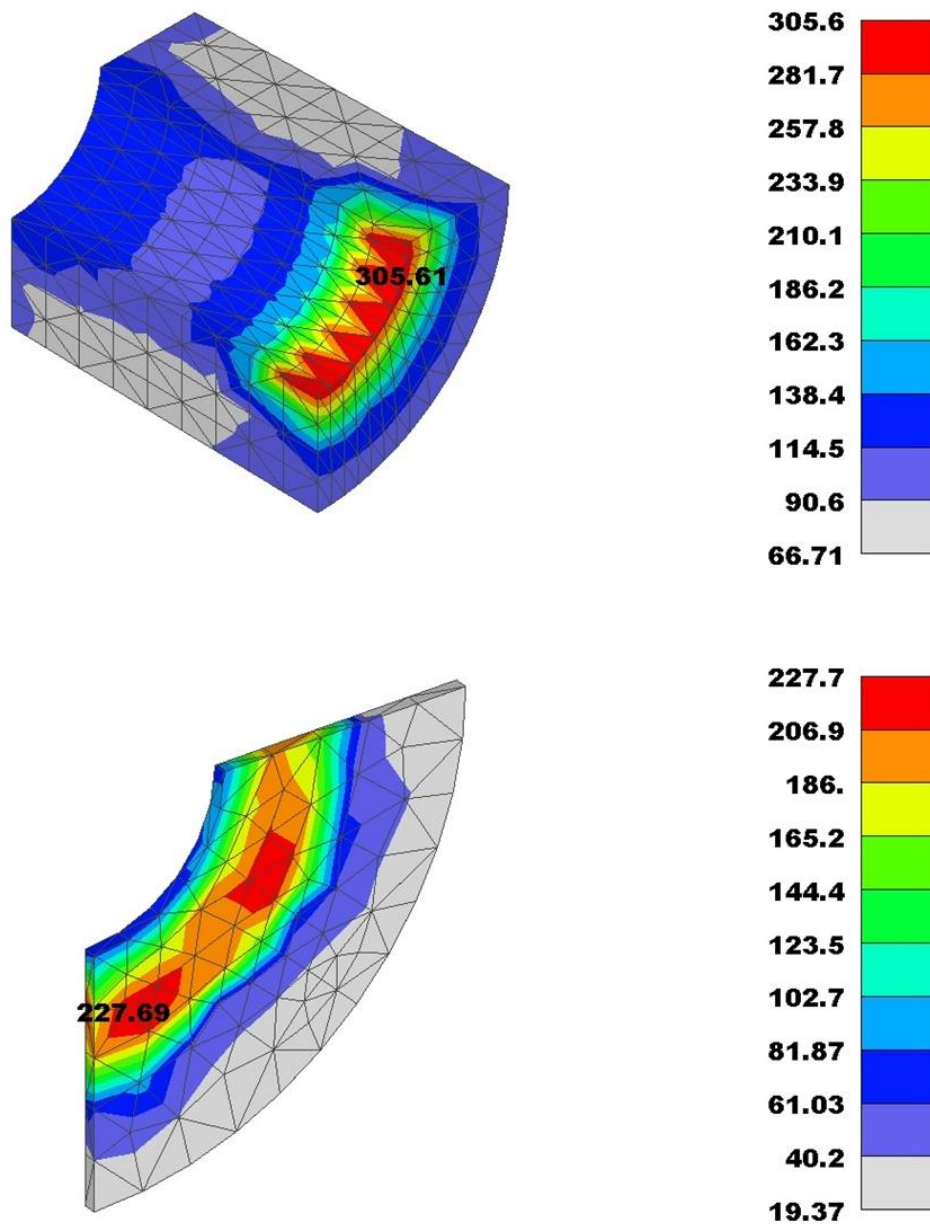
Слика 5.2. Вредности напона за носач

Максимални напони за носач се налазе у зони где је дршка носача и у том делу имају највећу вредност због површине попречног пресека дршке.



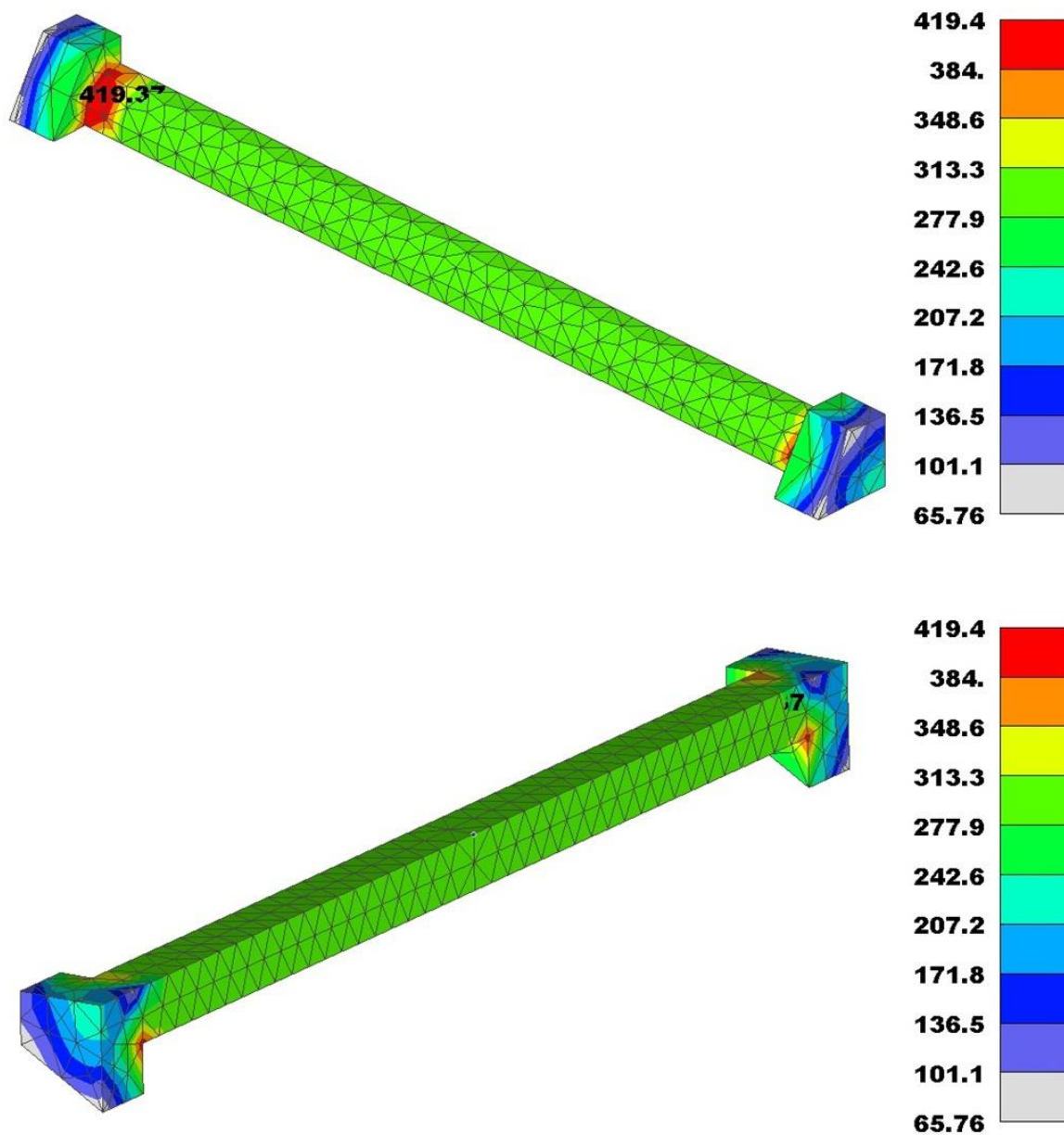
Слика 5.3. Вредности напона за чауру

Максимална вредност напона за чауру у зони у којој се налази је услед контакта полупрстена (на тој површини га притиска).



Слика 5.4. Вредности напона за полупрстен и подлошку

Максимална вредност напона у зони у којој се налази полупрстен је по ободу полупрстена, док су вредности напона за подлошку услед контакта полупрстена са једне стране, а са супротне стране услед контакта епрувете.



Слика 5.5. Вредности напона епрувете

Најкритичнија зона вредности напона је на завртањској вези између завртња и навртке, и ту је максимална вредност напона целог модела која износи 419.4 N/mm^2 при померању од 1.15 mm .

6. Закључак

У првом делу рада су објашњени завртњи и завртањске везе, формирање навоја, профили навоја, облици завртња и навртки, материјали којим се израђују навојни делови, стандарди као и напрезања и њихови напони у навојном пару. У другом делу су обрађени начини моделирања завртња применом методе коначних елемената, њихове врсте и пуштањем анализа за сваку врсту добијени су резултати напона. На крају је урађен опис модела и његових компонената као и материјала којим је моделиран и при пуштању анализе на затезање добијени су његови резултати. У додатку је додатно објашњено упутство за моделирање овог модела у софтверском пакету „Femap“ као и техничка документација модела.

Разлог због којег је испитивана завртањска веза је због њихове широке примене, доступности компоненти који чине везу, једноставности, приступачна цена и жеља за већом прецизношћу при моделирању. Циљ је био провера алата за испитивање завртња у виду провере напона и постојања критичних места. Анализом је обухваћено формирање оптималне мреже, задавање контакта, услова симетрије, ограничења и оптерећења.

