



Nenad Kolarević
Miloš Stanković
Aleksandar Grbović
Marko Miloš

SOFTVERSKI ALATI U DIZAJNU

ZBIRKA ZADATAKA

Strukturalna analiza

A: Static Structural (ANSYS)

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

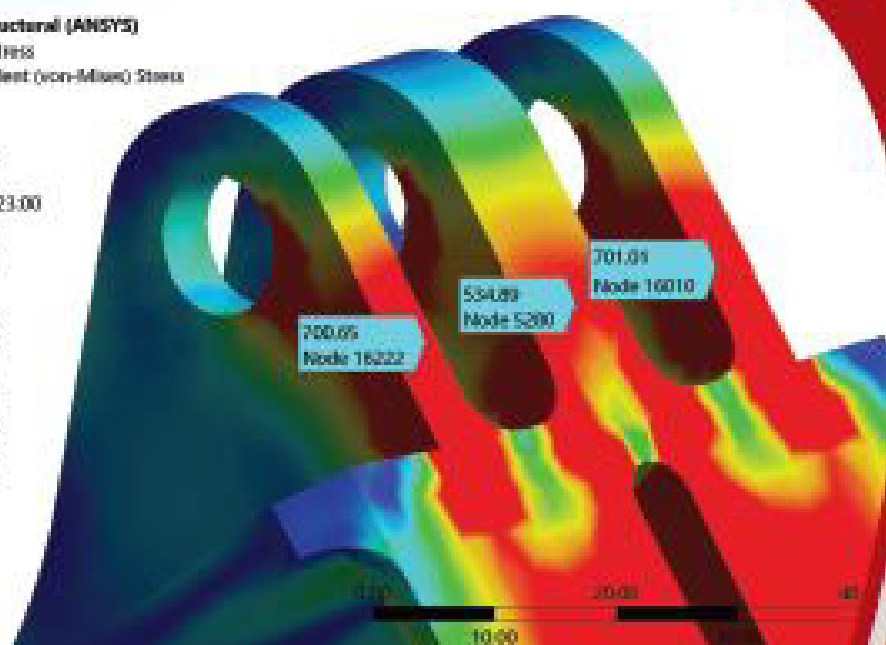
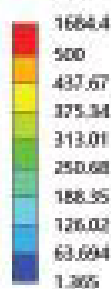
Unit: MPa

Time: 1 s

Max: 1664.4

Min: 1.365

04/09/2022 23:00



Beograd, 2022.

dr Nenad Kolarević, docent, dr Miloš Stanković, naučni saradnik,
dr Aleksandar Grbović, redovni profesor i dr Marko Miloš, redovni profesor
SOFTVERSKI ALATI U DIZAJNU
ZBIRKA ZADATAKA – Strukturalna analiza

Мишљење и оцена Рецензента 1 - др Милосав Огњановић, професор емеритус:

Примери обрађени у овој збирци представљају аутентичне инжењерске проблеме из области структуралне анализе и њихова решења. Базирани су на искуствима аутора стечених у пракси, што посебно даје на значају презентованом материјалу. Иако су у питању конкретни примери са прецизно дефинисаном геометријом и граничним условима, феноменолошки гледано описани поступци се могу се применити на јако широк спектар ситуација. Изведени су јасно и концизно, како би се сложене нумеричке анализе што једноставније представиле студентима. Обим и формат уџбеника је јако добро прилагођен, са великим бројем слика и истакнутих детаља, без којих би разумевање примера било отежано. Збирка ће свакако наћи своју примену и у инжењерској пракси, као згодан приручник инжењерима који се баве поменутом облашћу. За израду 3Д модела и нумеричких прорачуна, коришћени су напредни инжењерски софтвери CATIA и ANSYS, респективно, који иначе имају широку примену у индустрији. Збирка је првенствено намењена студентима модула „Дизајн у машинству“, али свакако може бити од користи осталим студентима.

Мишљење и оцена Рецензента 2 - др Божидар Росић, редовни професор у пензији:

:

Наведени примери у збирци су изузетно систематизовани, јасно изложени, базирани на реалним проблемима у пракси и написани у обиму који је права мера доброг универзитетског уџбеника. Велика вредност збирке је да по први пут, на једном месту, приказана примена савремених софтверских алата на конкретним инжењерским проблемима кроз примере из реалне праксе са којима се сваки инжењер сусреће. Моделирање конструкција је обрађено у софтверском пакету CATIA, а структурална анализа је извршена коришћењем софтверског пакета ANSYS. Изетност наведених примера је да нису цитирани из литературе већ представљају лично инжењерско искуство аутора. Дакле све је потпуно аутентично. Ова збирка попуњава све празнине у практичној примени савремених софтвера и разрешава све недоумице у до сада доступној литератури коју користе студенти модула „Дизајн у машинству“, а истовремено представља богат извор информација из области инжењерског пројектовања које могу да користе студенти других усмерења и инжењери разних профила. Као посебну вредност књиге истичем свеобухватност датих примера-задатака из праксе који захтевају примену већине алатки и могућности модула софтвера који се користи за структуралну анализу, а при томе су прецизно изложени по методологији: задатак-детаљан поступак решавања-решење и као такви читаоцу обезбеђују врхунску илустративност изложене материје.

dr Nenad Kolarević, docent, dr Miloš Stanković, naučni saradnik,
dr Aleksandar Grbović, redovni profesor i dr Marko Miloš, redovni profesor

SOFTVERSKI ALATI U DIZAJNU
ZBIRKA ZADATAKA – Strukturalna analiza

I izdanje

Recenzenti:

dr Milosav Ognjanović, profesor emeritus, Mašinski fakultet, Beograd
dr Božidar Rosić, redovni profesor u penziji, Mašinski fakultet, Beograd

Izdavač:

Univerzitet u Beogradu,
MAŠINSKI FAKULTET
Ul. Kraljice Marije 16, Beograd
tel. (011) 3370 760
fax (011) 3370 364

Za izdavača:

Prof. dr Vladimir Popović, dekan

Glavni i odgovorni urednik:

Prof. dr Milan Lečić

Odobreno za štampu odlukom Dekana Mašinskog fakulteta u
Beogradu br. 22/2022 od 1.9.2022.g.

Tiraž: 200 primeraka

ISBN 978-86-6060-064-8

Štampa:

PLANETA – print
Ruzveltova 10, Beograd
tel/fax: (011) 3088 129

*Zabranjeno preštampavanje i fotokopiranje.
Sva prava zadržava izdavač i autori*

PREDGOVOR

Udžbenik koji je prethodio ovoj *Zbirci zadataka* (primera) imao je za cilj da studentima Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu olakša spremanje i polaganje ispita iz predmeta *Softverski alati u dizajnu* a naročito onima koji ranije nisu imali priliku da steknu osnovna znanja o načinima korišćenja softverskih alata u projektovanju i analizi struktura različitih namena.

Zbirka rešenih zadataka (primera) je rezultat ideje autora da se čitaoci upoznaju sa metodologijom, osnovnim principima i najvažnijim alatima softvera za rešavanje dela problema sa kojima se u svakodnevnom radu susreću inženjeri.

Detaljna uputstva i instrukcije za korišćenje osnovnih alati slušaoci dobijaju na kursu *Softverski alati u dizajnu*. Znanja i iskustva stečena na ovom kursu, kao nadogradnja na prethodno stečena znanja iz fundamentalnih predmeta na Mašinskom fakultetu, predstavljaju preduslov za uspešno razmatranje ovde predstavljenih primera koji su proistekli iz rešavanja praktičnih problema u mašinskoj industriji, a koji su – sa druge strane – najbliži oblasti mašinstva koja se izučava na katedri za *Opšte mašinske konstrukcije*.

Modeliranje geometrije delova i sklopova za koje se u *ANSYS*-u analiziraju naponska i deformacijska stanja strukture, može da se uradi u bilo kojem sličnom softverskom paketu iste namene. *ANSYS*, kao softver koji se koristi za analizu stanja i ponašanja strukture je odabran jer je najintuitivniji za korisnika (a naročito početnika u primeni metode konačnih elemenata) i poznat je kao vodeći za ovu namenu.

U prvom delu kursa *Softverski alati u dizajnu* studenti ovladavaju softverskim paketom *CATIA* koji je prvenstveno razvijan za modeliranje geometrije - stoga su svi primeri prvo modelirani u *CATIA*-i, sačuvani kao *.stp* fajl, a potom uvezeni u *ANSYS* gde se dalje vrši njihova strukturalna analiza.

Naša preporuka je da se svaki geometrijski fajl čuva u *.stp* formatu i kao takav učita u *ANSYS*. Prilikom instalacije je moguće podesiti parametre tako da *ANSYS* može da učita i izvorne fajlove iz pojedinih softvera za modeliranje geometrije kao što su *CATIA*, *SolidWorks*, *PTC CREO* i dr.

U zbirci su obrađeni primeri koji se isključivo odnose na strukturalnu analizu, tj. određivanje raspodele napona i deformacija. U ovim primerima se za strukturalnu analizu koristi modul *Static Structural* baziran na metodi konačnih elemenata.

Važno je napomenuti da rezultati proračuna prvenstveno zavise od postavljenih graničnih uslova i stoga je potrebno verifikovati svaki numerički model. Pored toga, veliki uticaj na tačnost rezultata ima i kvalitet definisane

mreže konačnih elemenata. Ako je mreža veoma gruba u određenim zonama, korisnik se ne može pouzdati u vrednosti dobijenih naponskih stanja u njima. Iskustvo u pravilnom postavljanju graničnih uslova i definisanju proračunske mreže stiče se kroz rad na konkretnim inženjerskim zadacima - praktičnim radom stiče se rutina za pravilno definisanje numeričkog modela koji će valjano simulirati realno stanje i ponašanje neke konstrukcije i obezbediti verodostojne rezultate.

Primeri numeričkih proračuna stanja i ponašanja strukture metodom konačnih elemenata su urađeni u verziji 16.2 softverskog paketa *ANSYS*, a modeliranje delova je rađeno u verziji V5.R21 softverskog paketa *CATIA*.

Autori duguju veliku zahvalnost recenzentima ovog izdanja, prof. dr Milosavu Ognjanoviću i prof. dr Božidaru Rosiću.

Unapred se zahvaljujemo svim korisnicima zbirke koji će svojim dobronamernim sugestijama doprineti da sledeće izdanje bude bolje.

Beograd, 2022.g.

Autori

SADRŽAJ

Predgovor	I
Sadržaj	III
Primer 1 - postavka zadatka	1
Primer 1 - rešenje	2
Primer 2 - postavka zadatka	49
Primer 2 - rešenje	51
Primer 3 - postavka zadatka	104
Primer 3 - rešenje	106
Primer 4 - postavka zadatka	168
Primer 4 - rešenje	170
Primer 5 - postavka zadatka	248
Primer 5 - rešenje	251
Primer 6 - postavka zadatka	361
Primer 6 - rešenje	364
Primer 7 - postavka zadatka	438
Primer 7 - rešenje	440
Primer 8 - postavka zadatka	478
Primer 8 - rešenje	479
Literatura	

Primer 5 (postavka zadatka)

Minijaturna spojnica sa elastomerom (slika 5.0) koristi se za prenošenje obrnog momenta od 2 Nm između dva vratila prečnika 8 mm pri broju obrtaja od 10000 u minuti.

Spojnica se sastoji od 2 aluminijumske polutke sa kandžama. Svaka polutka je prosečena. Pritezanjem zavrtnja M3, silom od 1600 N, ostvaruje se frikcioni spoj polutke spojnice i vratila od opšteg konstrukcionog čelika. Između polutki, tj. kandži, postavljen je polimerni deo koji doprinosi elastičnosti spojnice i omogućava ublažavanje udara.

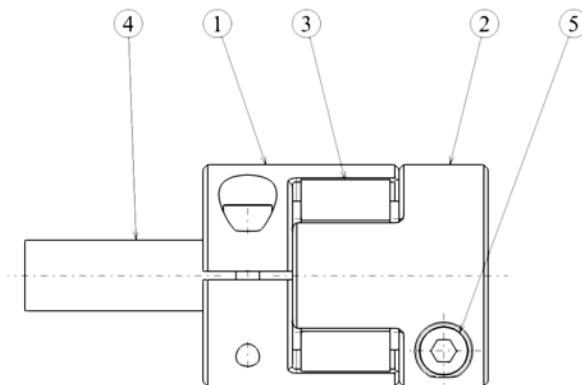
Numeričkom metodom konačnih elemenata proveriti nosivost spojnice, tj. da li je moguće preneti obrtni moment od 2 Nm sa ovom spojnicom ako je koeficijent trenja aluminijuma i čelika 0,3.

Simulirati zavrtnajsku vezu i odrediti naponsko i deformacijsko stanje polutke spojnice.

Koeficijent trenja u navojnom spoju je 0,18, dok je koeficijent trenja između elastomera i aluminijumskih kandži 0,1.

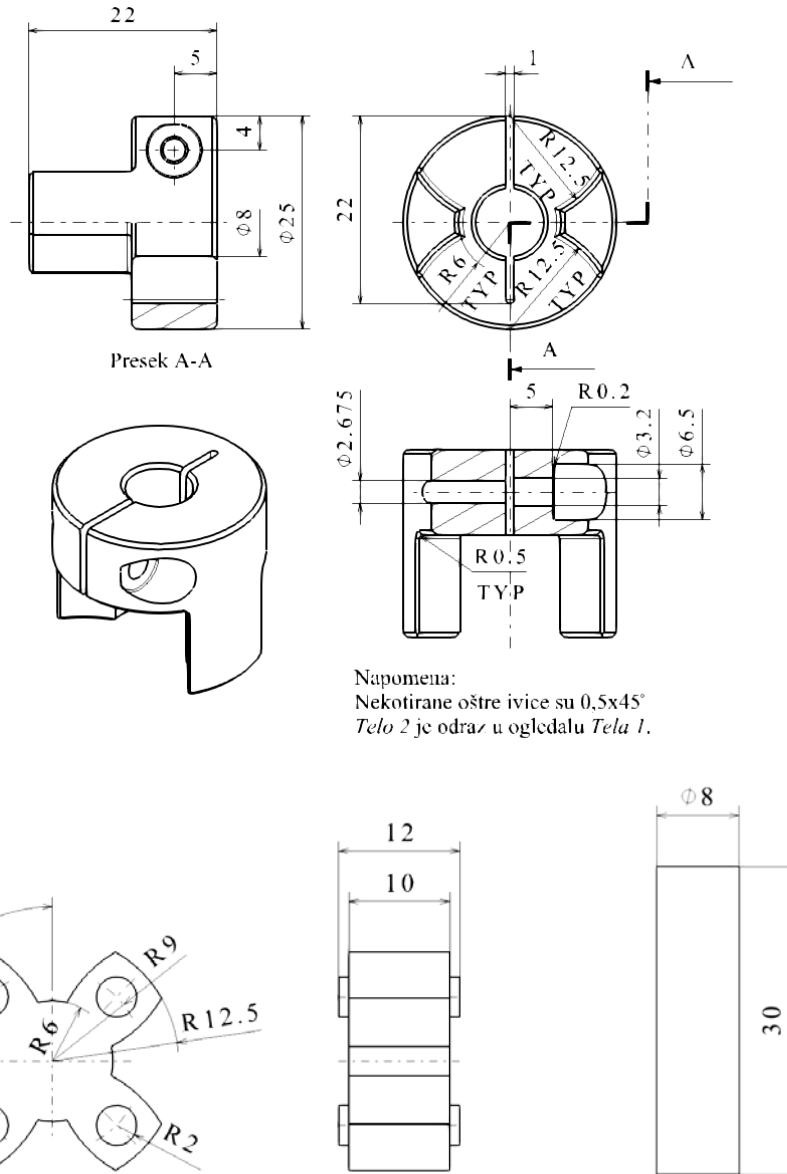
Za materijal polutke usvojiti ponuđeni aluminijum, za materijal vratila ponuđeni konstrukcioni čelik, a za materijal elastomera ponuđeni polimer iz baze podataka softverskog paketa ANSYS.

Usvojiti da je zavrtnaj takođe od konstrukcijskog čelika kao i vratilo, jer njegova nosivost nije predmet ove analize.



Slika 5.0
(nastavak na sledećoj stranici)

Sklop elastične spojnice
(1. Telo 1, 2. Telo 2, 3. Elastomer, 4. Vratilo,
5. Zavrtnj ISO 4762 M3x12)



Slika 5.0
 (nastavak sa prethodne stranice)

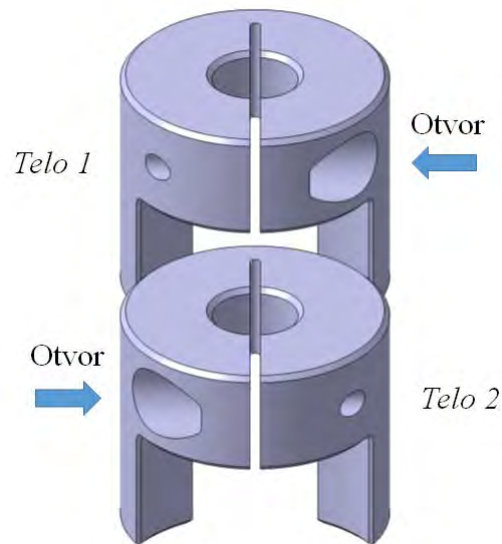
Dimenzije pojedinačnih delova

REŠENJE

Rešavanje zadatka se realizuje korišćenjem softverskih paketa *CATIA* i *ANSYS* kroz sledeće korake.

Korak 1 – Modeliranje geometrije

Obzirom da ovaj sklop sadrži dva dela koja su jedan drugom odraz u ogledalu (slika 5.1), u cilju uštede u vremenu, napravljen je „Master deo“, koji će se potom u nekoliko koraka iskoristiti za dobijanje oba dela.

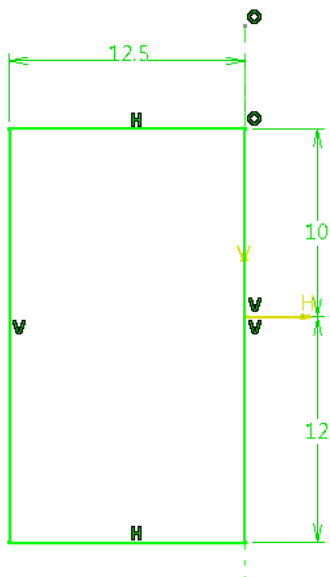


Slika 5.1

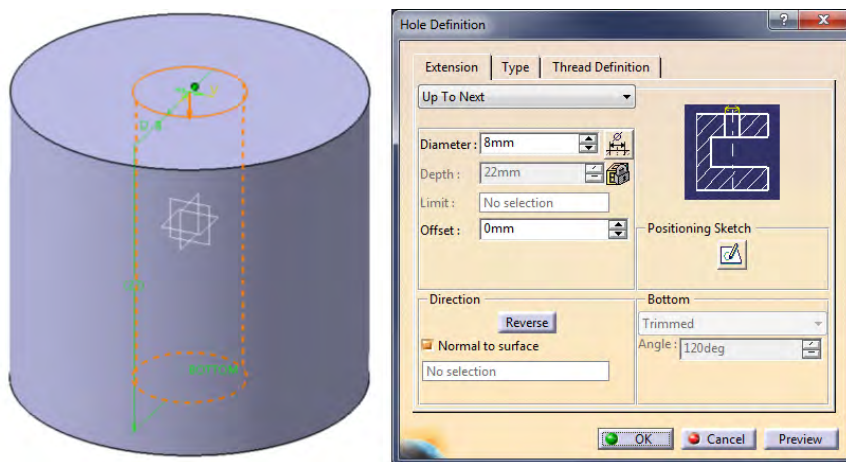
Prema postupku opisanom u prethodnom primeru, pokrenut je modul *Assembly Design*, preimenovan sklop *Product 1* u *El. Spojnica*, a potom ubačen novi deo u sklop. Deo je nazvan *Telo 1*. Odmah je sačuvan ovaj sklop dvoklikom na *El. Spojnica*, te izborom opcije *Save* i navođenjem putanje foldera u kom će biti sačuvan.

U grani *Telo 1*, dvokliknuto je na *PartBody*, kako bi se aktivirao modul *Part Design*. Potom je u ravni *yz* formirana skica sa slike 5.2.

Pomoću komande *Shaft*, rotacijom skiciranog profila oko ose date u samoj skici, a koja se poklapa sa V osom, formiran je cilindar. Zatim pomoću komande *Hole*, formiran je otvor prečnika 8 mm, kroz sredinu cilindra (slika 5.3).

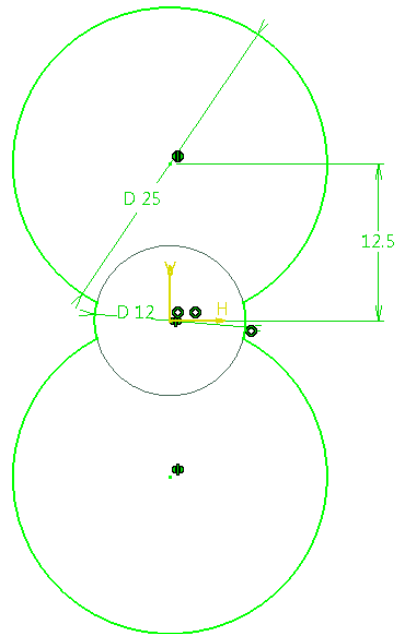


Slika 5.2



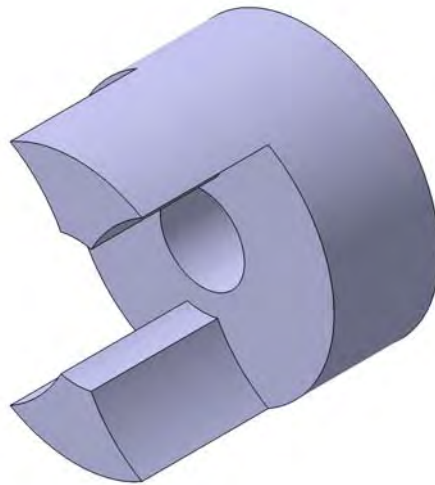
Slika 5.3

U xy ravni formirana je skica sa slike 5.4, a potom je iskorišćena za komandu *Pocket*, kojom se dobija model sa slike 5.5.



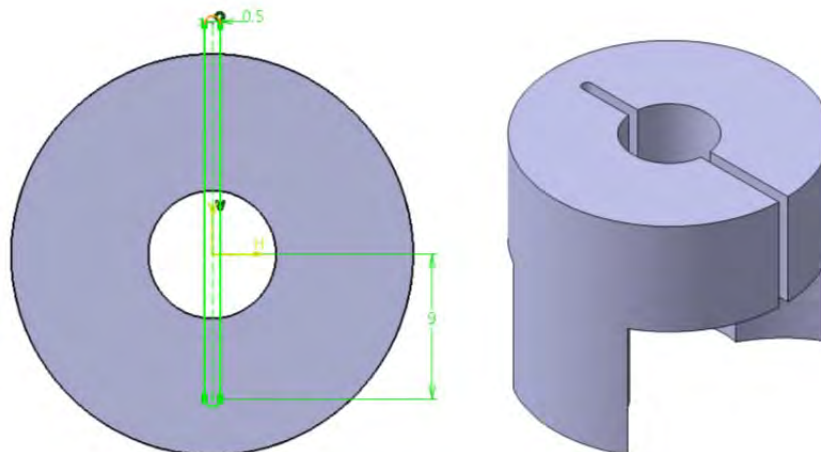
Slika 5.4

Odsecanje materijala komandom *Pocket* treba da bude u smeru negativne z -ose.



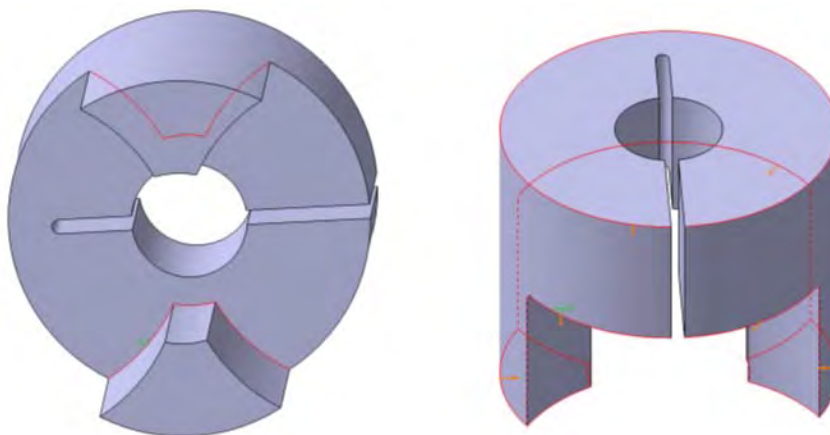
Slika 5.5

U ravni xy formirana je skica sa slike 5.6, pa ponovo komandom *Pocket* urađen žleb, ali ovoga puta u suprotnom smeru (pozitivna z -osa).



Slika 5.6

Radijusom 0,5 mm zaobljena je ivica prikazana na slici 5.7 lijevo i uz to su oborene ivice prikazane na slici 5.7 desno sa $0,5 \times 45^\circ$.

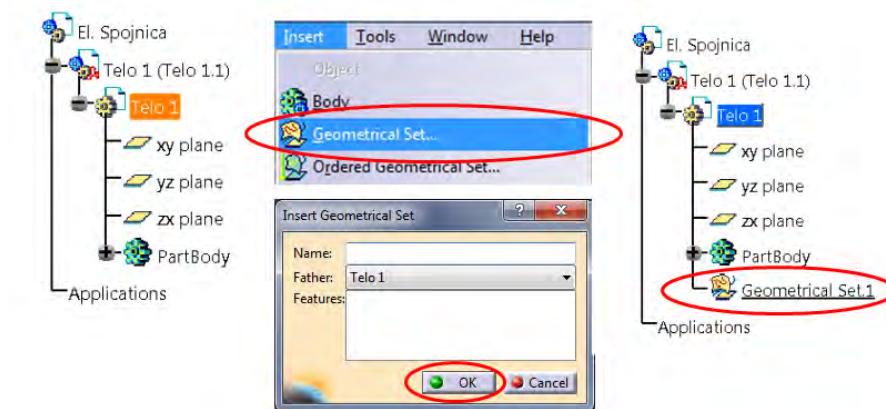


Slika 5.7

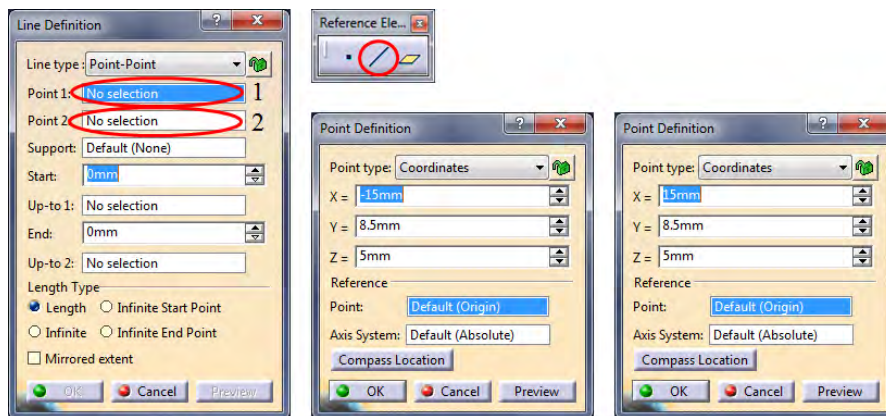
U cilju izrade master fajla, potrebno je formirati liniju koja će se kasnije za svaki od delova koristiti pri formiranju otvora za zavrtnanj. Konstrukcione elemente, kao što je u ovom slučaju linija, prikladno je smestiti u posebnu granu

stabla, koja se naziva Geometrijski set (*Geometrical Set*). Kako bi se to uradilo, najpre treba formirati tu granu stabla. Ovo se izvodi dvoklikom na *Telo 1* (slika 5.8), praćenjem putanje *Insert/Geometrical Set...*, a zatim, kada se otvori radni prozor ove komande, potvrđivanjem na OK. U stablu se pojavljuje grana *Geometrical Set.1*.

Obratiti pažnju da je grana *Geometrical Set.1* podvučena, što znači da će naredna komanda biti smeštena u tu granu. Za sada ostaviti tako, a kasnije će biti opisan povratak na granu *PartBody*.



Slika 5.8



Slika 5.9

Formiranje linije se vrši pomoću komande *Line* (slika 5.9). Otvaranjem radnog prozora *Line Definition*, izabran je desni klik na polje *Point 1* (1), a zatim u padajućem meniju odabrana opcija *Create Point*. Sa ovim se otvara novi radni prozor *Point Definition*. U njemu je potrebno preko koordinata definisati tačku, koja predstavlja početnu tačku linije. Istim postupkom, samo unošenjem pozitivne vrednosti za koordinatu x , formira se i krajnja tačka duži (*Point 2*).

Potvrdom na OK u radnom prozoru *Line Definition*, linija je formirana i možemo se vratiti u granu *PartBody*. Povratak se vrši desnim klikom na granu *PartBody*, a zatim izborom *Define in Work Object* iz padajućeg menija koji se otvara. Grana *PartBody* biva podvučena.

Ovim je završeno modeliranje master fajla, iz kog ćemo formirati dva dela: *Telo 1* i *Telo 2*. S obzirom da se ovaj master fajl već zove *Telo 1*, potrebno je iskopirati ga i promeniti naziv u *Telo 2*.

Postupak je sledeći:

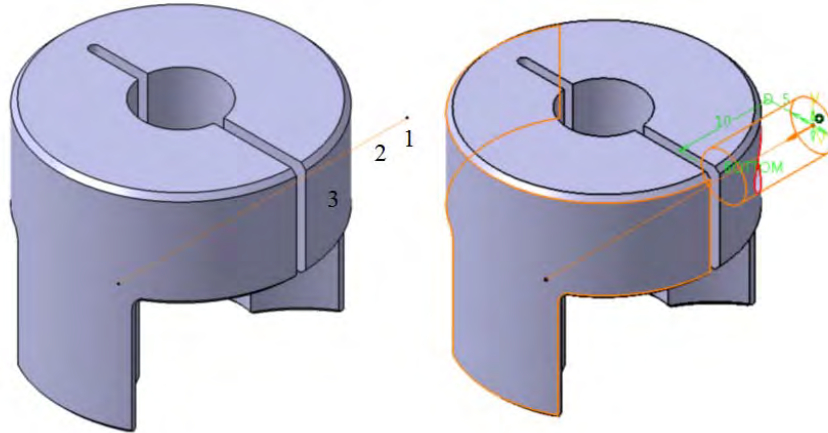
1. Isključiti CATIA-u
2. Otvoriti folder u kom se nalaze fajlovi *El. Spojnica* i *Telo 1*
3. Iskopirati fajl *Telo 1*
4. Kopiju preimenovati u *Telo 2*
5. Otvoriti fajl *Telo 2*
6. Kada se fajl otvori, u stablu obeležiti *Telo 1*, izabrati desni klik */Properties/Product* i ovde takođe promeniti naziv u *Telo 2*.
7. Sačuvati i zatvoriti fajl

Sada je potrebno odraditi otvore za zavrtnje na oba fajla, koji jedan drugom predstavljaju sliku u ogledalu.

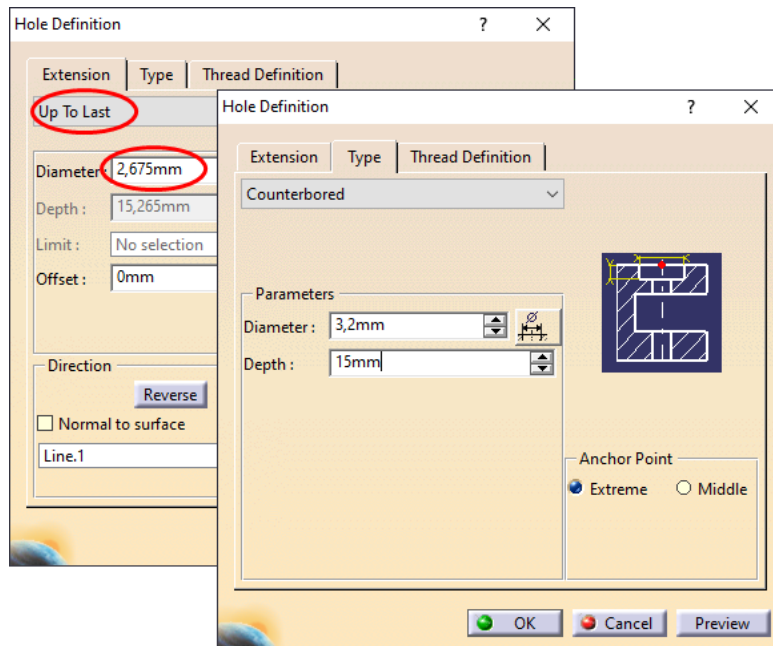
Po otvaranju fajla *Telo 1*, bira se komanda *Hole*, a potom selektuje najpre tačka (1), potom linija (2) i na kraju cilindrična površina modela (3) (slika 5.10). Unet je prečnik rupe $\varnothing 8$ i dubina 10 mm. Rupa je sa ravnim dnom.

Potom je formiran još jedan otvor pomoću komande *Hole*. Takođe se selektuje prvo tačka, zatim linija i na kraju cilindrična površ. Potrebno je usmeriti strelicu rupe u željenom smeru (ka modelu). U prvom prozoru komande definiše se dubina (*Up to last*) i srednji prečnik navoja (2,675 mm), a u drugom prozoru upuštena rupa (*Counterboard*, 3,2 mm i 15 mm) (slika 5.11).

Napomena: CATIA podržava formiranje navoja (prozor *Thread Definition*, komande *Hole*), ali s obzirom da se pravi model za proračune u ANSYS-u, neće se definisati navoj u bukvalnom smislu. Naime, za ove proračune, **prečnik navoja je neophodno aproksimirati srednjim prečnikom**, kako u rupi, tako i na stablu zavrtnja.

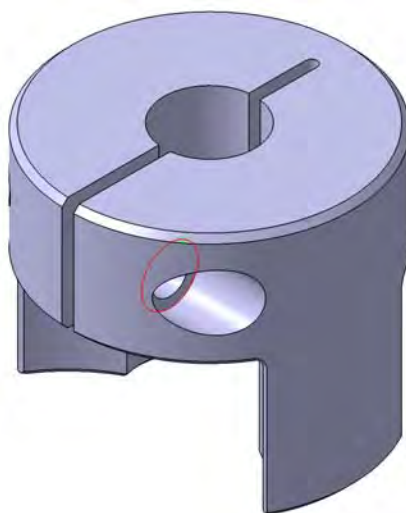


Slika 5.10



Slika 5.11

Ivica radijusa je zaobljena sa 0,2 mm u korenu rupe $\text{Ø}3.2$ (slika 5.12), čime je *Telo 1* kompletno.



