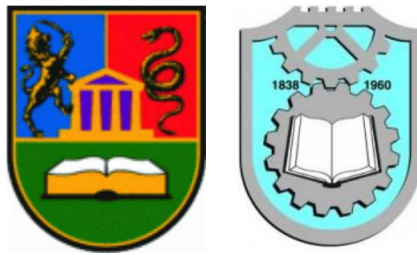


**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Основне академске студије**

**Модул: Информатика у инжењерству**

**Предмет: Коначни елементи I**

**Број индекса: 728/2013**

**Станимир М. Сићевић**

**МКЕ анализа хидрауличног прикључног  
блока изложеног унутрашњем притиску  
завршни рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

**1. Др Мирослав Живковић - ментор**

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

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

**Датум одбране:\_\_\_\_\_**

**Оцена:\_\_\_\_\_**

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Истакне улогу *Femap*-а као и *SolidWorks* радног окружења који су коришћени у изради овог рада и да прикаже њихове основне карактеристике као и принцип рада.
- У другом делу кандидат треба да измоделира хидраулични прикључни блок. Димензионише све прикључне цеви на основу задатог цртежа, и креира склоп који ће се користити за даљу анализу.
- Трећи део је предвиђен за анализу задатог модела методом коначних елемената, и проверу напонско-деформационог стања прикључног блока и прикључних цеви при притиску на унутрашње површине. Неопходно је да кандидат детаљно опише начин креирања материјала и мреже коначних елемената за хидраулични блок и цеви, начин задавања граничних услова и оптерећења у овом случају притиска. На крају треба да пропусти анализу, прикаже добијене резултате и да изложи њихово тумачење.

Препоручена литература:

- [1] **Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н.:** Метод коначних елемената I, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [2] <http://www.pveng.com/FEA/FEASamples/StepByStep/StepByStep.php>
- [3] Femap
- [4] SolidWorks

Крагујевац, датум

ментор:

**Проф. Др Мирослав Живковић**

---

**Резиме:** Рад представља један начин моделирања хидрауличног прикључног блока као и свих прикључних цеви у програмском пакету *SolidWorks* на основу задатог цртежа. Тако креирана геометрија представља полазну основу за креирање тетраедарске мреже коначних елемената у програмском пакету *Femap*. Након креирања мреже коначних елемената задата су ограничења, тако што су фиксирани чворови који се налазе на чеоној површини прикључне цеви без капице. Задато је и оптерећење тако што је задат притисак на све унутрашње површине хидрауличног блока и прикључних цеви. Анализа је одрађена у солверу *NX Nastran*, док су на крају рада приказани резултати анализе и њихово тумачење.

**Кључне речи:** *Femap*, *SolidWorks*, МКЕ, *NX Nastran*, Хидраулични прикључни блок, Прикључне цеви.

**Abstract:** The work represent us one way of modeling the hydraulic connection block and all connecting pipes in *SolidWorks* software package based on the set of drawings. That created geometry is the starting point for creating the tetrahedral mesh finals element software package *Femap*. After creating the finals element mesh are specified constraints, such as fixed nodes that are on the front surface of the connecting pipes without caps. The tasked is the load so that the set pressure on the intermally surface hydraulic block and connecting pipes. The analysis did come in solver *NX Nastran*, while at the end of the paper presents the results of analysis and interpretation.

**Key words:** *Femap*, *SolidWorks*, FEM, *NX Nastran*, Hydraulic connection block, Connecting Pipes.

# Садржај

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| <b>1. Увод</b>                                      | 1  |
| <b>2. Метод коначних елемената</b>                  | 3  |
| 2.1. Преглед развоја методе коначних елемената      | 4  |
| 2.2. Улога рачунара у МКЕ                           | 5  |
| 2.3. Основни кораци у МКЕ                           | 5  |
| 2.4. Оптерећење                                     | 7  |
| 2.5. Примена методе коначних елемената              | 7  |
| <b>3. Femap</b>                                     | 8  |
| <b>4. SolidWorks</b>                                | 11 |
| <b>5. Моделирање 3D елемента</b>                    | 14 |
| 5.1. Моделирање хидрауличног прикључног блока       | 15 |
| 5.2. Креирање прикључних цеви                       | 17 |
| 5.3. Креирање склопа                                | 21 |
| <b>6. Анализа модела</b>                            | 26 |
| 6.1. Креирање материјала и мреже коначних елемената | 26 |
| 6.2. Задавање ограничења и оптерећења               | 29 |
| 6.3. Анализа                                        | 31 |
| 6.4. Тумачење резултата                             | 32 |
| <b>7. Закључак</b>                                  | 36 |
| <b>Литература</b>                                   | 38 |

# 1. Увод

Метода коначних елемената (МКЕ) представља нумерички поступак решавања инжењерских проблема и проблема математичке физике. Овом методом анализирају се конструкције и делови конструкција и њихово понашање услед различитих врста врсти оптерећења. У највећем броју случајева када анализирана структура има сложену геометрију, када је сложено оптерећење, и када су структуре од различитих материјала, није могуће наћи решење у аналитичком облику применом једначина теорије еластичности. Аналитичко решење подразумева добијање аналитичких израза за рачунање тражених карактеристика на различитим местима структуре (померање, температура, напон и слично). За добијање таквих података треба решавати диференцијалне или парцијалне диференцијалне једначине. То је могуће урадити само за врло једноставне проблеме. За сложену геометрију и сложено оптерећење није могуће наћи решење у аналитичком облику па се због тога користе нумерички методи, а један од њих, најчешће коришћен је метод коначних елемената.

Хидраулични прикључни блок је компонента која служи да регулише проток течности између пумпи и осталих компоненти у хидрауличним систему. Има улогу као централна табла у електричном колу, јер омогућава контролу колико течности протекне и између компоненти хидрауличних машина. Хидраулични блокови су обично направљени од легура гвожђа, алуминијума или челика, и могу бити стандардни или прилагођени дизајну структуре система у коју се уграђују.

У дугом поглављу дате су неке предности методе коначних елемената (МКЕ) које су је довеле испред других нумеричких метода, када се први пут појављује и ко су њени утемељитељи. Истакнута је улога рачунара у МКЕ и који се све проблеми могу решавати помоћу методе коначних елемената.

Треће поглавље илуструје основне карактеристике програмског пакета *Feap*, његове могућности које заједно NX Nastran солвером представљају један моћан нумерички алат за испитивање понашања различитих врста конструкција.