Начин моделирања који је изабран за креирање модела је „Solid bolt“, он је најпрецизнији али и временски најзахтевнији, уједно и највише елемената захтева па је прорачун временски скупљи посебно код великих склопова са више завртањских веза. „Hybrid bolt“ даје задовољавајуће поклапање са начином за којим смо се већ одлучили за моделирање и код њега је само лакше задавање предоптерећења завртња јер се задаје преко линијског елемента (греде). Код „Spider bolt“ начина било је неопходно одрадити више анализа јер су резултати дали велика одступања. Прва анализа се састоји из креирања RB2 елемента за навртку, и за пречник те мреже су узете исте димензије као димензије навртке. Код друге анализе за пречник мреже су узете димензије пречника тела завртња и резултати који су добијени значајно одступају и вредности напона су доста већи од реалних. Трећа анализа даје најприближнија одступања од реалних резултата и вредности напона јер је за пречник мреже узета средња вредност димензија пречника навртке и тела завртња. Овај начин је

најлакши за коришћење, има мали број елемената, погодан је за велике склопове али не и за места где је потребно прецизно одрадити стање напона.

Даље истраживање обухвата моделирање завртња са свим детаљима тј. узимање у обзир и моделирање навоја и коришћење нелинеарне анализе у циљу одређивања места кидања завртња.

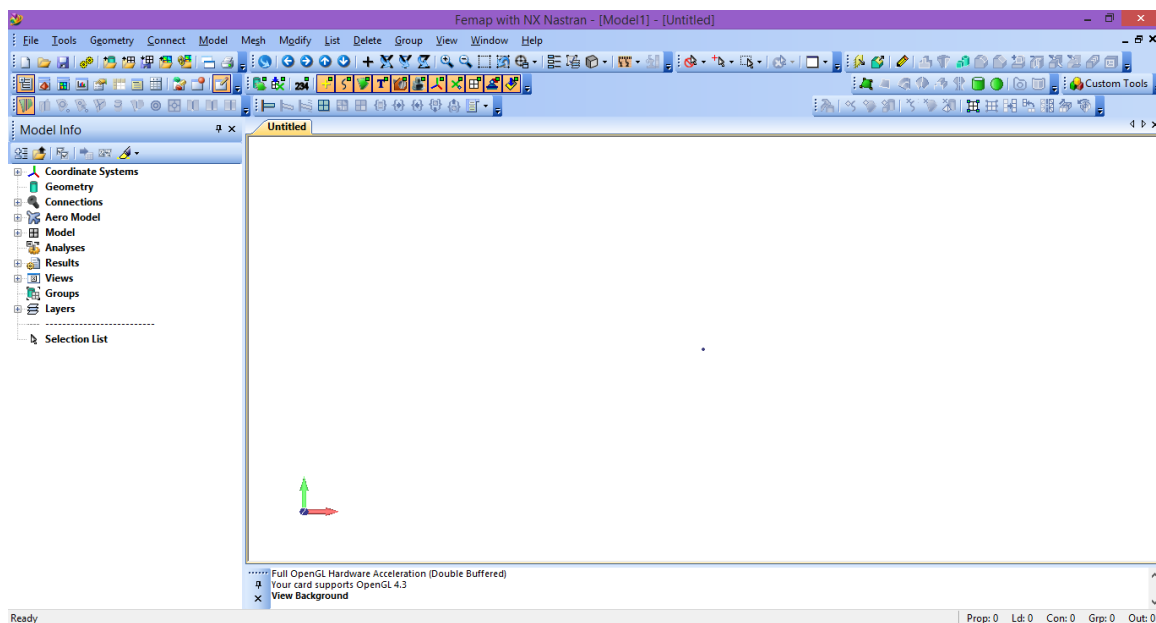
Додатак

А. Фемап упутство

„Femap“ (Finite Element Modeling And Postprocessing) је инжењерски програм који служи за анализу елемената и сложених система применом методе коначних елемената као и за анализу и обраду резултата.

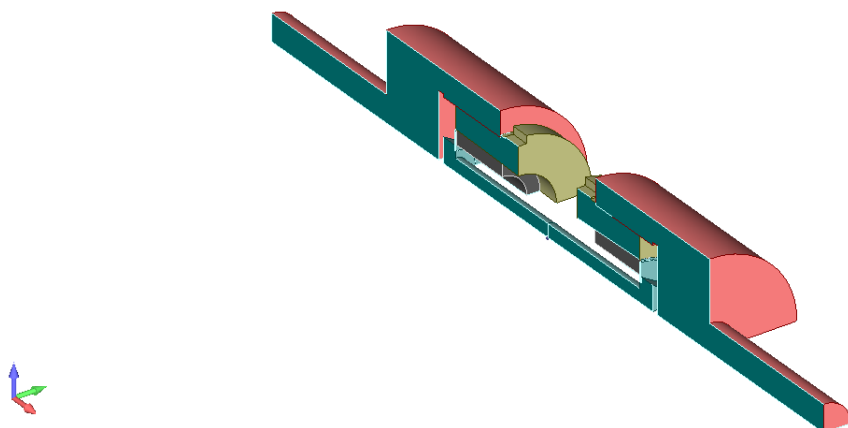
Коришћењем Фемап-а, може се:

- Предвидети и побољшати перформансе и поузданост производа.
- Смањити укупно време неопходно за израду физичких прототипова за тестирање.
- Урадити процена и поређење различитих материјала и дизајна.



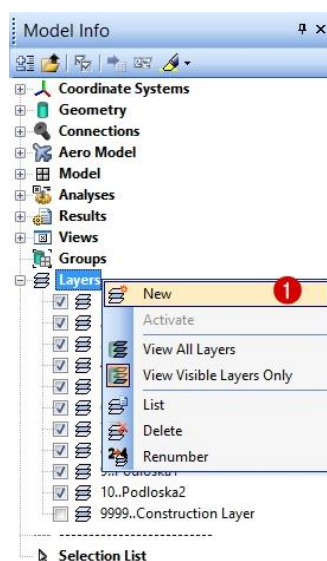
Слика А.1. Фемап радно окружење

Први корак је импортовање CAD модела. Да би смо убацили модел изаберемо опцију **File / Import / Geometry...**

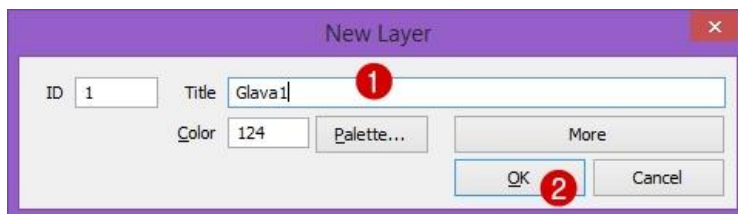


Слика А.2. Импортован модел

Након тога формирамо слојеве (*Layers*). Они служе за унапред планирано одвајање значајних делова модела, а и за једноставнију прегледност у току рада. Да би смо модел расподелили на више слојева, неопходно је да се ти слојеви прво формирају. Креирамо их помоћу опције **Tools / Layers...** или преко стабла **Model Info** које нам омогућава целокупну прегледност и навигацију у току рада.



Слика А.3. Креирање слојева



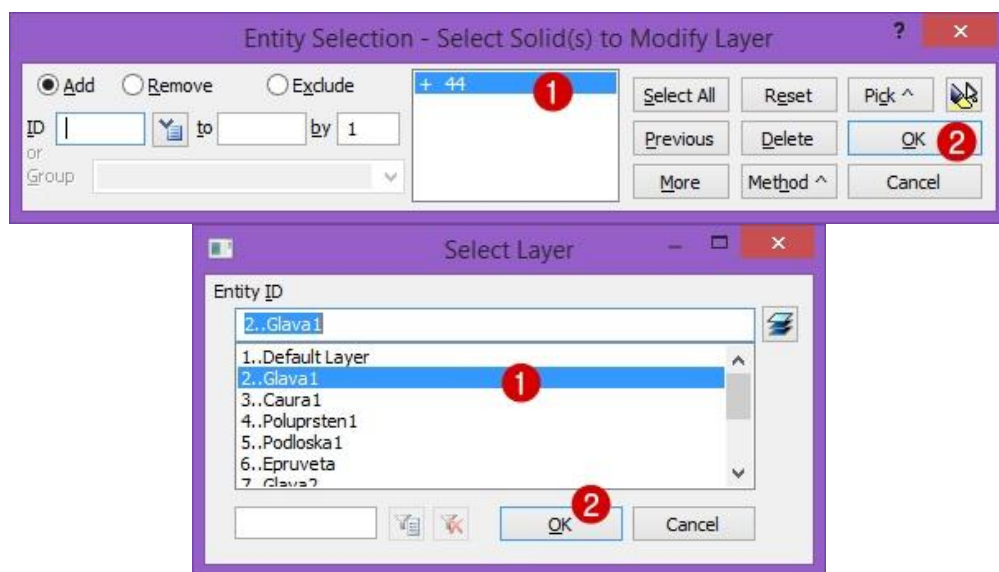
Слика А.4. Креирање назива слојева

И тако истим поступком креирамо сваки слој који нам је потребан.