Slika 5.12

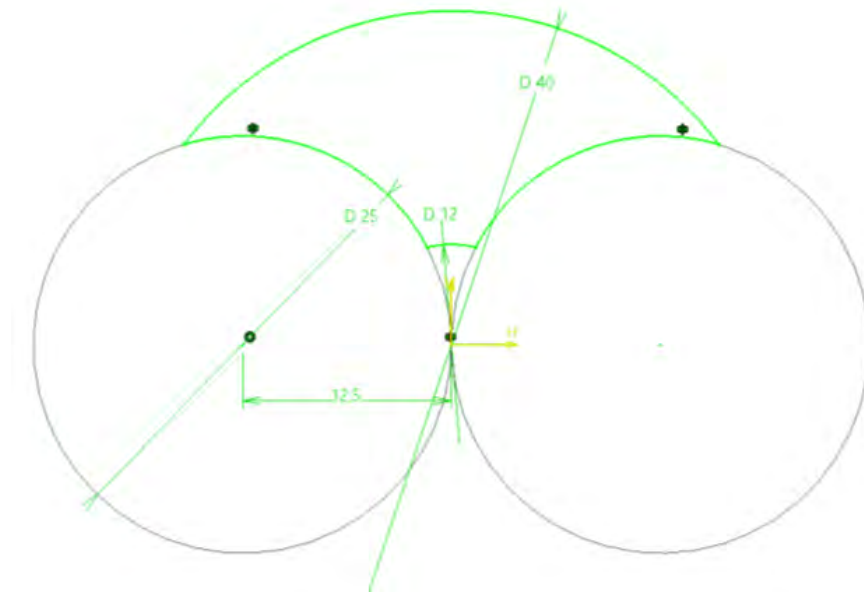
Sačuvati deo *Telo 1*, a potom na isti način formirati otvor na delu *Telo 2*, sa jedinom razlikom da otvor polazi sa suprotne strane konstruktivne linije.

Oba dela su već prikazana na slici 5.1.

Ponovo se otvara sklop *El. Spojnica*, u kom se i dalje nalazi samo deo *Telo 1*. Pomoću komande *Existing Component* i klikom na sklop *El. Spojnica*, ubacuje se deo *Telo 2*, čije se pozicioniranje naknadno definiše.

Radi lakše manipulacije pri izradi preostalih delova delovi *Telo 1* i *Telo 2* se mogu sakriti.

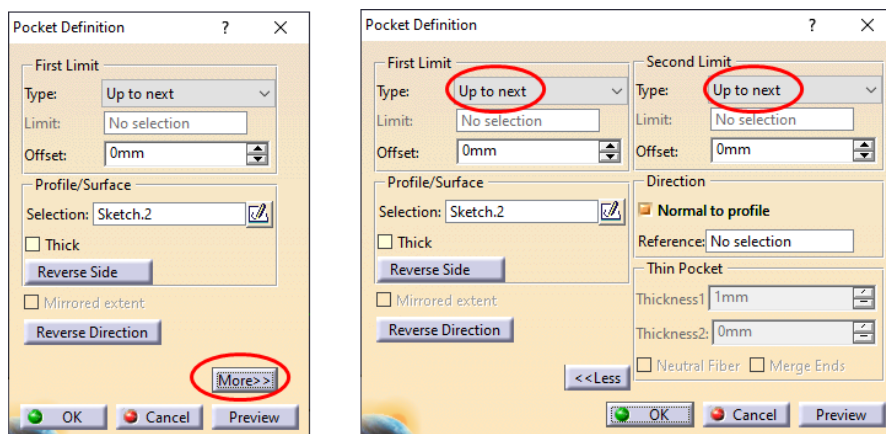
Ubacuje se novi deo u sklop i dodeljuje mu se naziv *Elastomer*. U ravni *xy* formira se krug prečnika $\text{Ø}25$ sa centrom u koordinatnom početku, zatim mu se pomoću komande *Pad* zadaje debljina 5 mm u oba smera (*Mirrored Extent*). Ponovo se bira ravan *xy* i u njoj formira skica (slika 5.13).



Slika 5.13

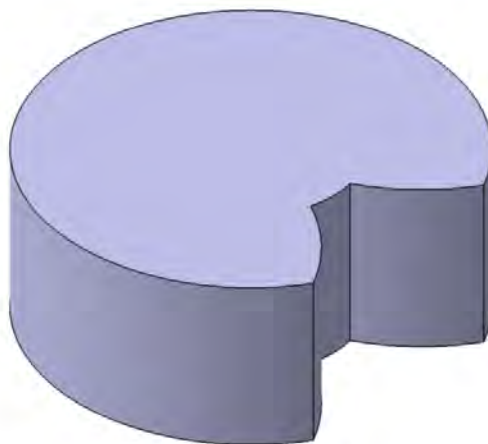
Ova skica se koristi za izradu žleba pomoću opcije *Pocket*.

Za obe granice žleba bira se opcija *Up to next* (slika 5.14).



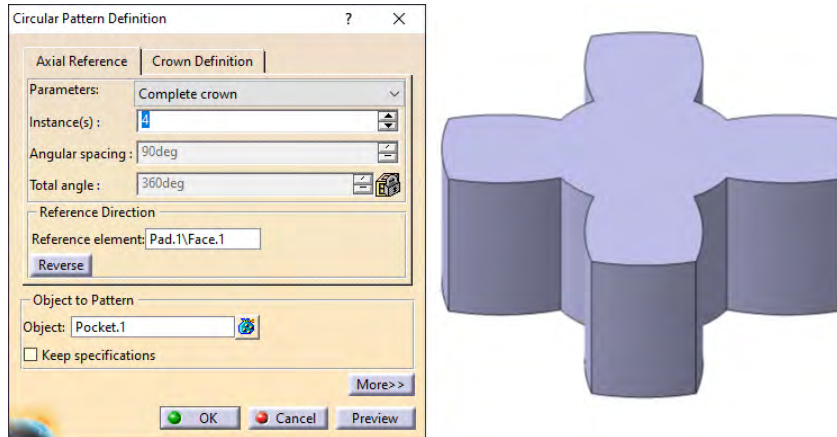
Slika 5.14

Nakon ove opcije, model izgleda kao na slici 5.15.



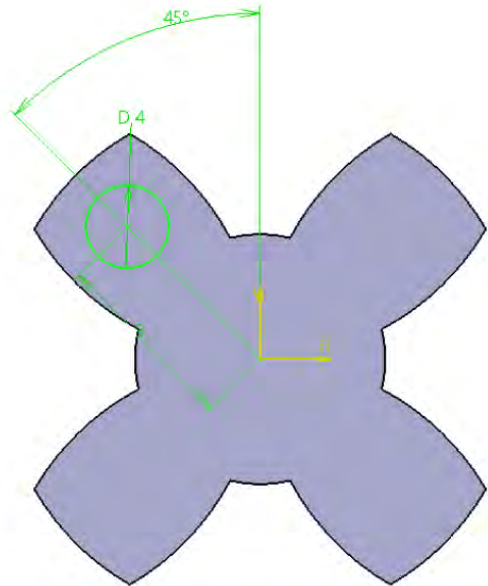
Slika 5.15

Pomoću komande *Circular Pattern* umnožava se žleb četiri puta, tj. formiraju se četiri žleba pod uglom od 90° jedan u odnosu na drugi. Ovo je najlakše izvesti izborom opcije *Complete crown* u odeljku *Parameters* komande *Circular Pattern* slici 5.16.



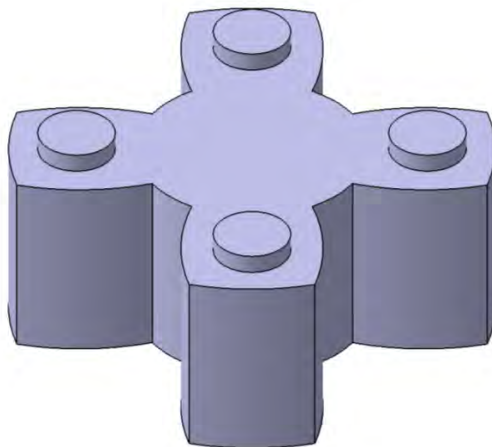
Slika 5.16

U ravni xy formirana je skica prema slici 5.17. Može se uočiti da se krug sa skice poklapa sa „zubom“ *Elastomera*.



Slika 5.17

Pomoću komande *Pad*, upisujući dužinu 6 mm (*Mirrored Extent*), formiran je distancer na zubu, koji se pomoću opcije *Circular Pattern* umnožava 4 puta. Finalni oblik dela dat je na slici 5.18.



Slika 5.18

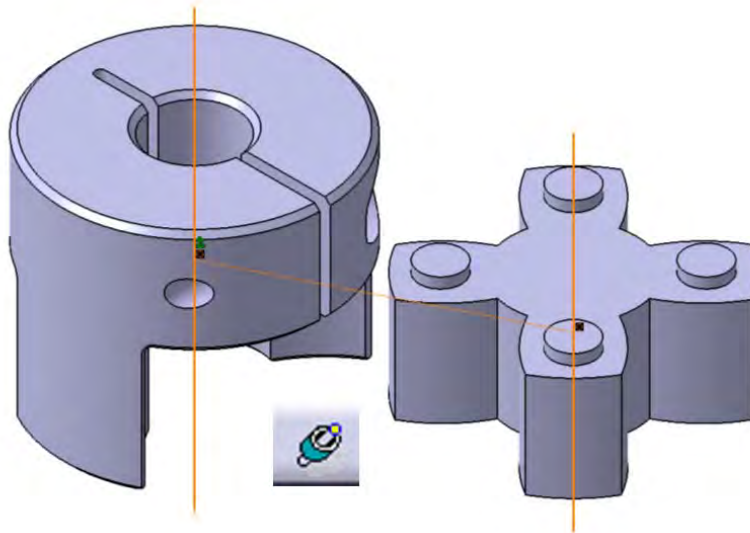
Dvoklikom na ime sklopa u stablu (*El. Spojnica*), vraća se u modul *Assembly Design*. Unosi se novi deo i dodeljuje mu se naziv *Vratilo*. Dvoklikom na *PartBody* dela *Vratilo*, vraća se u *Part Design*. Zatim je u ravni *xy* formiran krug prečnika 8 mm sa centrom u koordinatnom početku, a pomoću komande *Pad* mu je saopštena dužina 30 mm u smeru *z*-ose (slika 5.19).



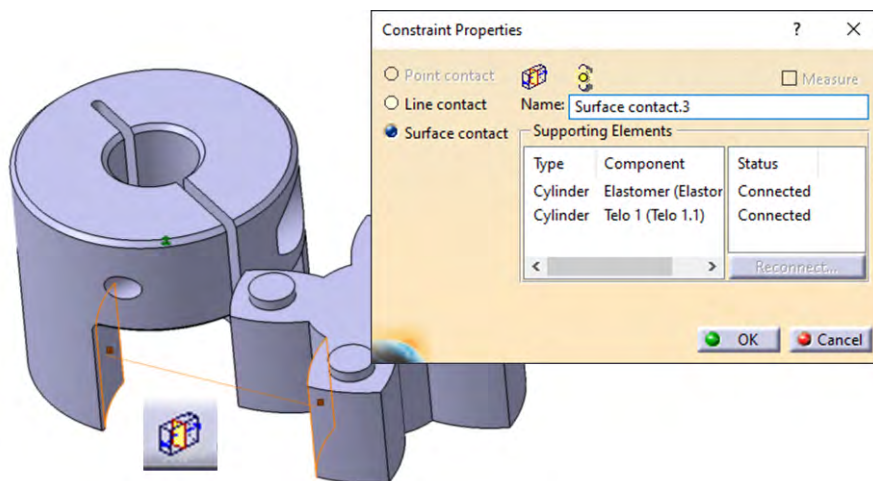
Slika 5.19

Potrebno je ponovo se vratiti u *Assembly Design* i otkriti sve prethodno sakrivene delove (desni klik na ime dela u stablu /*Hide/Show*). Zatim pomoću komande *Fix Component*, fiksirati deo *Telo 1*, a onda koristeći *Explode*, razmaknuti delove jedan od drugog radi lakšeg finalnog sklapanja. Klikom na komandu *Update*, samo fiksirani deo (*Telo 1*) se vraća u svoju prvobitnu poziciju, dok ostali delovi ostaju na pozicijama zauzetim nakon komande *Explode*.

Nakon toga povezuju se delovi. Sakriti sve osim delova *Telo 1* i *Elastomer*. Pomoću komande *Coincidence Constraint* definiše se saosnost pomenutih delova (slika 5.20), a pomoću komande *Surface Contact* poklapanje površina prikazanih na slici 5.21.

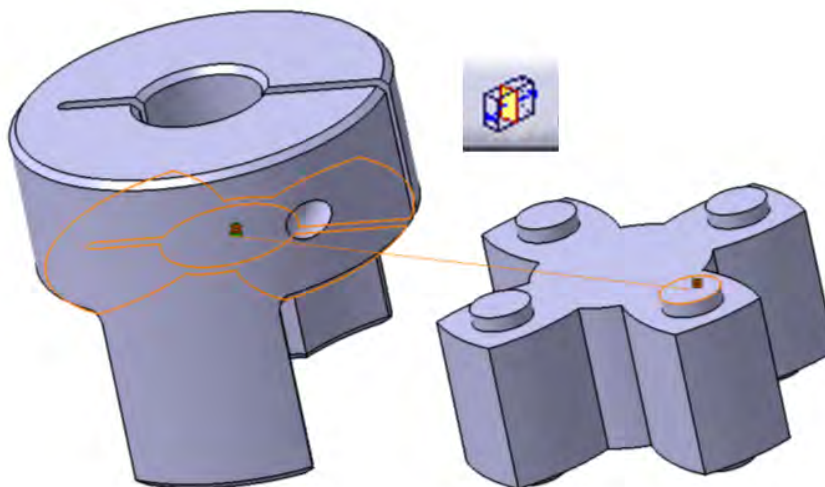


Slika 5.20



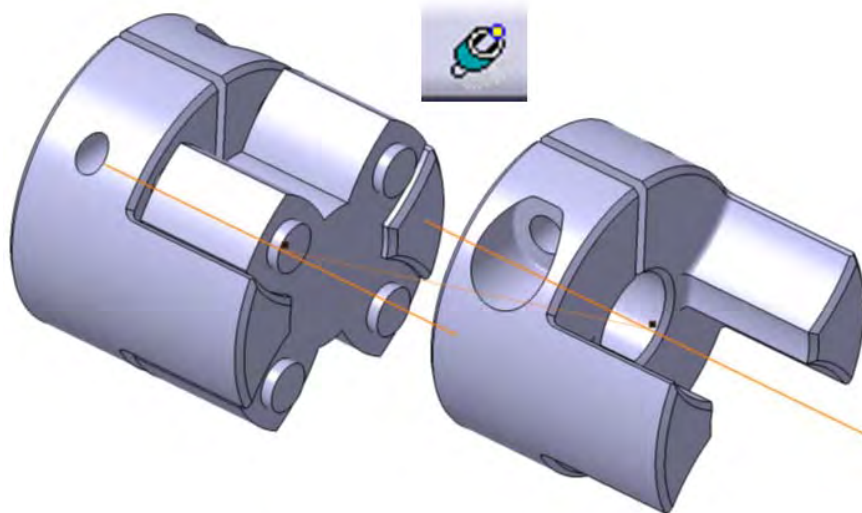
Slika 5.21

Pomoću iste komande povezuje se čeonu površina *Distancera* sa unutrašnjom čeonom površinom *Tela 1* (slika 5.22).

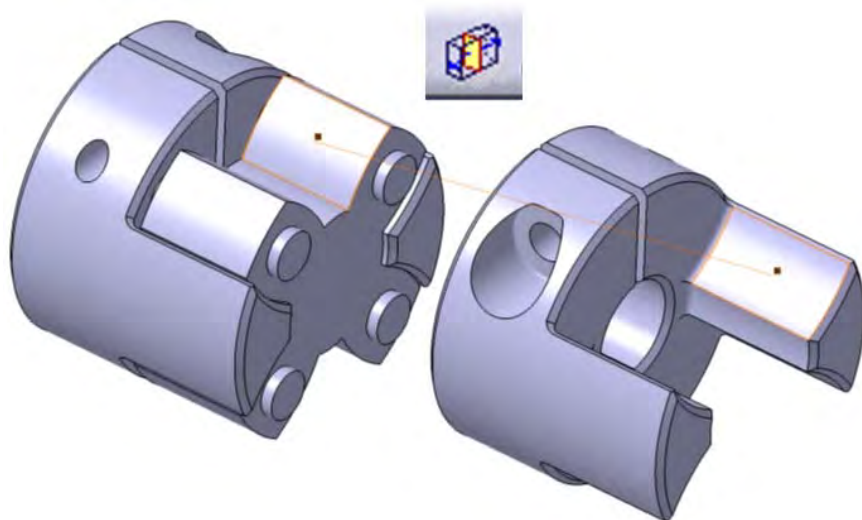


Slika 5.22

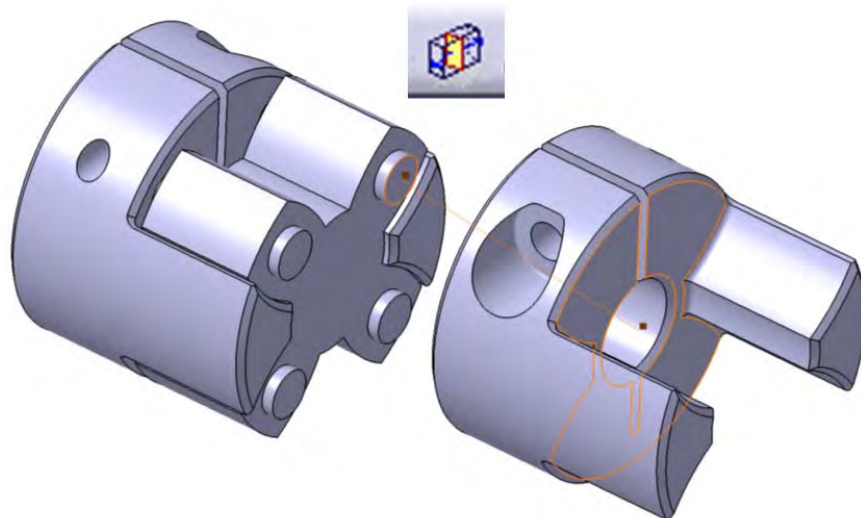
Sada se može otkriti i definisati u stablu *Telo 2* saosnost između cilindričnih površi Elastomera i Telo 2 (slika 5.23). Zatim dovesti u kontakt bokove zuba Elastomera i Telo 2 (slika 5.24) i konačno povezati čeonu površi pomenutih delova (slika 5.25).



Slika 5.23

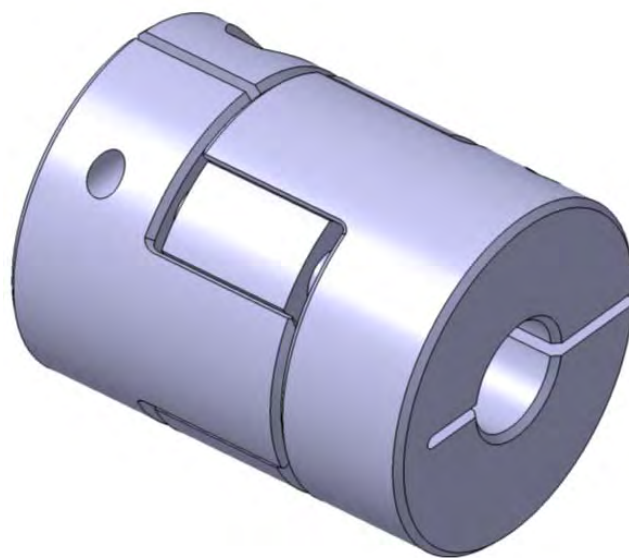


Slika 5.24



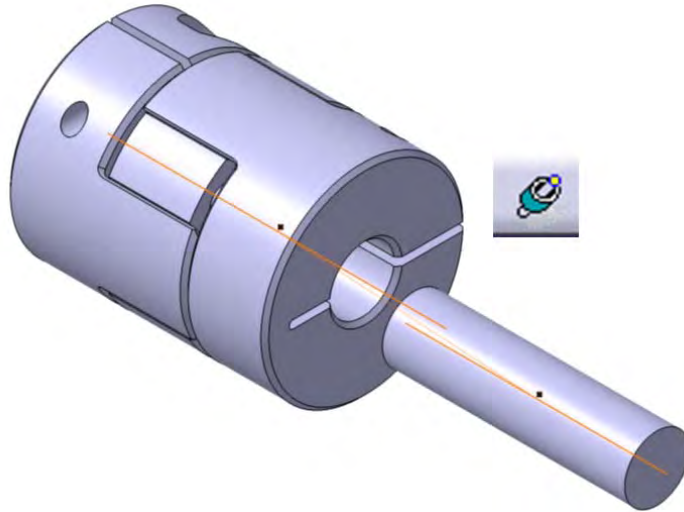
Slika 5.25

Sklop trenutno izgleda kao na slici 5.26.

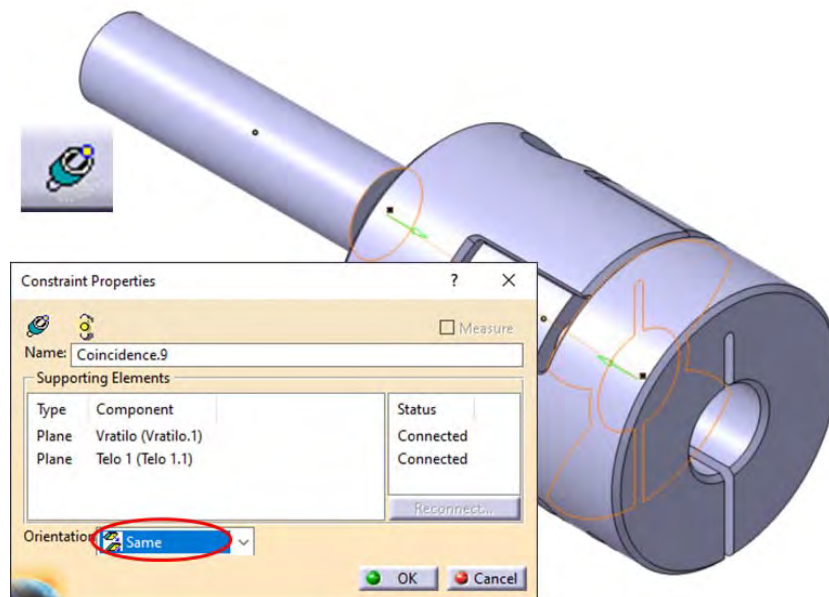


Slika 5.26

Otkriti poslednji deo u trenutnom sklopu, *Vratilo*, i definisati saosnost *Vratila* i *Tela 1* (slika 5.27)



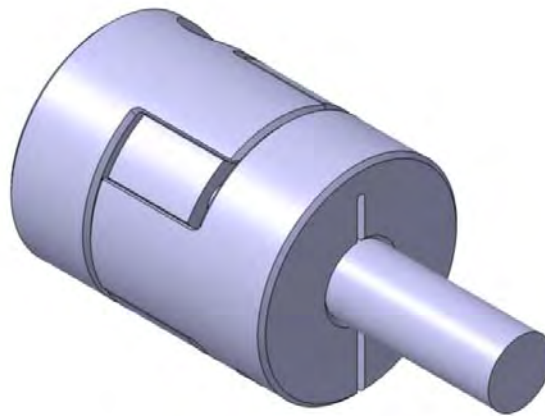
Slika 5.27



Slika 5.28

Zatim se definiše poklapanje čeonu površi *Vratila* i *Tela 1* (slika 5.28). S obzirom da se poklapanje vrši sa iste strane, koristi se *Coincidence Constraint*, pri čemu se u polju *Orientation* bira opcija *Same*.

Trenutni izgled sklopa prikazan je na slici 5.29. Potrebno je još iz kataloga standardnih delova uvesti odgovarajuće zavrtnje kojima se pritežu polutke spojnice (*Telo 1* i *Telo 2*) i korigovati njihove prečnike navoja na srednji prečnik $d_s=2,675$ mm.



Slika 5.29

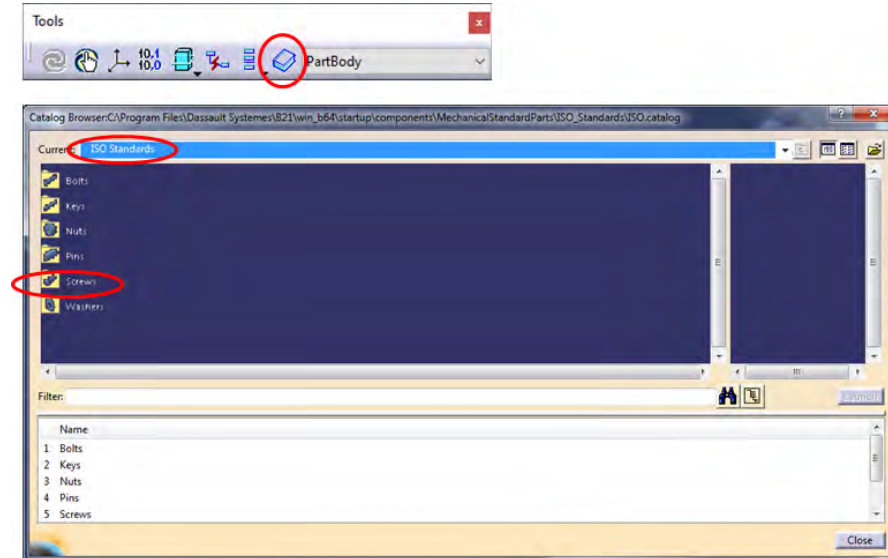
Oznake zavrtnja koji se uvode u sklop su
ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD CAP.

Klikom na komandu *Catalog Browser*, otvara se radni prozor sa slike 5.30. Iz padajućeg menija odabran je *ISO Standards*, a zatim se dvoklikne na ikonicu *Screws*.

Otvaranjem podgrupe *Screws*, bira se (dvoklikom):

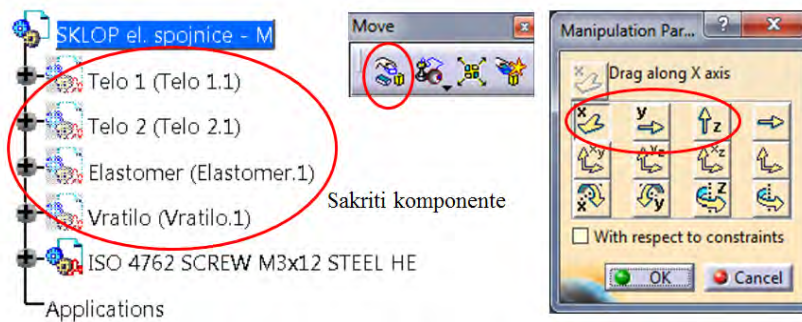
ISO_4762_HEXAGON_SOCKET_HEAD_CAP_SCREW,

a potom se u ovoj grupi odabere zavrtanj dimenzije M3x12. Dvoklikom, on se automatski pojavljuje u stablu, zajedno sa *Catalog* prozorom, na kom treba potvrditi sa OK.



Slika 5.30

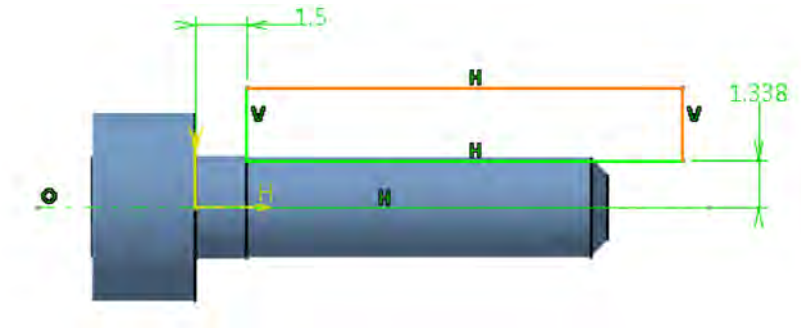
Ukoliko je zavrtanj preklapljen drugim delovima sklopa, pomoću komande *Manipulation* može se izvući u vidno polje (slika 5.31). Najlakši način ja da se sakriju svi delovi u stablu osim zavrtanja, a zatim se on pomeri u prazan deo ekrana.



Slika 5.31

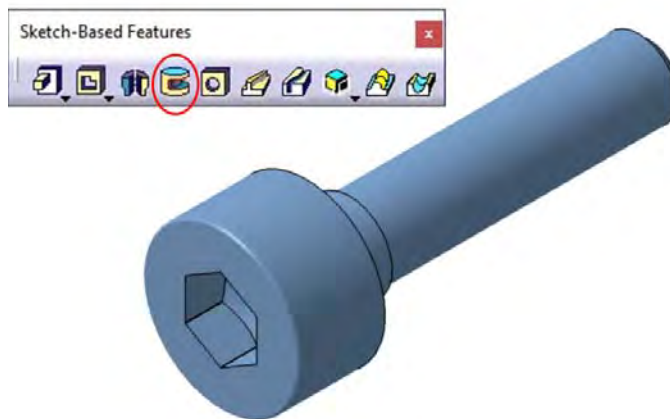
Sada se mogu otkriti skrivene komponente i sačuvati sklop.

Kako bi se korigovao prečnik zavrtnja, otvara se model u nezavisnom prozoru (desni klik na naziv zavrtnja u stablu, pa se iz padajućeg menija bira *ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD CAP.1 / Open in New Window*). Bira se ravan *zx* i skicira se profil kao na slici 5.32. Skicirana je i osa koja se poklapa sa osom *H*.



Slika 5.32

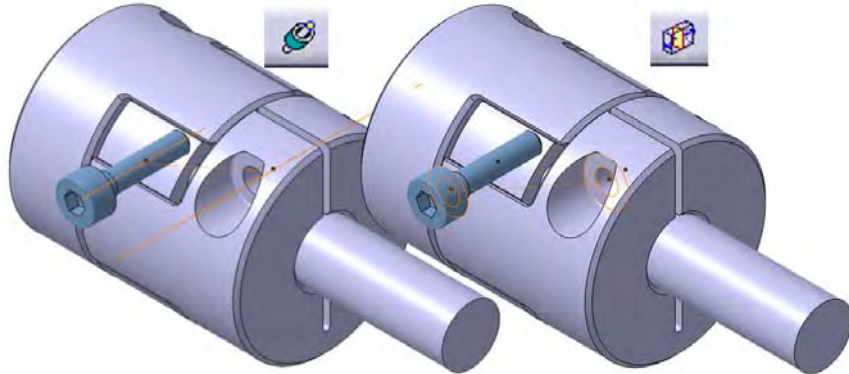
Sada se bira komanda *Groove* (slika 5.32a) kojom se smanjuje postojeći prečnik zavrtnja na vrednost srednjeg prečnika. Na istoj slici prikazan je i konačan model zavrtnja. Zavrtnanj je sačuvan, a prozor *Part Design* se zatvara.



Slika 5.32a

U prozoru *Assembly Design*, koji je i dalje otvoren, promene geometrije zavrtnja su već implementirane tako da je još neophodno definisati njegov položaj u sklopu. Definiše se saosnost tela zavrtnja i rupe za zavrtnanj, a potom

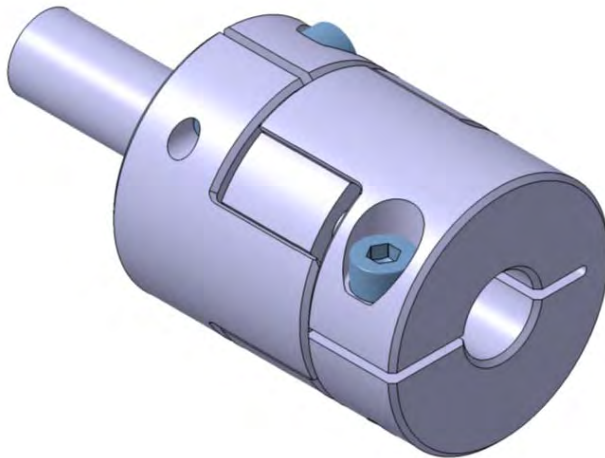
poklapanje čelone površine glave zavrtnja sa odgovarajućom površi rupe na *Telu 1* (slika 5.33).



Slika 5.33

Selektovanjem zavrtnja u stablu i izborom prečice na tastaturi CTRL+D (prečica za komandu *Fast Multi Instantiation*), umnožava se zavrtnj. Ovaj novi zavrtnj povezuje se na isti način kao prethodni, samo sa rupom na *Telu 2*.

Ovim je sklop elastične spojnice kompletiran (slika 5.33a).



Slika 5.33a

Korak 2 – Definisanje materijala

S obzirom da se u zadatku traži korišćenje metode konačnih elemenata za proračun nosivosti spojnice u daljem radu se koristi softverski paket ANSYS. Postupak usvajanja materijala je isti kao u prethodnim primerima. Za materijal vratila se traži konstrukcioni čelik iz ANSYS-ove baze podataka, što je *Structural Steel*, a on je automatski odabran kao osnovni. Za materijal polutki potrebno je odabrati *Aluminum Alloy*, a za materijal elastomera *Polythylene*. Na slici 5.34 prikazani su svi odabrani materijali iz datoteke *General Materials*.

Engineering Data Sources			
A	B	C	D
1	Data Source	Location	Description
2	★ Favorites		Quick access list and default items
3	General Materials		General use material samples for use in various analyses.
4	General Non-linear Materials		General use material samples for use in non-linear analyses.
5	Explicit Materials		Material samples for use in an explicit analysis.
6	Hyperelastic Materials		Material stress-strain data samples for curve fitting.
7	Magnetic B-H Curves		B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis.
8	Thermal Materials		Material samples specific for use in a thermal analysis.

Outline of General Materials				
A	B	C	E	
1	Contents of General Materials	Add	Description	
2	Material			
3	Air		General properties for air.	
4	Aluminum Alloy		General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.	
5	Concrete			
6	Copper Alloy			
7	Gray Cast Iron			
8	Magnesium Alloy			
9	Polyethylene			
10	Silicon Anisotropic			
11	Stainless Steel			
12	Structural Steel		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1	
13	Titanium Alloy			

Properties of Outline Row 4: Structural Steel		
A	B	C
1	Property	Unit
2	Density	7850 kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	
4	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05 C ⁻¹
5	Reference Temperature	22 C
6	Isotropic Elasticity	
7	Derive from	Young's Modulus and ...
8	Young's Modulus	2E+11 Pa
9	Poisson's Ratio	0.3
10	Bulk Modulus	1.6667E+11 Pa
11	Shear Modulus	7.6923E+10 Pa
12	Field Variables	
13	Temperature	Yes

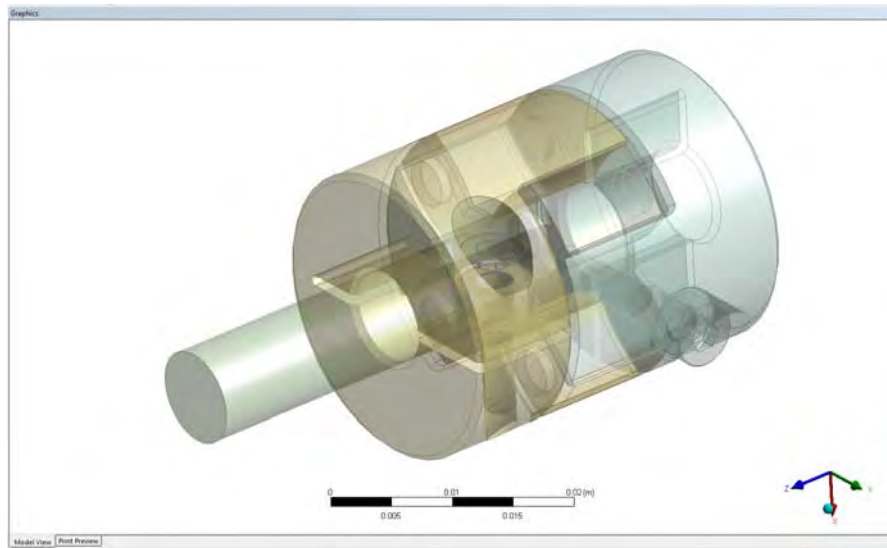
Slika 5.34
Odabrani materijali iz datoteke *General Materials*

Pojavljivanje ikonice u obliku knjige pored simbola žutog plusića znači da je taj materijal aktivan, tj. da se može odabrati i koristiti u daljem proračunu. U koraku 3 je prikazan postupak usvajanja konkretnog materijala, od ponuđenih aktiviranih, za učitani geometrijski model.