У четвртом поглављу су представљене функционалности *SolidWorks* развојног окружења, карактеристике које га чине једним од водећих софтвера за креирање производа у свету, и приказани су сви модули који су укључени у *SolidWorks* пакет.

У петом одељку извршено је тродимензионално моделирање хидрауличног прикључног блока као и свих прикључних цеви на основу задатог радионочног цртежа применом пакета *SolidWorks*, а затим је креиран склоп свих компоненти који нам је потребан за даљу МКЕ анализу.

Шесто поглавље је главни део овог Завршног рада. У њему је описан цео ток пре и после анализе који је потребан да би се дошло до жељених резултата, од увоза тродимензионалног модела, креирања мреже коначних елемената, задавања граничних услова и оптерећења до приказивања резултата и тумачења истих.

Седмо поглавље представља закључак овог рада.

## 2. Метод коначних елемената

Метод коначних елемената (МКЕ) је данас најопштији нумерички метод, примењен у готово свим наукама, посебно у инжењерским областима. Сматра се да је МКЕ метод који је, у поређењу са другим, имао највећи утицај на развој и домете техничких дисциплина у двадесетом веку. Велики број међународних часописа највишег нивоа, читава индустрија за развој софтвера на основима МКЕ, свакодневна примена МКЕ комерцијалних и специјалних програмских пакета у оквиру CAD система у свим индустријским гранама, и интензивна научна истраживања у МКЕ, најкраће су илустрација претходне тврдње. У развијеним земљама МКЕ курсеви на редовним и последипломским студијама на техничким факултетима су постали део општег образовања студената.

Метода коначних елемената је применљива на областима солида, флуида, провођења топлоте и уопште на проблеме поља физичких величина, као и на спрегнуте проблеме), примењује се на линеарне и нелинеарне проблеме. Добијена решења су приближна и односе се на одређене тачке структуре. Процес моделирања састоји се у дискретизацији континуума (тела или структуре). Модел се састоји од коначних елемената, који су повезани у чворовима (елемент штапа), по граничним заједничким линијама (равански елементи), или заједничким површинама (просторни елементи). За сваки коначни елемент постављају се једначине, а њиховом комбинацијом добију се једначине целе структуре.

Зависно од врсте проблема који се решава, као решења се добију одговарајуће величине. У случају рачунања напонско-деформационог стања структуре резултати су померања сваког чвора структуре и напони унутар сваког елемента. Померања и напони су последица деловања спољашњег оптерећења. У проблемима који се не односе на структуралну анализу непознате у чворовима могу бити неке друге физичке величине нпр. температуре.

## 2.1. Преглед развоја методе коначних елемената

Развој МКЕ је директно везан за појаву рачунара. Јер, практична примена МКЕ, поред осталог, подразумева решавање великих система алгебарских једначина, чији број даље иде на више десетина хиљада једначина. Основне идеје МКЕ појавиле су себи у радовима Аргириса (*Argyris and Kelsey*(1954)), Тарнера (*Turner* и др. (1956)), И Клофа (*Clough* (1960)). Име "Коначни елемент" први пут се појавио у раду Клофа (1960). Значајни допринос развоју МКЕ у раним шездесетим годинама дали су Аргирис (на пример *Argyris* (1965)), и Зиенкиевич и Ченг (*Zienkiewicz and Cheung* (1967)) седамдесетих година започета је примена МКЕ на нелинеарне проблеме солида (конструкција), као и на друге области (Механика флуида, провођење топлоте, електромагнетизам и др.). Затим, настављене су, до данас, генерализације МКЕ, примене на најсложеније спрегнуте проблеме, какви су данас посебно актуелни у биомеханици.

Посебан значај у развоју МКЕ имали су варијациони принципи механике континуума који су примењени на формулацију МКЕ, па је МКЕ добио општи приступ. Даљи развој МКЕ одвија се у правцу раванских елемената. Тако је *Saurant* решавајући граничне проблеме торзије предложио и користио троугаоне елементе, а решење добио помоћу варијационе методе *Ritz*-а. Тек 1960. године постављен је директни тј. статички приступ МКЕ. Половином шездесетих *White* и *Fridrich* решавају парцијалне диференцијалне једначине користећи мрежу троугаоних коначних елемената и варијационе принципе. Након тога уводи се појам доње и горње границе апроксимације по МКЕ. *Hellinger* и *Reissner* постављају мешовити модел коначних елемената у коме се комбиновано јављају силе и деформације као непознате величине.

У методи коначних елемената мора се остварити континуитет између елемената и поддомена у мрежи елемената. То је постигнуто увођењем интерполационих функција које су се развиле на основу развоја математичке теорије сплајнова. Интерполационе функције се претпостављају у облику полинома чиме се обезбеђује континуитет између елемената. Математичари су седамдесетих година дефинитивно генерализирали теорију тако је *Oden* увео низ генерализација и проширио примену на вишедимензионално подручје,

еуклидске просторе и подручје нелинеарне анализе. Од тада се МКЕ развија са развојем рачунара. Они су омогућили решавање великих проблема сложене геометрије и оптерећења. До деведесетих нема визуализације проблема. Са данашњим могућностима рачунара могуће је добити потпуни визуелни приказ напонског, деформационог, термичког поља или неког другог проблема.

МКЕ је већ одавно у масовној употреби за прорачун различитих проблема. Не могу се ни замислити иоле озбиљнији прорачуни без употребе овог моћног метода. И поред тога наставља се развој алата и истражују нове могућности примене МКЕ.

## **2.2. Улога рачунара у МКЕ**

У модерном конструкционом машинству користе се различити компјутерски софтвери *CAE (Computer Aided Engineering)* како би се оценила конструкција у сваком кораку у процесу дизајнирања и пројектовања. *CAE* алати се користе за анализе кинематичких или динамичких карактеристика конструкције. У употреби је низ моћних *CAD (Computer Aided Design)* софтверских алата. Први програми нису имали могућност визуализације и даље су се развијали до добијања новијих верзија као што су *NASTRAN*, *SAP*, *ANSYS*, *IDEAS*, *FLOW CATIA*, *ALGOR*, итд. Софтвери су се развијали зависно од подручја за које су намењени или за универзалну примену (статичку, динамичку, термичку анализу, итд).