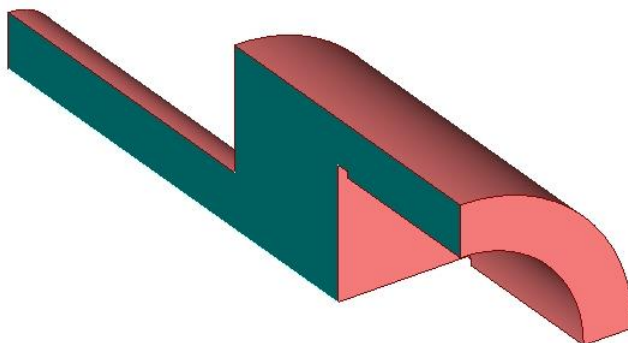
Слика А.5. Слојеви модела

Пошто смо слојеве креирали, сада је потребно да сваки солид елемента убацимо у свој слој и за то нам је потребна опција **Modify / Layer / Solid...**



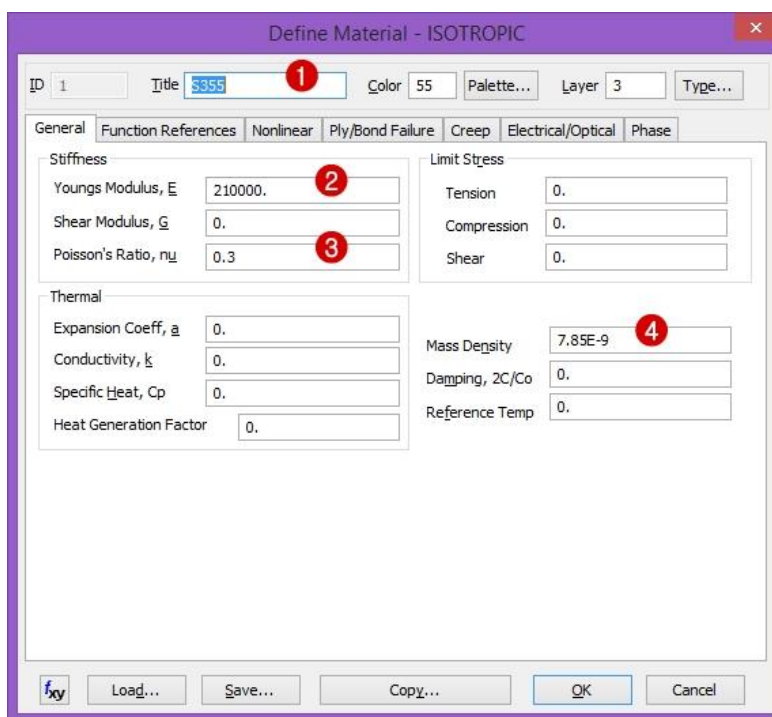
Слика А.6. Селектовање солида у слој

Сваки део модела селекујемо посебно, ово је пример где је селетована само глава модела. Када изаберемо опцију бр 2. – „ОК“ одмах након притиснемо тастере **CTRL + G** да би се део модела сврстао у жељени слој. И тако истим поступком одрадимо за остале делове.



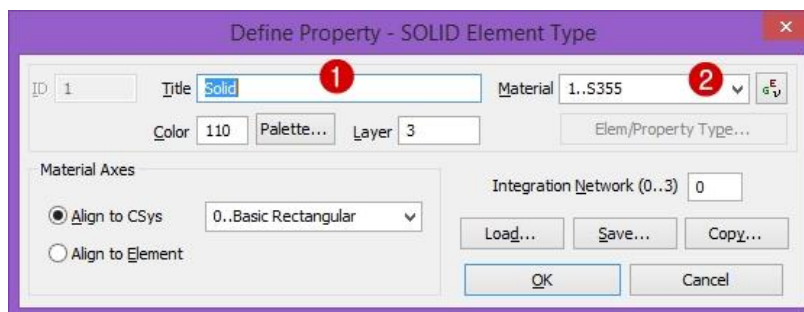
Слика А.7. Слој главе (носача) модела

Следећи корак је дефинисање карактеристика материјала. Опција за дефинисање материјала **Model / Material...**



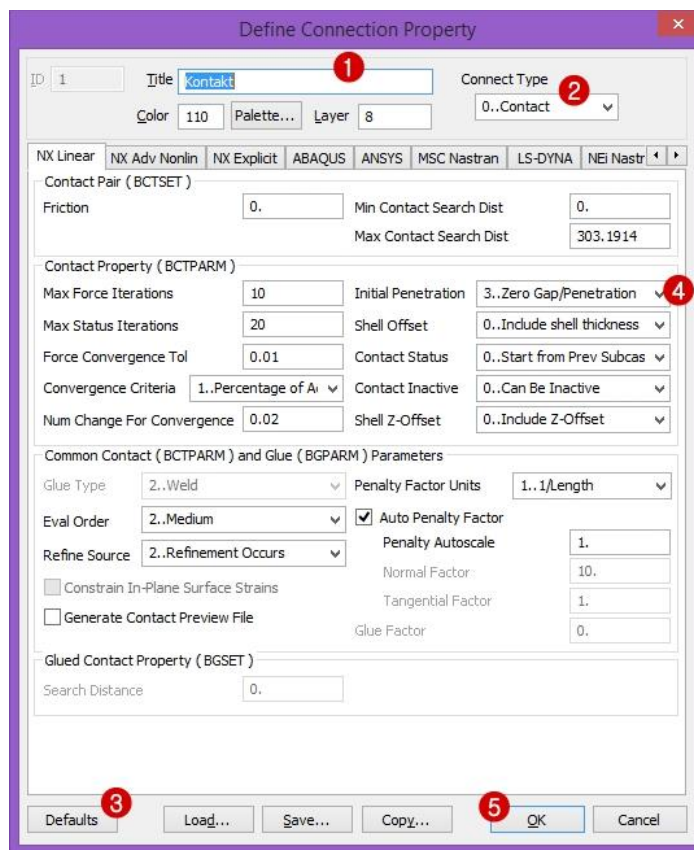
Слика А.8. Дефинисање материјала модела

Опција за дефинисање типа елемента: **Model / Property...**



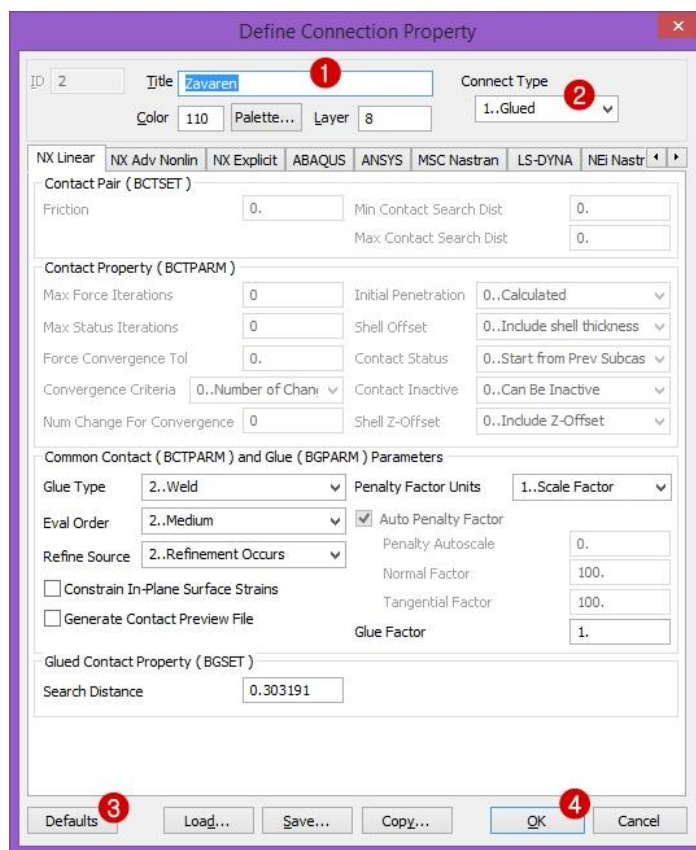
Слика А.9. Дефинисање типа елемента

Након дефинисања материјала и особина потребно је задати везе (*Connections*) које су нам потребне како би наш модел спојили у једну целину. Прву ствар коју требамо да урадимо је да дефинишемо својства веза тј. особине (*Properties*) и то чинимо помоћу опције **Connect / Connection Property...**



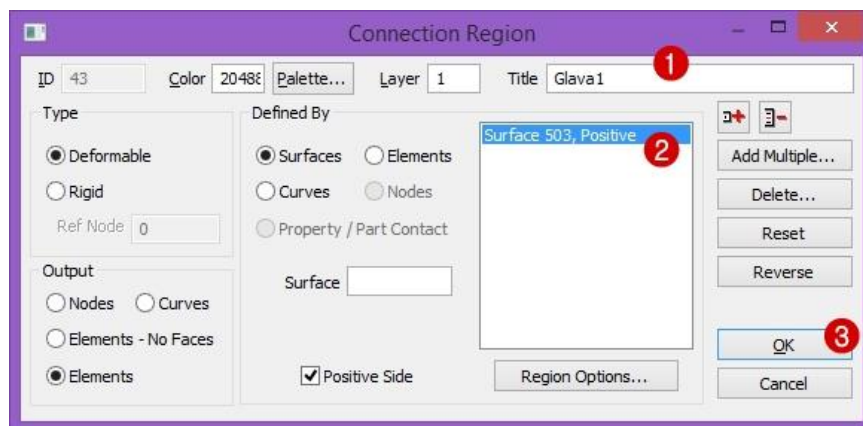
Слика А.10 Дефинисање својства везе контактом

Исти поступак поновимо како би сада дефинисали заварен спој.