Korak 3 - Učitavanje geometrije

Učitavanje geometrije (.stp fajla dobijenog modeliranjem geometrije u softverskom paketu CATIA) u ANSYS vrši se na isti način kao u prehodnim primerima. Opcija *Simplify Topology* je aktivirana kako bi se olakšalo korišćenje modela, a u ovom primeru je od velikog značaja jer je za definisanje navojnog spoja potrebna isključivo jedna kompletna cilindrična površ.

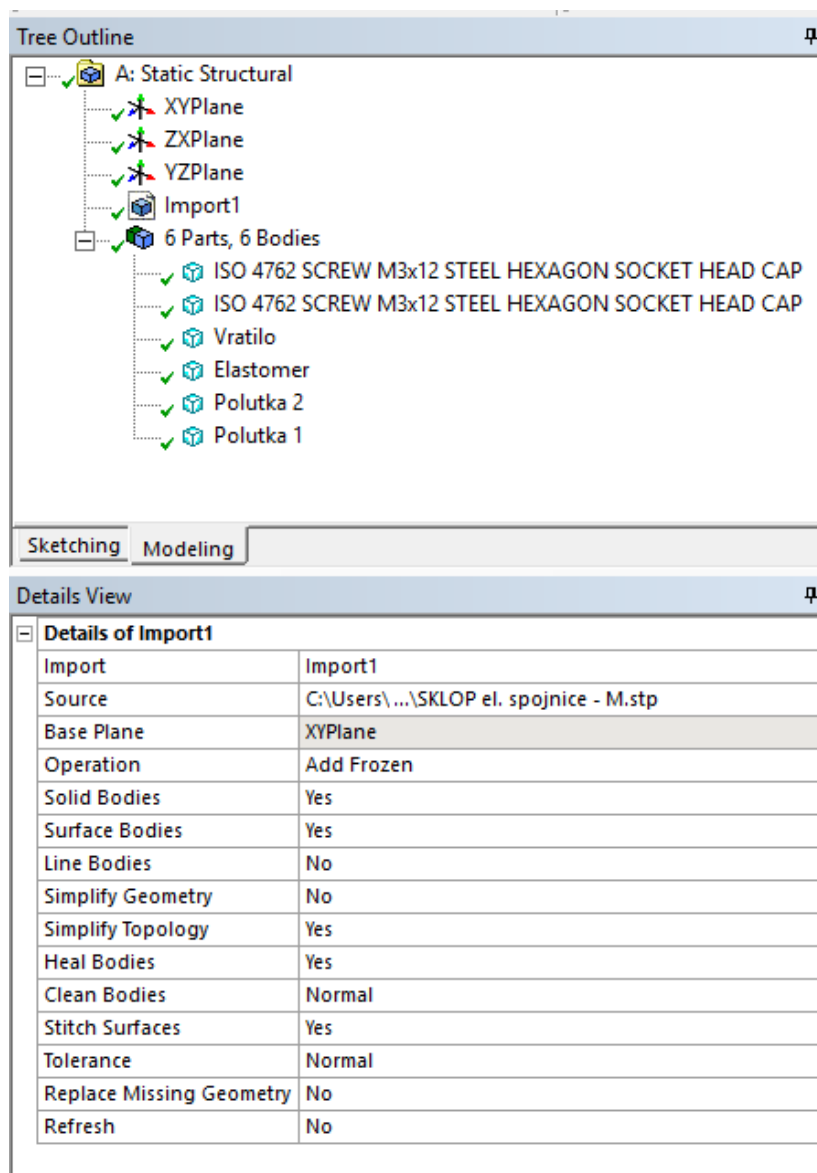
Klikom na ikonicu *Generate* softer učitava i generiše geometrijski skup tačaka iz prethodno selektovanog .stp fajla. Na kraju ovog koraka dobija se prikaz u glavnom prozoru koji odgovara slici 5.35. Pored polja *Import* dobija se pozitivni zeleni simbol koji ukazuje da je geometrija sada definisana.



Slika 5.35

Prikaz glavnog prozora u kome se vidi model spojnice

Ovime se učitava 6 delova, dve polutke (telo 1 i 2), elastomer, vratilo i 2 zavrtnja M3x12mm. Svi ovi delovi su izlistani u stablu u prozoru *Tree Outline* sa leve strane, slika 5.36.

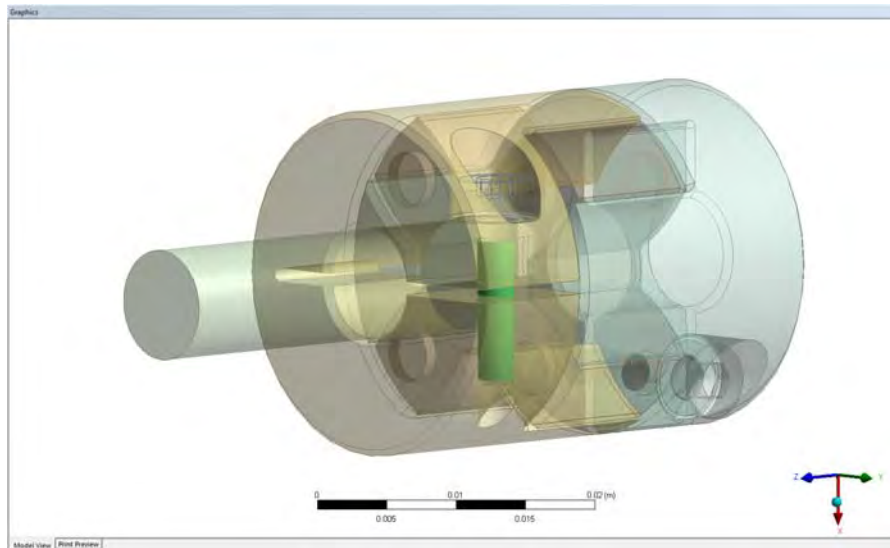


Slika 5.36

Prikaz prozora *Tree Outline* u kome se vide svi učitani delovi i prozor ispod *DetailsView* u kome su podešavanja

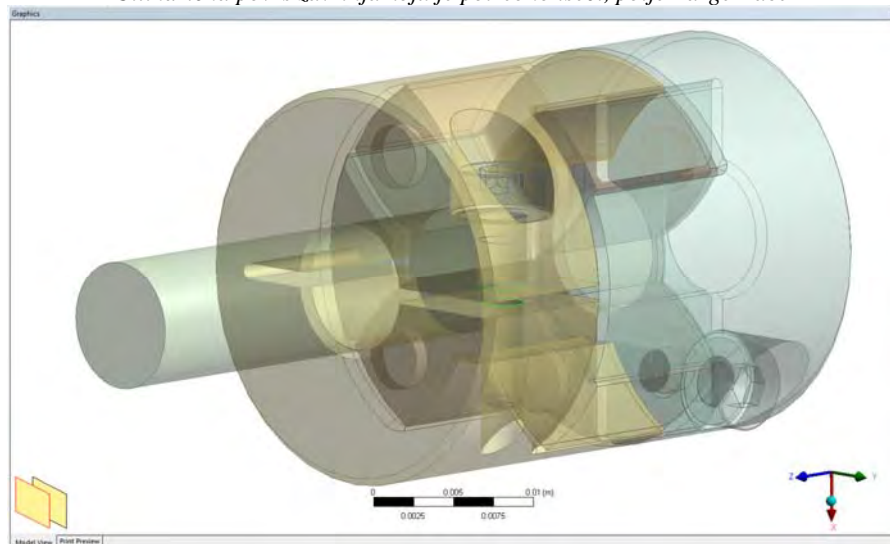
Opcijom *Face Split*, cilindar zavrtnja koji predstavlja navojni deo je isečen tako da se dobije cilindrična površ koja nema kontakt sa polutkom spojnice.

Za *Target Face* polje izabrana je cilindrična površ stabla, slika 5.37, a za *Tool Geometry* polje su odabrane kružnice sa kojima je prethodnu površ potrebno iseći, slika 5.38.



Slika 5.37

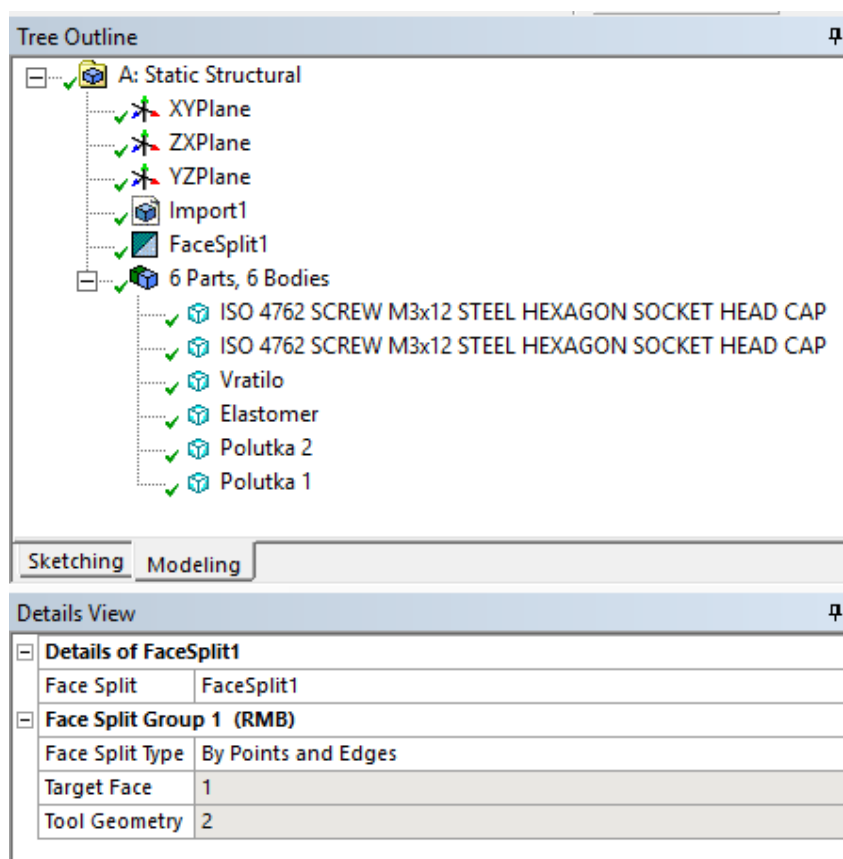
Cilindrična površ zavrtnja koju je potrebno iseći, polje *Target Face*



Slika 5.38

Kružnice kojima se iseca površ zavrtnja, polje *Tool Geometry*

Nakon klika na komandu *Generate*, dobija se presečena površ. Na slici 5.39 prikazana su podešavanja za komandu *Face Split* u prozoru *Details View*, zajedno sa prozorom *Tree Outline* u kome se vidi pozitivan znak pored opcije *Face Split* koji ukazuje da je alatka ispravno definisana.




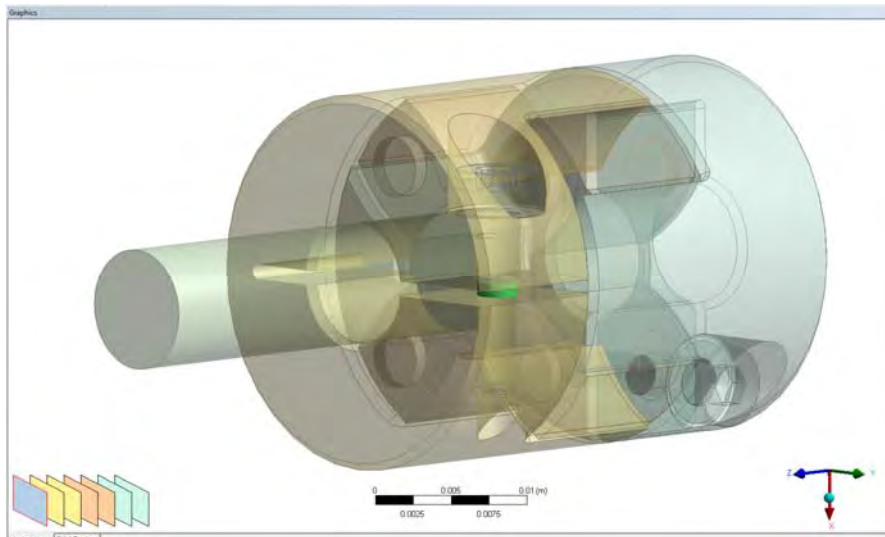
Slika 5.39

Podešavanja za opciju *Face Split* u prozoru *DetailsView* i izgled prozora *Tree Outline*

Dobijena cilindrična površ zavrtnja koja nije u kontaktu sa polutkom spojnice, površ koja se nalazi u prosečenom delu spojnice, prikazana je na slici 5.40. Ova površ je potrebna radi unošenja pritezanja zavrtnja u kasnijem delu pravljenja numeričkog modela.

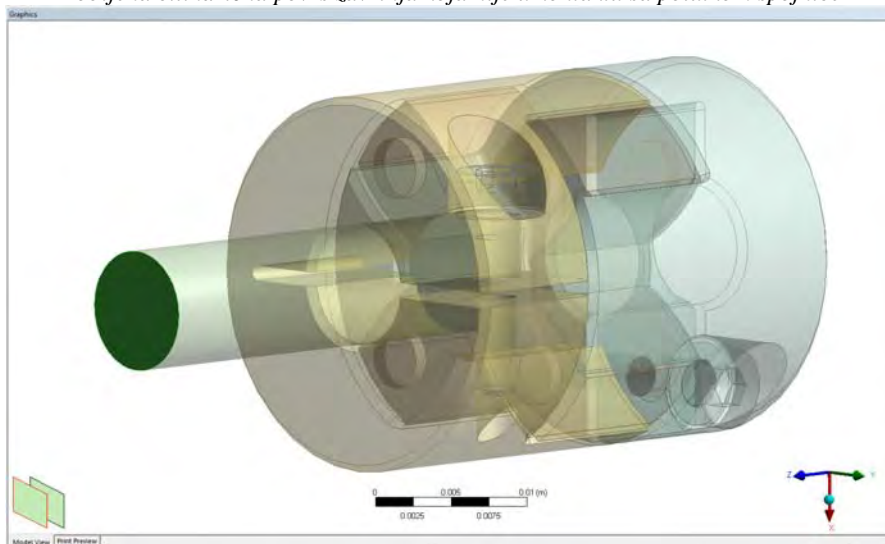
Na sličan način je isečena cilindrična površ vratila kako bi se dobila površ koja predstavlja rukavac za ležaj. Naime, prvo je postavljena nova ravan, opcijom

New Plane () , odabirom početka odsečenog dela vratila za polje *Base Face*, slika 5.41, i unošenjem vrednosti za koliko se ravan pomera u odnosu na odabranu ravnu površ vratila.



Slika 5.40

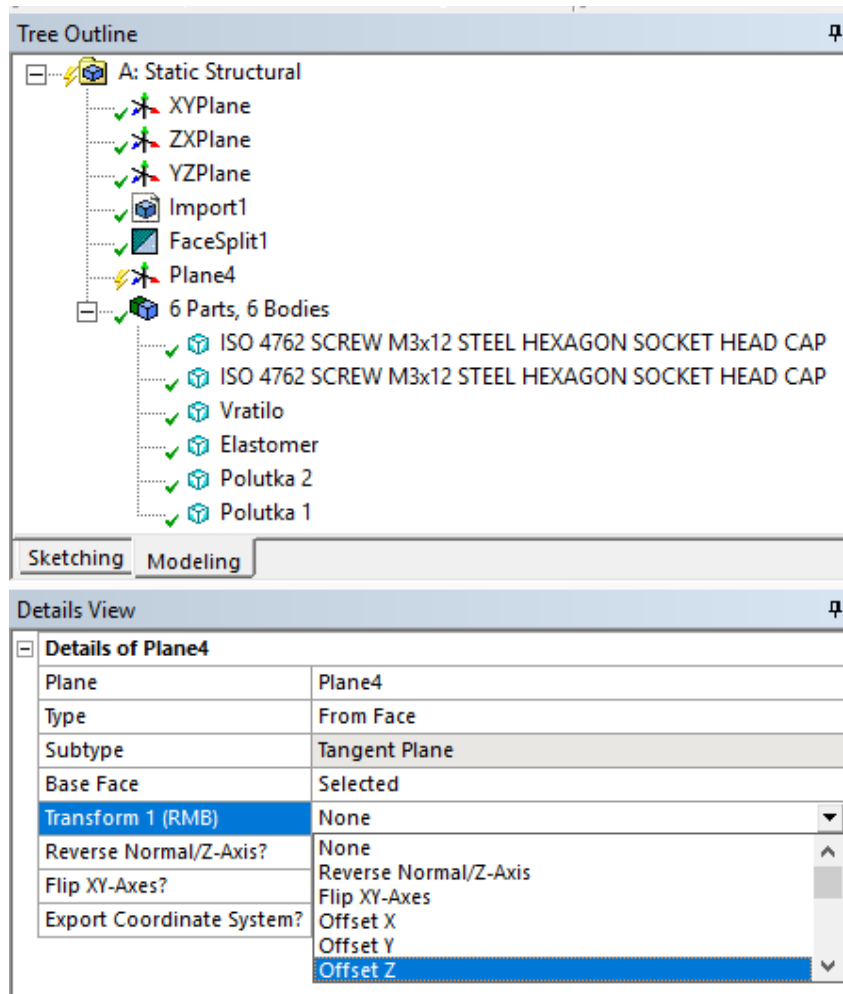
Dobijena cilindrična površ zavrtnja koja nije u kontaktu sa polutkom spojnice



Slika 5.41

Površ odsečenog vratila koja se koristi za pravljenje nove ravni

Ravan se pomera u pravcu *Z* ose odabirom opcije *Offset Z* u polju *Transform 1* (RMB), slika 5.42. Klikom na ovu opciju otvaraju se nove podopcije ispod.



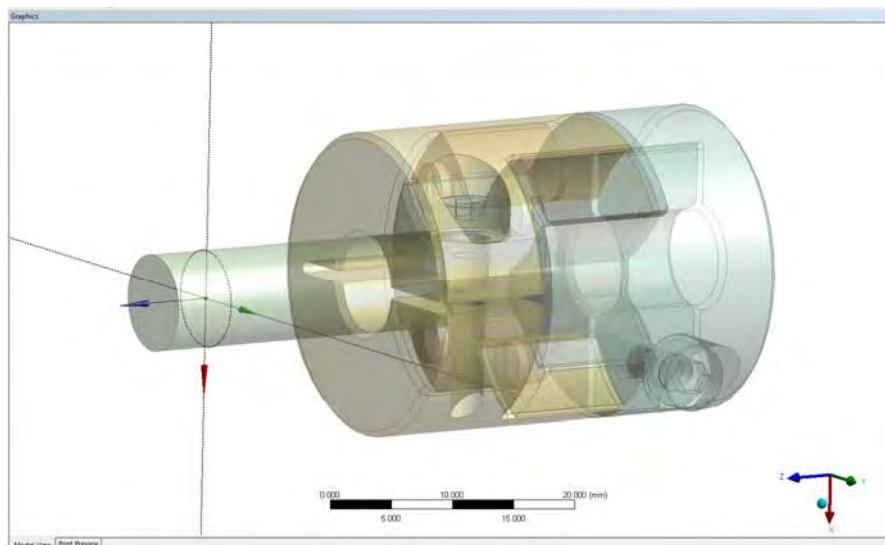
Slika 5.42
Opcija *Offset Z* za transliranje ravni

U polju *FD1*, *Value 1* uneta je vrednost -5 mm, za koju je potrebno pomeriti ravan, a to je vrednost koja simulra širinu ležaja u osloncu, slika 5.43. Kompletna podešavanja za novu ravan se vide na ovoj slici.

Details View	
Details of Plane4	
Plane	Plane4
Sketches	0
Type	From Face
Subtype	Outline Plane
Base Face	Selected
Use Arc Centers for Origin?	Yes
Transform 1 (RMB)	Offset Z
<input type="checkbox"/> FD1, Value 1	-5 mm
Transform 2 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No

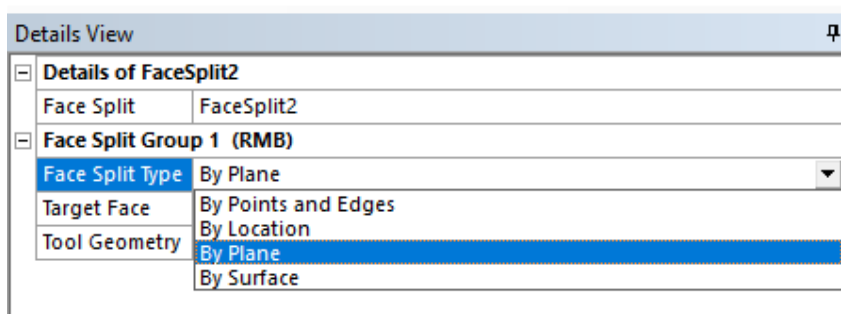
Slika 5.43
Kompletna podešavanja za opciju New Plane

Na slici 5.44 vidi se nova ravan u glavnom prozoru *Graphics*.

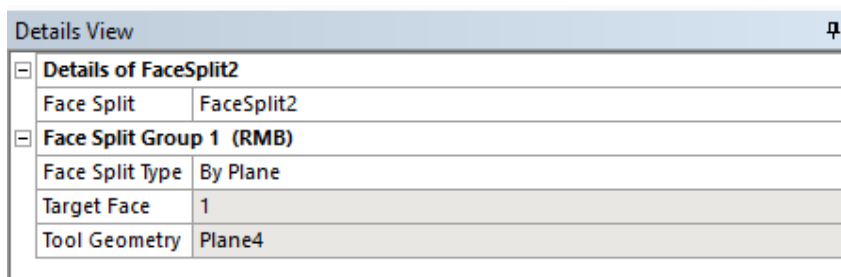


Slika 5.44
Nova ravan u glavnom prozoru

Već poznatom komandom *Face Split* preseca se cilindrična površ vratila sa prethodno nacrtanom ravni. U polju *Face Split Type* izabrana je opcija *By Plane*, slika 5.45, i onda je za *Target Face* odabrana nova ravan *Plane4* levim klikom na nju u stablu u prozoru *Tree Outline*, slika 5.46.



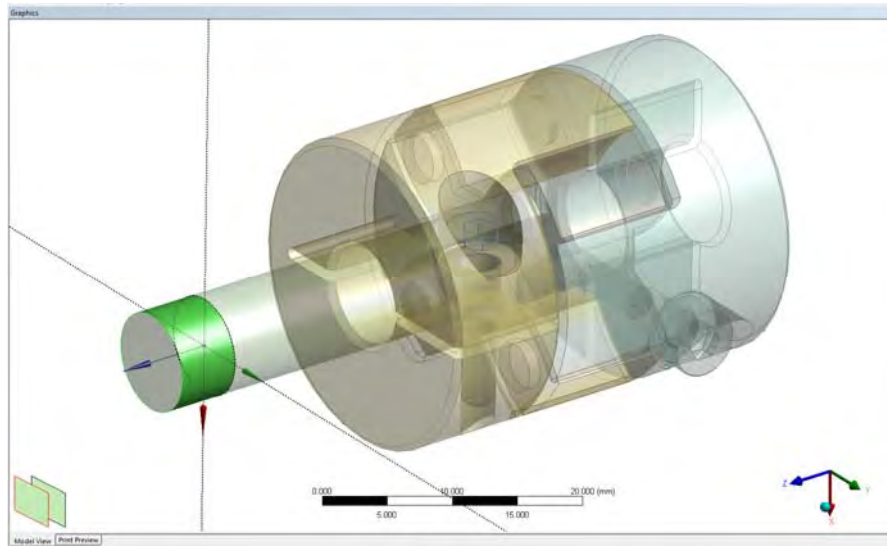
Slika 5.45
Opcija *Face Split* i podopcija *By plane*



Slika 5.46
Podešavanja za opciju *Face Split*

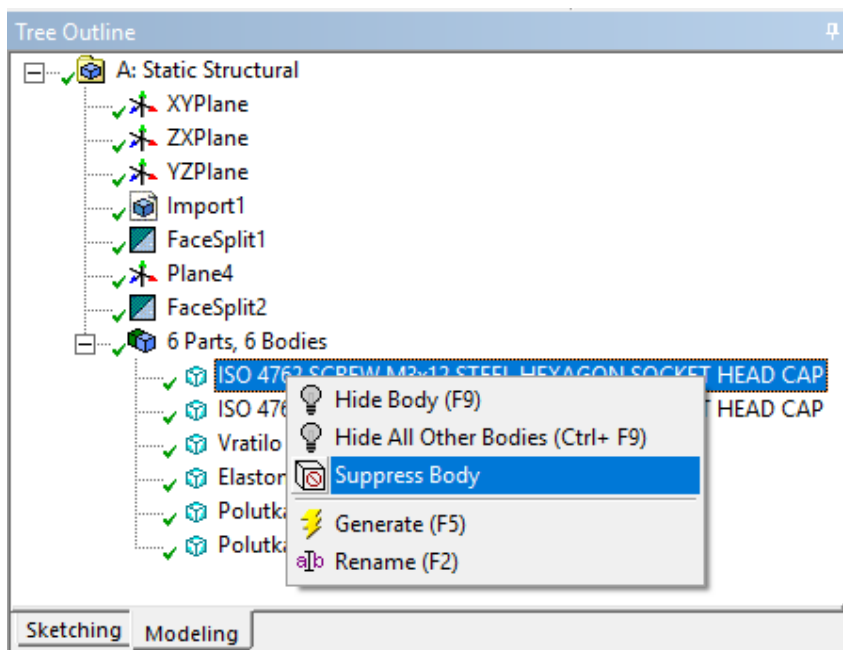
Klikom na komandu *Generate* izvršava se presecanje cilindrične površi vratila i dobija se prikaz u glavnom prozoru kao na slici 5.47.

Zavrtnanj M3 koji se nalazi na drugoj polutci nije od značaja za numeričku analizu i može se prosto ukloniti, deaktivirati, opcijom *Suppress Body* koja se otvara nakon desnog klika na zavrtnanj u prozoru *Tree outline*, slika 5.48.



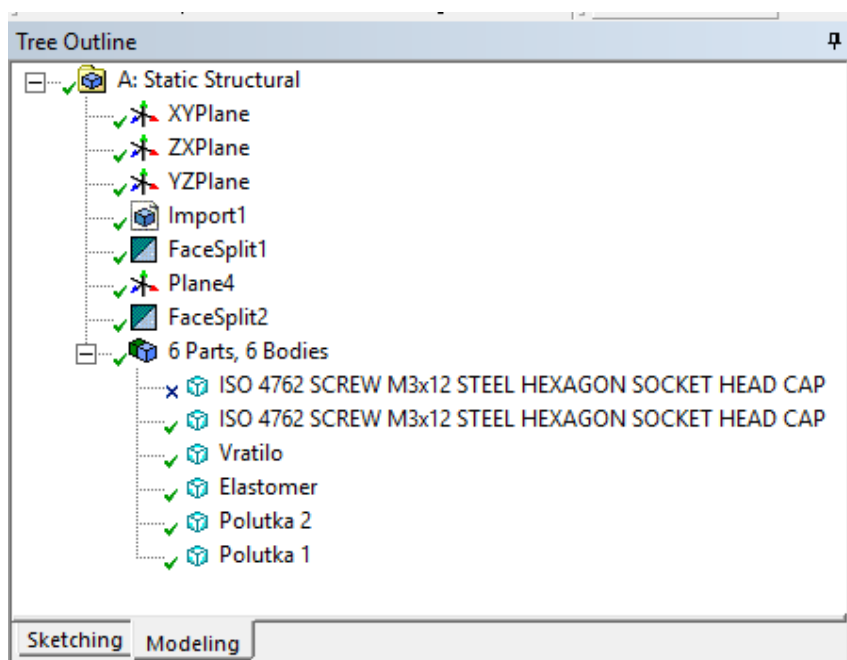
Slika 5.47

Presečena površ vratila koja simulira rukavac vratila za ležaj



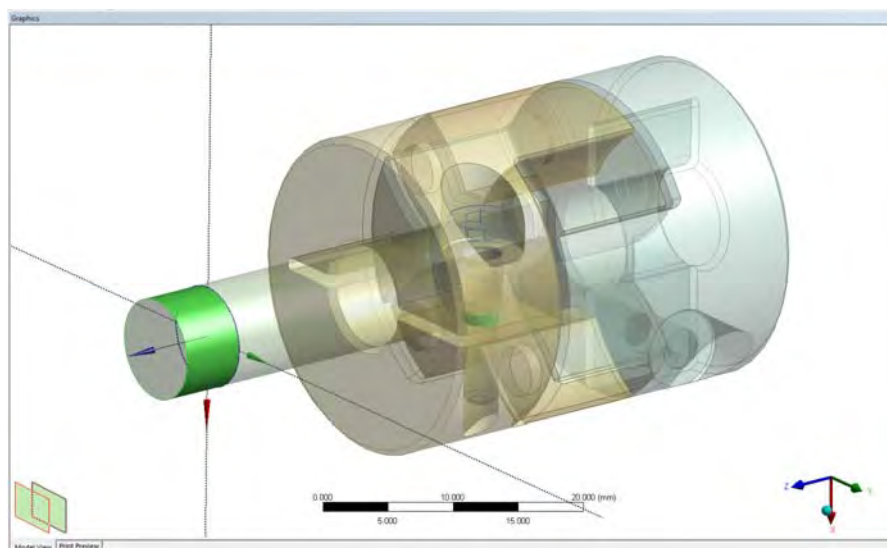
Slika 5.48

Opcija Suppress Body



Slika 5.49

Izgled ekrana Tree Outline na kraju 3. koraka



Slika 5.50

Izgled glavnog ekrana Graphics na kraju 3. koraka

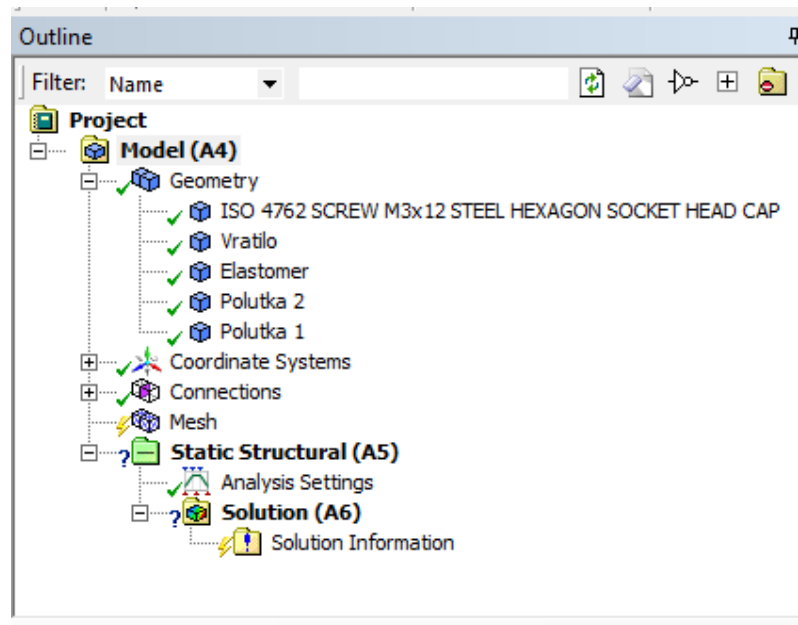
Nakon klika na zavrtanj u stablu na glavnom ekranu odabrani zavrtanj dobija tamniju boju što vizuelno pokazuje koji je zavrtanj odabran. Izgled prozora *Tree Outline* na kraju ovog 3. koraka je dat na slici 5.49.

Izgled glavnog ekrana *Graphics* na kraju 3. koraka, sa selektovanim novodobijenom površi zavrtnja za unošenje pritezanja i površi vratila koja simulira rukavac vratila za ležaj, dat je na slici 5.50.

Korak 4 – Zadavanje materijala, kontakata i definisanje proračunske mreže

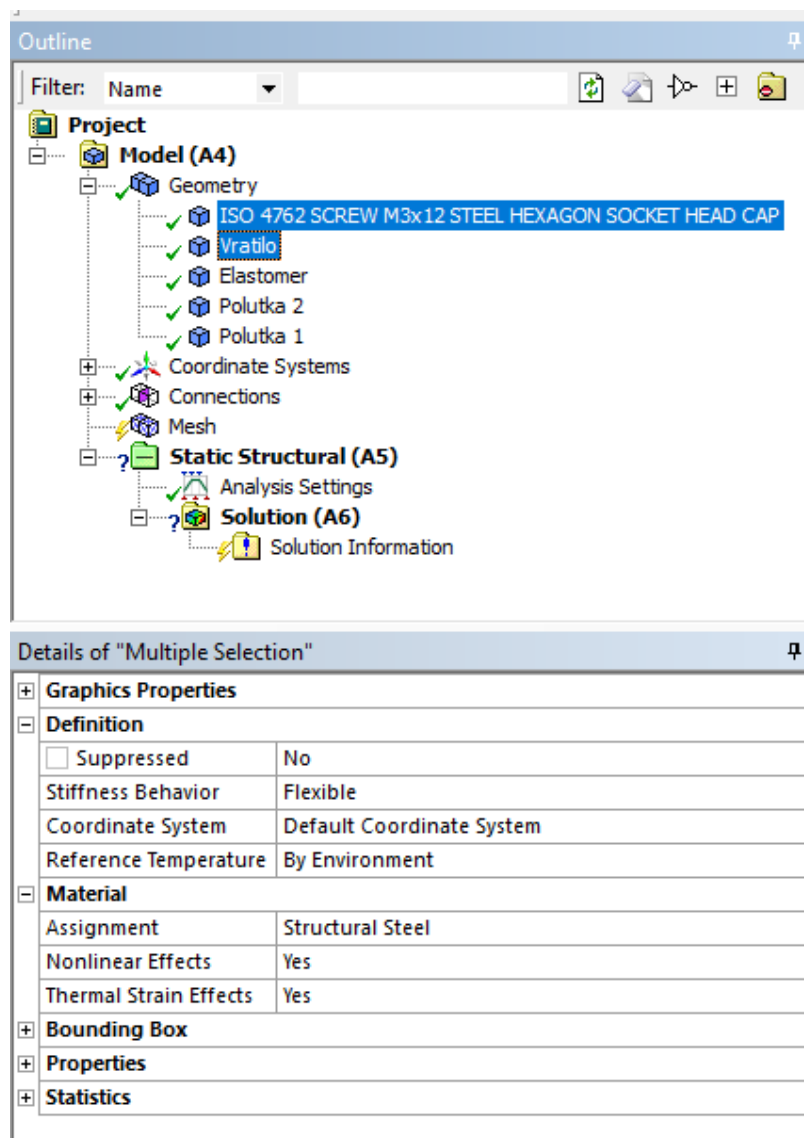
Na početku ovog koraka dodeljeni su materijali svakom delu ponaosob. Postupak je isti kao i kod prethodnog primera. Duplim klikom na polje *Model* u prostoru *Workbench*-a otvara se prozor u kome se definiše proračunska mreža, unose opterećenja i ograničenja numeričkog modela na kome se radi.