Ранија примена МКЕ односила се само на структуралну механику да би се касније проширила на решавање проблема преноса топлоте, електростатички потенцијал, механику флуида, вибрациону анализу и разне друге проблеме у машинству. Данас се развијају софтвери у подручју брызгања пластике који су у могућности да покажу дистрибуцију температурног поља и пуњење калупа течном масом.

## **2.3. Основни кораци у МКЕ**

Инжењерски проблеми могу бити структурални или неструктурални (пренос топлоте или ток флуида). У структурној анализи циљ пројектанта је да одреди померања и напоне у целој структури која је изложена деловању

оптерећења. За многе проблеме немогуће је наћи расподелу деформација коришћењем класичних аналитичких метода заснованих на једначинама теорије еластичности, па се користи МКЕ. Постоје два основна приступа у МКЕ. Први је метод сила или метод флексибилности.

У методу сила основне непознате величине у проблему који се анализира су силе. Да би се добиле једначине структуре прво се постављају једначине равнотеже. Резултат је систем алгебарских једначина у којима су непознате величине силе које се из једначина одређују. Други приступ је метод померања или метод крутости у коме су основне непознате померања у чворовима. За постизање услова компатибилности код решавања конкретних проблема тражи се да су елементи повезани у чворовима, дуж страница или одговарајућих површина пре и после деловања оптерећења. Основне једначине структуре садрже померања чворова, а користе се једначине равнотеже и веза између сила и померања. Од два поменута приступа већу примену је нашао други метод померања и његова формулација је слична за многе структуралне проблеме. Већина програма је направљена на основу метода померања.

У МКЕ се користе модели структура у којима су међусобно повезани елементи који се зову коначни елементи. Сваком елементу се придружује функција померања. Сви елементи су повезани директно или индиректно укључујући чворове и/или заједничке граничне линије елемената и/или заједничке површине. На основу познатих вредности напона и деформација у једном чвору и елементу могу се одредити напони и деформације за било који други чвор и елемент структуре која се разматра и чије су карактеристике материјала и оптерећења већ познате.

Да би се изложила процедура прорачуна по МКЕ неког проблема најбоље је специфицирати редослед корака у тој процедури. Пре описа неопходних корака треба нагласити да се моделирање проблема по МКЕ изврши дискретизацијом структуре на одговарајући број коначних елемената, изабере врста (тип) елемента који ће се користити у анализи, а затим дефинишу врсте оптерећења, гранични услови или ослонци.

## **2.4. Оптерећење**

У МКЕ се могу користити различите врсте оптерећења. У структурној анализи оптерећење делује у чворовима. Континуално оптерећење и почетне деформације могу се наносити на једнодимензионалне елементе, деловање притиска на дво и тродимензионалне елементе, сила притиска на дво и тродимензионалне елементе, сила гравитације, центрифугална сила и топлотно оптерећење.

## **2.5. Примена методе коначних елемената**

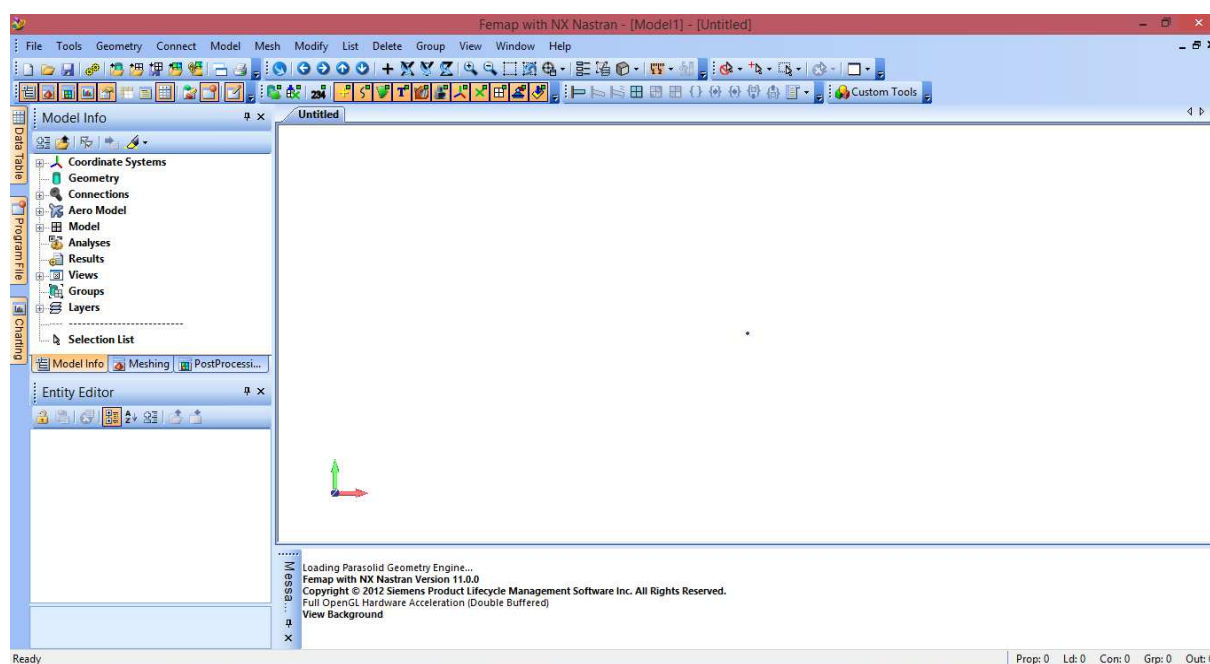
Методом коначних елемената могу се решавати проблеми структурне анализе. У оквиру тога постоје статички и динамички проблеми. Типични статички проблеми су рачунање деформационо-напонског стања структуре.

### 3. Femap

**Femap** је напредни инжењерски симулациони пакет (CAE) који служи за креирање мреже коначних елемената сложених техничких производа и састава, и графичко приказивање резултата анализе. Метод коначних елемената омогућава инжењерима да практично моделирају компоненте, склопове, или системе.

Користећи дигиталне симулационе могућности *Femap*-а можете да:

- Предвидите и побољшате перформансе и поузданост производа,
- Смањите дуготрајну и скупу израду физичких прототипова и њихово тестирање,
- Процените различите материјале и дизајн,
- Оптимизујете дизајн и смање утрошак материјала.