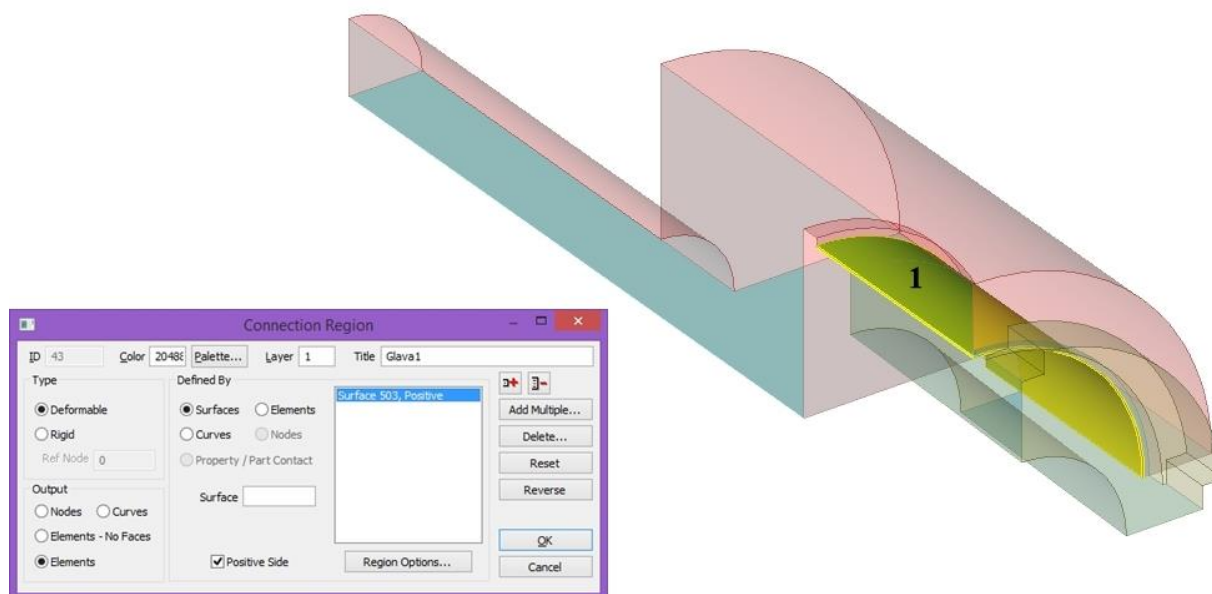


Слика А.11 Дефинисање својства завареног споја

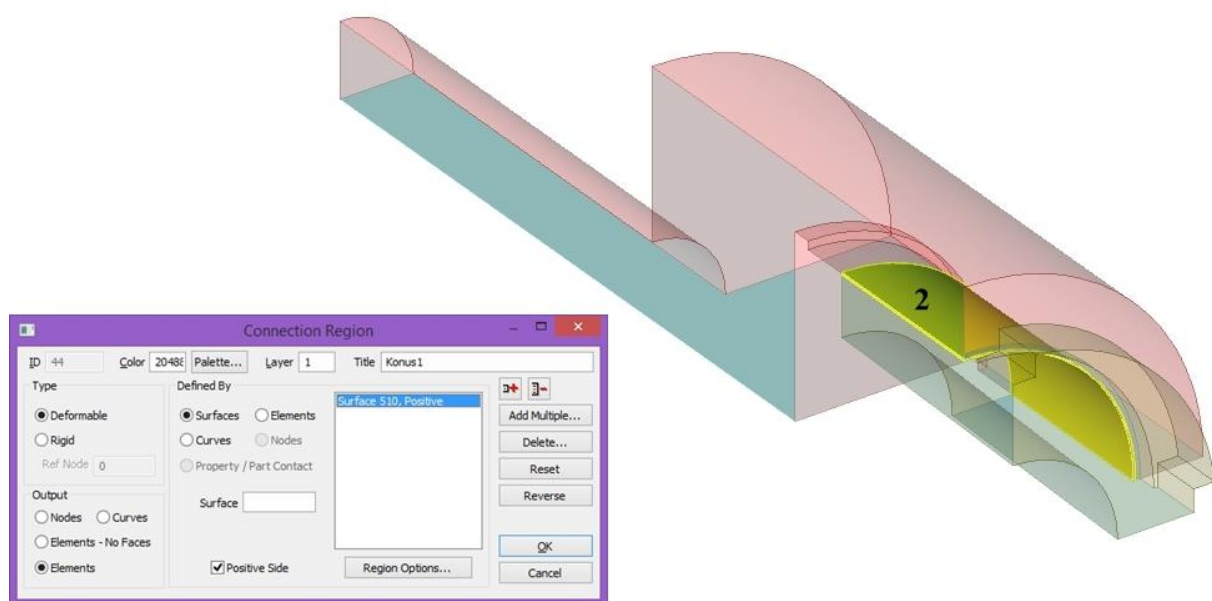
Следећи корак је задавање региона (*Regions*) који су нам потребни како би смо креирали површине делова модела на којима треба задати својства дефинисана у претходном кораку. Опција за задавање региона **Connect / Connection Region...**



Слика А.12 Задавање конекције региона

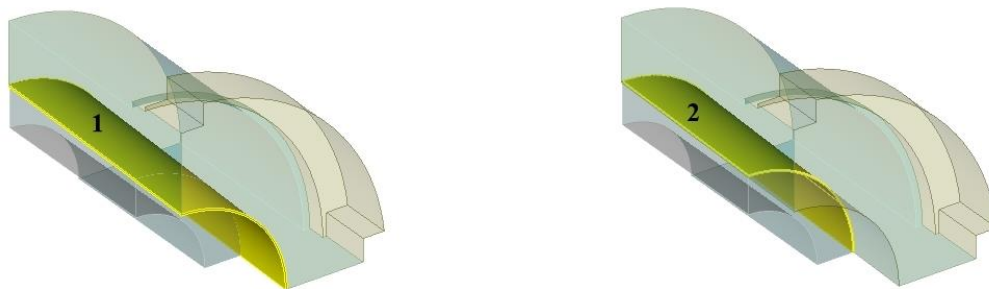


Слика А.13 Регион првог дела модела који је селектован

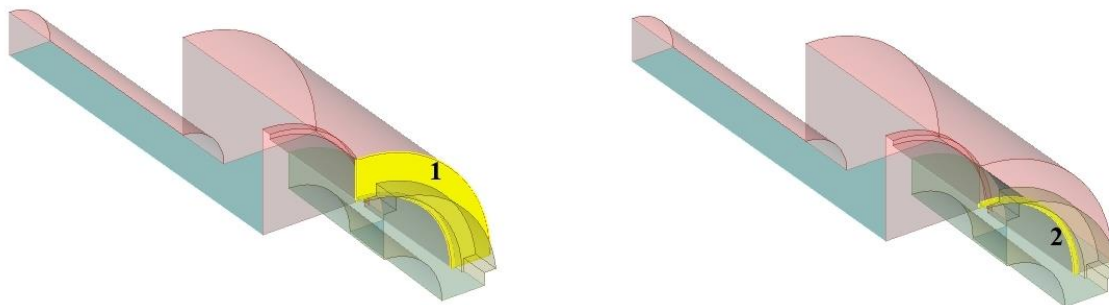


Слика А.14 Регион другог дела модела који је селектован

Истим поступком задавања конекција региона урадимо и за преостале делове и ово су њихове површине:



Слика А.15. 1. - Површина чауре, 2. - Површина полупрстена



Слика А.16. 1. - Површина носача, 2. - Површина чауре



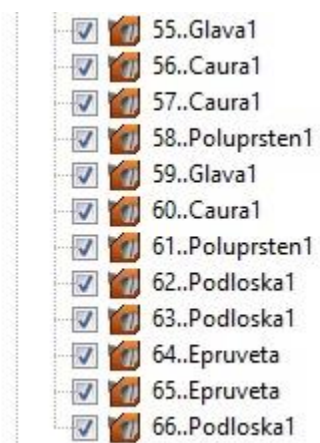
Слика А.17. 1. - Површина полупрстена, 2. - Површина подлошке



Слика А.18. 1. - Површина подлошке, 2. - Површина епрувете

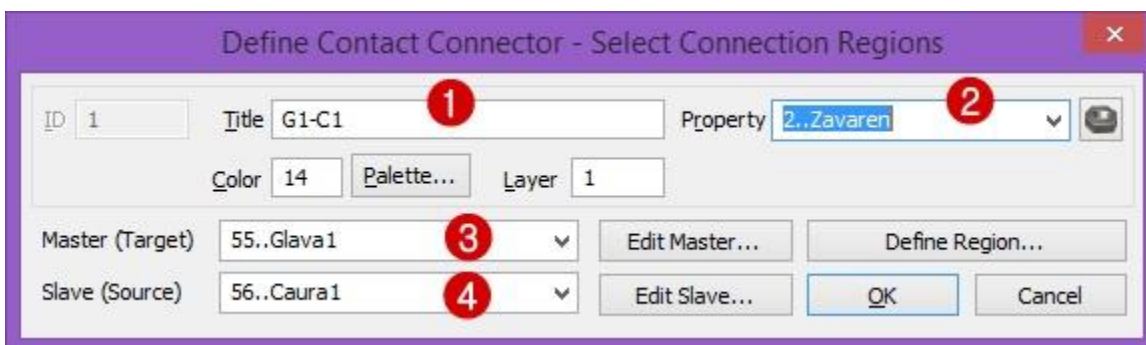


Слика А.19. 1. - Површина подлошке, 2. - Површина епрувете



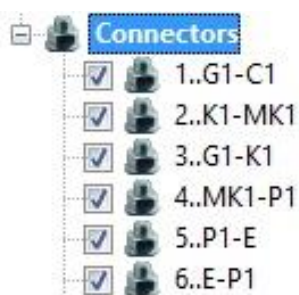
Слика А.20. Региони модела

Пошто је модел симетричан истим поступком задавања конекција региона се треба означити и друга половина, тј. доњи део. Када све то одрадимо следећи корак је задавање конектора. Они служе како би се између површина које смо означили дефинисао тип контакта. Дакле пошто имамо 12 креираних региона, имаћемо 6 конектора са једне стране модела, а услед симетричности модела исто толико и са друге. Опција за задавање конектора **Connect / Connector...**



Слика А.21. Дефинисање контакта конектора

Контакт, тј веза између главе (носача) и чауре је остварена помоћу навоја али пошто не постоји опција за контакт навоја у софтверу користи се опција *Glued* (заварен) која даје исте могућности. Остали конектори су повезани помоћу опције *Contact* (контакт).