Klikom na plusić sa leve strane polja *Geometry* u prozoru *Outline* izlistavaju se svi delovi, slika 5.51.



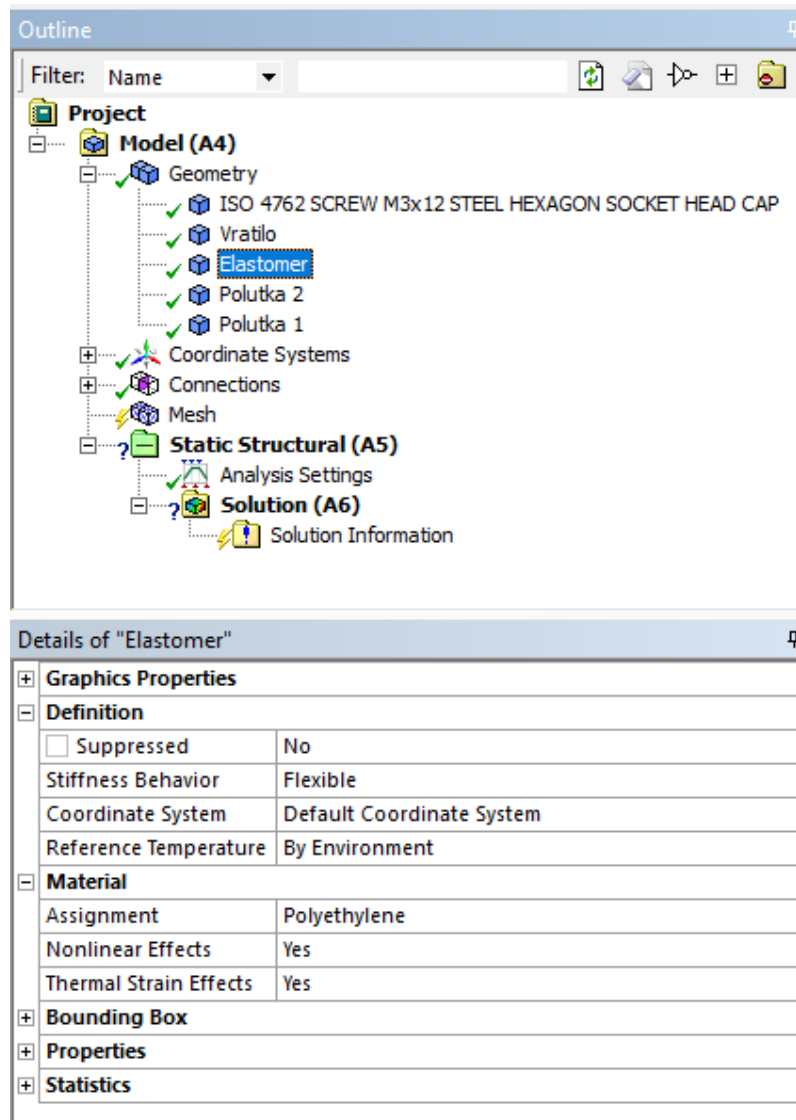
Slika 5.51
Izlistavanje svih delova u prozoru *Outline*

Za materijal vratila i zavrtnja automatski je postavljen konstrukcioni čelik, *Structural Steel*, slika 5.52. Zadavanje materijala većem broju delova u jednom koraku može se uraditi zadržavanjem dugmeta *CTRL* na tastaturi.



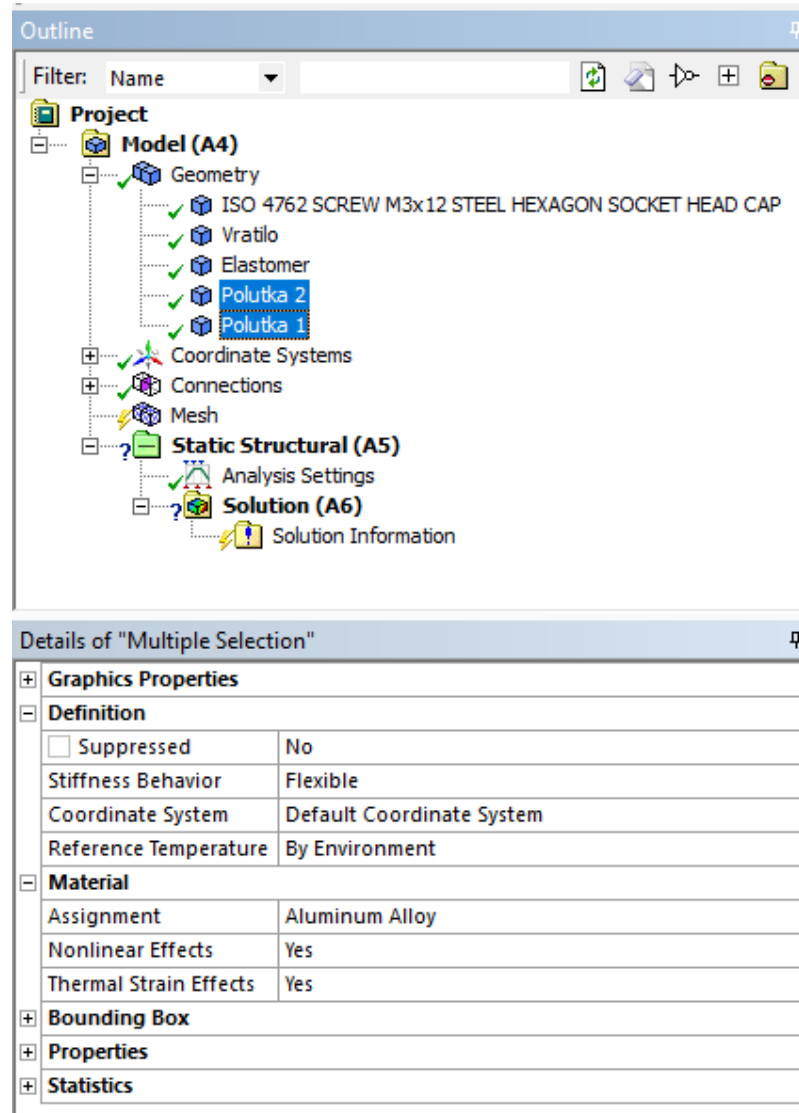
Slika 5.52
Usvojeni materijal *Structural Steel* za vratilo i zavrtnj

Za elastomer je usvojen materijal *Polyethylene*, slika 5.53.



Slika 5.53
Usvojeni materijal *Polyethylene* za elastomer

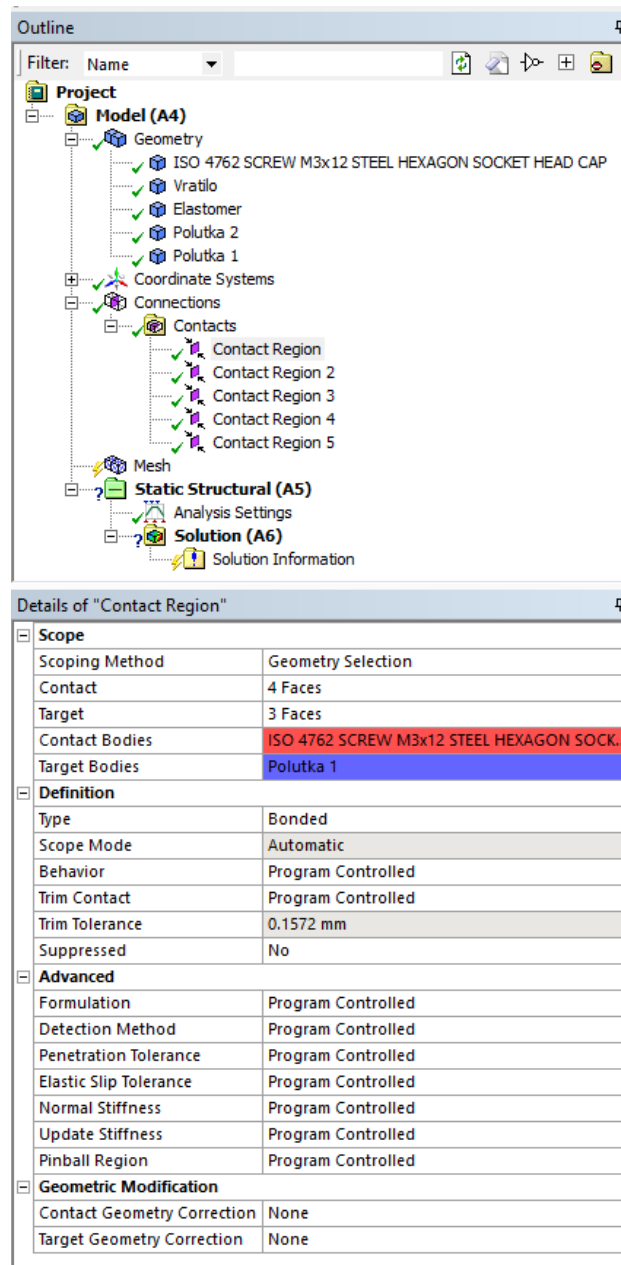
Za polutke spojnice (Polutka 1 i 2) izabran je materijal Aluminum Alloy, slika 5.54.



Slika 5.54

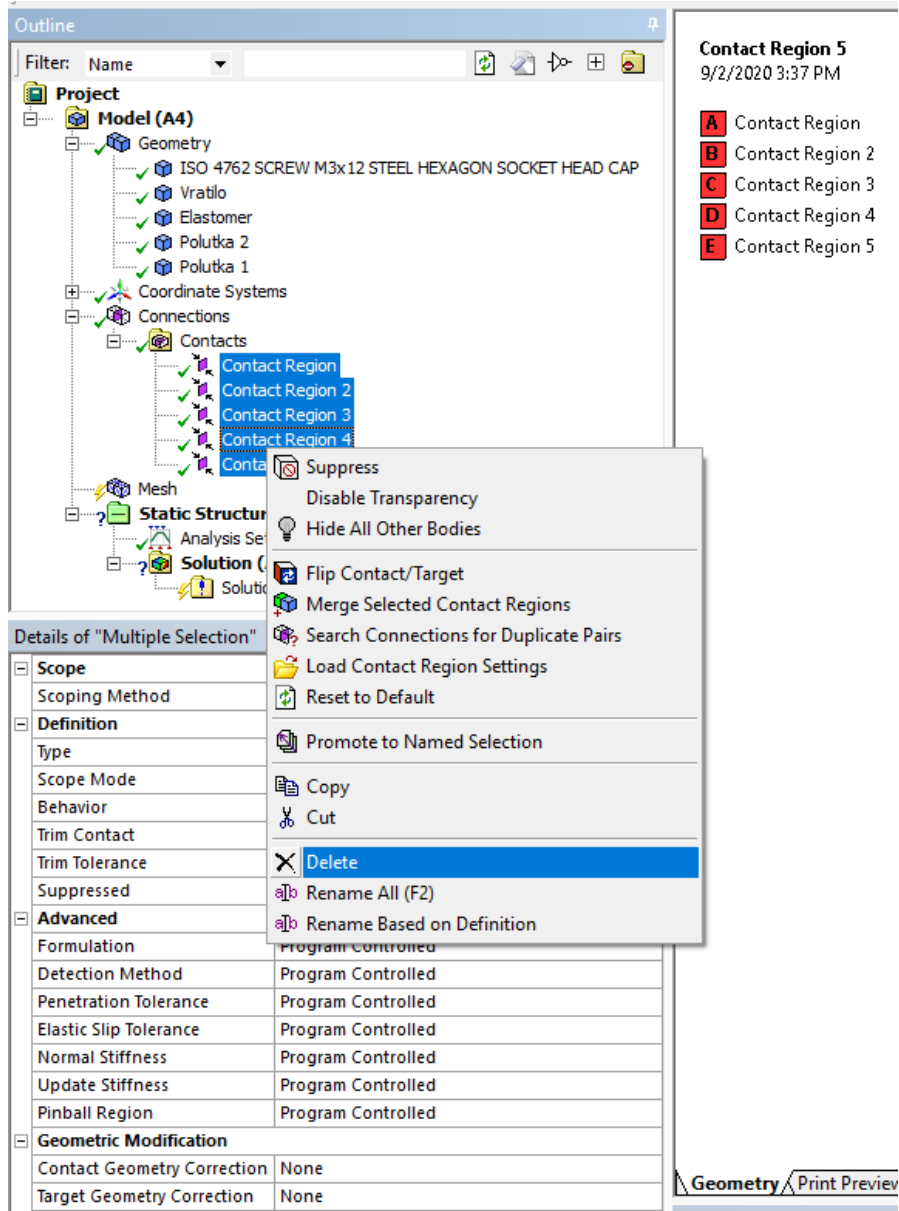
Usvojeni materijal Aluminum Alloy za polutke spojnice

Nakon dodeljivanja materijala potrebno je definisati konekcije kada su u pitanju sklopovi. Softver automatski postavlja nekoliko kontakata, tipa *Bounded*, na površima koje su bliske, slika 5.55.



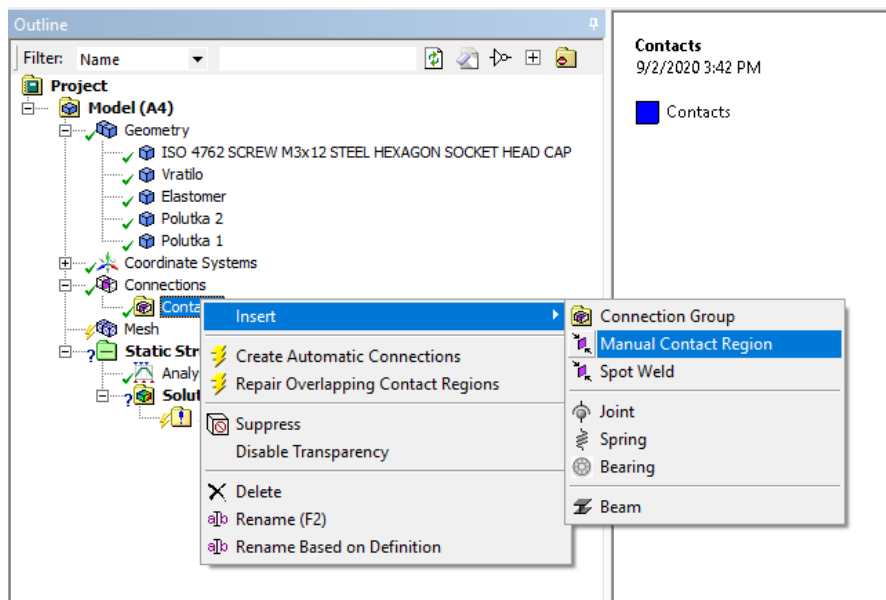
Slika 5.55

Automatski dodeljeni kontakti u prozoru Outline i njihove karakteristike u prozoru ispod Details of „Contact Region“



Slika 5.56
Opcija Delete za brisanje automatski formiranih kontakata

Ovi automatski kontakti se brišu desnim klikom na njih i levim klikom na opciju *Delete* kao na slici 5.56. Nakon toga otvara se novi prozor u kome treba potvrditi brisanje kontakata. Nakon brisanja postavljeni su novi kontakti opcijom *Manual Contact Region* unutar opcije *Insert* koja se dobija desnim klikom na polja *Contacts* u prozoru *Outline*, slika 5.57.

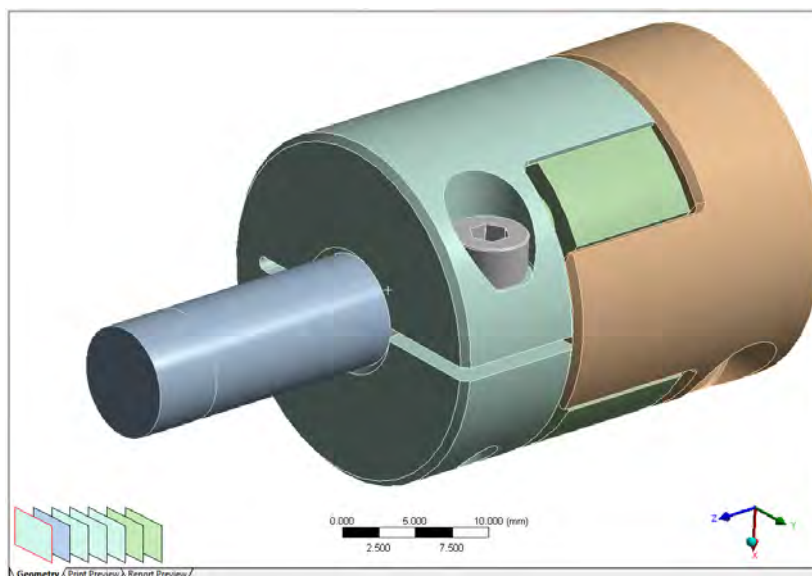


Slika 5.57

Opcija *Manual Contact Region* za postavljanje kontakata

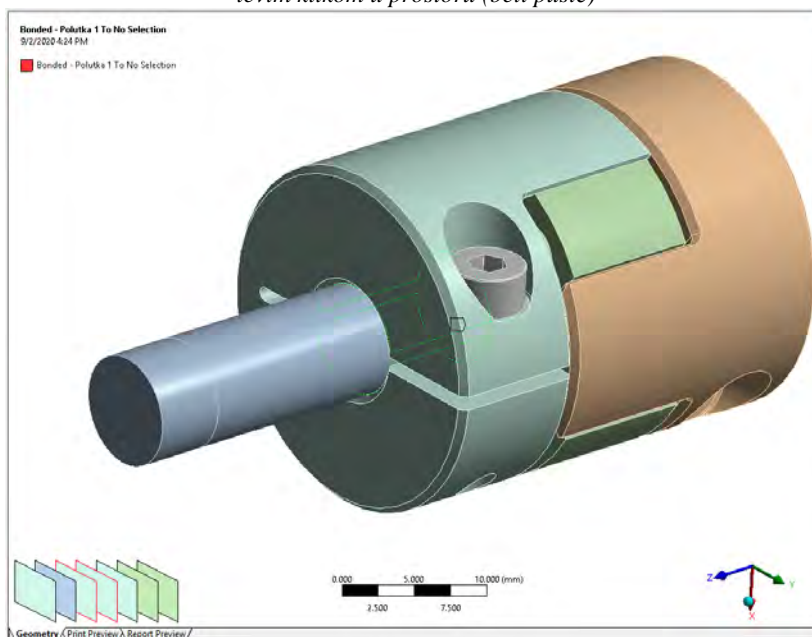
Prvi kontakt definisan je kao *Frictional* sa koeficijentom trenja od 0,2 između vratila i polutke spojnice. Da bi se odabrale površi prve polutke spojnice koje su u kontaktnu sa vratilom potrebno je kliknuti u njihovom pravcu u glavnom prozoru, nakon čega se u donjem levom uglu pojavljuju sve moguće površi koje se nalaze na ovom pravcu, slika 5.58.

Na mestu na kome je kliknuto pojavljuje se beli plusić kao indikator pravca, a površi na ovom pravcu su razvrstane po bojama pa je lakše zaključiti o kojoj se površi radi. Prva površ je čeona površ polutke spojnice (svetlo plave boje), druga (tamno plave boje) je površ vratila, a treća i četvrta površ (svetlo plave boje) su površi spojnice koje su u kontaktu sa vratilom. Treća i četvrta površ su učitane u polju *Contact* u prozoru *Details of „Bonded – No Selection To No Selection“*, slika 5.59. Zadržavanjem *CTRL* dugmeta na tastaturi moguće je odabrati obe površi zajedno klikom na ponuđene površi u donjem levom uglu.



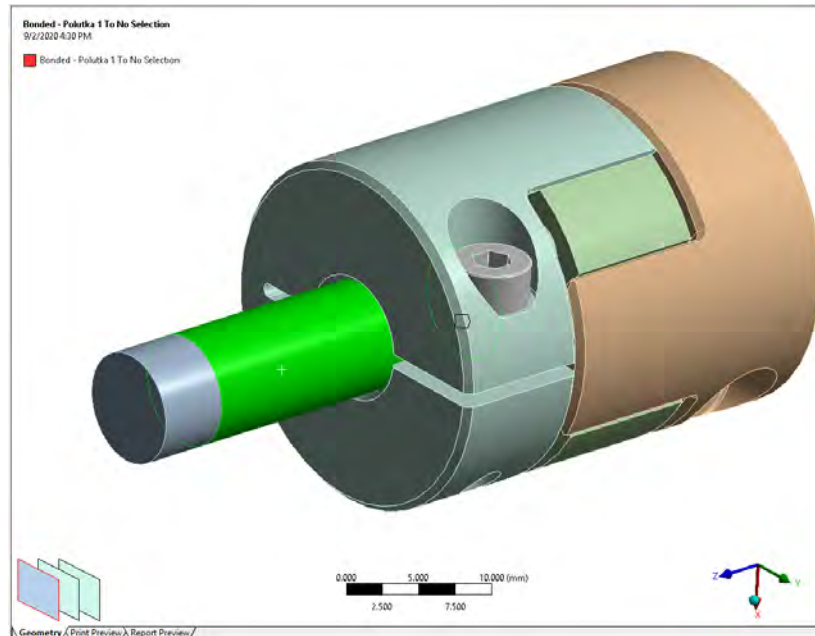
Slika 5.58

Površni, u donjem levom uglu glavnog ekrana, koje se nalaze na pravcu koji je odabran levim klikom u prostoru (beli pusić)



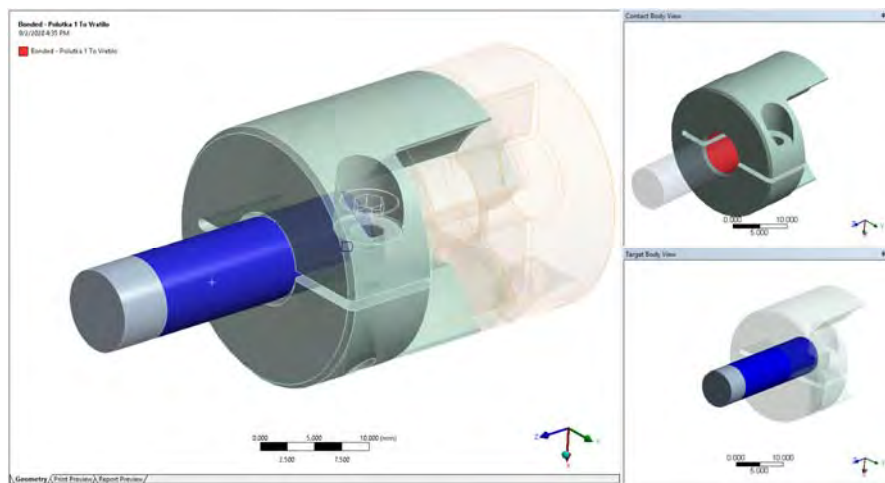
Slika 5.59

Odabrane površi prve polutke spojnice koje su u kontaktu sa vratilom



Slika 5.60

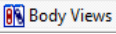
Odabrane površi prve polutke spojnice koje su u kontaktu sa vratilom

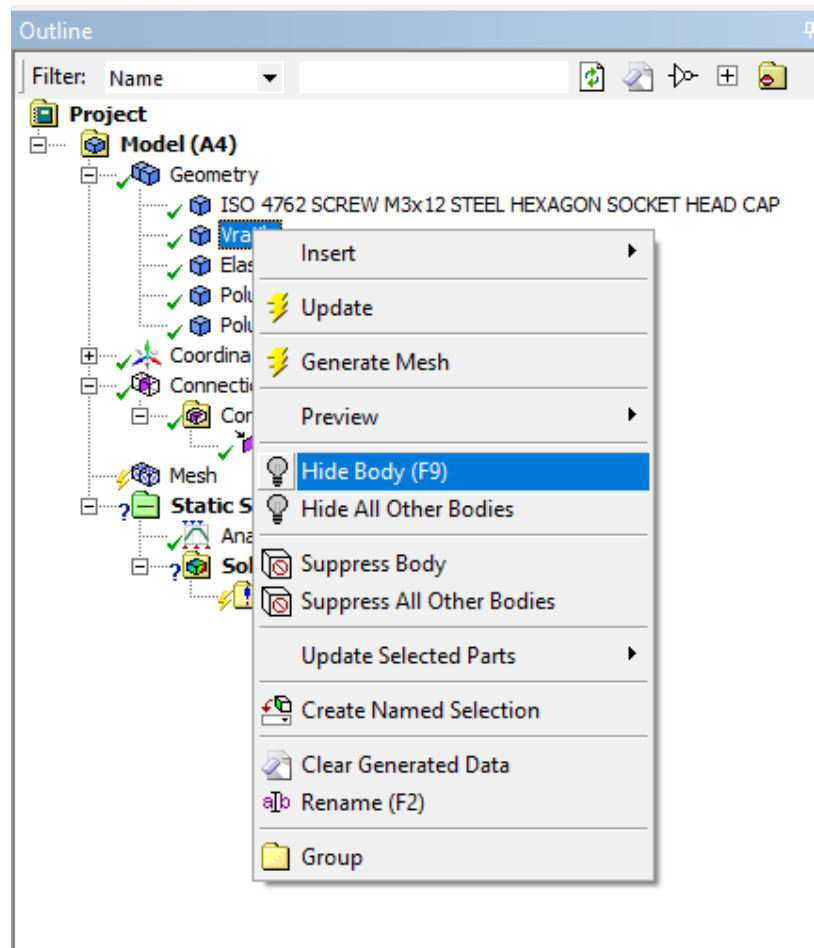


Slika 5.61

Odabrane površi prvog kontakta između prve polutke spojnice i vratila

U polje ispod, *Target*, uneta je površ vratila koja dolazi u kontakt sa prvom polutkom spojnice, slika 5.60.

Skreće se pažnja na opciju *Body Views* () radi bolje preglednosti odabranih površi - na desnoj strani ekrana otvaraju se 2 nova prozora u kome su prikazane odvojeno površi koje su odabrane za *Contact* region, crvene površi, i površi koje su odabrane za *Target* region, plave površi. Ove površi za prvi kontakt između vratila i prve polutke spojnice date su na slici 5.61.

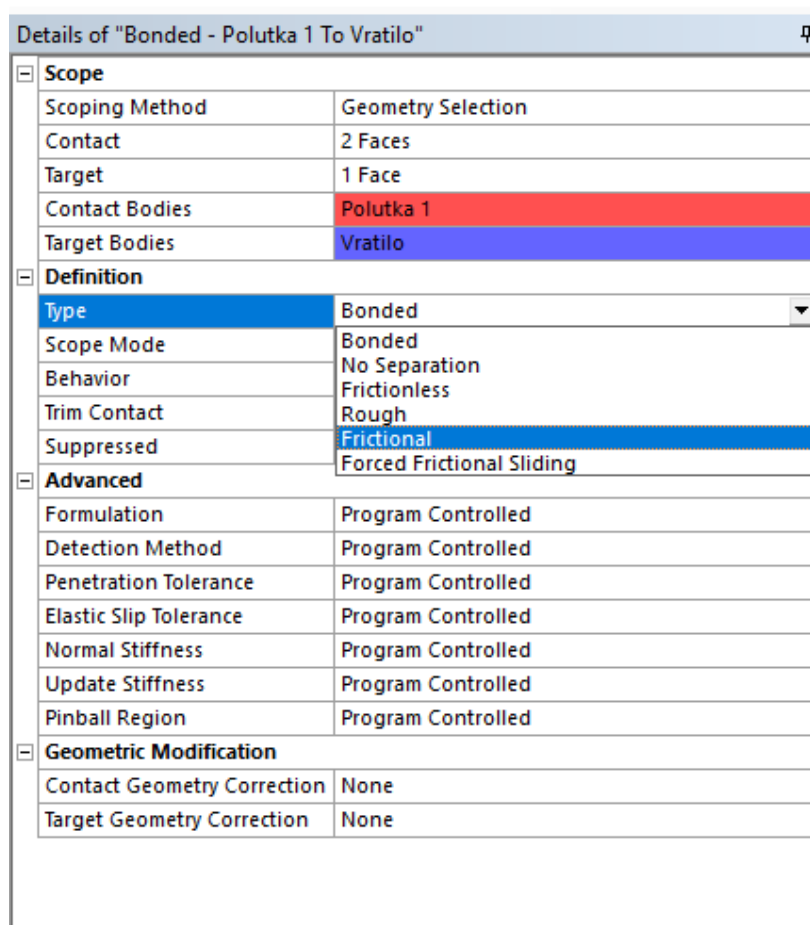


Slika 5.62

Opcija *Hide Body* za privremeno skrivanje tela radi lakše manipulacije

U dodatnim prozorima desno jasno se uočavaju kontaktne površi koje su odabrane za polja *Contact* i *Target*. Odabir ovih površi, pored prikazanog postupka, može se izvršiti i u ovim prozorima i sakrivanjem tela desnim klikom na željeno telo u prozoru *Outline* i aktiviranjem komande *Hide Body*, slika 5.62.

U prozoru za podešavanja kontakta *Detail of „Bonded – Polutka 1 to Vratilo“* odabran je tip kontakta *Frictional*, slika 5.63. Lista ponuđenih tipova kontakata dobija se klikom na strelicu sa desne strane polja *Type*.



Slika 5.63
Frictional tip kontakta

Za vrednost koeficijenta trenja potrebno je uneti 0,3 u polje *Frictional Coefficient*, slika 5.64.

Details of "Frictional - Polutka 1 To Vratilo" ⌵	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	2 Faces
Target	1 Face
Contact Bodies	Polutka 1
Target Bodies	Vratilo
Definition	
Type	Frictional
<input checked="" type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.3
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 5.64
Uneta vrednost koeficijenta trenja

Za ponašanje kontakta odabrana je opcija *Symmetric*, polje *Behavior*, slika 5.65.

Details of "Frictional - Polutka 1 To Vratilo" ⌵	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	2 Faces
Target	1 Face
Contact Bodies	Polutka 1
Target Bodies	Vratilo
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.3
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled ▼
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	Asymmetric Symmetric
Advanced	Auto Asymmetric
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 5.65

Opcija *Symmetric* za definisanje ponašanja

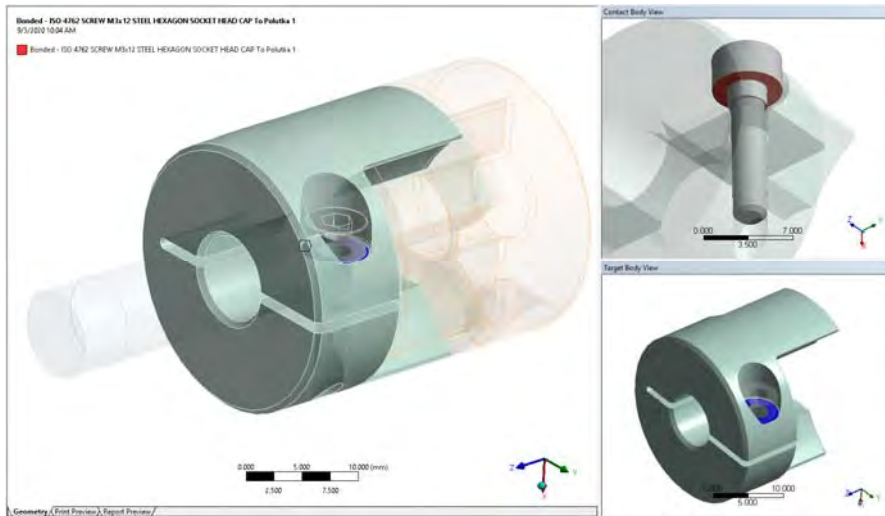
Kompletna podešavanja u prozoru *Details of „Frictional – Polutka 1 To Vratilo“* za prvi kontakt između vratila i polutke spojnice data su na slici 5.66. Sam prozor menja naziv kako se unose podešavanja.

Details of "Frictional - Polutka 1 To Vratilo" ⌵	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	2 Faces
Target	1 Face
Contact Bodies	Polutka 1
Target Bodies	Vratilo
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.3
Scope Mode	Manual
Behavior	Symmetric
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 5.66

Kompletna podešavanja za prvi kontakt između vratila i polutke spojnice

Drugi kontakt je definisan kao *Frictional* između glave zavrtnja, polje *Contact*, i površi polutke spojnice koja dolazi u kontakt, polje *Target*. Ođabrane površi date su na slici 5.67.



Slika 5.67

Površii odabrane za drugi kontakt između glave zavrtnja i polutke spojnice

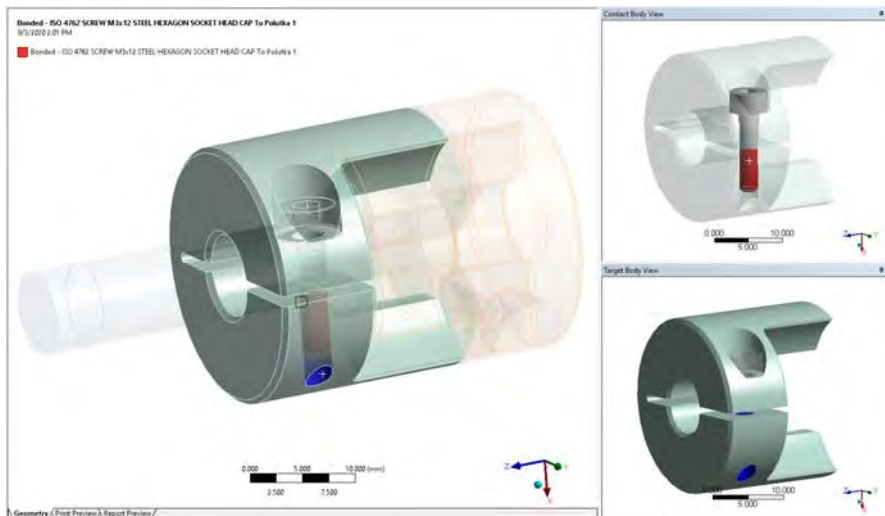
Kompletna podešavanja za drugi kontakt su data na slici 5.68.

Details of "Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HE..."	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKE...
Target Bodies	Polutka 1
Definition	
Type	Frictional
<input checked="" type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.3
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 5.68

Podšavanja za drugi kontakt između glave zavrtnja i polutke spojnice

Treći kontakt, navojni spoj, je definisan između navojnog dela zavrtnja, polje *Contact* i odgovarajućeg otvora na spojnici, polje *Target*. Odabrane površi su date na slici 5.69.