Слика 1. Femap v11 радно окружење

*Femap* можете користити без обзира на ваш CAD програм са којим моделирате. Он има уграђене транслаторе за преузимање геометрије из свих водећих CAD програма, као што су *Solid EDGE*, *NX*, *Pro/ENGINEER*, *CATIA*, *SolidWorks*, *Autodesk Inventor*, *AutoCAD* итд. На располагању су сви потребни

програмски алати за *edit*-овање линија, површина и солида. Припрема геометрије за различите врсте анализа је зато брза и једноставна.

*Femap* укључује низ програмских алата за аутоматско искључивање непотребних детаља (заобљења, мањих рупа, удруживање мањих површина итд.). Код пластичних делова са танким зидовима или код конструкција од лимова, мрежу је потребно креирати на средњим површинама, које *Femap* сам креира уз прихватање вредности параметара, са којима можемо контролисати процес креирања средњих површина.

Такође укључује и оптимизовање *Default* параметара за креирање МКЕ мреже, зависно од типа и облика геометрије. Са додатним параметрима корисник може, већ према сопственом искуству код креирања МКЕ мрежа, додатно утицати на квалитет мреже коначних елемената.

Код умрежавања са методама за “мапирану” мрежу, на располагању су једноставни поступци за контролу мреже, његово згушћивање или проређивање по поједином ивицама. Код умрежавања са “*Free*” методама, можемо најпре дефинисати глобалну густину мреже за површину, коју затим додатно по жељи мењамо на појединој линији или у појединој тачци.

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

*Femap* има подршку више графичких прозора и специјализованих панела, који омогућавају потпуни приступ моделу коначних елемената, резултатима података. Можете изменити изглед интерфејса у складу са вашим захтевима, прилагодити ниво функционалне изложености, мењати палете у потпуности и прилагодити иконе. Приступ *API* је кроз развојно окружење у оквиру корисничког интерфејса, где можете да креирате прилагођене програме који аутоматизују токове посла и процесе, а који могу да комуницирају и размењују податке са независним програмима као што су *Microsoft Word* и *Microsoft Excel*.

Основни пакет *Feap*-а пружа могућност:

- Линеарне и статичке анализе,
- Анализе извијања,
- Основне нелинеарне анализе,
- Анализе преноса топлоте.

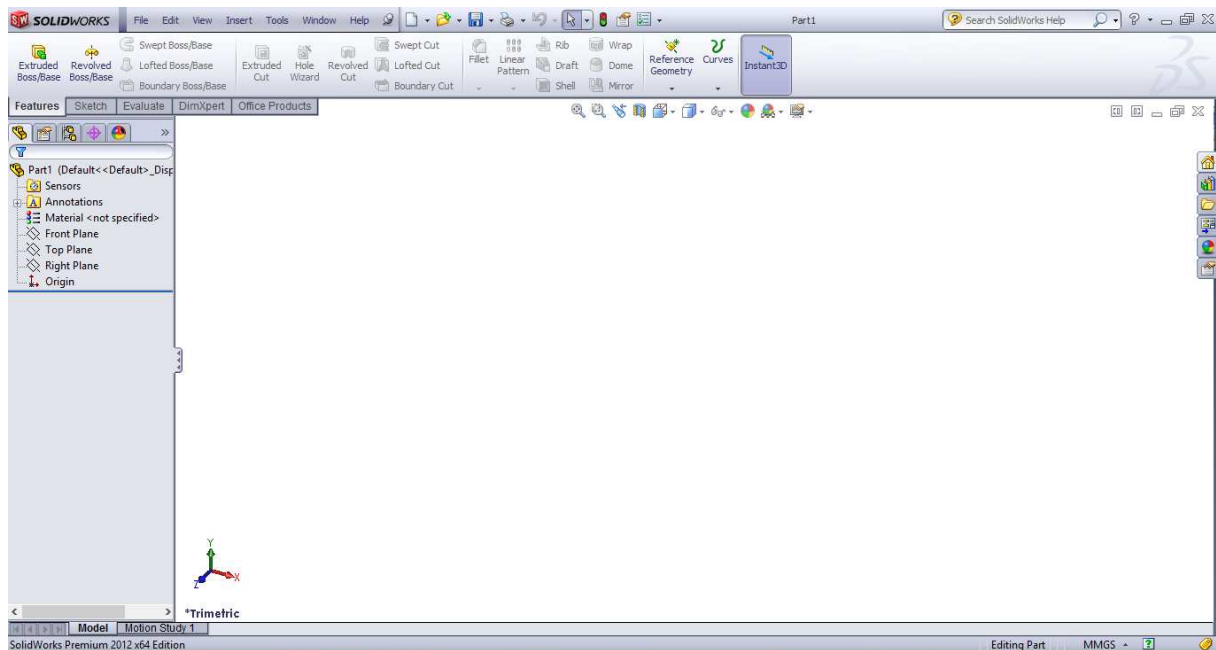
Док *NX Nastran* укључује додатне опције:

- Напредна нелинеарна анализа,
- Аероеластичност,
- Суперелементи,
- Оптимизација,
- Динамика ротора,
- *DMAP (Direct Matrix Abstraction Program)*.

## 4. SolidWorks

**SolidWorks** софтвер представља свеобухватно решење за развој производа, конструкција и израду техничке документације. Поред тога представља основу за даље коришћење модела за израду технологије, прорачуне и симулације.

*SolidWorks* пакет се користи у процесима развоја и пројектовања производа, конструкција, алата и технологије. Из 3D модела производа аутоматизованим поступком лако се долази до радионичких и склопних цртежа, који садрже ортогоналне пројекције, изометрије, пресеке, детаље, излазне спецификације и извештаје, као што су саставнице, листе делова и нормативи. *SolidWorks* се подједнако успешно користи за израду техничких упутстава, инструкција за монтажу, сервисирање и употребу. Симулације и прорачуни су додатна погодност која омогућава инжењерима да провере чврстоћу, деформације, кинематику и динамику покретних елемената, израчунају производну цену конструкције и одреде еколошки утицај производа. *SolidWorks* такође представља платформу за комуникацију између извођача, купаца, добављача и подизвођача.