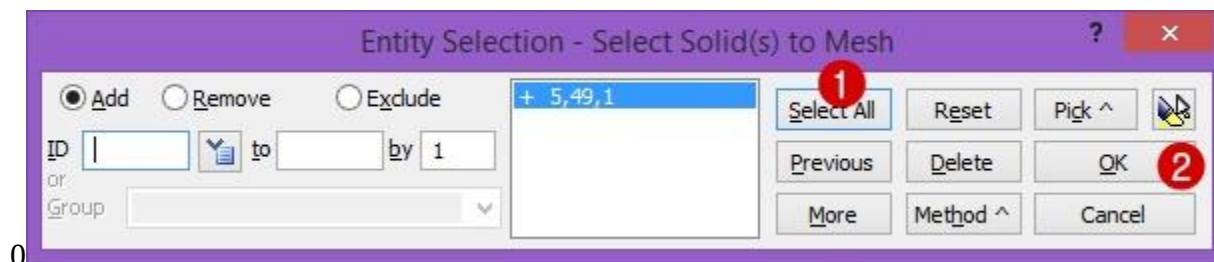
Слика А.22. Конектори модела

Наредна ствар је креирање мреже модела. Опција за креирање се назива **Tet Mesh Solid** која аутоматски креира тип елемента тетраедар са међучворовима и налази се у палети **Mesh...**

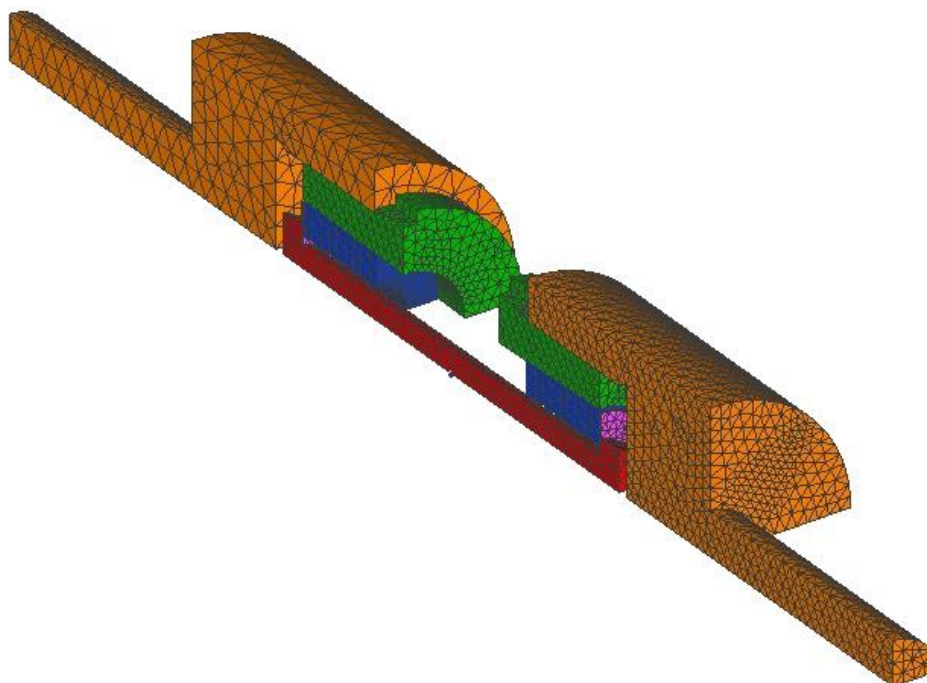


Слика А.23. Опција Tet Mesh Solid

Притиском на опцију нам се отвара прозор где је потребно да изаберемо све делове модела које треба да обухвати мрежа

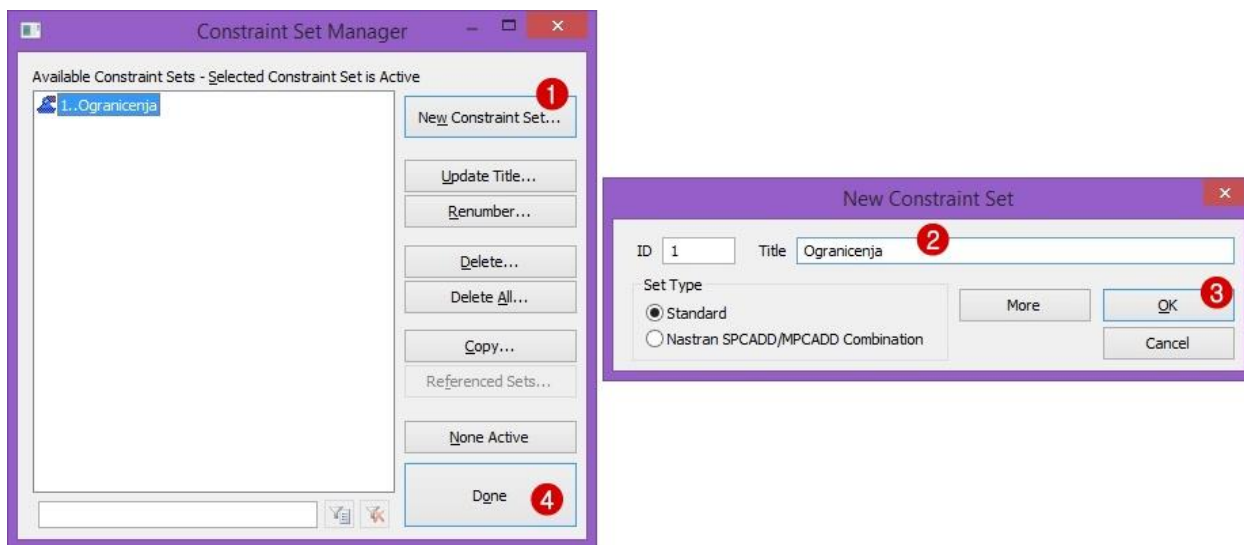


Слика А.24. Селектовање солида



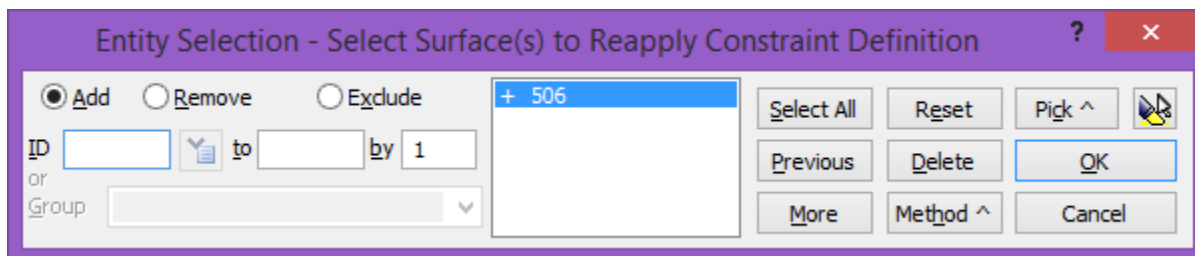
Слика А.25. Модел са мрежом

Ограничења се задају помоћу команде **Model / Constraint / Create Manage Set...** (или пречицом Shift + F2).

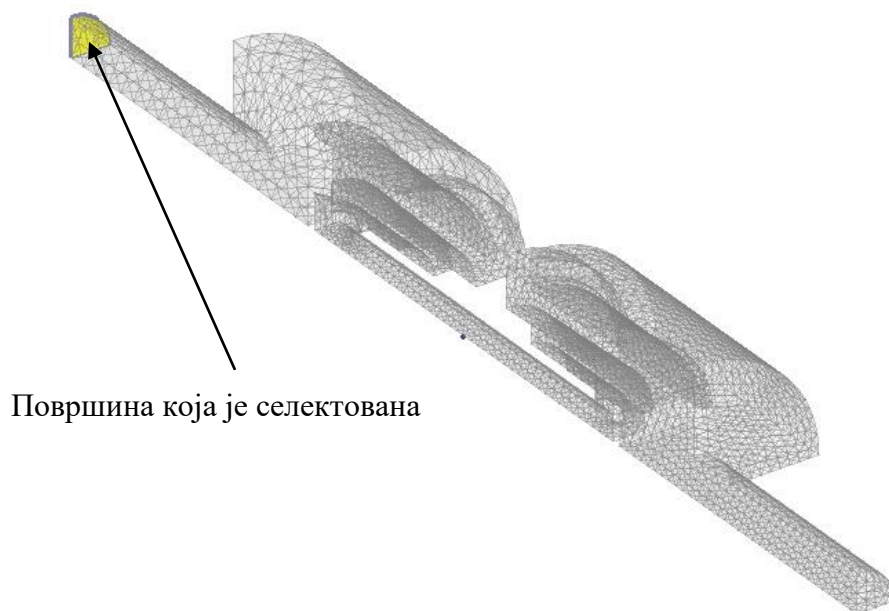


Слика А.26. Задавање ограничења

Командом **Model / Constraint / On Surface...** се задају ограничења по површинама модела.