Slika 5.69

Površni odabrane za kontakt između navojnog dela zavrtnja i polutke spojnice

Za ovaj treći kontakt odabran je tip *Frictional*, sa koeficijentom trenja 0,18. Međutim potrebno je uneti i podešavanja za navoj. Na dnu prozora *Details of „Frictional - ...“* u okviru polja potrebno je aktivirati opciju *Bolt Thread*, slika 5.70.

Details of "Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HE..."	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKE...
Target Bodies	Polutka 1
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.18
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None Smoothing Bolt Thread

Slika 5.70
Opcija Bolt Thread

Nakon odabira opcije *Bolt Thread* pojavljuju se nova polja ispod. Potrebno je uneti parametre navoja u polja ispod. Za srednji prečnik navoja, *Mean Pitch Diameter* polje, uneta je vrednost 2,675 mm, a za korak *Pitch Diameter* vrednost 0,5 mm. Ove vrednosti se mogu naći u knjizi [1] u tablici 2.5 na strani 171, slika 5.71 (podaci za metrički navoj M3).

Tablica 5.2. Osnovne dimenzije navoja za zavrtnje

Nomin. prečnik $d=D$ mm		Korak P mm	Srednji prečnik $d_2=D_2$ mm	Dubina nošenja H_f mm	Noseći presek A_s mm ²	Prečnik jezgra d_3 mm	Ugao zavojnice ϕ stepeni
I	II						
Metrički navoj krupnog koraka							
1		0,25	0,838	0,135	0,460	0,693	5,43
1.2		0,25	1,038	0,135	0,732	0,893	4,38
1.6		0,35	1,373	0,189	1,270	1,170	4,64
2		0,40	1,740	0,217	2,070	1,509	4,19
2.5		0,45	2,208	0,244	3,390	1,948	3,71
3		0,50	2,675	0,271	5,030	2,387	3,41
	3,5	0,60	3,110	0,325	6,780	2,765	3,51
4		0,70	3,545	0,379	8,780	3,141	3,60
	4,5	0,75	4,013	0,406	11,3	3,580	3,41
5		0,80	4,480	0,433	14,2	4,019	3,25
6		1	5,350	0,541	20,1	4,773	3,41
8		1,25	7,188	0,677	36,6	6,466	3,17
10		1,5	9,026	0,812	58,0	8,160	3,03
12		1,75	10,863	0,947	84,3	9,853	2,94
	14	2	12,701	1,083	115	11,546	2,87
16		2	14,701	1,083	157	13,546	2,48
	18	2,5	16,376	1,353	193	14,933	2,78
20		2,5	18,376	1,353	245	16,933	2,48
	22	2,5	20,376	1,353	303	18,933	2,24
24		3	22,051	1,624	353	20,319	2,48
	27	3	25,051	1,624	459	23,319	2,18
30		3,5	27,727	1,894	561	25,706	2,30
	33	3,5	30,727	1,894	694	28,706	2,08
36		4	33,402	2,165	817	31,093	2,19
	39	4	36,402	2,165	976	34,093	2,00
Metrički navoj sitnog koraka							
8		1	7,350	0,541	39,2	6,773	2,48
10		1,25	9,188	0,676	61,2	8,466	2,48
12		1,25	11,188	0,676	92,1	10,466	2,04
16		1,5	15,026	0,811	167	14,160	1,82
20		1,5	19,026	0,811	172	18,160	1,44
24		2	22,701	1,082	384	21,546	1,61
30		2	28,701	1,082	621	27,546	1,27
36		3	34,051	1,623	865	32,319	1,61
		$A_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad R = 0,14434P$ $d_3 = d_1 - H/6 \quad R_{\min} = 0,125P$ $d_{3\min} = d_1 - 2a \quad d_{3\max} = d_1 - 2b$ $a = H/4 - R_{\min} = 0,107H$ $b = R_{\min} \left[1 - \cos \left[\frac{\pi}{3} - \arccos \left(1 - \frac{T_{d2}}{4R_{\min}} \right) \right] \right] + \frac{T_{d2}}{2}$					

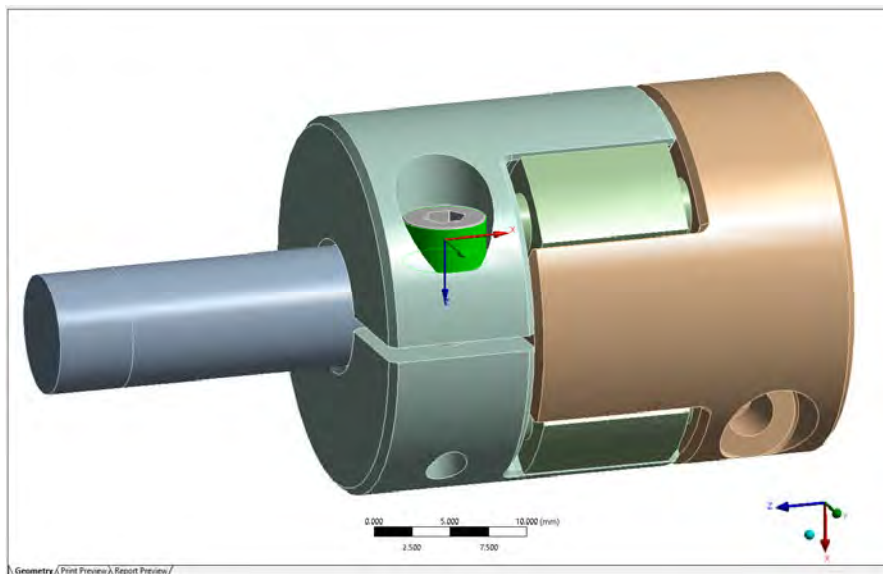
Slika 5.71

Osa rotacije zavrtnja zadaje se u polju *Orientational* sa alatom *Revolute Axis*, slika 5.72.

Details of "Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HE..."	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKE...
Target Bodies	Polutka 1
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.18
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	Bolt Thread
Orientation	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Mean Pitch Diameter	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Pitch Distance	Revolute Axis
<input type="checkbox"/> Thread Angle	60. °
Thread Type	Single-Thread
Handedness	Right-Handed

Slika 5.72
Opcija *Revolute Axis*

Aktiviranjem ove komande pojavljuju se dva nova žuta polja za podešavanje početne i krajnje tačke ove ose. Za ove tačke potrebno je formirati nove koordinatne sisteme sa početkom baš u ovim tačkama. Postupak postavljanja ovih koordinatnih sistema alatom *Create Coordinate System* je isti kao u prethodnim primerima. Za prvi koordinatni sistem odabrana je cilindrična površ glave zavrtnja, a za osu u polju *Axis* odabrana je Z osa, kako bi se ona poklapala sa globalnom koordinatnom osom X, slika 5.73.



Slika 5.73

Odabrana površ glave zavrtnja za prvi koordinatni sistem

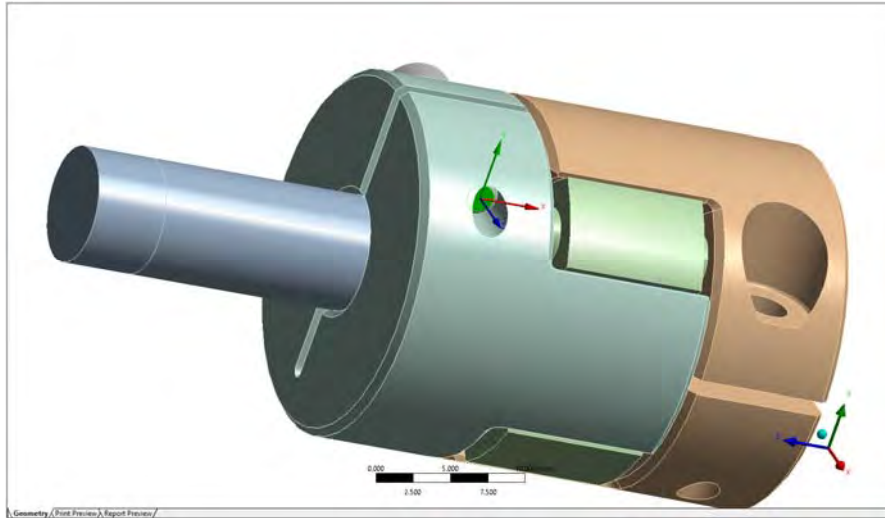
Podešavanja za ovaj prvi koordinatni sistem data su u prozoru *Details of „Coordinate System“*, slika 5.74.

Details of "First point" ⌵	
[-] Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System	Program Controlled
Suppressed	No
[-] Origin	
Define By	Geometry Selection
Geometry	Click to Change
Origin X	-6.45 mm
Origin Y	8.5 mm
Origin Z	5. mm
[-] Principal Axis	
Axis	Z
Define By	Global X Axis
[-] Orientation About Principal Axis	
Axis	Y
Define By	Default
[+] Directional Vectors	
[-] Transformations	
Base Configuration	Absolute
Transformed Configuration	[-6.45 8.5 5.]

Slika 5.74

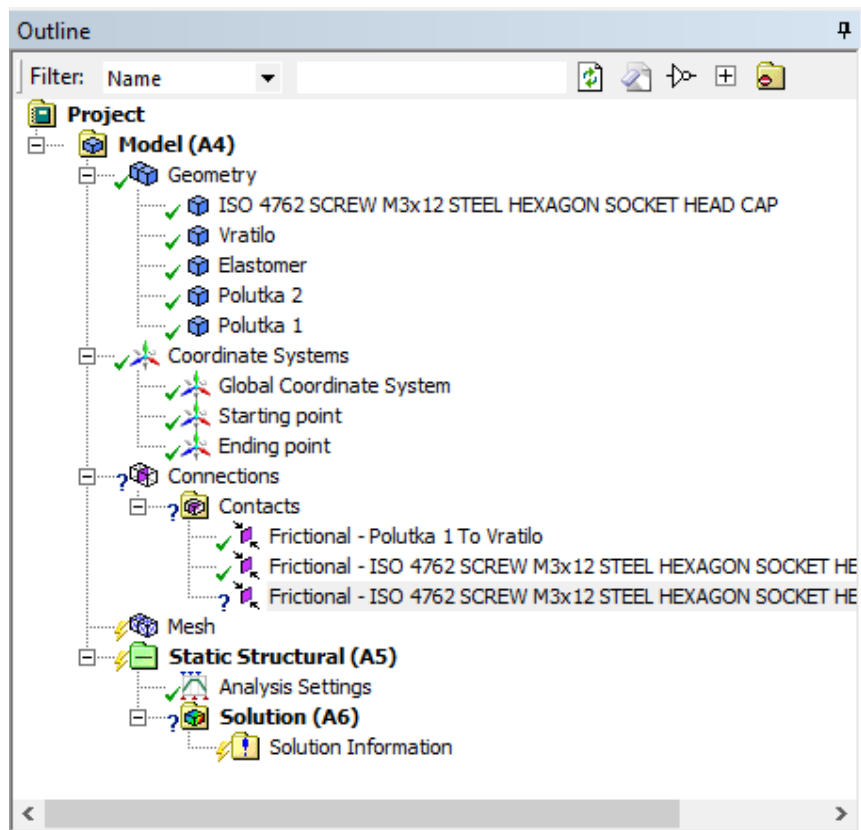
Podšavanja za prvi koordinatni sistem

Drugi koordinatni system je postavljen na donjoj površ zavrtnja sa odabranom Z osom za polje *Axis* kao i kod prethodnog koordinatnog sistema. Odabrana površ i orijentacija drugog koordinatnog sistema dati su na slici 5.75.



*Slika 5.75
Odabrana površ zavrtnja za drugi koordinatni sistem*

Koordinatnim sistemima su promjenjeni nazivi radi lakšeg korišćenja, a njihova pozicija u stablu u prozoru *Outline* data je na slici 5.76.



Slika 5.76

Koordinatni sistemi u stablu u prozoru Outline

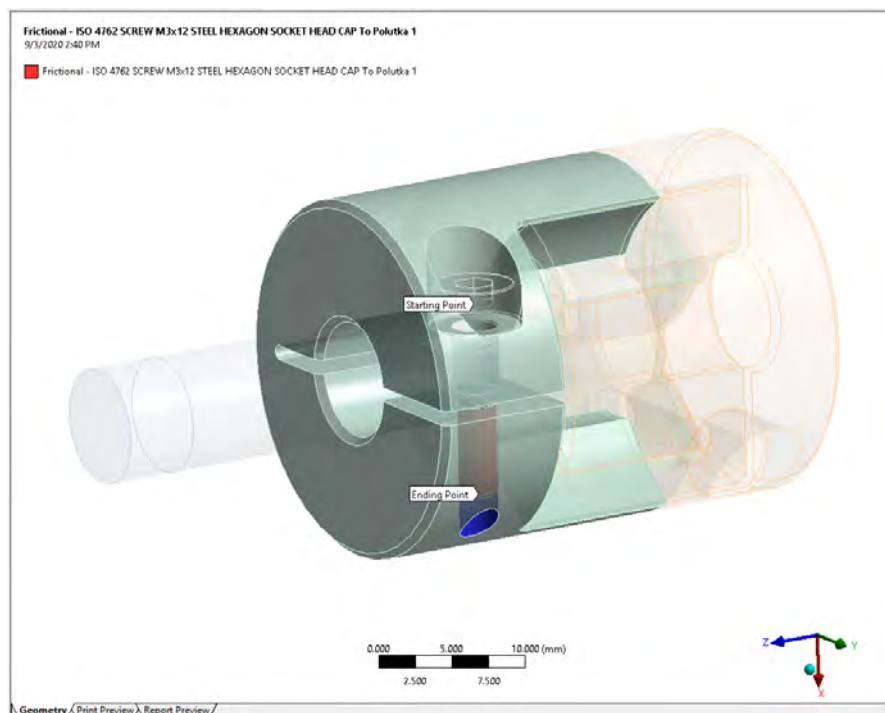
Sada su ovi koordinatni sistemi učitani za osu rotacije zavrtnja, *Starting point* koordinatni sistem za prvu tačku, a *Ending point* koordinatni sistem za drugu tačku, slika 5.77.

Details of "Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD ...	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKE...
Target Bodies	Polutka 1
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.18
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	Bolt Thread
Orientation	Revolute Axis
Starting Point	Starting point
Ending Point	Ending point
<input type="checkbox"/> Mean Pitch Diameter	2.675 mm
<input type="checkbox"/> Pitch Distance	0.5 mm
<input type="checkbox"/> Thread Angle	60. °
Thread Type	Single-Thread
Handedness	Right-Handed

Slika 5.77

Postavljanje početne i krajnje tačke ose rotacije zavrtnja
sa novodobijenim koordinatnim sistemima

U glavnom prozoru pojavljuju se ove dve tačke, potrebno je proveriti da li je orijentacija ispravna, slika 5.78.



Slika 5.78

Početnja i krajnja tačka ose rotacije zavrtnja u glavnom prozoru

Aktivirana je opcija za agresivno ažuriranje krutosti pri svakoj iteraciji, *Each Iteration, Aggressive* u polju *Update Stiffness*, slika 5.79.

Details of "Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD CAP To P... ⚙	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD CAP
Target Bodies	Polutka 1
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.18
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled ▾
Stabilization Damping Factor	Program Controlled
Pinball Region	Never
Time Step Controls	Each Iteration, Aggressive
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	Bolt Thread
Orientation	Revolute Axis
Starting Point	Starting point
Ending Point	Ending point
<input type="checkbox"/> Mean Pitch Diameter	2.675 mm
<input type="checkbox"/> Pitch Distance	0.5 mm
<input type="checkbox"/> Thread Angle	60. °
Thread Type	Single-Thread
Handedness	Right-Handed

Slika 5.79
Opcija Each Iteration, Aggressive

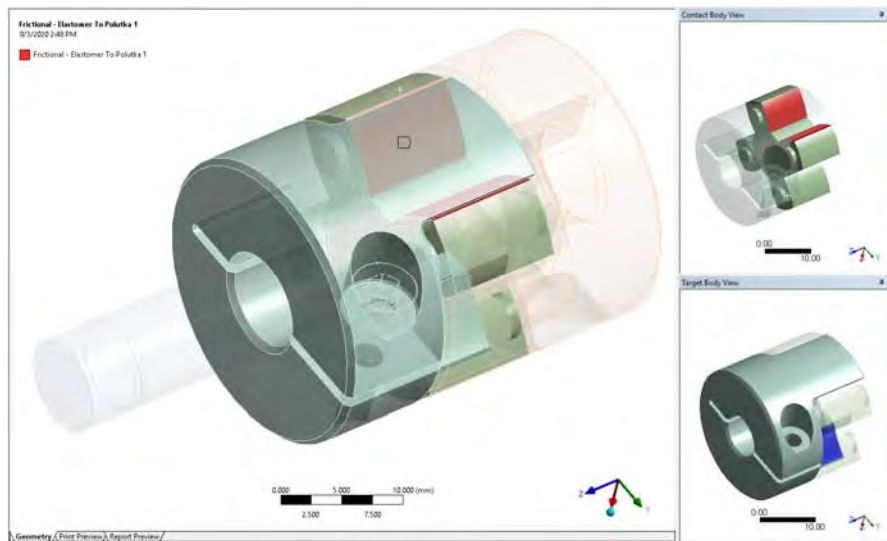
Kompletna podešavanja za treći kontakt između navojnog dela zavrtnja i polutke spojnice su data na slici 5.80.

Details of "Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD CAP To P... ⚙	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD CAP
Target Bodies	Polutka 1
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.18
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Each Iteration, Aggressive ▾
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	Bolt Thread
Orientation	Revolute Axis
Starting Point	Starting point
Ending Point	Ending point
<input type="checkbox"/> Mean Pitch Diameter	2.675 mm
<input type="checkbox"/> Pitch Distance	0.5 mm
<input type="checkbox"/> Thread Angle	60. °
Thread Type	Single-Thread
Handedness	Right-Handed

Slika 5.80

Podešavanja za treći kontakt između navojnog dela zavrtnja i polutke spojnice

Četvrti kontakt je definisan između prve polutke spojnice i elastomera. Odabrane površi su prikazane na slici 5.81.



Slika 5.81

Površni odabrane za kontakt između prve polutke spojnice i elastomera

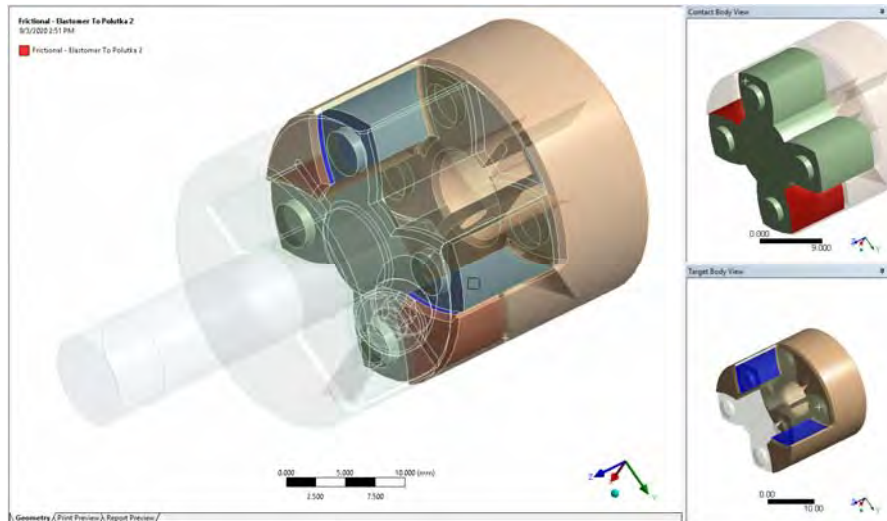
Kompletna podešavanja za četvrti kontakt su data na slici 5.82. Odabran je *Frictional* tip kontakta sa koeficijentom trenja 0,1.

Details of "Frictional - Elastomer To Polutka 1" ⌵	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	4 Faces
Target	4 Faces
Contact Bodies	Elastomer
Target Bodies	Polutka 1
Definition	
Type	Frictional
<input checked="" type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.1
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 5.82

Podšavanja za četvrti kontakt između prve polutke spojnice i elastomera

Peti kontakt je definisan između druge polutke spojnice i elastomera. Odabrane površi su prikazane na slici 5.83.



Slika 5.83

Površni odabrane za kontakt između druge polutke spojnice i elastomera

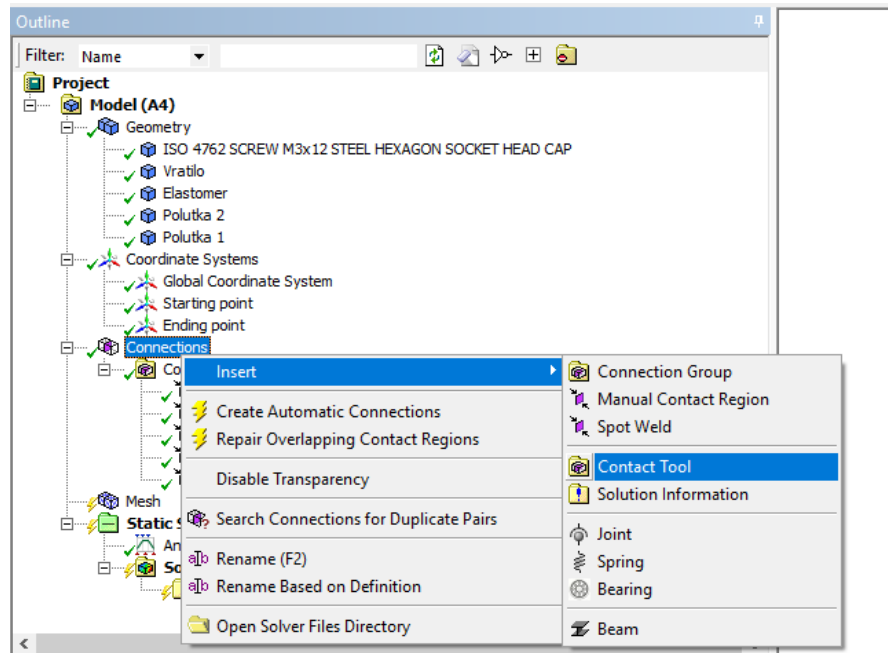
Kompletna podešavanja za peti kontakt su data na slici 5.84. Izabran je *Frictional* tip kontakta sa koeficijentom trenja 0,1 tj. ista su podešavanja kao za prethodni kontakt.

Details of "Frictional - Elastomer To Polutka 2"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	4 Faces
Target	4 Faces
Contact Bodies	Elastomer
Target Bodies	Polutka 2
Definition	
Type	Frictional
<input checked="" type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.1
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None
Geometric Modification	
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. mm
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 5.84

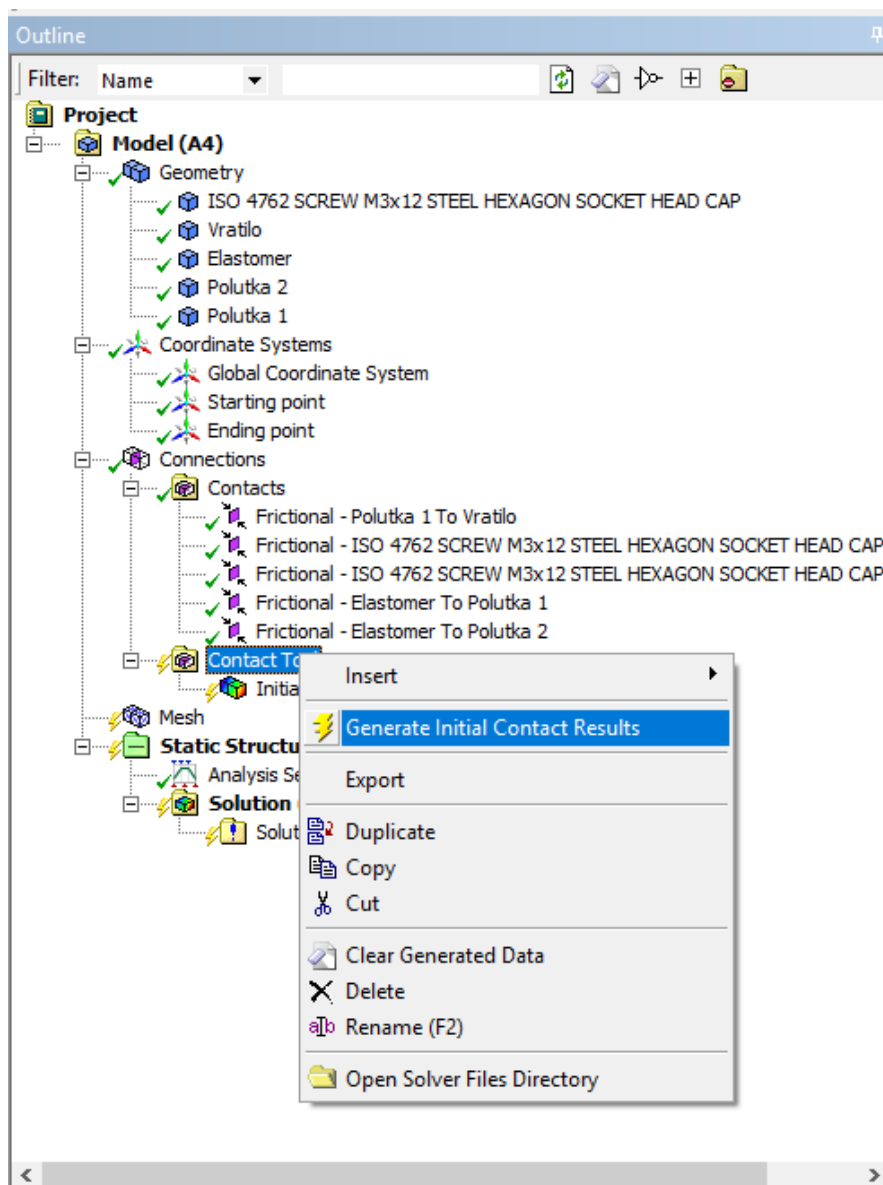
Podšavanja za peti kontakt između druge polutke spojnice i elastomera

Ovim su definisani svi kontakti između delova sklopa elastične spojnice. Korisno je proveriti stanje kontakata posebnim alatom. Ova alatka se aktivira desnim na polje *Connections* u prozoru *Outline* i odabirom *Contact Tool* opcije u okviru *Insert* polja, slika 5.85.



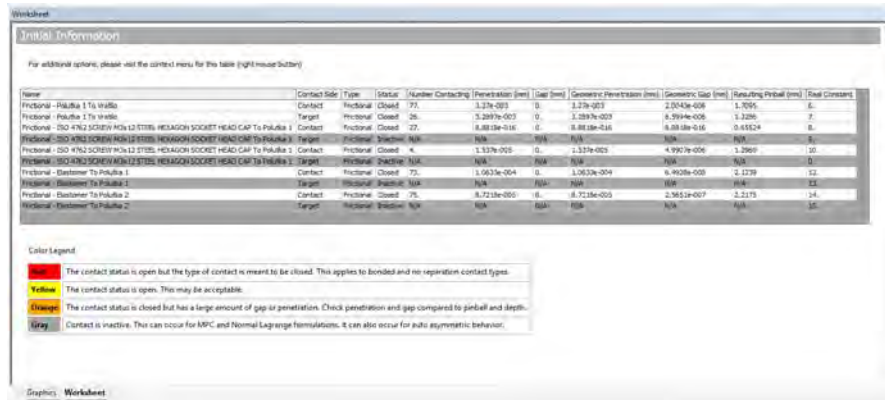
Slika 5.85
Opcija *Contact Tool*

U stablu u prozoru *Outline* pojavljuje se novo polje *Contact Tool* i u okviru njega *Initial Information*. Desnim klikom pojavljuje se paleta i komanda *Generate Initial Contact Results* za izvršavanje pomenute alatke, slika 5.86.



Slika 5.86
Komanda Generate Initial Contact Results

U glavnom prozoru se pojavljuje tablica sa informacijama o svim prethodno zadatim kontaktima, gde se može proveriti da li su svi kontakti pravilno definisani, slika 5.87. Ako nema crvenih kontakata i neplaniranih žutih i narandzastih, onda su prethodno definisani kontakti numeričkog modela ispravno postavljeni.



Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (mm)	Gap (mm)	Geometric Penetration (mm)	Geometric Gap (mm)	Resulting Penetration (mm)	Seal Constant
Frictional - Približ 1 To Walla	Contact	Frictional	Closed	77	1.27e-023	0	1.27e-023	2.0043e-008	1.705e	6
Frictional - Približ 1 To Walla	Target	Frictional	Closed	26	3.2879e-007	0	3.2879e-007	6.5914e-006	1.228e	7
Frictional - DIO 4192 SPORENI KOLA IZ STRELA HELIAGON SOCIETY HEAD CAP To Približ 1	Contact	Frictional	Closed	27	8.4818e-016	0	8.4818e-016	6.8818e-016	3.4152e	8
Frictional - DIO 4192 SPORENI KOLA IZ STRELA HELIAGON SOCIETY HEAD CAP To Približ 1	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	9
Frictional - DIO 4192 SPORENI KOLA IZ STRELA HELIAGON SOCIETY HEAD CAP To Približ 1	Contact	Frictional	Closed	4	1.3279e-025	0	1.3279e-025	4.9927e-006	1.2967	10
Frictional - DIO 4192 SPORENI KOLA IZ STRELA HELIAGON SOCIETY HEAD CAP To Približ 1	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	11
Frictional - Backstener To Približ 1	Contact	Frictional	Closed	73	1.0633e-004	0	1.0633e-004	6.4028e-008	2.1739	12
Frictional - Backstener To Približ 1	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	13
Frictional - Backstener To Približ 2	Contact	Frictional	Closed	75	8.7215e-000	0	8.7215e-000	2.3651e-007	2.2175	14
Frictional - Backstener To Približ 2	Target	Frictional	Inactive	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	15

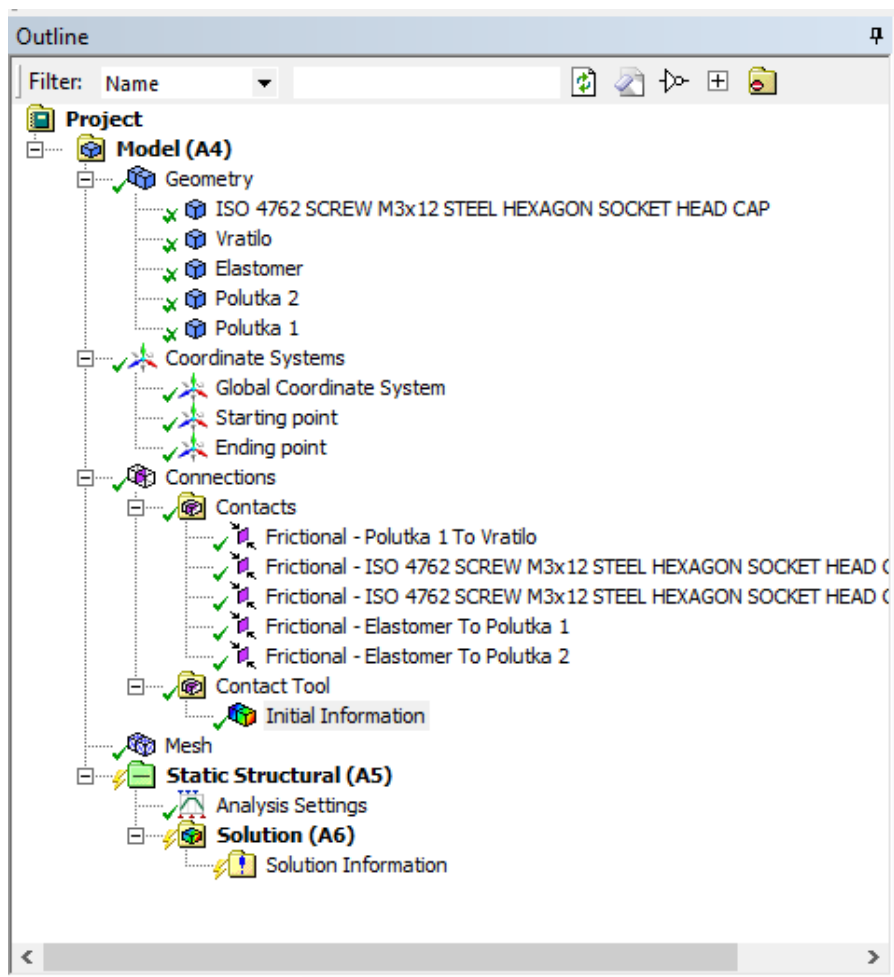
Color Legend:

- Red**: The contact status is open but the type of contact is meant to be closed. This applies to bonded and no-separation contact types.
- Yellow**: The contact status is open. This may be acceptable.
- Orange**: The contact status is closed but has a large amount of gap or penetration. Check penetration and gap compared to pinball and depth.
- Gray**: Contact is inactive. This can occur for MPC and Normal Lagrange formulations. It can also occur for auto asymmetric behavior.

Slika 5.87

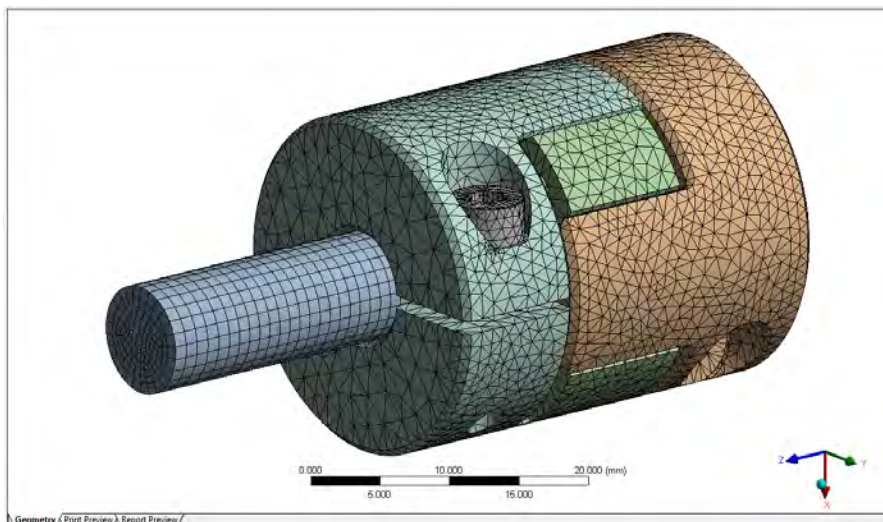
Tablica sa podacima o stanju svih kontakata

U stablu u prozoru *Outline* mogu se uočiti svi kontakti, dodati koordinatni sistemi i pozitivan znak pored polja *Mesh* što ukazuje da je proračunska mreža definisana. Ovo softver automatski radi prilikom izvršavanja komande *Contact Tool*, slika 5.88.



Slika 5.88
Izgled stabla u prozoru Outline

Ova proračunska mreža koju je softver sam definisao je previše gruba pa se stoga pravi nova mreža. Nova mreža je definisana samo veličinom elemenata od 2 mm i prikazana je na slici 5.89.