Слика 2. SolidWorks 2012 радно окружење

*SolidWorks* пакет омогућава да:

- Пројектујете комплетне производе и креирате квалитетну излазну документацију, са смањеним ризиком од прављења грешака. Комплетан ланац комуникације у вашој фирми који се односи на ваше производе је побољшан јер је разумевање *3D* документације лако и нетехничким лицима. У самој производњи ће људи имати квалитетнији приказ делова које је потребно направити, монтирати, заварити и извршити контролу над њима. Имиџ фирме у односима са страним и домаћим купцима може такође да се поправи ако се комуникација врши кроз професионално урађену документацију у 3 димензије.
- Користите постојећу документацију из *AutoCAD* софтвера и *DWG* формата.
- Комуницирате са купцима и подизвођачима кроз *eDrawings* додатак којим размењујете квалитетне *2D* и *3D* приказе ваших делова и склопова без потребе да ваши сарадници имају било какав додатни софтвер. На овај начин побољшавате комуникацију и скраћујете време које се троши на додатна појашњења.
- Дефинишете интерактивне и фотореалистичне слике и филмове ваших производа и пре него што су направљени, за потребе каталога, интернет презентације и сајамских манифестација.
- Вршите читав спектар прорачуна и симулација, којима се скраћује време изласка производа на тржиште кроз смањену потребу за израдом прототипова. Симулацијама се спречавају откази у раду производа и повећава квалитет и задовољство купаца. Веома битна ставка је и велика уштеда материјала која се може остварити оптимизацијом производа кроз коришћење овог сегмента софтвера.
- Дефинишете комплетан норматив (саставницу) производа коју можете на тај начин повезати са информационом системом фирме и елиминисати грешке и губитак времена услед ручног уноса ових података.
- Фирма *Solfin* пружа првокласну подршку и услуге обуке, имплементације и прилагођавања софтвера, што додаје вредност на сам софтвер и гарантује успешну примену и повраћај инвестиције.

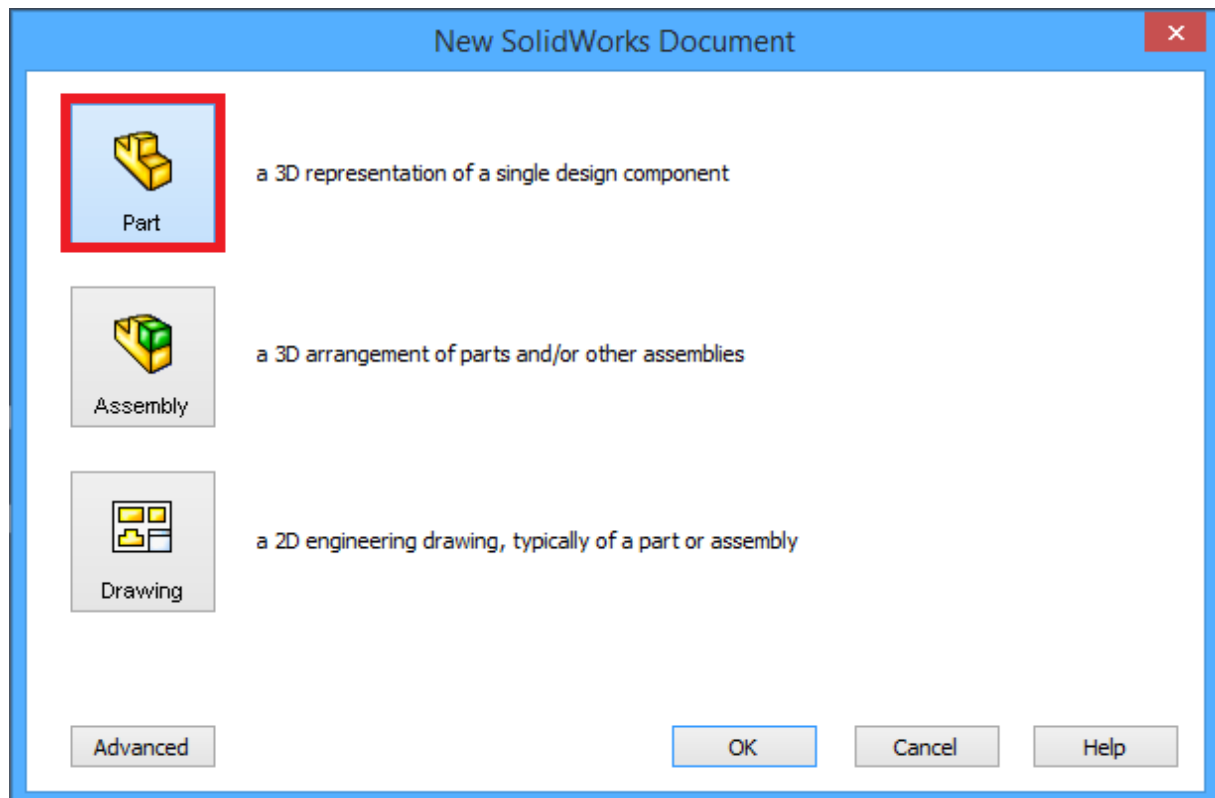
*SolidWorks* пакет садржи следеће модуле:

- *SolidWorks 3D CAD,*
- *SolidCAM,*
- *Altium,*
- *Lentak,*
- *SolidWorks Elektrical,*
- *SolidWorks Simulation,*
- *SolidWorks Enterprise PDM,*
- *Logopres,*
- *SolidWorks Plastics,*
- *SolidWorks Flow Simulation,*
- *Draft Sight 2D CAD,*
- *SolidWorks Coproser,*
- *SolidWorks Inspection.*

## 5. Моделирање 3D елемента

Интуитивно радно окружење и сви алати омогућавају креирање како једноставних призматичних делова који се користе у машиноградњи, тако и сложене геометрије коју имамо код стилизованих делова од пластике, одливака, сложених површина које се користе у бродоградњи, ауто и авио индустрији.