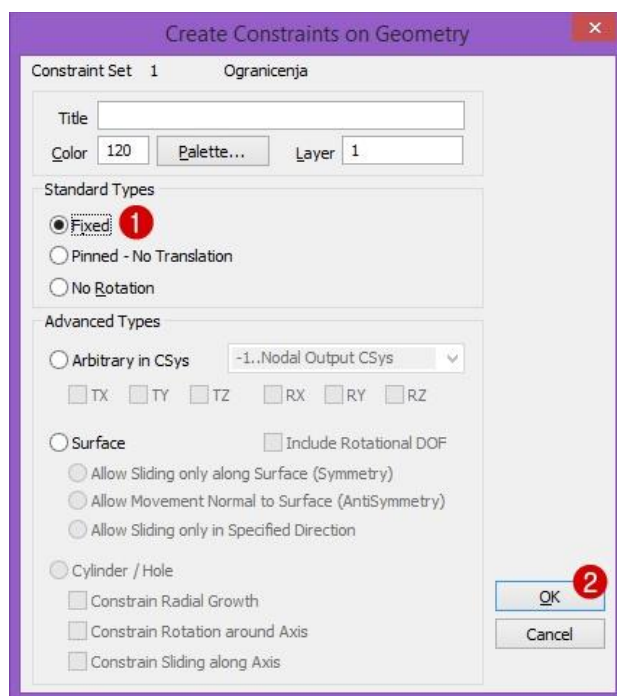


Слика А.27. Селектовање површине на којој је потребно задати ограничење



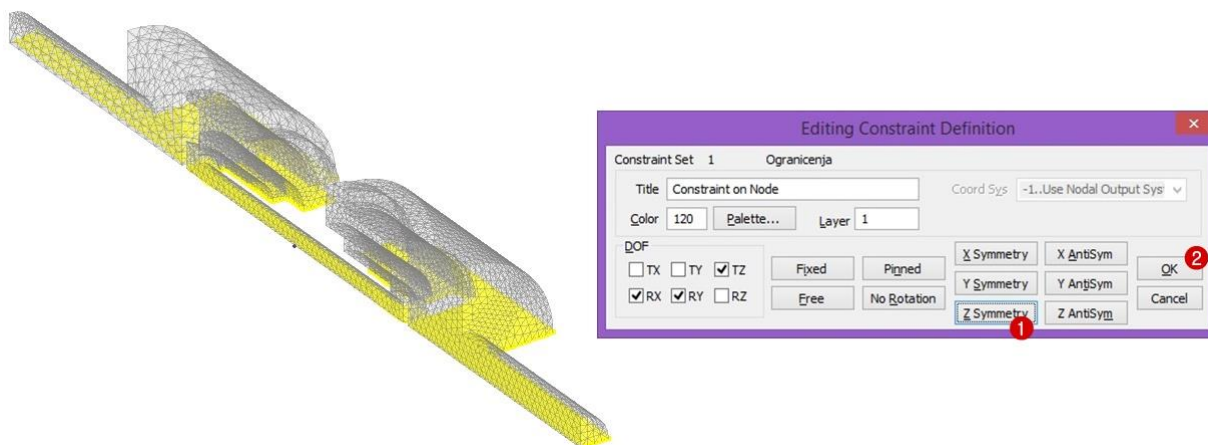
Слика А.28. Приказ селектоване површине

Након селектовања потребно је изабрати врсту ограничења у нашем случају је непокретно (*Fixed*). Што значи да по тој геометрији модел нема транслације, тј. померања по X, Y и Z правцу (оси) и нема ротације око X, Y и Z осе.

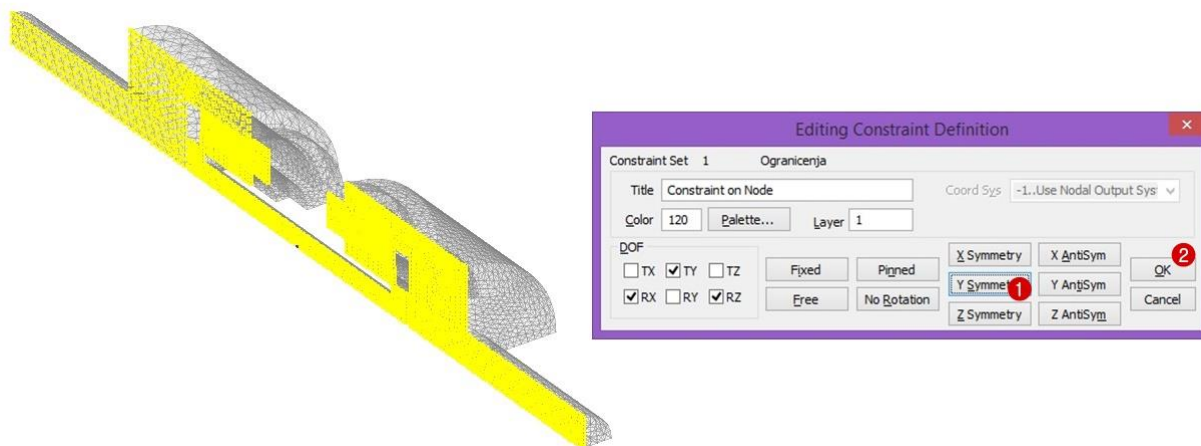


Слика А.29. Креирање ограничења на геометрији

Услед полупресека модела неопходно је ограничити и симетрије. **Model / Constraint / Nodal... > Method / On Surface...**

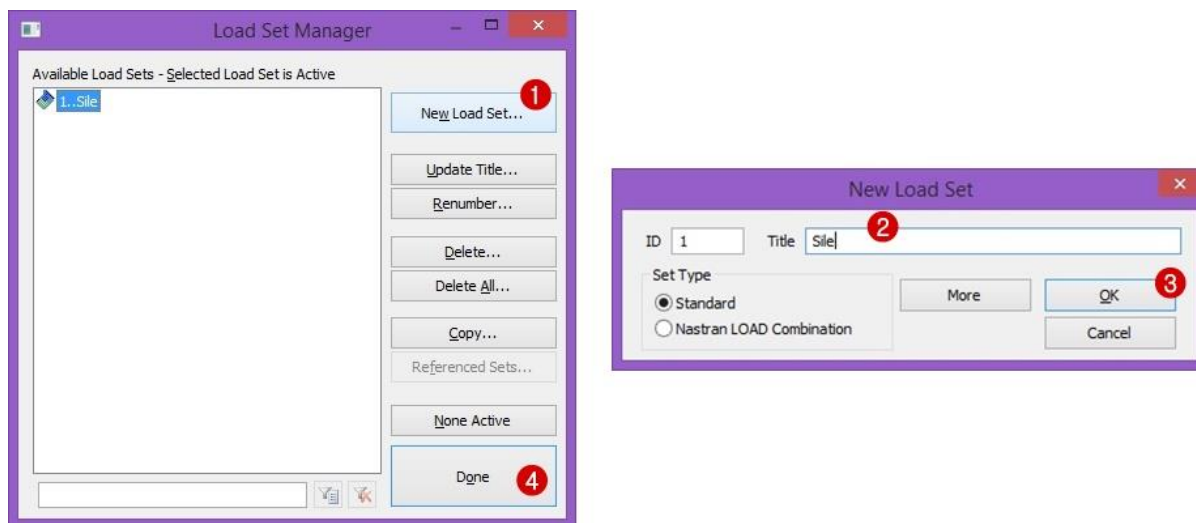


Слика А.30. Површина ограничено Z симетрије (оса Z је управна на селектовану раван)
ограничена померања по Z правцу и ротације по X и Y оси



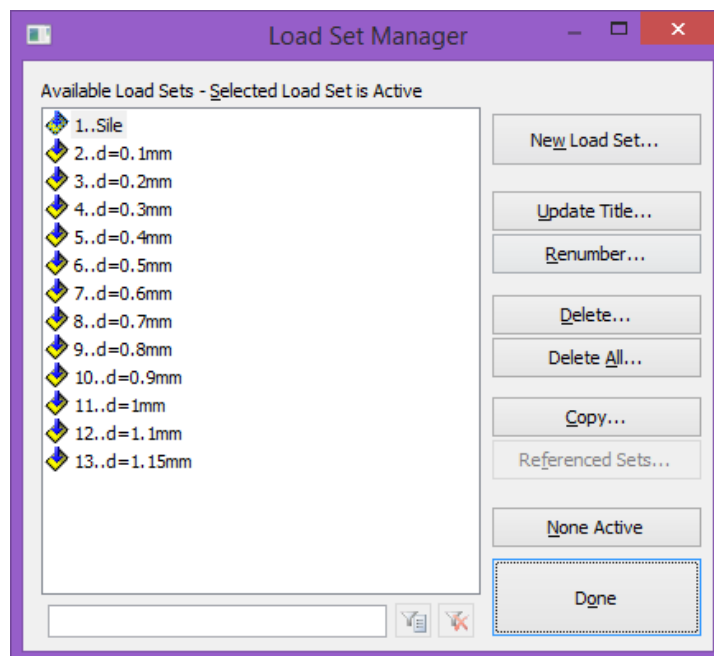
Слика А.31. Површина ограничено Y симетрије (оса Y је управна на селектовану раван)
ограничена померања по Y правцу и ротације по X и Z оси

Задавање оптерећења се врши веома слично као и задавање ограничења. **Model / Load / Create Manage Set...** (пречица Ctrl + F2)



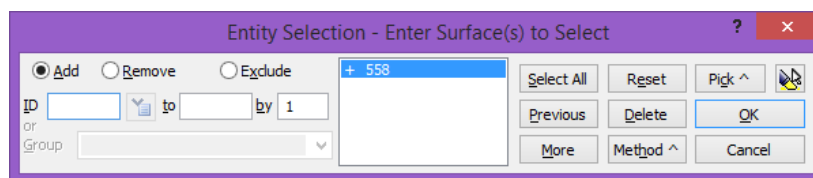
Слика А.32. Задавање оптерећења

Истим поступком креирамо свако оптерећење посебно за померања од 0.1 mm до 1.15 mm