Slika 5.89
Početna proračunska mreža sklopa spojnice sa elastomerom

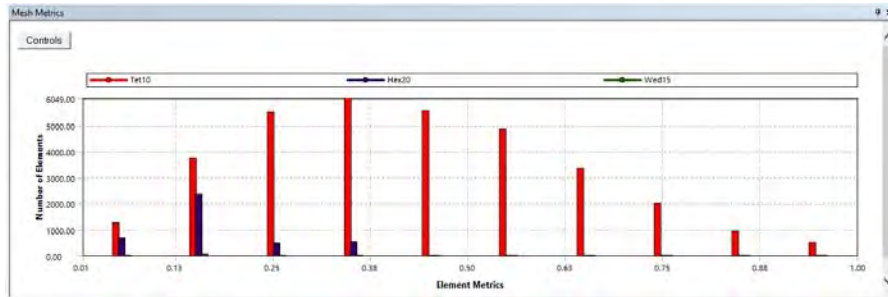
Parametri za podešavanje proračunske mreže u prozoru *Details of „Mes“* dati su na slici 5.90.

Details of "Mesh" ⌵	
<input type="checkbox"/>	Display
Display Style	Body Color
<input type="checkbox"/>	Defaults
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
<input type="checkbox"/>	Sizing
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Element Size	1.0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.5342e-002 mm
<input type="checkbox"/>	Inflation
<input type="checkbox"/>	Patch Conforming Options
<input type="checkbox"/>	Patch Independent Options
<input type="checkbox"/>	Advanced
<input type="checkbox"/>	Defeaturing
<input type="checkbox"/>	Statistics
<input type="checkbox"/> Nodes	77548
<input type="checkbox"/> Elements	37712
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	5.954e-003
<input type="checkbox"/> Max	0.99994
<input type="checkbox"/> Average	0.39816
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.20798

Slika 5.90

Definisani parametri početne proračunske mreže u levom prozoru Details of "Mesh"

Kvalitet proračunske mreže, ocenjen opcijom *Skewness*, dat je na slici 5.91.



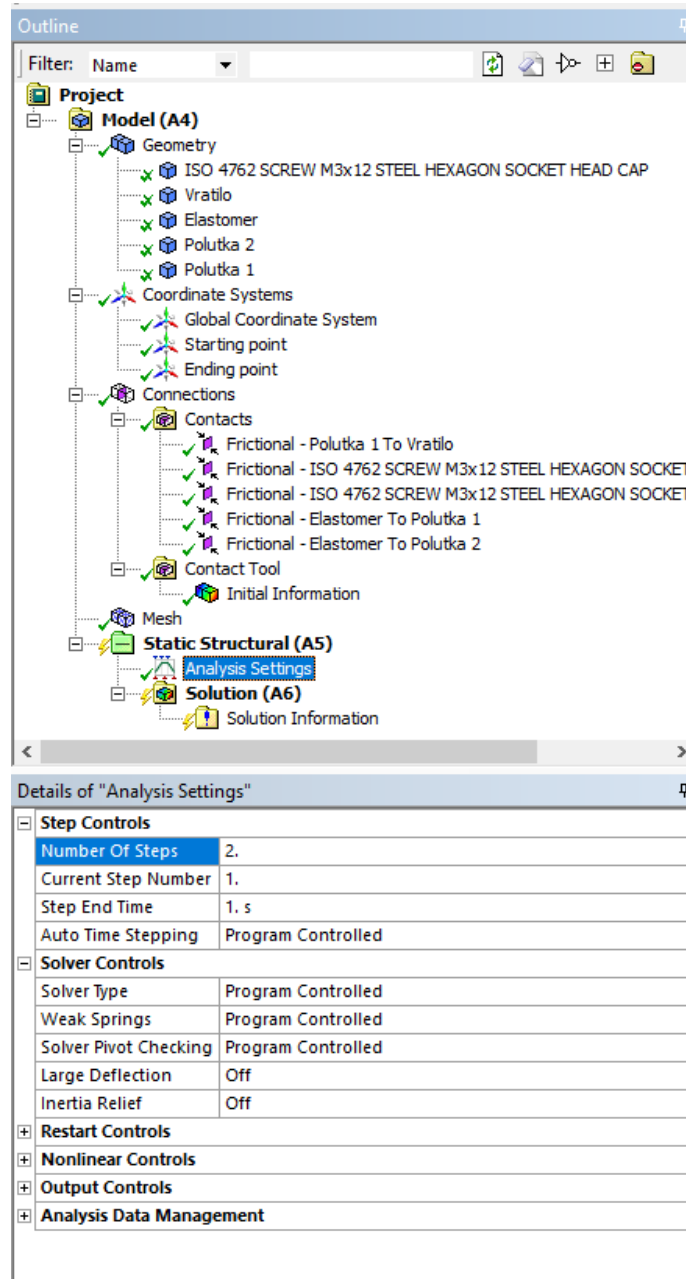
Slika 5.91
Kvalitet pojedinačnih delova proračunske mreže spojnice

Iterativni postupak pravljenja finije proračunske mreže je prikazan u poslednjem koraku. Za sada se može zaključiti da je proračunska mreža suviše gruba u predelu zavrtnja i zone prosecanja polutke spojnice.

Korak 5 – Definisavanje numeričkog modela

Numerički model se postavlja u 2 koraka, prvi korak je pritezanje spojnice za zavrtnjem M3, a u drugom koraku se spojnica izlaže opterećenju, obrtnom momentu i centrifugalnoj sili.

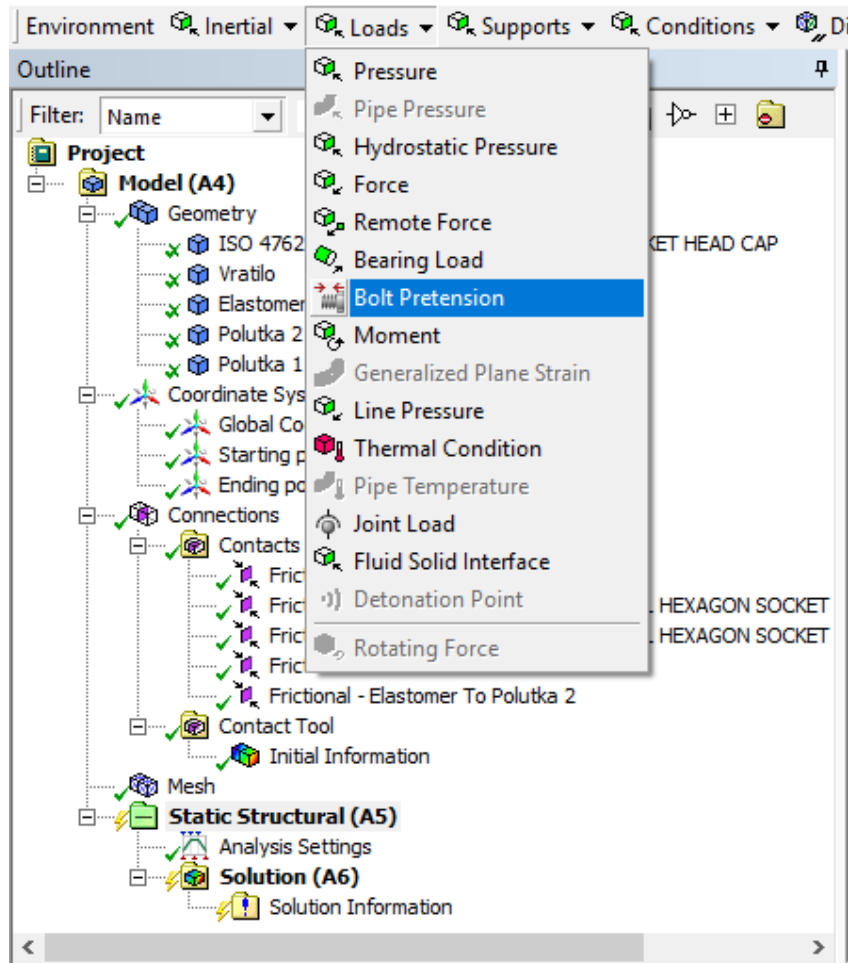
Ovo definisanje koraka se vrši klikom na polje *Analysis Settings* u prozoru *Outline*, i upisivanjem vrednosti 2 u polju *Number of Steps* u prozoru ispod *Details of „Analysis Settings“*, slika 5.92.



Slika 5.92

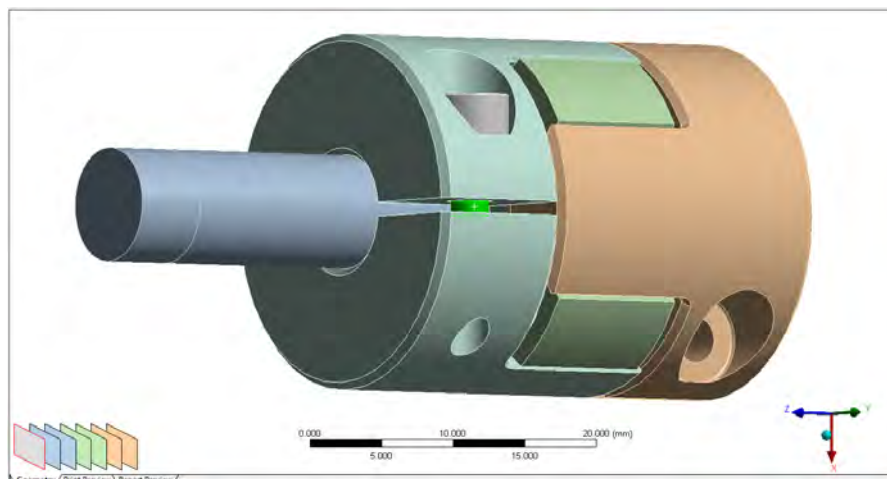
Podేశavanje numeričkog modela koji se izvršava u 2 koraka

Prvo je uneto pritezanje zavrtnja, opcijom *Bolt Pretension* koja se nalazi u paleti *Loads*, slika 5.93.



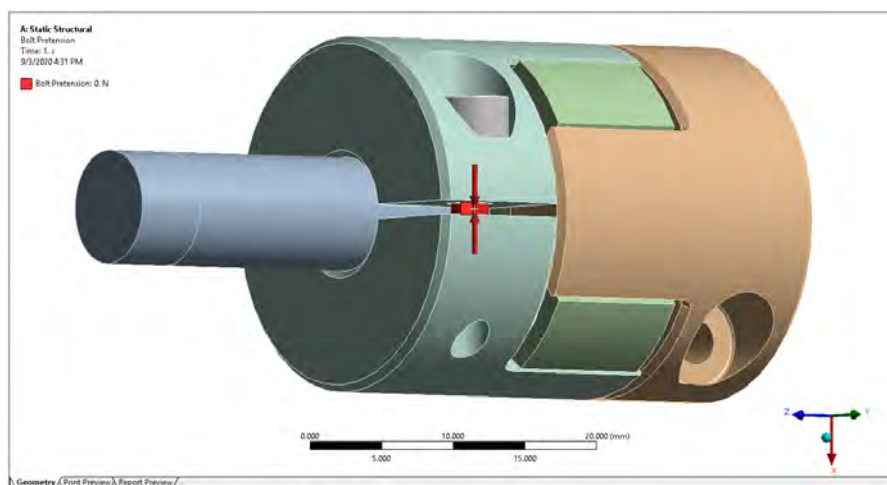
Slika 5.93
Opcija Bolt Pretension

Za polje *Geometry*, u prozoru *Details of „Bolt Pretension“*, bira se cilindrična površ zavrtnja, levim klikom na sredinu površi u glavnom prozoru, koja nije u kontaktu sa polutkom spojnice, površ koja je dobijena u koraku 3, slika 5.94.



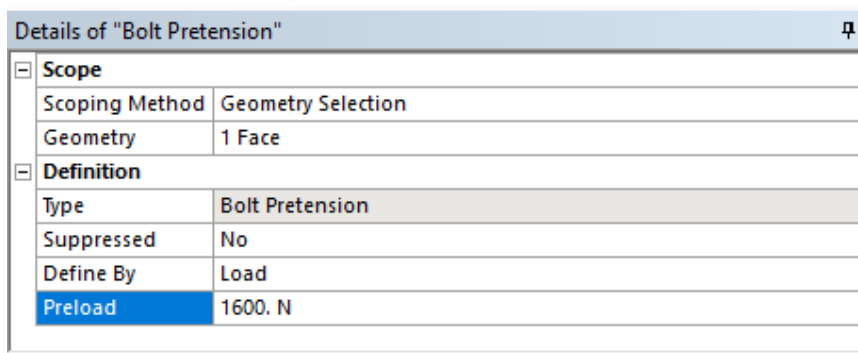
Slika 5.94
Površ na koju se unosi pritezanje zavrtnja

Tačno na mestu levog klika na površ, postavlja se plusić, slika 5.94, a prihvatanjem ove površi za polje *Geometry* površ postaje crvena i pojavljuju se 2 strelice koje ukazuju tačno mesto unošenja pritezanja zavrtnja, slika 5.95.



Slika 5.95
Strelice koje prizazuju tačnu poziciju i pravac pritezanje zavrtnja

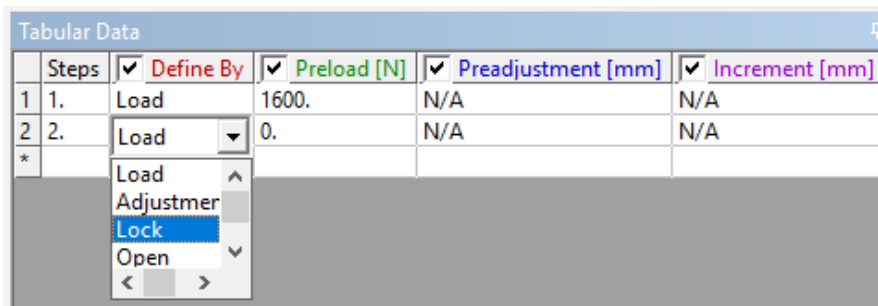
U polje *Preload* u prozoru *Details of „Bolt Pretension“*, uneta je vrednost pritezanja od 1600 N, slika 5.96.



Slika 5.96

Podšavanja za opciju Bolt Pretension u prozoru Details of „Bolt Pretension“

Da bi se pritezanje zadržalo i u drugom koraku proračuna, u prozoru *Tabular Data*, izabrana je opcija *Lock* u padajućem meniju klikom na strelicu u drugom koraku polja *Define By*, slika 5.97.



Slika 5.97

Podšavanja za opciju Bolt Pretension u prozoru Tabular Data

Sa ovim korakom automatski nestaje vrednost nula u polju *Preload* za drugi korak, slika 5.98.

Tabular Data					
	Steps	Define By	Preload [N]	Preadjustment [mm]	Increment [mm]
1	1.	Load	1600.	N/A	N/A
2	2.	Lock	N/A	N/A	N/A
*					

Slika 5.98

Podšavanja za opciju Bolt Pretension u prozoru Tabular Data

Centrifugalno, zapremisko, opterećenje se unosi opcijom *Rotational Velocity* iz palete *Inertial* kao u prethodnim primerima. Podšavanja za ovu opciju u prozoru *Details of „Rotational Velocity“* prikazana su na slici 5.99.

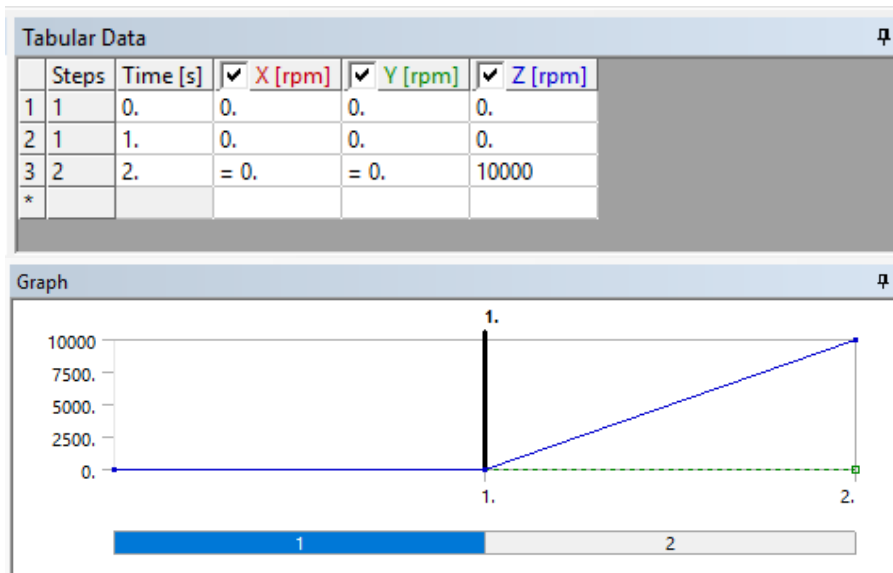
Details of "Rotational Velocity"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Definition	
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. RPM (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0. RPM (ramped)
<input checked="" type="checkbox"/> Z Component	10000 RPM (ramped)
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0. mm
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0. mm
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0. mm
Suppressed	No

Slika 5.99

Podšavanja za opciju Rotational Velocity u prozoru Details of „Rotational Velocity“

U prozoru *Tabular Data* uneta je vrednost 0 za prvi korak jer se tada odvija samo pritezanje, dok je u drugom koraku upisana vrednost od 10 000 obr/min (RPM), slika 5.100.

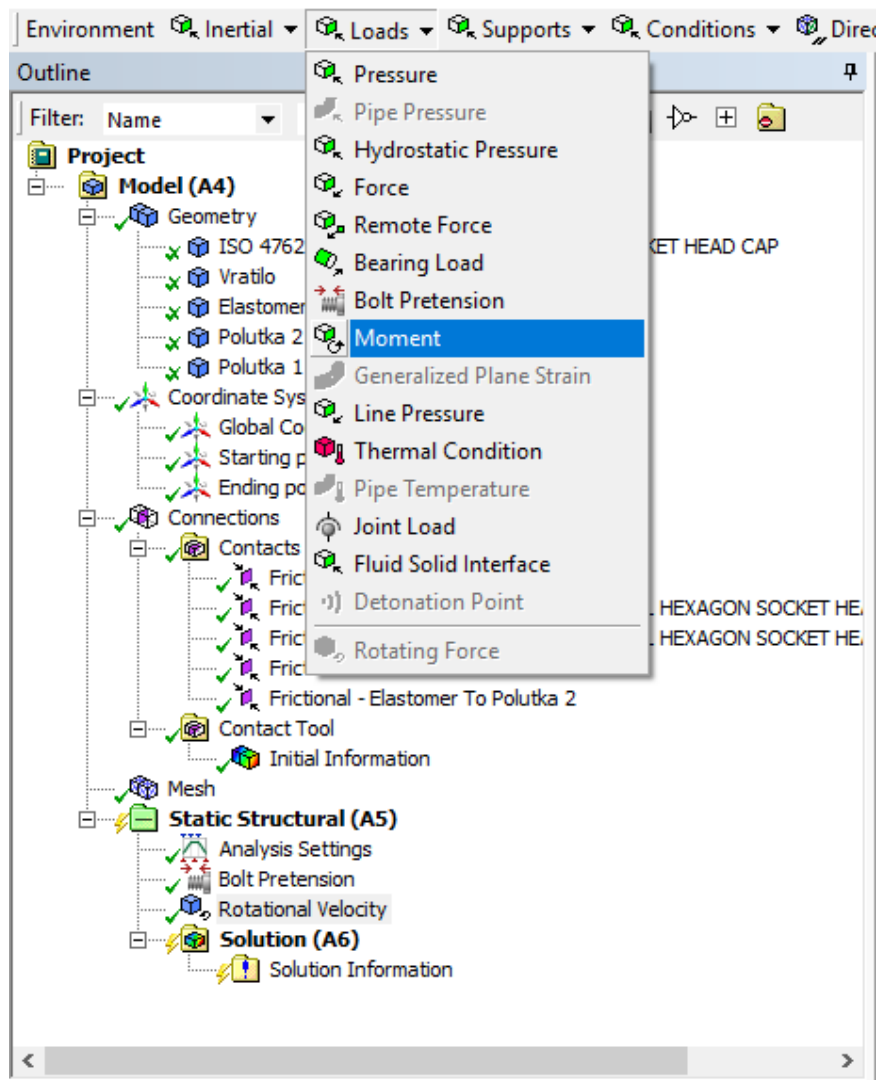
Upisivanje vrednosti se može uraditi nakon duplog klika na odgovarajuće polje. U prozoru *Graph* se pojavljuje i dijagram koji ilustruje opterećenje u prvom i drugom koraku, slika 5.100.



Slika 5.100

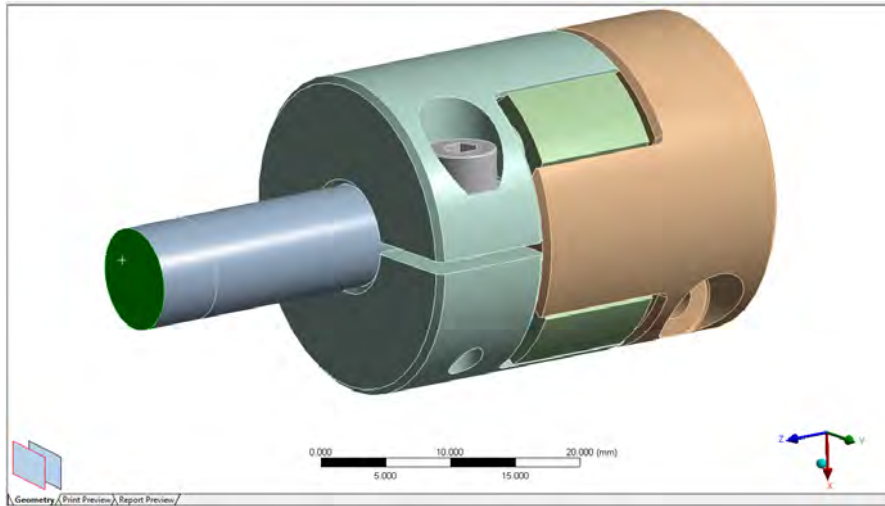
Podешavanja za opciju Rotational Velocity u prozoru Tabular Data i dijagram koji ilustruje opterećenje u prozoru Graph

Spojница u toku rada prenosi obrtni moment od 2 Nm, pa je stoga opcijom *Moment* iz palete *Loads*, unet ovaj moment u pravcu Z ose, slika 5.101.



Slika 5.101
Opcija Moment

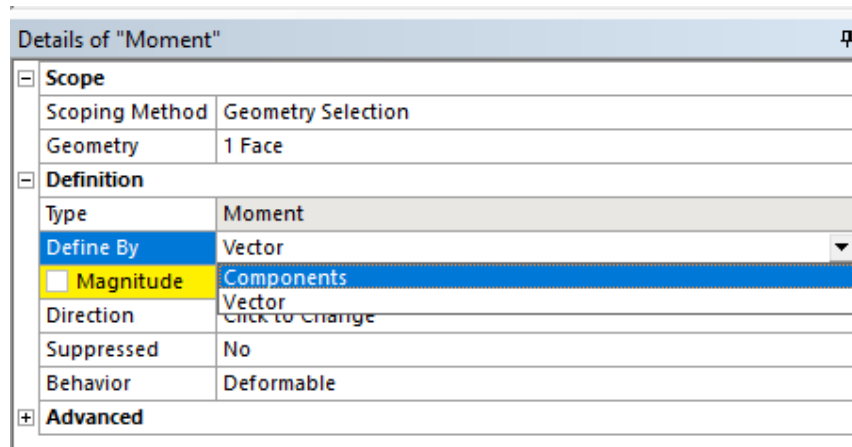
Čeona površina vratila, slika 5.102, je odabrana za polje *Geometry* u prozoru *Details of „Moment“*.



Slika 5.102

Čeona površ vratila izabrana za unos obrtnog momenta

U polju *Define By* odabrana je opcija *Components* umesto *Vector*, kako bi se uneo moment oko željene ose, slika 5.103.



Slika 5.103

Opcija *Components* za unos momenta u željenom pravcu

U novootvorenom polju *Z Component* je uneta vrednost obrtnog momenta od 2 Nm tj. 2 000 Nmm, slika 5.104. Sa ovime su podešavanja za opciju *Moment* u prozoru *Details of „Moment“* potpuno definisana.

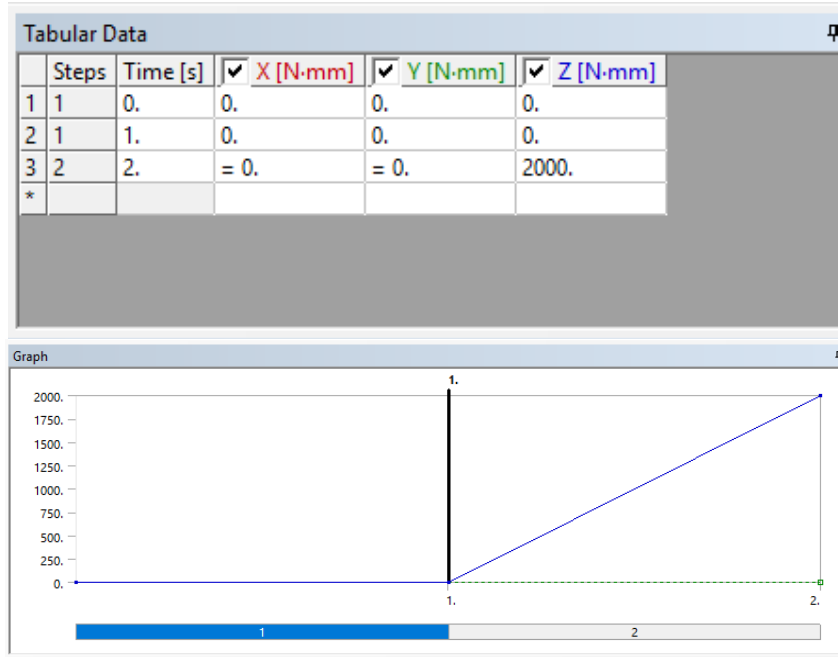
Details of "Moment" ⌵	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Moment
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0. N-mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0. N-mm (ramped)
<input checked="" type="checkbox"/> Z Component	2000. N-mm (ramped) ▶
Suppressed	No
Behavior	Deformable
[+] Advanced	

Slika 5.104

Podešavanja za opciju *Moment* u prozoru *Details of „Moment“*

U prozoru *Tabular Data* je definisan obrtni moment za svaki korak proračuna. Odnosno, za prvi korak je uneta vrednost od 0 Nmm, dok je za drugi korak upisana vrednost od 2 000 Nmm.

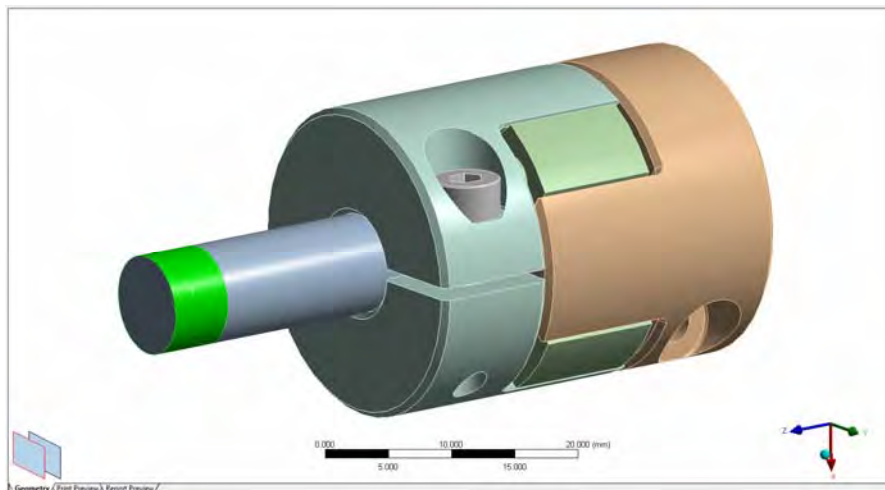
Izgled prozora *Tabular Data* sa unetim podacima i dijagram koji ilustruje opterećenje kroz korake u prozoru *Graph* su dati na slici 5.105.



Slika 5.105

Podšavanja za opciju Moment u prozoru Tabular Data i dijagram koji ilustruje opterećenje u prozoru Graph

Nakon unetih opterećenja potrebno je oduzeti stepene slobode sklopu, tj. delovima. Cilindričnoj površi koja predstavlja rukavac vratila za ležaj i koja je prikazana na slici 5.106, oduzima se mogućnost radijalnog kretanja što simulira uticaj ležaja opcijom *Cylindrical support*, iz menija *Supports*, koja je već korišćena u prethodnom primeru 3.



Slika 5.106

Površ vratila koja predstavlja rukavac za ležaj

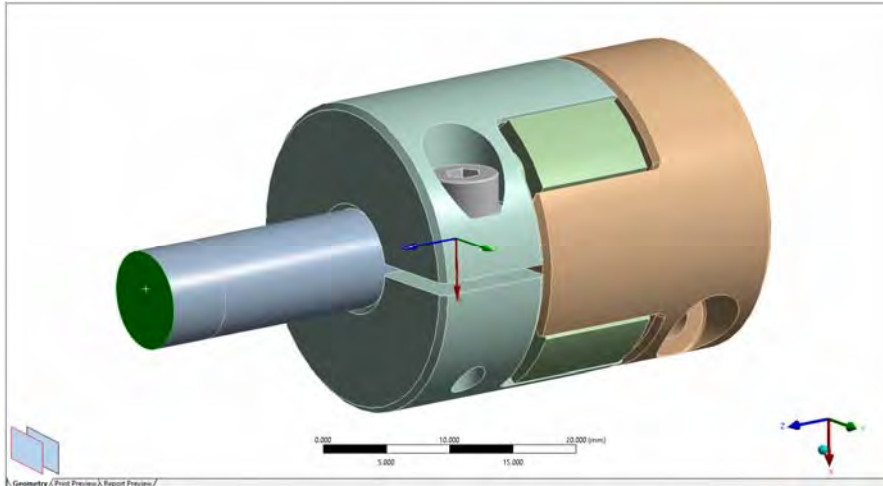
Ovoj površi oduzeta je mogućnost radijalnog pomeranja, a oslobodjena je aksijalno i tangencijalno. Podešavanja za opciju *Cylindrical Support* u prozoru *Details of „Cylindrical Support“* data su na slici 5.107.

Details of "Cylindrical Support" ⌵	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Cylindrical Support
Radial	Fixed
Axial	Free
Tangential	Free
Suppressed	No

Slika 5.107

Podešavanja za opciju Cylindrical Support u prozoru Details of „Cylindrical Support“

Aksijalno pomeranje vratila oduzeto je na čeonj površini, slika 5.108, opcijom *Displacement* iz menija *Supports*.



Slika 5.108

Površ vratila kojoj se oduzima aksijalno pomeranje

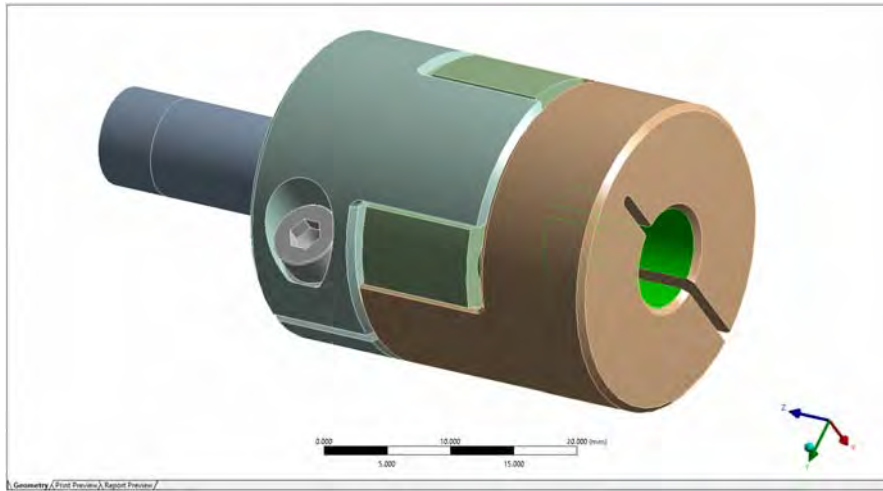
Aksijalno pomeranje vratila oduzima se upisivanjem vrednosti 0 u polju *Y Component* u prozoru *Details of „Displacement“*, slika 5.109.

Details of "Displacement" ⌵	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Free
Y Component	Free
<input checked="" type="checkbox"/> Z Component	0. mm (ramped) ▶
Suppressed	No

Slika 5.109

Podšavanja za opciju Displacement u prozoru Details of „Displacement“

Na drugoj strani spojnice uneta je opcija *Fixed Support*, iz iste palete *Supports*, kako bi se pružio otpor obrtnom momentu. Izabrane su površi polutke spojnice koje dolaze u kontakt sa vratilom sa druge strane (misli se na vratilo koje ne postoji u modelu), slika 5.110.



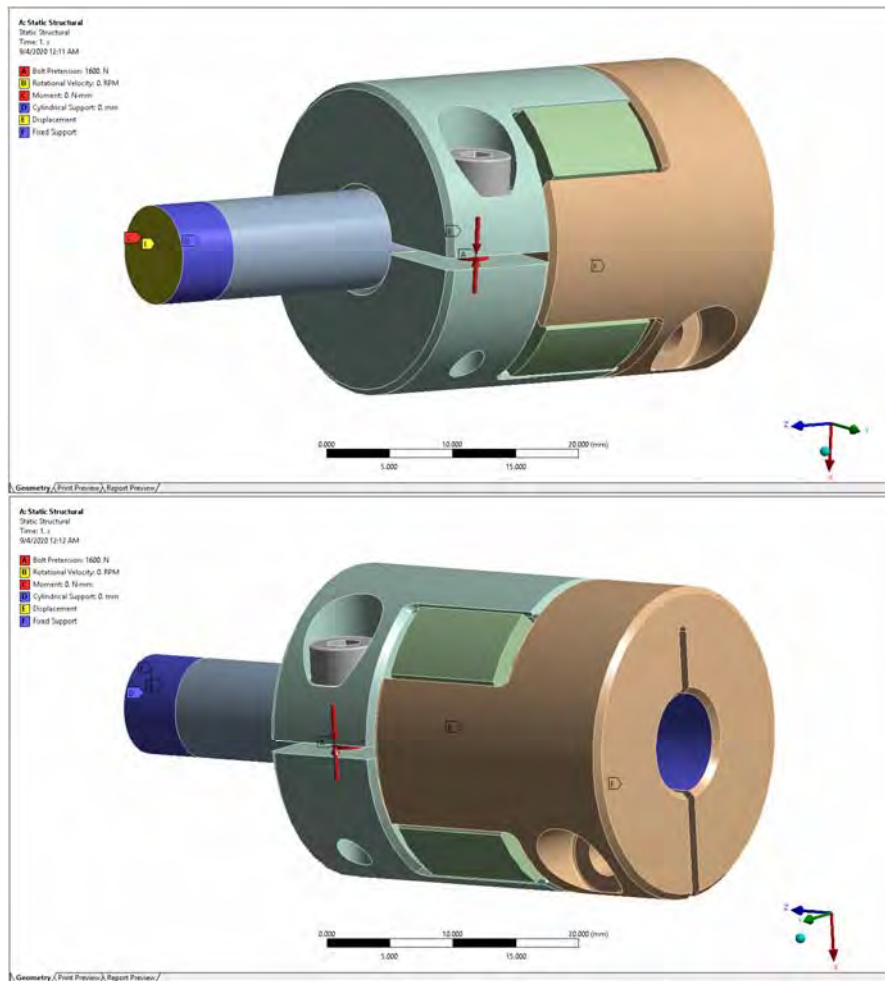
Slika 5.110
Izabrane površi za opciju *Fixed Support*

Podešavanja za alatku *Fixed Support*, u prozoru *Details of „Fixed Support“* data su na slici 5.111.