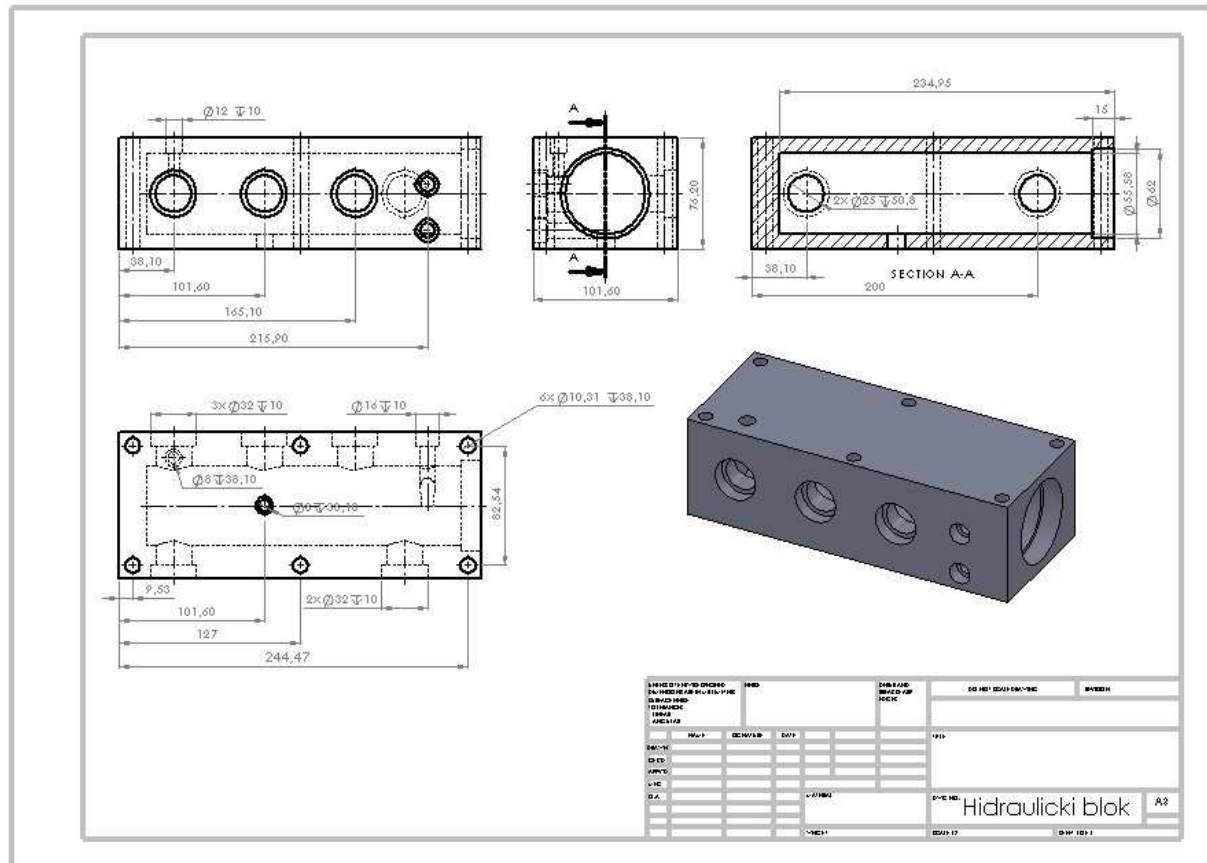
Да би смо започели моделирање компоненти, након отварања *Solid Works*-а изабраћемо опцију *Part* (Слика 3) која ће нам отворити радно окружење за моделирање 3D модела.



Слика 3. Опција *Part* за креирање 3D модела

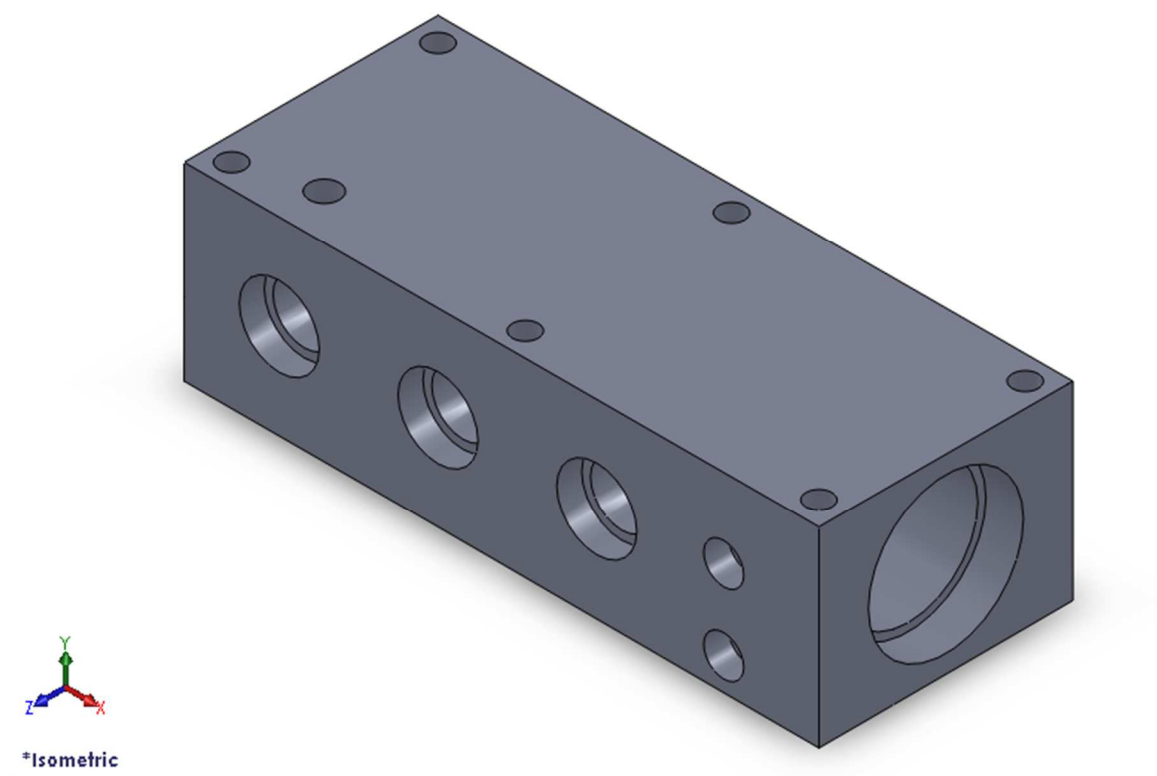
### 5.1. Моделирање хидрауличног прикључног блока

Компонента коју је потребно моделирати је хидраулични прикључни блок на основу мера које су приказане на радионичком цртежу на Слици 4.