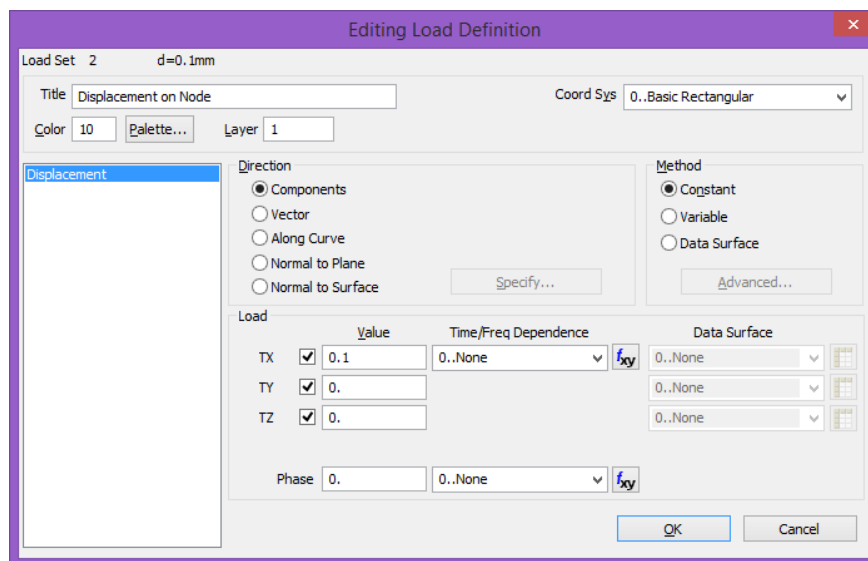


Слика А.33. Приказ свих оптерећења

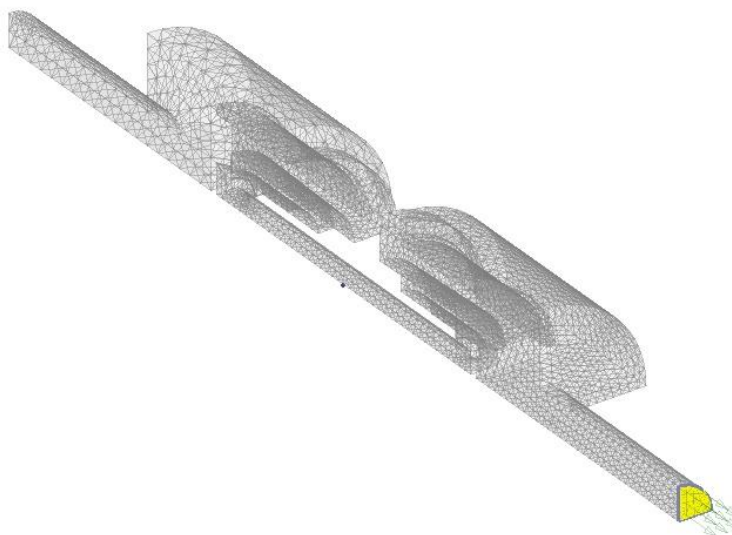
Командом **Model / Load / On Surface...** се задају оптерећења по површинама модела.



Слика А.34. Селектовање површине на којој је потребно задати оптерећење

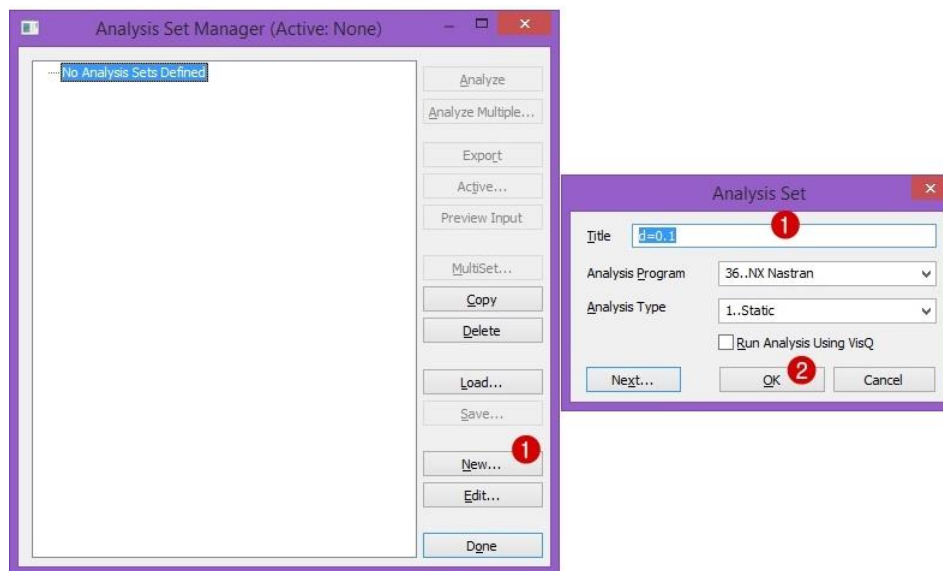


Слика А.35. Дефинисање оптерећења (померање)



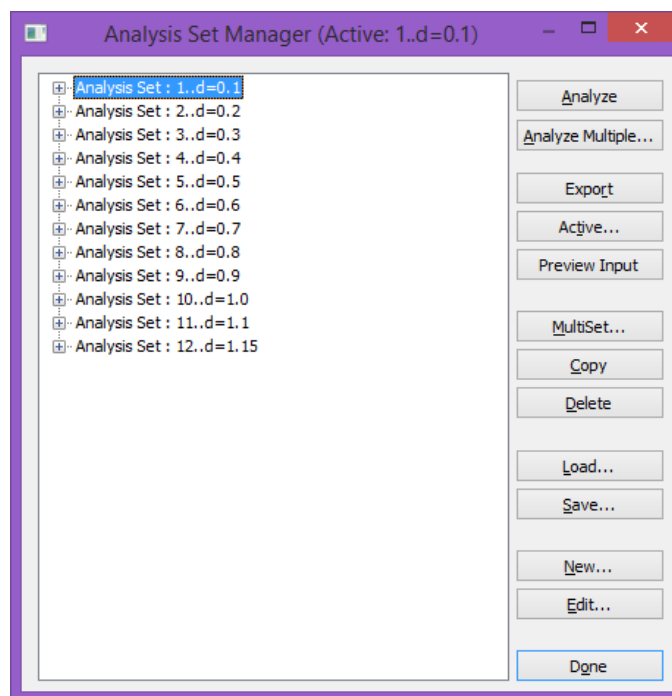
Слика А.36. Површина на којој је задато оптерећење (померање)

На крају након целокупног рада потребно је само још креирати анализе да би смо приликом њиховог покретања добили жељене резултате модела. Поступак креирања **Model / Analysis...**



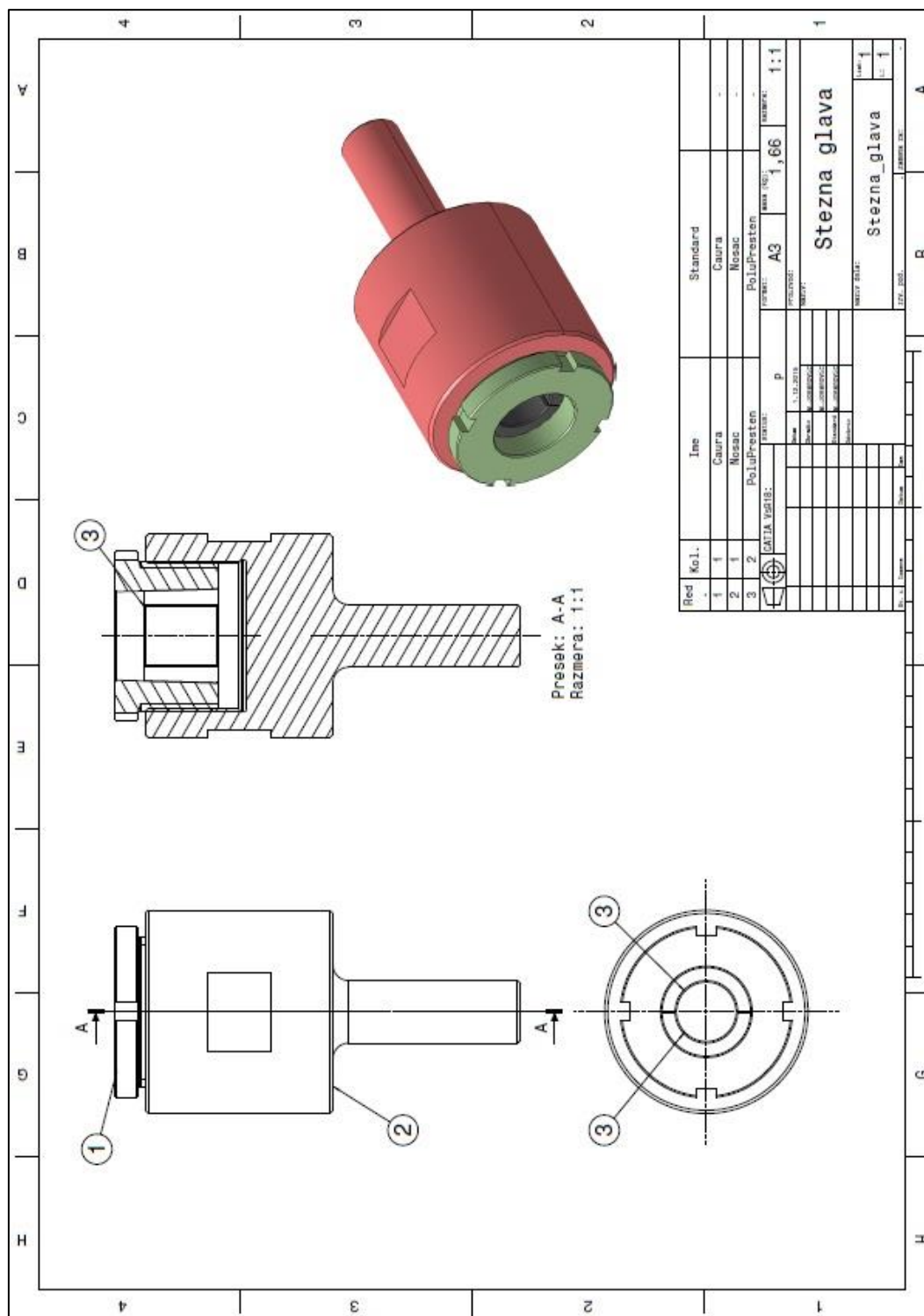
Слика А.37. Креирање анализе

Истим поступком за свако задато оптерећење потребно је посебно креирати анализу.