Details of "Fixed Support" ⌵	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
[-] Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

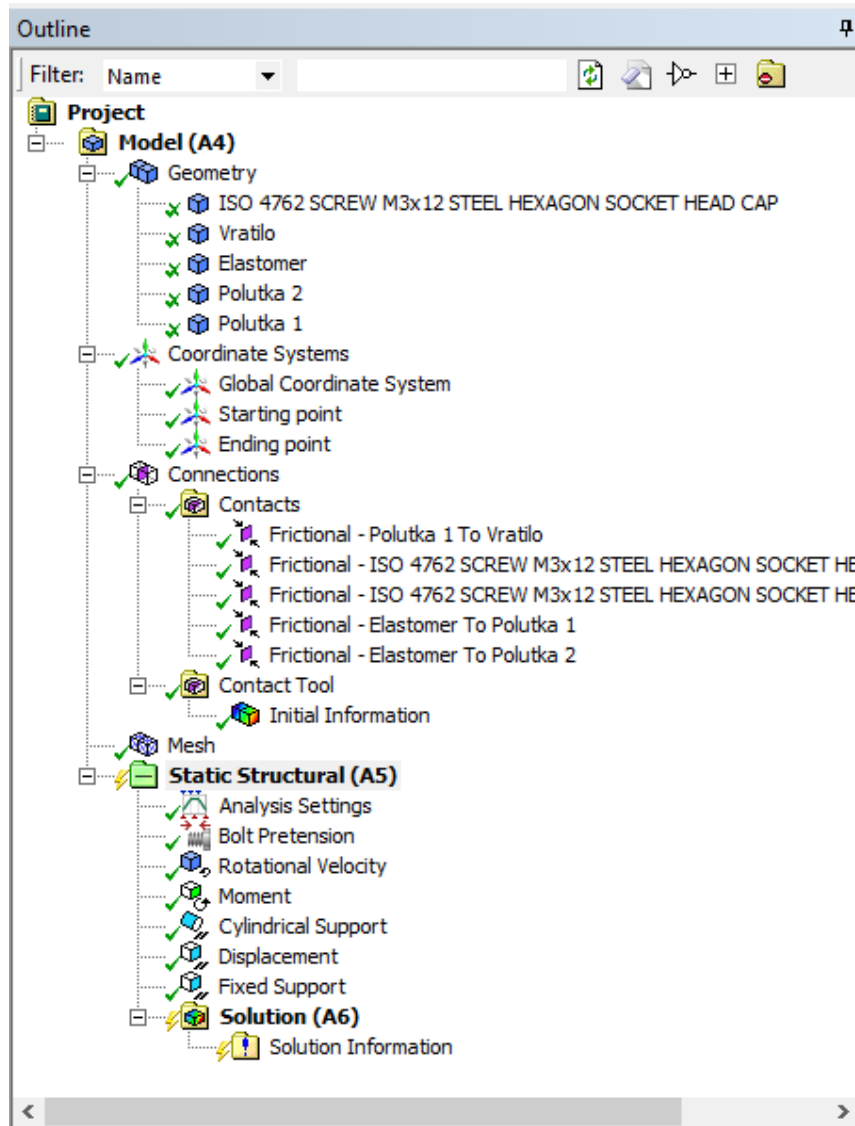
Slika 5.111
Podešavanja za alatku *Fixed Support* u prozoru *Details of „Fixed Support“*

Kompletno definisan numerički model sklopa spojnice sa elastomerom, u glavnom prozoru, dat je na slici 5.112. Ovaj prikaz dobija se klikom na polje *Static Structural (A5)* u prozoru *Outline*.



Slika 5.112
Kompletno definisan numerički model sklopa spojnice sa elastomerom

Izgled prozora *Outline* sa dosadašnjim koracima je dat na slici 5.113.



Slika 5.113
Prozor Outline sa dosadašnjim koracima

Korak 6 – Izvršavanje proračuna

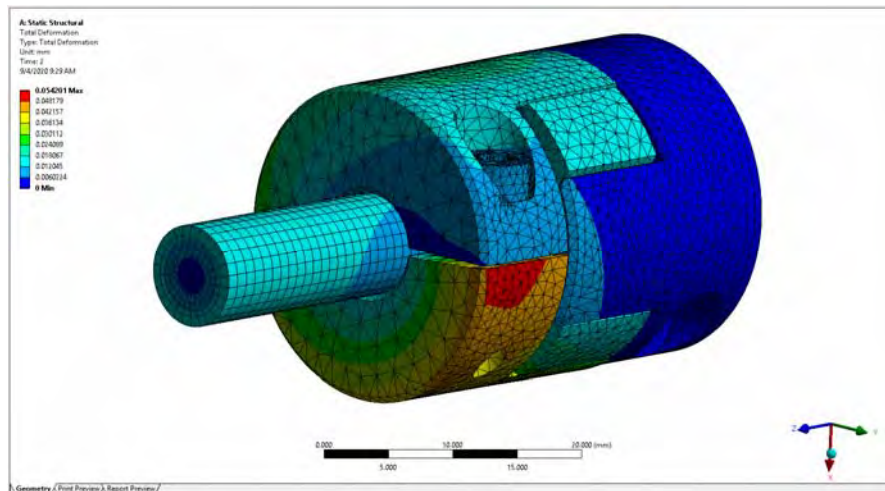
Kada je numerički model definisan svojom mrežom, graničnim uslovima i opterećenjem može se pristupiti njegovom rešavanju desnim klikom na polje *Static Structural* i levim klikom na komandu *Solve*. Nakon završenog proračuna dobija se pozitivna oznaka pored polja *Solution*.

Obzirom da su aktivirani *Frictional* tipovi kontakata proračun se izvršava kroz nekoliko iteracija jer je numerički model značajno zahtevniji i dosta duže traje u odnosu na prethodne primere.

Korak 7 – Prikaz rezultata

Za prvu iteraciju, sa grubom mrežom, korišćene su alatke *Total* iz padajućeg menija *Deformation* i *Equivalent (von-Mises)* iz menija *Stress*.

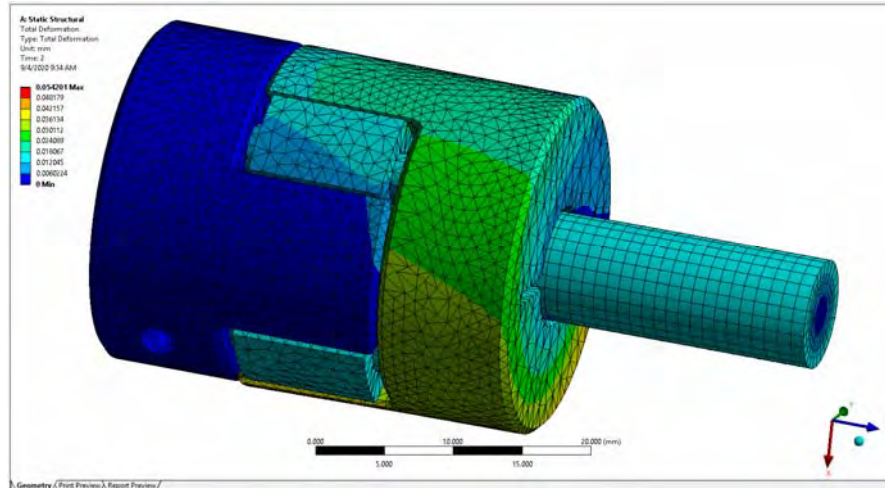
Alatkom *Total Deformation* i uvećanjem prikaza 15 puta jasno se uočava deformisanje prve polutke spojnice usled pritezanja zavrtnja, slika 5.114.



Slika 5.114

Opcija *Total Deformation* sa pogledom na prvu polutku spojnice

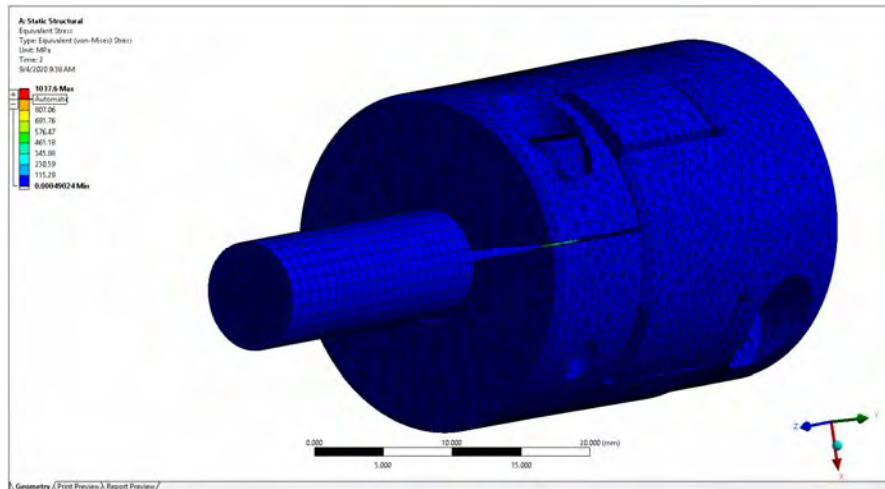
Na videu se može uočiti i sabijanje elastomera usled obrnog momenta, slika 5.115, dok se uvijanje vratila ne može vizuelno uočiti bez znatno većeg uvećanja deformacija jer su ova pomeranja značajno manja u odnosu na ostala.



Slika 5.115

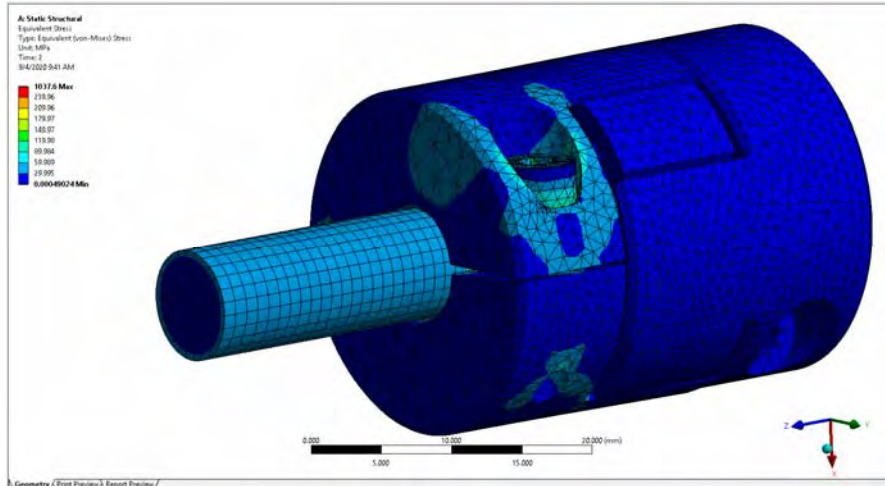
Opcija *Total Deformation* sa pogledom na sabijeni elastomer spojnice

Opcijom *Equivalent Stress* se ne primećuju naponi na ostatku strukture spojnice jer su naponi u zavrtnju daleko veći. Da bi se ovo izbeglo moguće je promeniti skalu levim klikom na liniju koja razdvaja dva polja skale, različitih boja, zadržavanjem klika i povlačenjem na dole ka nižim vrednostima, slika 5.116.

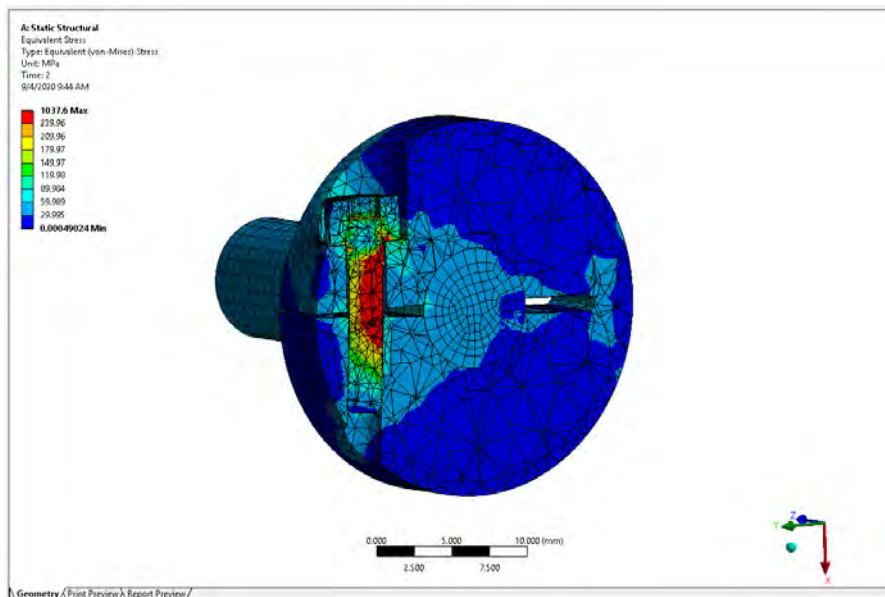


Slika 5.116

Opcija *Equivalent (von-Mises) Stress* i mogućnost korigovanja skale



Slika 5.117
Opcija Equivalent (von-Mises) Stress sa promenjenom skalom

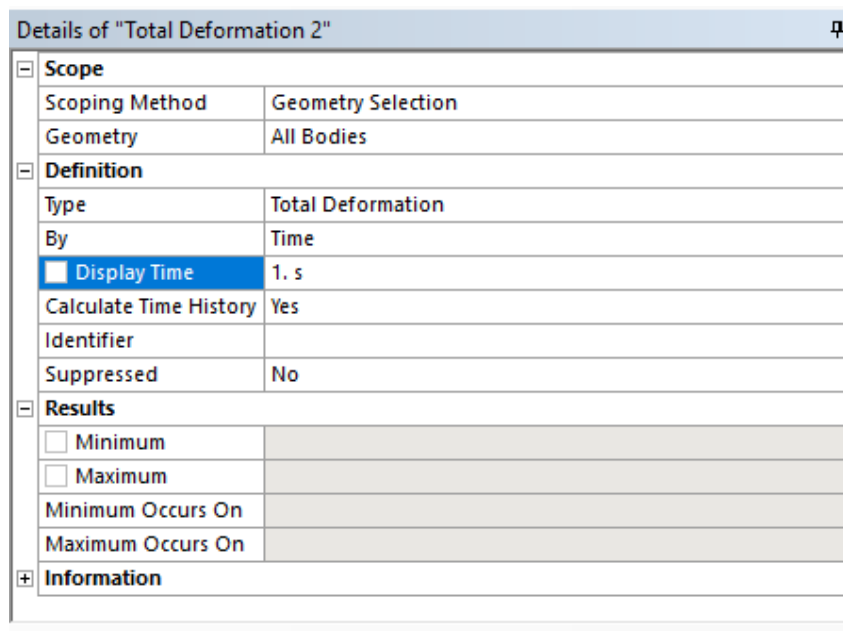


Slika 5.118
Opcija Equivalent (von-Mises) Stress sa promenjenom skalom
i uvedenim presekom u pravcu ose zavrta

Svlačenjem skale na vrednosti od oko 240 MPa dobija se prikaz u glavnom prozoru kao na slici 5.117.

Da bi se prikazala raspodela napona u zavrtnju mogu se sakriti ostala tela već pominjanom opcijom *Hide Body* ili uvođenjem preseka u pravcu ose zavrtnja kao na slici 5.118.

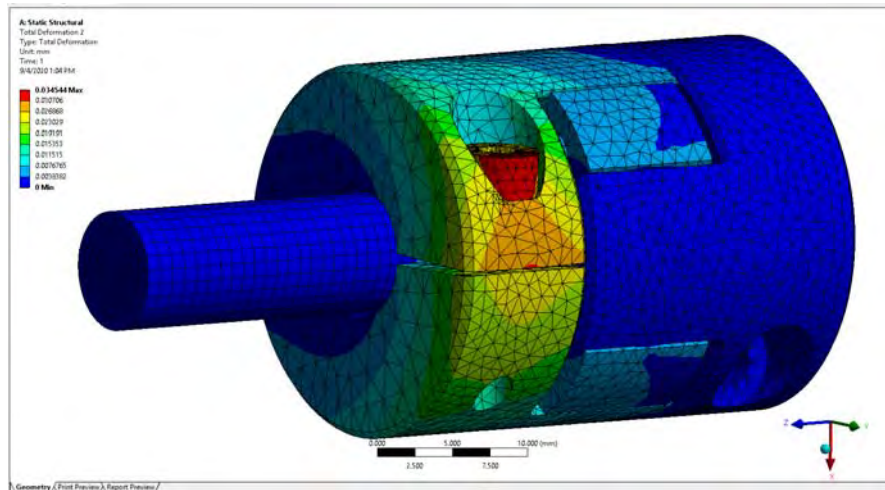
Alatkama *Total Deformation* i *Equivalent Stress* mogu se prikazati deformacijsko i naponsko stanje spojnice po koracima proračuna, tj. upisivanjem vrednosti 1 u polju *Display Time* u prozoru *Details of „...“* softver prikazuje deformacijsko ili naponsko stanje (u zavisnosti od izabrane alatke) spojnice nakon prvog koraka – pritezanja zavrtnja, slika 5.119.



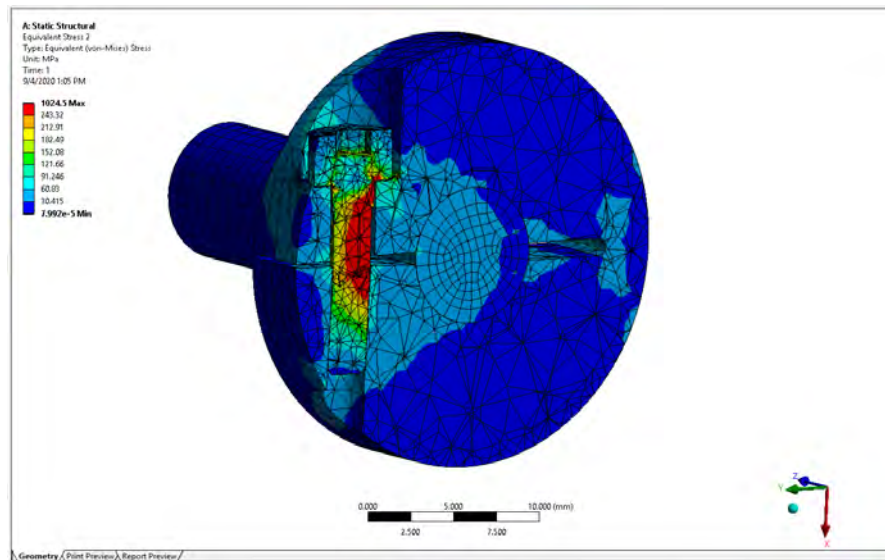
Slika 5.119

Podešavanja za opciju *Total Deformation* za prikazivanje stanja deformacija spojnice na kraju 1. koraka

Deformacije na kraju prvog koraka, dobijene prethodno objašnjenim postupkom prikazane su na slici 5.120, a naponi na slici 5.121.

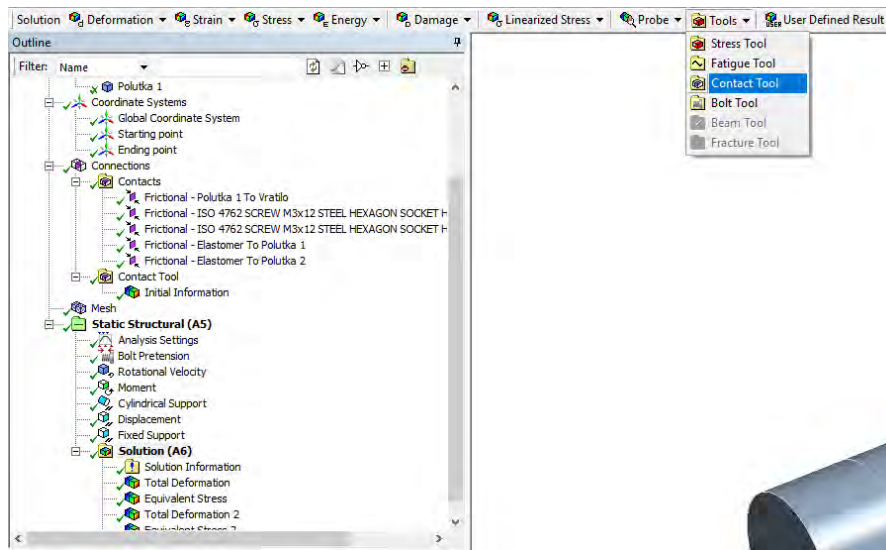


Slika 5.120
Deformacije na kraju 1. koraka



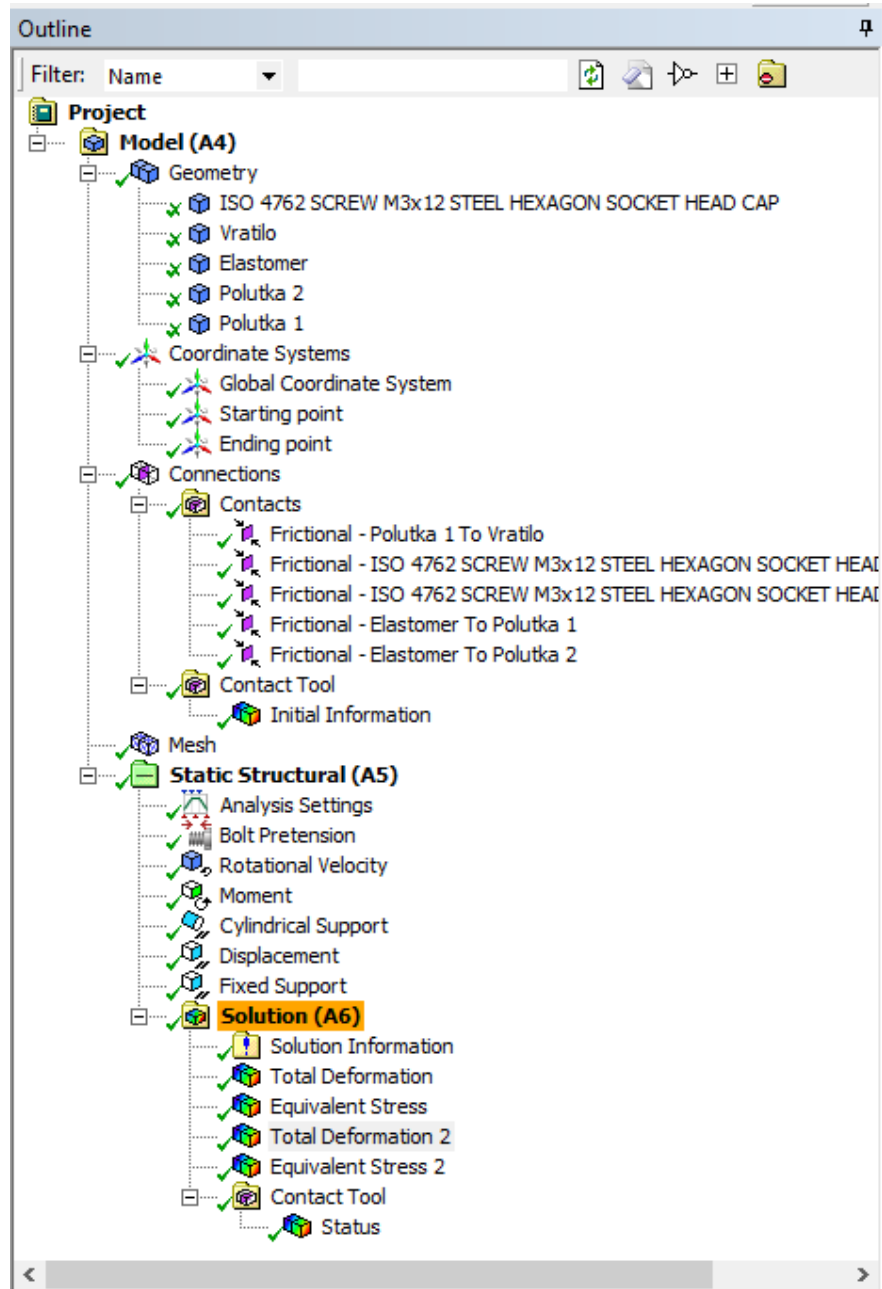
Slika 5.121
Naponi u preseku na kraju 1. koraka

Proverom kontaktnog pritiska na kontaktu između polutke spojnice i vratila može se zaključiti da li postoji prenos obrtnog momenta ili dolazi do proklizavanja. Alatom *Contact Tool*, iz padajućeg menija *Tools* na slici 5.122, mogu se analizirati rezultati na samim kontaktima.



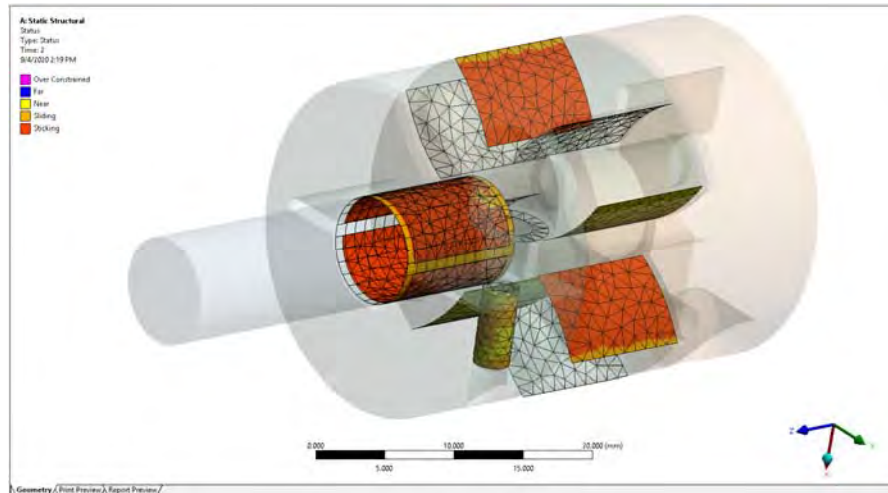
Slika 5.122
Alatka *Contact Tools*

U stablu u prozoru *Outline* u okviru alatke *Contact Tool* pojavljuje se polje *Status*, slika 5.123. Rezultati se učitavaju komandom *Generate All Results*.



Slika 5.123
Polje Status u prozoru Outline

Klikom na ove rezultate u glavnom ekranu se prikazuje status kontaktnih elemenata, da li postoji kontakt uopšte, da li je to proklizavanje ili su površi „zalepljene“, slika 5.124.



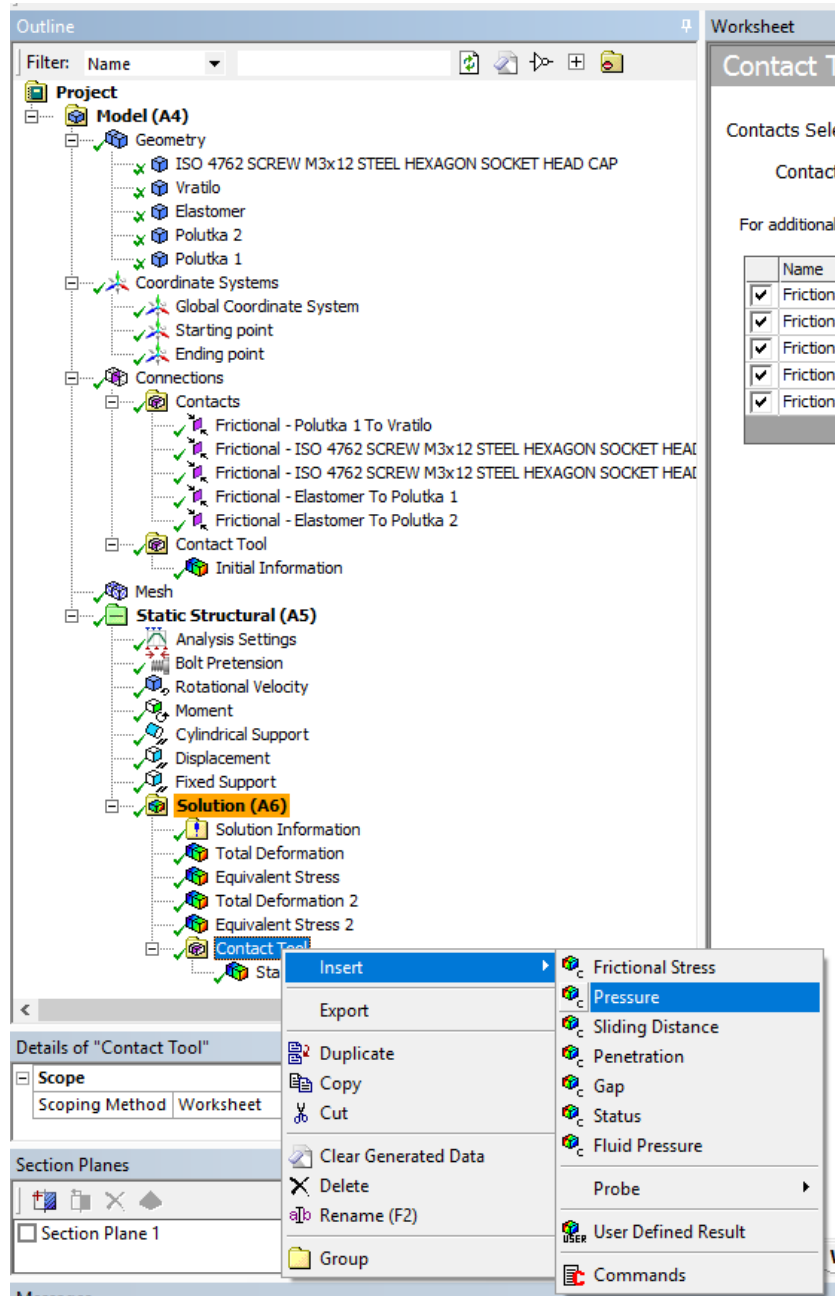
Slika 5.124

Prikaz statusa kontakata u glavnom prozoru

Prikaz kontaktnih pritisaka dobija se alatom *Pressure* koja se može naći desnim klikom na polje *Contact Tool* u prozoru *Outline* u okviru menija *Insert*, slika 5.125.

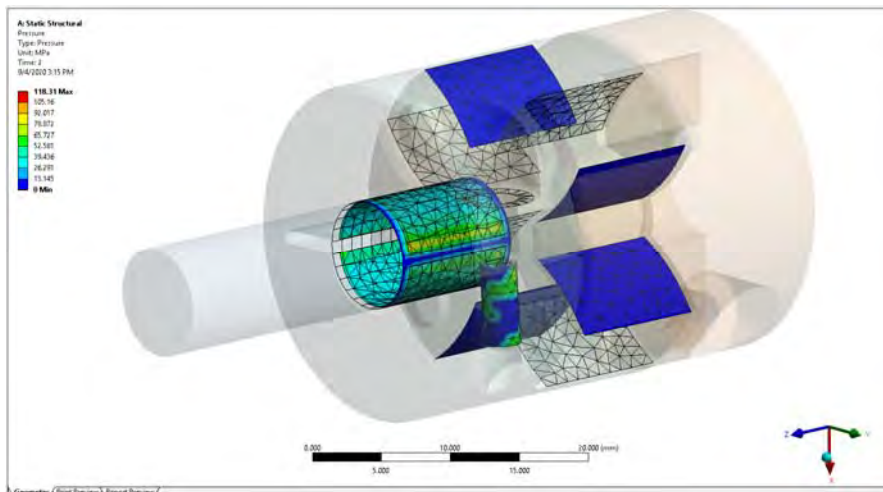
Desnim klikom na novonastalo polje *Pressure* u prozoru *Outline* i aktiviranjem komande *Generate All Results* dobija se raspodela kontaktnih pritisaka u glavnom ekranu, slika 5.126.

Na osnovu rezultata može se zaključiti da je model ispravno definisan, postoji deformacija usled pritezanja zavrtnja, postoji uvijanje vratila i deformacija elastomera usled obrtnog momenta; u drugom koraku se vidi da centrifugalna sila ima dejstvo na strukturu, raspodela kontaktnih pritisaka ukazuje da postoji prenos obrtnog momenta i da nema proklizavanja, itd. Raspodela napona takođe ukazuje na pritezanje zavrtnja i ostvarivanje preklopa između polutke spojnice i vratila. Međutim naponi zavrtnja su dosta visoki i potrebno je napraviti finiju proračunsku mrežu na zavrtnju kako bi se dobili precizniji rezultati. Finija mreža je neophodna na kontaktnim površima a naročito na navojnom spoju gde se preporučuje veličina elemenata barem 4 puta manja od koraka navoja.