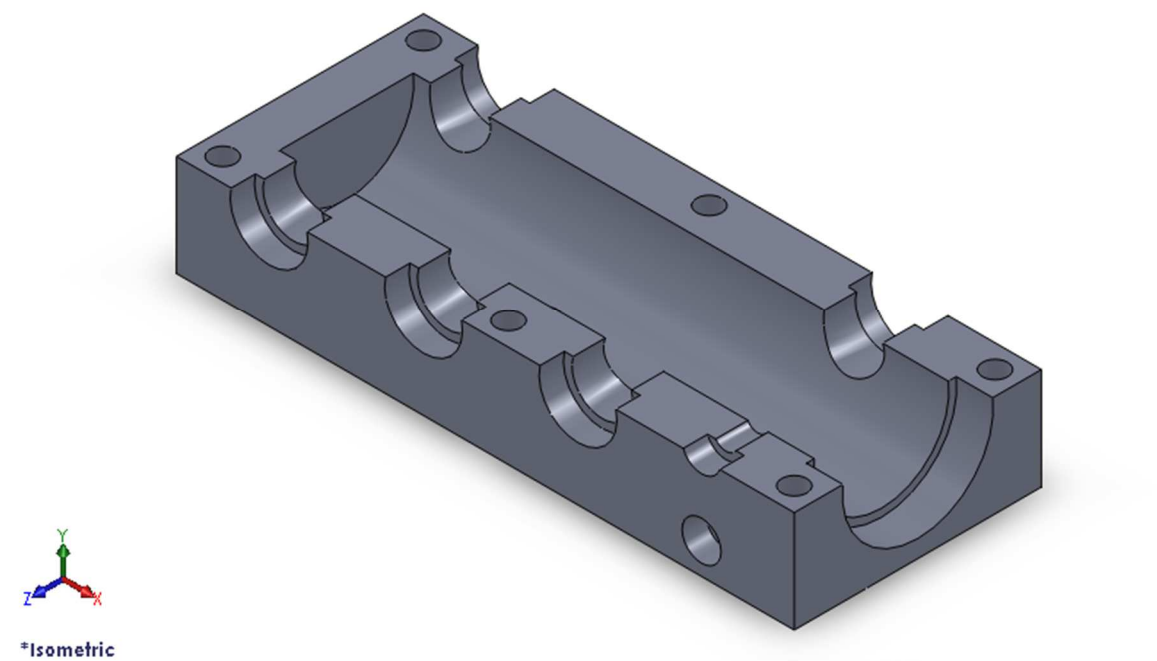


Слика 4. Цртеж са мерама хидрауличног прикључног блока

По завршетку моделирања хидрауличног блока добија се модел који је приказан на Сликама 5 и 6.



Слика 5. Хидраулични блок – Изометриски приказ



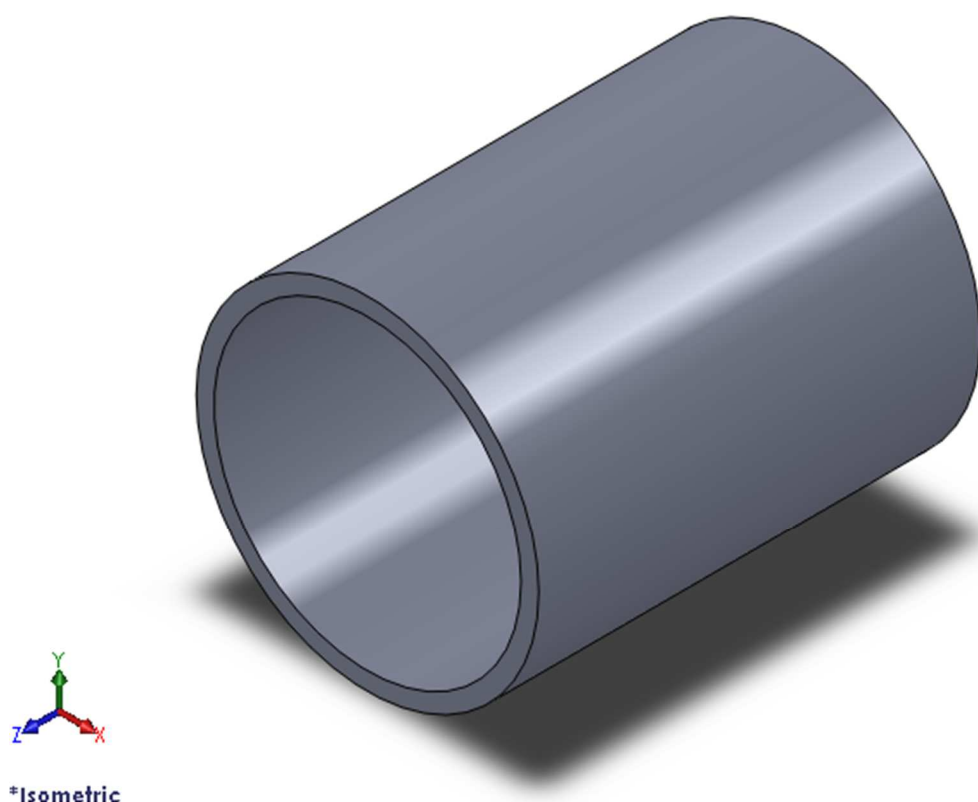
Слика 6. Пресек хидрауличног блока – Изометриски приказ

## 5.2. Креирање прикључних цеви

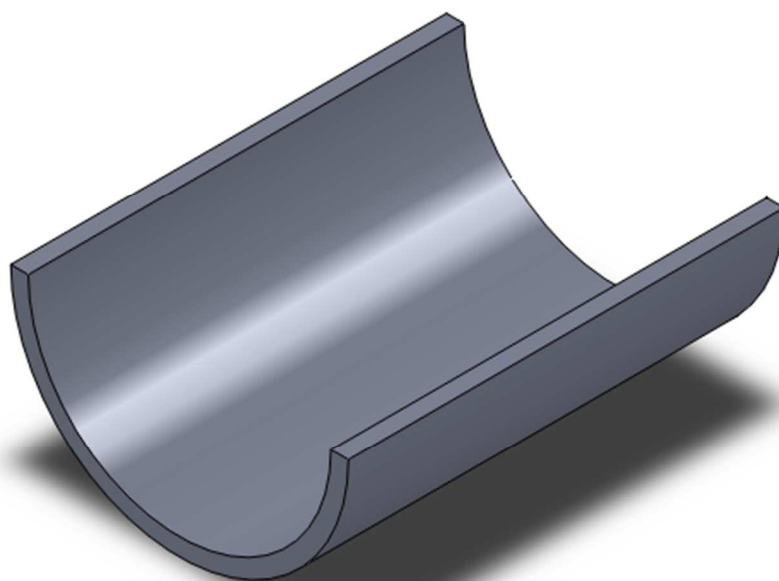
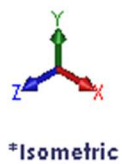
Након што смо измоделирали хидраулични потребно је моделирати прикључне цеви које ће затворити све отворе на хидрауличном блоку. На моделу се налази једанаест прикључних цеви које се деле у четири групе:

- Прикључна цев без капице ( $\Phi 63\text{mm}$ ),
- Прикључне циви са капицом ( $\Phi 32\text{mm}$ ),
- Прикључне цеви са капицом ( $\Phi 16\text{mm}$ ),
- Прикључне цеви са капицом ( $\Phi 12\text{mm}$ ).