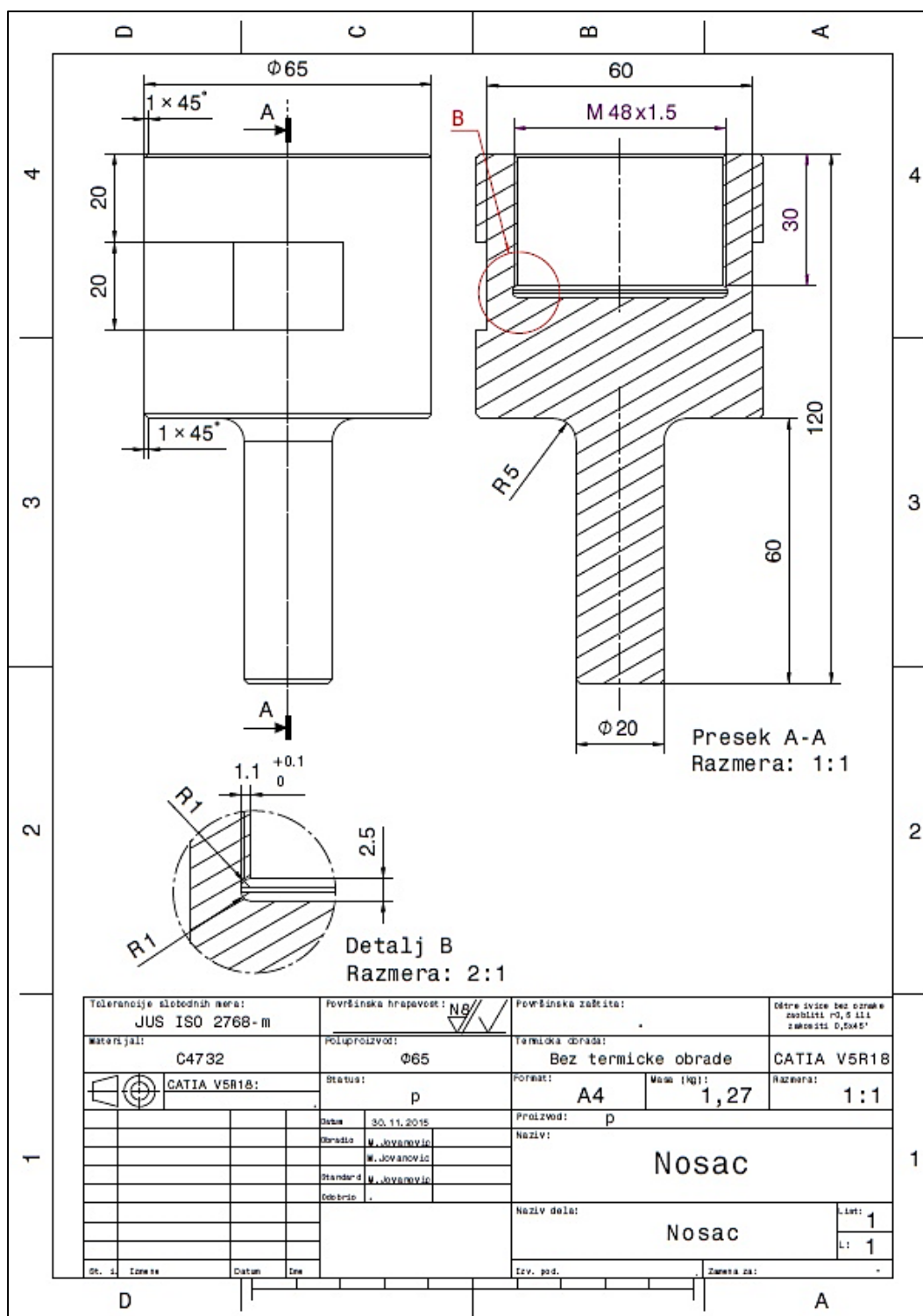


Слика А.38. Укупан број креираних анализа





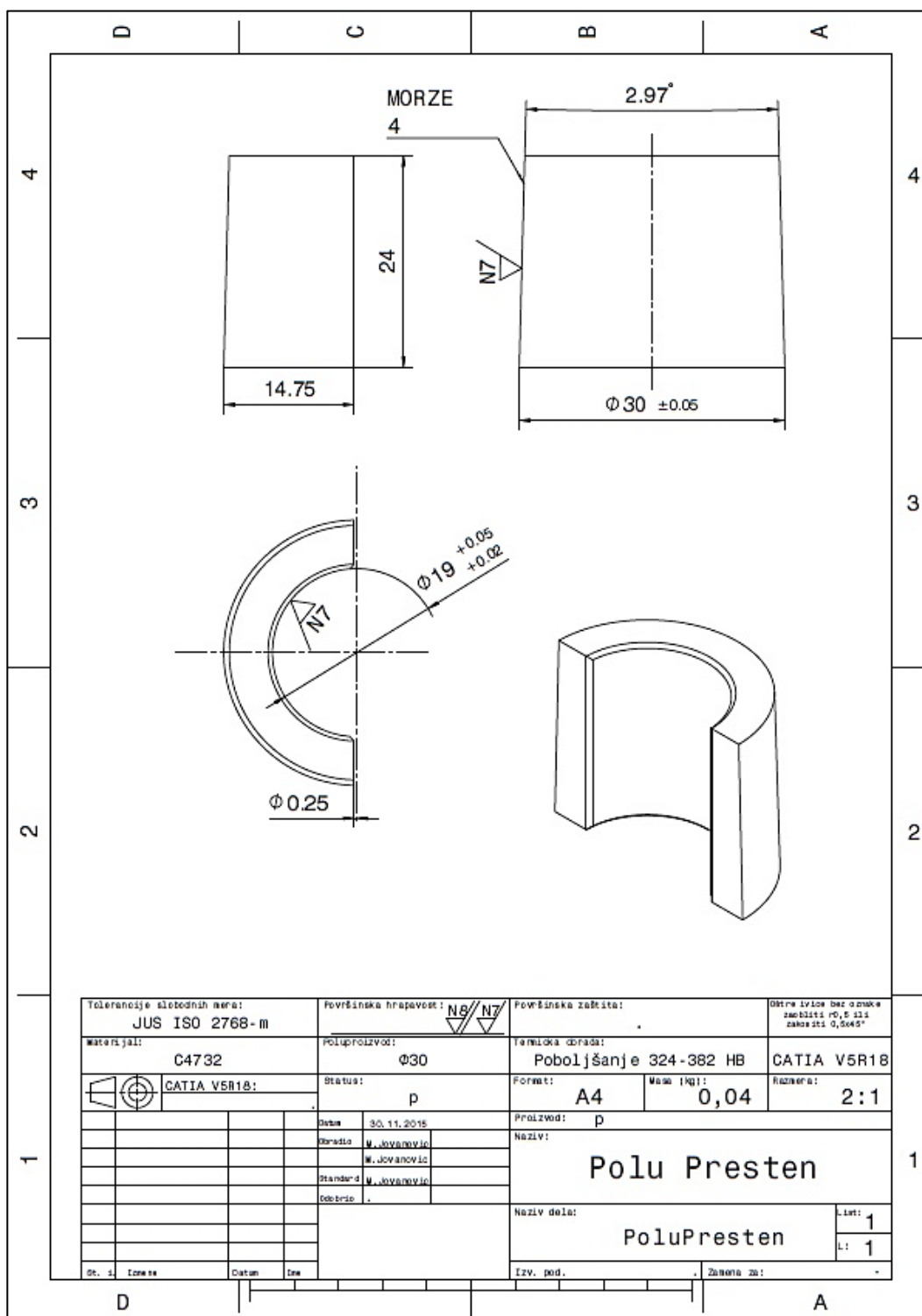
Слика Б.2. Технички документација - Стезна глава



Слика Б.З. Техничка документација – Носач



Слика Б.4. Техничка документација – Чаура



Слика Б.5. Техничка документација – Полу прстен

Литература

1. Др Милош Којић, Др Радован Славковић, Др Мирослав Живковић, Др Ненад Грујовић: Метод коначних елемената 1 (линеарна анализа), Машински факултет у Крагујевцу, 2010.
2. Др Вера Николић: Машински елементи (теорија, прорачун, примери), Машински факултет у Крагујевцу, 2004.
3. Др Дамир Јеласка: Елементи стројева, Факултет стројарства у Сплиту, 2005.
4. Каталог за завртње и навртке “Комет” Ваљево
5. Böllhoff - The Manual of Fastening Technology 5th edition