Slika 5.125

Alatka Pressure za prikaz kontaktnih pritisaka



Slika 5.126

Raspodela pritisa na kontaknim površima u glavnom ekranu

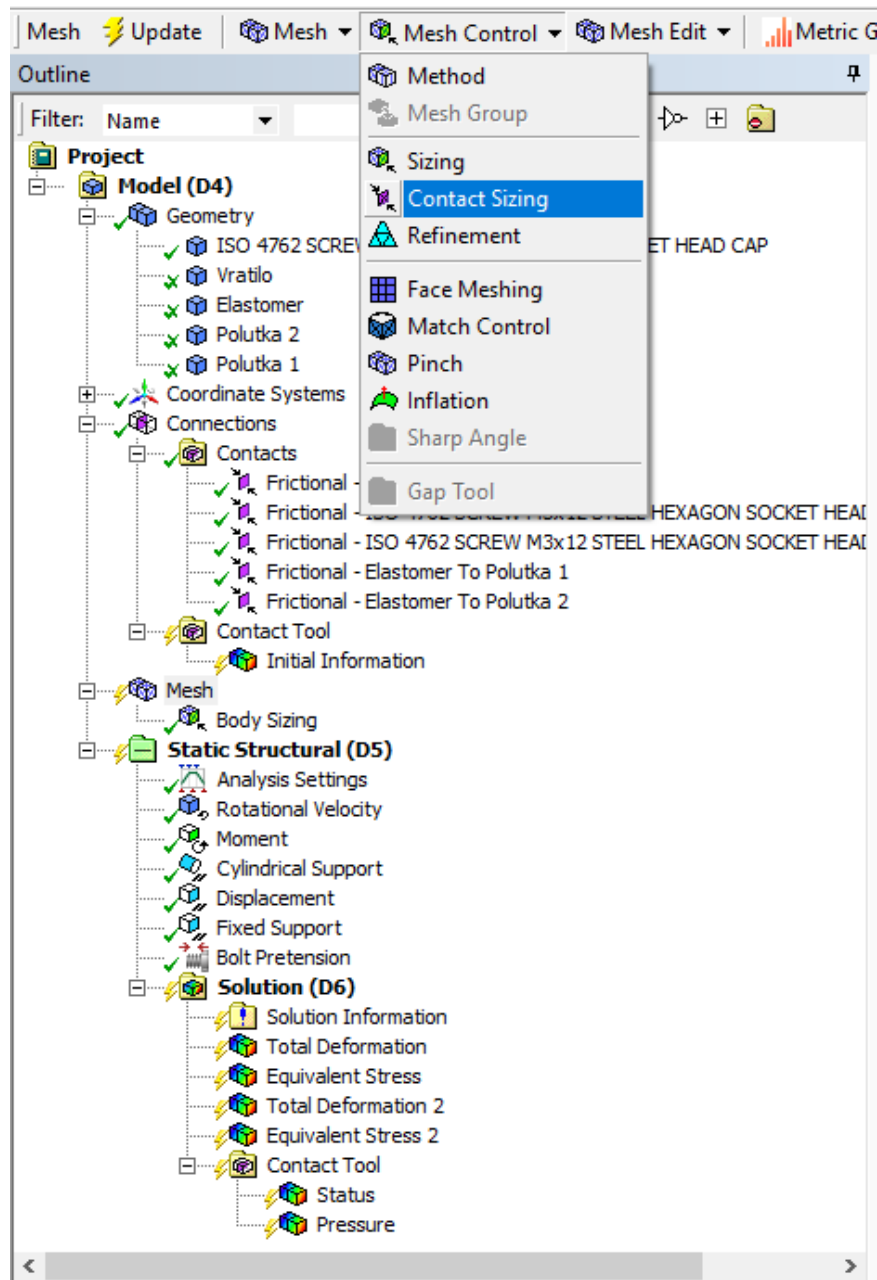
Korak 8 – Iterativni postupak definisanja odgovarajuće proračunske mreže i analiza rezultata

U posljednjem koraku potrebno je postepeno stvarati finiju proračunsku mrežu u zonama gde su visoki naponi, sve dok promena napona u tim zonama ne postane prihvatljiva.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	0.5 mm
Behavior	Soft

Slika 5.127

Podšavanja alatke Sizing za zadavanje veličine elemenata zavrtnja



Slika 5.128
Alatka Contact Sizing

Proračunska mreža koja je usvojena kao zadovoljavajuća u osnovnim podešavanjima ima nepromenjenu vrednost od 1 mm. Za zavrtnanj je uneta, dodatno opcijom *Sizing* iz padajućeg menija *Mesh Control*, veličina elementa od 0,5 mm u polju *Element Size*. U polju *Geometry* je izabran ceo zavrtnanj, a podešavanja za ovu alatku u prozoru *Details of "Body-Sizing" - Sizing* su data na slici 5.127.

Alatkom *Contact Sizing*, iz padajućeg menija *Mesh Control* na slici 5.128, zadaje se veličina elemenata na kontaktnim površinama između dva dela.

Za kontakt vratila i prve polutke spojnice upisana je vrednost od 0,5 mm u polju *Element Size* u prozoru *Details of "Contact Sizing" - Contact Sizing*, slika 5.129. U polju *Contact Region* bira se željeni kontakt od ponuđenih, *Frictional - Polutka 1 to Vratilo*, za koji se uvodi veličina elemenata na kontaknoj površi.

Details of "Contact Sizing" - Contact Sizing	
[-] Scope	
Contact Region	Frictional - Polutka 1 To Vratilo
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	0.5 mm

Slika 5.129

Podešavanja za opciju Contact Sizing i kontakt između polutke spojnice i vratila

Za kontakt glave zavrtnja i polutke spojnice upisana je vrednost veličine elemenata od 0,1 mm, slika 5.130.

Details of "Contact Sizing 2" - Contact Sizing	
[-] Scope	
Contact Region	Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD ...
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	0.1 mm

Slika 5.130

Podešavanja za opciju Contact Sizing i kontakt između polutke spojnice i glave zavrtnja

Za kontakt zavrtnja i polutke spojnice koji simulira navojni spoj upisana je vrednos od 0,1 mm što je 5 puta manja vrednost od koraka navoja, slika 5.131.

Details of "Contact Sizing 3" - Contact Sizing	
[-] Scope	
Contact Region	Frictional - ISO 4762 SCREW M3x12 STEEL HEXAGON SOCKET HEAD ...
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	0.1 mm

Slika 5.131

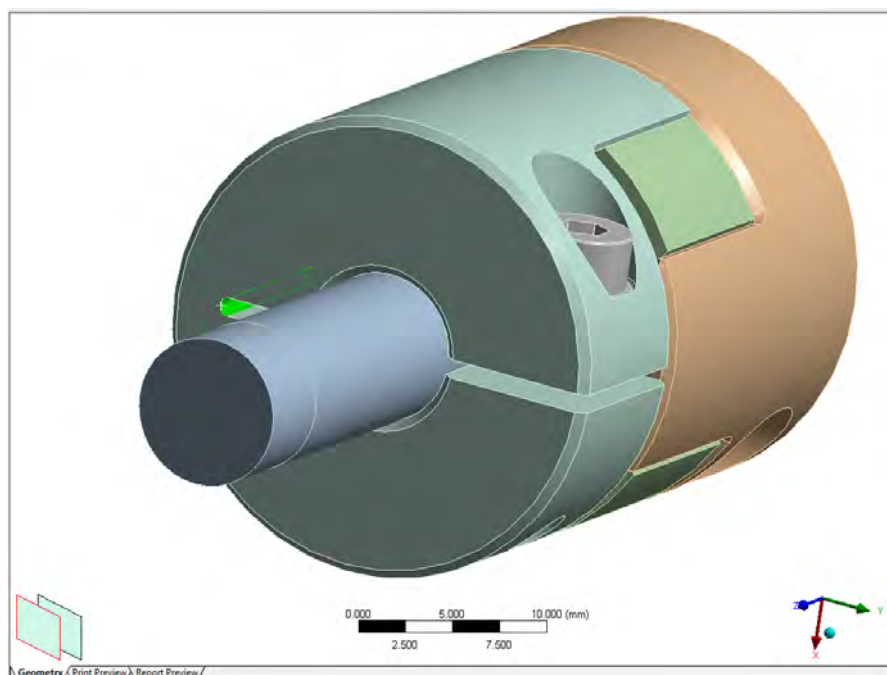
Podešavanja za opciju *Contact Sizing* i kontakt između polutke spojnice i navojnog dela stabla zavrtnja

Za kontakt elastomera i polutki nije uvedena zasebno veličina elemenata proračunske mreže jer se ne očekuju zone lokalno visokih napona, što se može zaključiti kroz proračun u koracima 5 i 6.

Međutim naponi na zaobljenju u rasečenom delu prve polutke spojnice nisu zanemarljivi i ovde treba proračunsku mrežu napraviti finijom.

Alatkom *Refinement*, odabranom zaobljenom površi, slika 5.132, u polju *Geometry* i upisanom vrednošću dva u polju *Refinement* u prozoru *Details of "Refinement"* - *Refinement* dobija se finija mreža u ovom predelu.

Na slici 5.133 prikazana su podešavanja za ovu alatku.

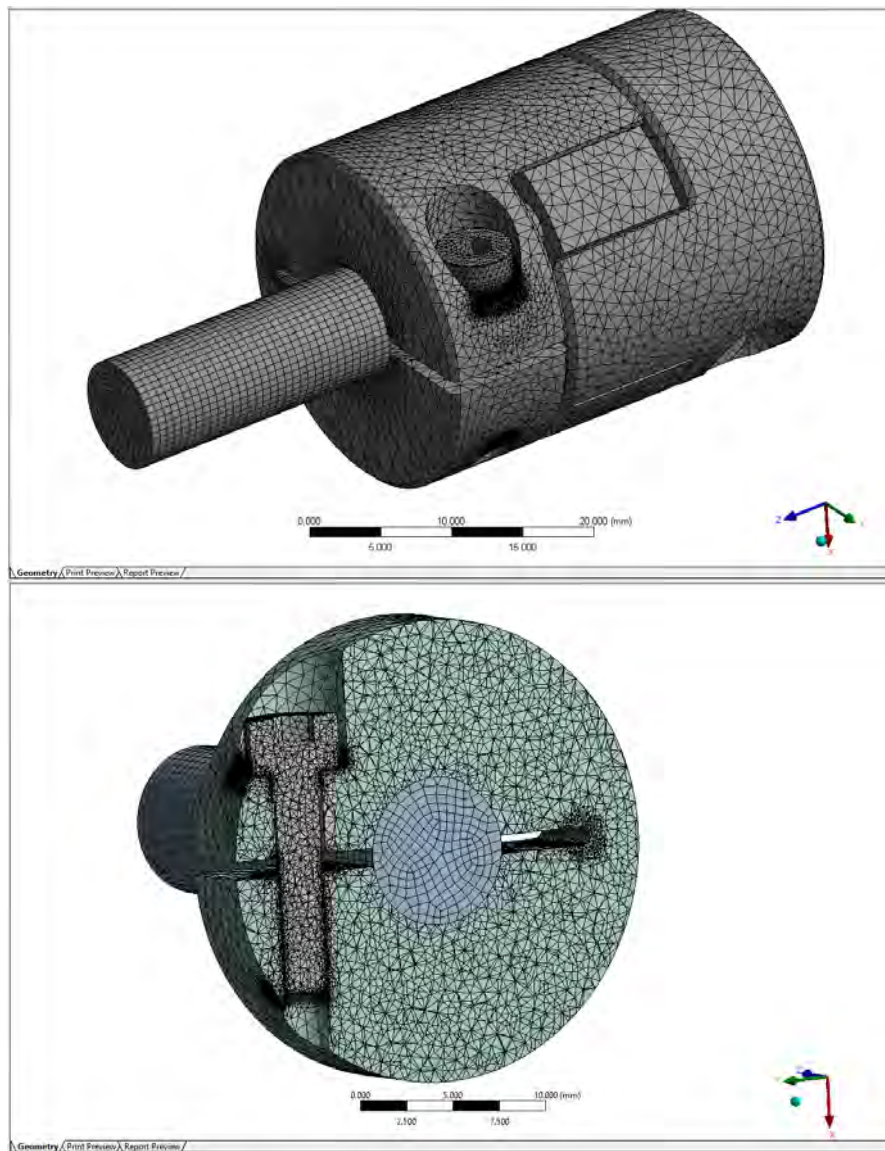


*Slika 5.132
Površ zaobljenja žleba na kojoj se uvodi alatka Refinement*

Details of "Refinement" - Refinement	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
<input checked="" type="checkbox"/> Refinement	2

*Slika 5.133
Podešavanja za opciju Refinement*

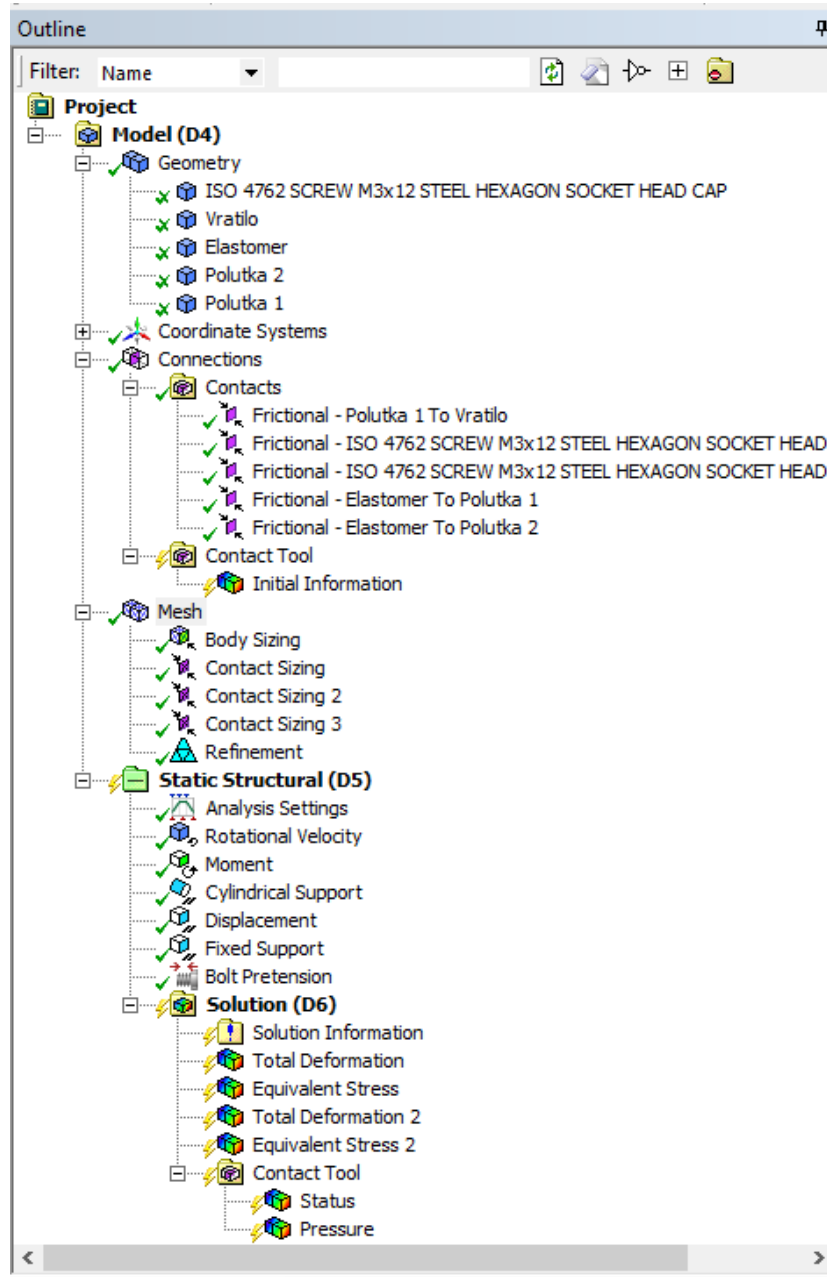
Dobijena proračunska mreža, koja je usvojena kao zadovoljavajuća za analizu rezultata, je prikazana na slici 5.134.



Slika 5.134

Usvojena proračunska mreža koja simulira geometriju modela sklopa spojnice sa elastomerom

Stablo i uvedene dodatne opcije za proračunsku mrežu u prozoru *Outline* su prikazani na slici 5.135.



Slika 5.135

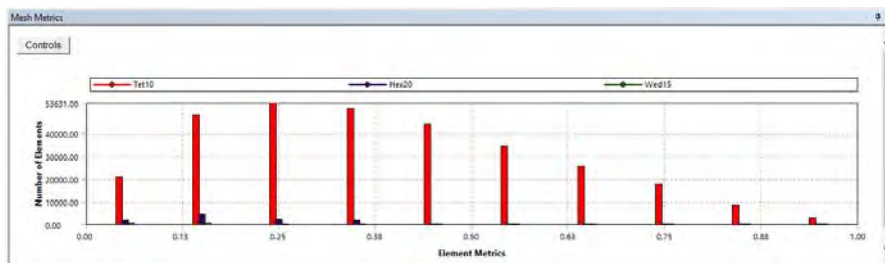
Stablo u kome se vide dodatne opcije za definisanje proračunske mreže

Opšta podešavanja i ocena kvaliteta elemenata proračunske mreže dati su na slikama ispod 5.136 i 5.137. Usvojena proračunska mreža sadrži 315 002 elementa.

Details of "Mesh" ⌵	
<input type="checkbox"/> Display	
Display Style	Body Color
<input type="checkbox"/> Defaults	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
<input type="checkbox"/> Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
<input type="checkbox"/> Element Size	1.0 mm
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.5342e-002 mm
<input type="checkbox"/> Inflation	
<input type="checkbox"/> Patch Conforming Options	
<input type="checkbox"/> Patch Independent Options	
<input type="checkbox"/> Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeaturing	
<input type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	523101
<input type="checkbox"/> Elements	315002
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	6.6236e-004
<input type="checkbox"/> Max	0.9998
<input type="checkbox"/> Average	0.37762
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.21091

Slika 5.136

Opšta podešavanja i opcija *Skewness* za ocenu kvaliteta elemenata proračunske mreže



Slika 5.137

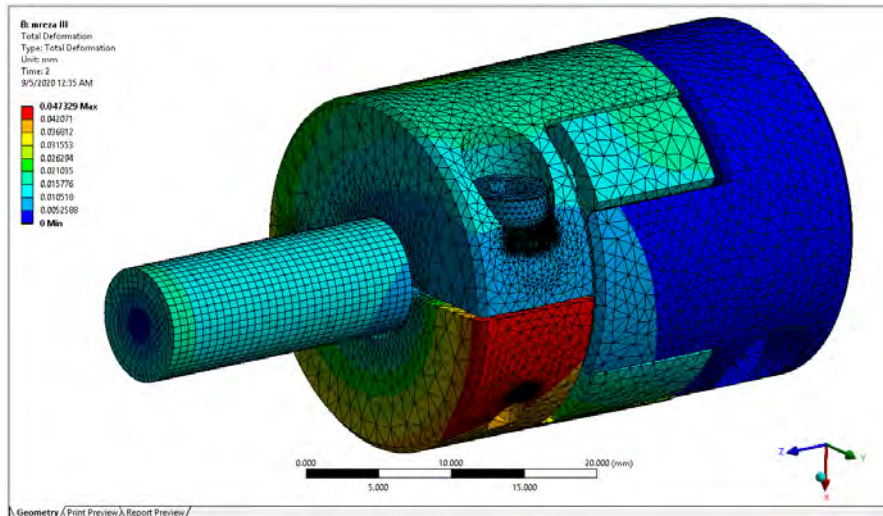
Ocena kvaliteta za usvojenu proračunsku mrežu po opciji Skewness

U daljem tekstu slede rezultati iz koraka 6 ali sa novom usvojenom proračunskom mrežom koja je finija u predelima od interesa.

Ukupne deformacije spojnice sa elastomerom su prikazane na slici 5.138 alatom *Total Deformation* i uvećanjem prikaza 15 puta. Jasno se uočava deformisanje prve polutke spojnice usled pritezanja zavrtnja. Video simulacijom se zaključuje da je pomeranje od 0.047 mm polutke spojnice uglavnom zbor relativne rotacije jedne polutke u odnosu na drugu, što sabija elastomer.

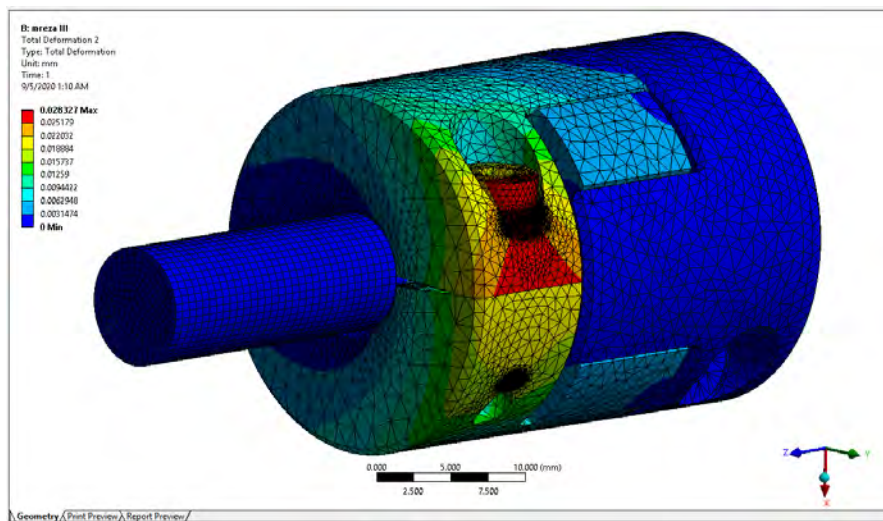
Na slici 5.139 su prikazane deformacije na kraju prvog koraka, pritezanja zavrtnja, i ovde se uočavaju deformacije od 0,25-0,28 mm koje se odnose na privlačenje rasečenih delova polutke spojnice. Ovo relativno kretanje, ugaono, jedne polutke spojnice u odnosu na drugu ukazuje na ostvareni prenos obrtnog momenta bez klizanja.

Sa druge strane širenje vratila usled centrifuge se može vizuelno primetiti sa većim uvećanjem kao i samo uvijanje vratila usled obrtnog momenta. Ako se pusti video simulacija rada spojnice uočava se i ugaono zakretanje jedne polutke spojnice u odnosu na drugu, a samim tim i sabijanje elastomera, što opet ukazuje na prenos obrtnog momenta i na elastična svojstva spojnice.



Slika 5.138

Ukupne deformacije spojnice sa elastomerom u toku rada spojnice

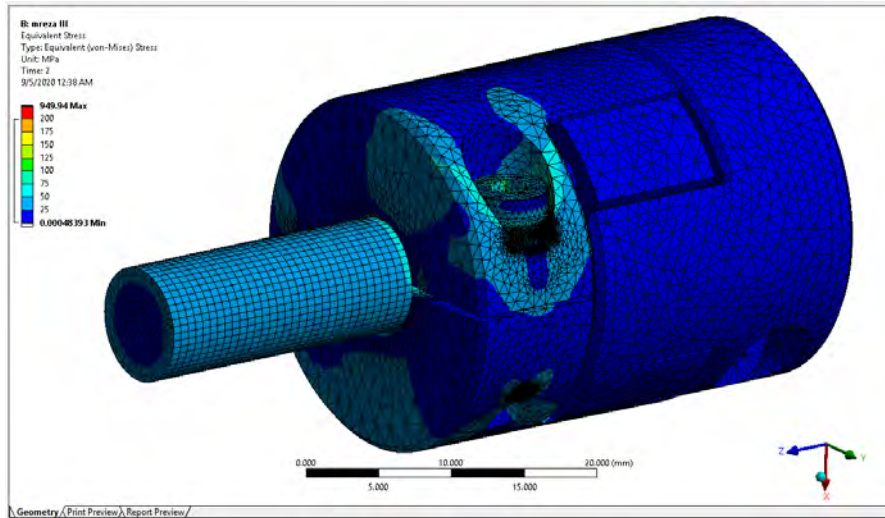


Slika 5.139

Ukupne deformacije spojnice sa elastomerom u toku rada spojnice – korak 1

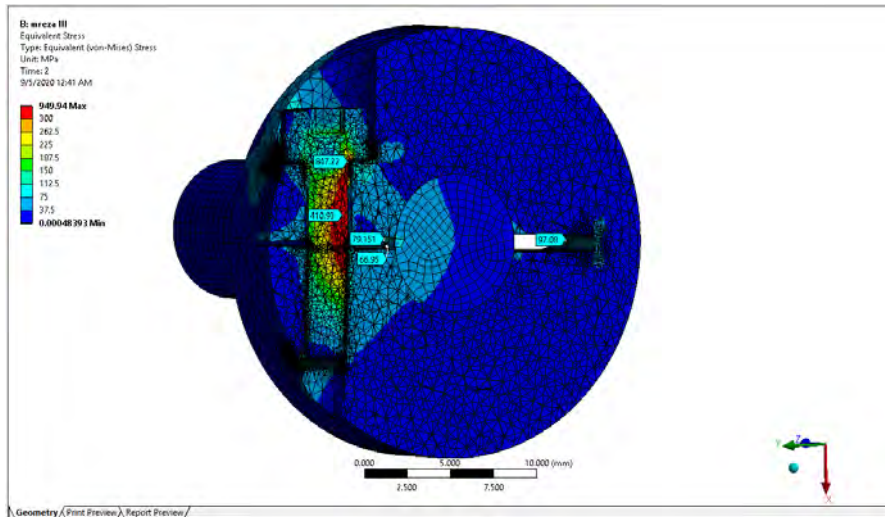
Naponsko stanje spojnice sa elastomerom je prikazano na slici 5.140 alatom *Equivalent (von-Mises) Stress* i uvećanjem prikaza 15 puta. Skala je korigovana

kao što je objašnjeno u koraku 6, a na slici 5.141 je prikazano naponsko stanje u preseku kroz osu zavrtnja.



Slika 5.140

Opcija Equivalent (von-Mises) Stress i mogućnost korigovanja skale



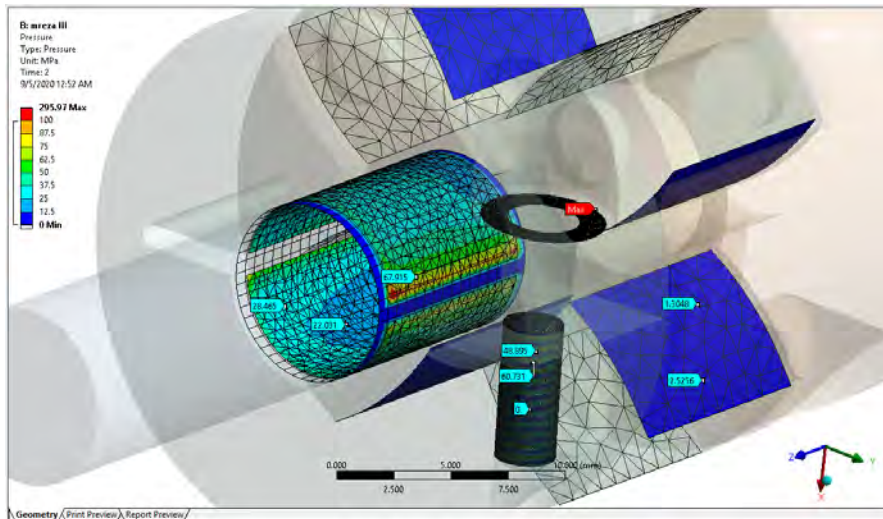
Slika 5.141

Opcija Equivalent (von-Mises) Stress sa promenjenom skalom i uvedenim presekom u pravcu ose zavrtnja

Naponsko stanje je prihvatljivo, napon u stablu zavrtnja je oko 400 N/mm^2 (MPa), dok se na radijusu ispod glave zavrtnja javlja i duplo veći napon i tu je lokalno najveći napon usled savijanja zavrtnja. Ovu zonu ispod glave zavrtnja bi trebalo dodatno ispitati finijom proračunskom mrežom, uklanjanjem oštrih ivica i drugih izvora netačnih rezultata.

U ovom zadatku se ne traži naponsko i deformacijsko stanje zavrtnja pa je stoga izostavljena dalja analiza zavrtnja. Za sada se može reći da rezultati ukazuju da je potreban kvalitet zavrtnja od najmanje 10.9.

Zadatkom je tražena nosivost spojnice, tj. da se potvrdi da li spojnica može da prenese obrtni moment od 2 Nm a da ne dođe do proklizavanja. Već na osnovu deformacija ovo može da se zaključi, ali raspodela pritiska i prikaz status kontakta su možda najsigurniji dokaz za to. Ova raspodela pritiska je data na slici 5.142, dok je status kontaktnih površi ostao nepromenjen u odnosu na korak 6.



Slika 5.142

Raspodela pritiska na kontaktnim površima u glavnom ekranu

Na kontaktu vratila i prve polutke spojnice može se primetiti relativno neravnomerna raspodela pritiska, gde su najviše vrednosti oko ivica polutke spojnice koje nastaju usled rasecanja horizontalnim žlebom. Ovo je očekivano, a pokazuje da je u praksi neophodno oboriti ili jos bolje zaobliti ivice kako bi se

izbegle zone povišenih vrednosti pritisaka. Međutim svi ovi pritisci su u granicama daleko ispod dozvoljenih.

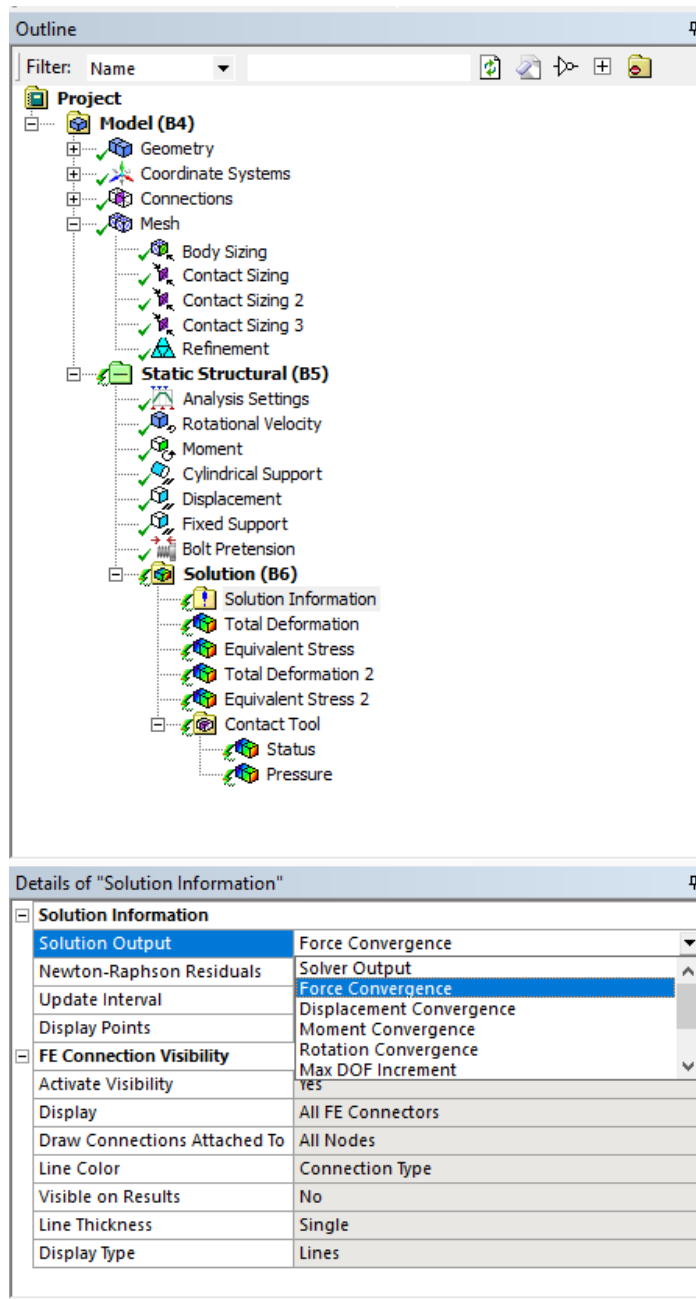
Na kontaktu koji predstavlja navojni spoj se jasno uočavaju svi navojci i raspodela pritisaka u njima. Vrlo male vrednosti pritiska se mogu uočiti na kontaktu elastomera i kandži polutaka spojnice, što je takođe očekivano jer je u pitanju znatno veća kontaktna površ u odnosu na ostale i još se ovaj kontakt ostvaruje na većem prečniku što smanjuje opterećenje. Najviše vrednosti pritisaka se ostvaruju između glave zavrtnja i prve polutke spojnice i ovu zonu bi trebalo dodatno razmotriti ako je od interesa.

Zaključak je da spojnica sa elastomerom pokazuje svoja elastična svojstva koja najviše zavise od karakteristika elastomera i da može preneti obrtni moment od 2 Nm bez proklizavanja.

Proračuni sa kontaktnima koji podrazumevaju vezu trenjem, *Frictional*, izvršavaju se iterativno, a svaka iteracija je znatno zahtevnija nego što je slučaj sa proračunom koji ima veze tipa *Bounded*.

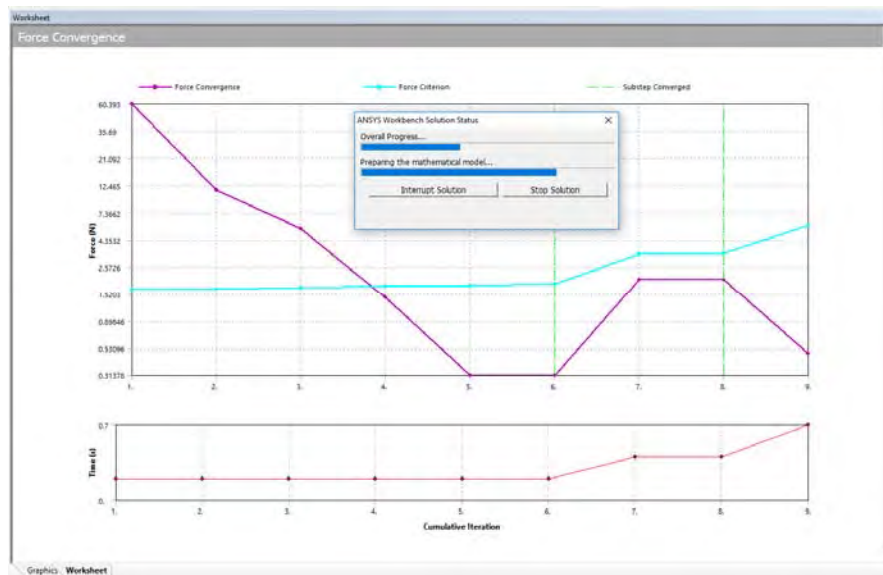
Ovo dovodi korisnika u situaciju da je neophodno imati hardverski jaču konfiguraciju računara i da izvršavanje proračuna traje značajno duže - nekoliko sati za primere koji se razmatraju u ovoj zbirci. U slučaju lošijih konfiguracija moguće je da softver izbací, na primer, grešku tipa nedovoljne memorije.

Praćenje stanja proračuna, konkretne iteracije i konvergencije rezultata, može se uraditi klikom na polje *Solutional Information* u prozoru *Outline* u toku izvršavanja proračuna. U prvom polju *Solution Output* prozora *Details of „Solution Information“* može se odabrati promenljiva čija se konvergencija prati, na primer sila – *Force Convergence*, slika 5.143.



Slika 5.143
Opcije za praćenje konvergencije rezultata

Na glavnom prozoru, nakon izabrane opcije *Force Convergence* u toku izvršavanja proračuna, dobija se dijagram kao na slici 5.144.



Slika 5.144

Izgled glavnog ekrana nakon izabrane opcije *Force Convergence*

Na osnovu prethodnih rezultata numeričkog proračuna može se zaključiti da se u prvom koraku javlja deformacija polutke spojnice usled pritezanja zavrtnja i vrlo visoki naponi u zavrtnju usled savijanja kojem se izlaže upravo zbog deformisanja pomenute polutke spojnice. Na spoju vratila i polutke se javljaju kontaktne pritisci usled presovanja tokom pritezanja zavrtnja. Ovaj kontaktne pritisak je uslov za prenošenje obrtnog momenta.

U drugom koraku, preko video simulacije, jasno se primećuje sabijanje elastomera usled obrtnog momenta koji se prenosi, što dovodi do ugaonog zakretanja jedne polutke u odnosu na drugu. Ako se deformacije dovoljno uvećaju može se uočiti i uvijanje vratila. Ovim se može zaključiti da razmatrana spojnica može preneti zahtevano opterećenje. Naponi i deformacije druge polutke nisu verodostojni zbog unetog graničnog uslova oduzimanja svih sloboda kretanja cilindričnoj površi polutke. Stoga ovi naponi i deformacije nisu predmet analize rezultata, ali očekuje se da je naponsko i deformacijsko stanje druge polutke spojnice nalik stanju prve polutke, jer se na isti način vezuje spojnica sa gonjenim vratilom.