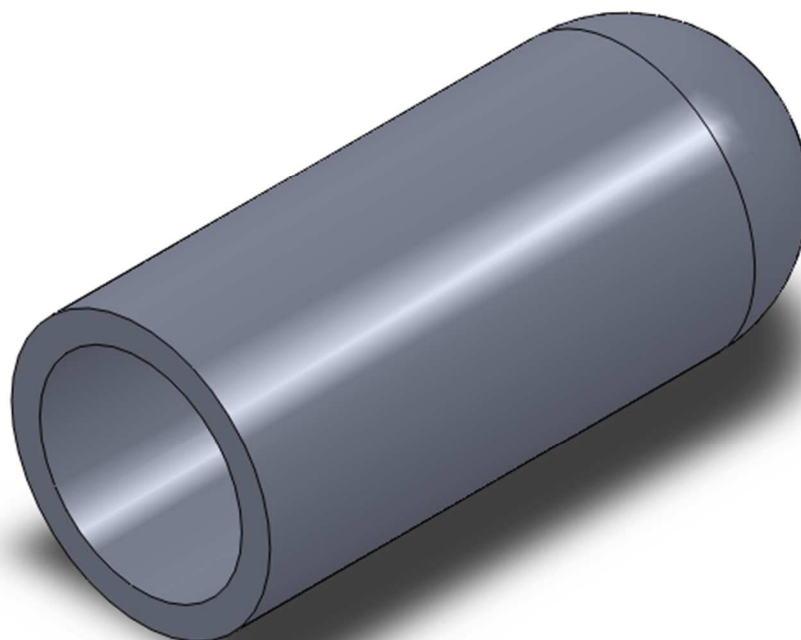
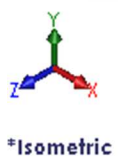
На Сликама 7, 9, 11 и 13 приказане су прикључне цеви пречника  $\Phi 63\text{mm}$ ,  $\Phi 32\text{mm}$ ,  $\Phi 16\text{mm}$ ,  $\Phi 12\text{mm}$  у изометриском приказу, респективно. Док је на Сликама 8, 10, 12 и 14 приказан пресек цеви  $\Phi 63\text{mm}$ ,  $\Phi 32\text{mm}$ ,  $\Phi 16\text{mm}$ ,  $\Phi 12\text{mm}$  прикључних цеви у изометриском приказу, респективно.



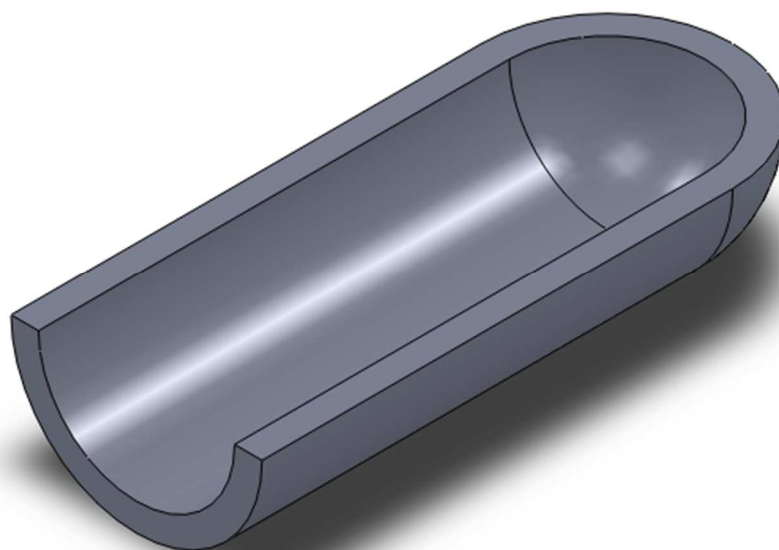
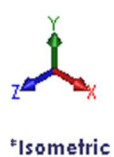
Слика 7. Прикључна цев без капице - Изометриски приказ



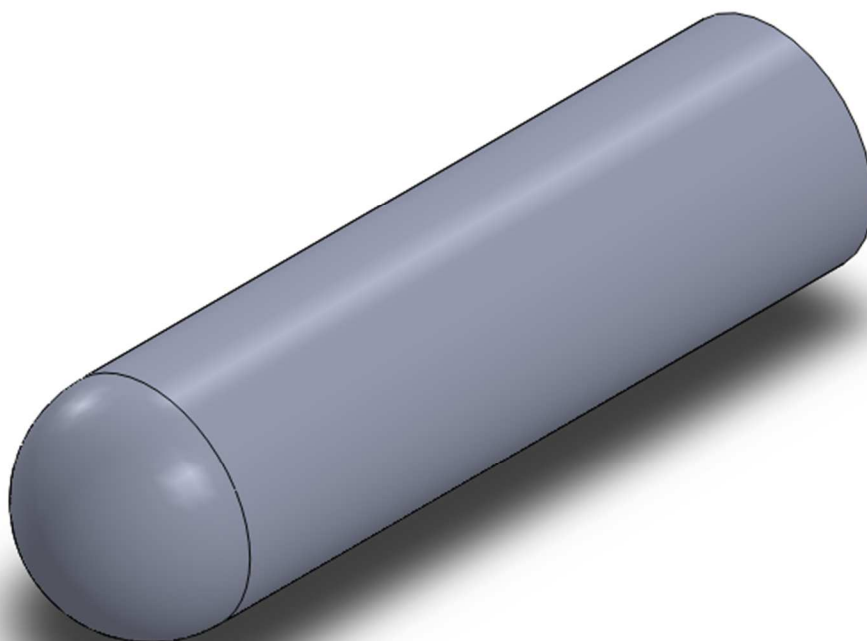
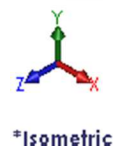
Слика 8. Пресек прикључне цеви без капице - Изометриски приказ



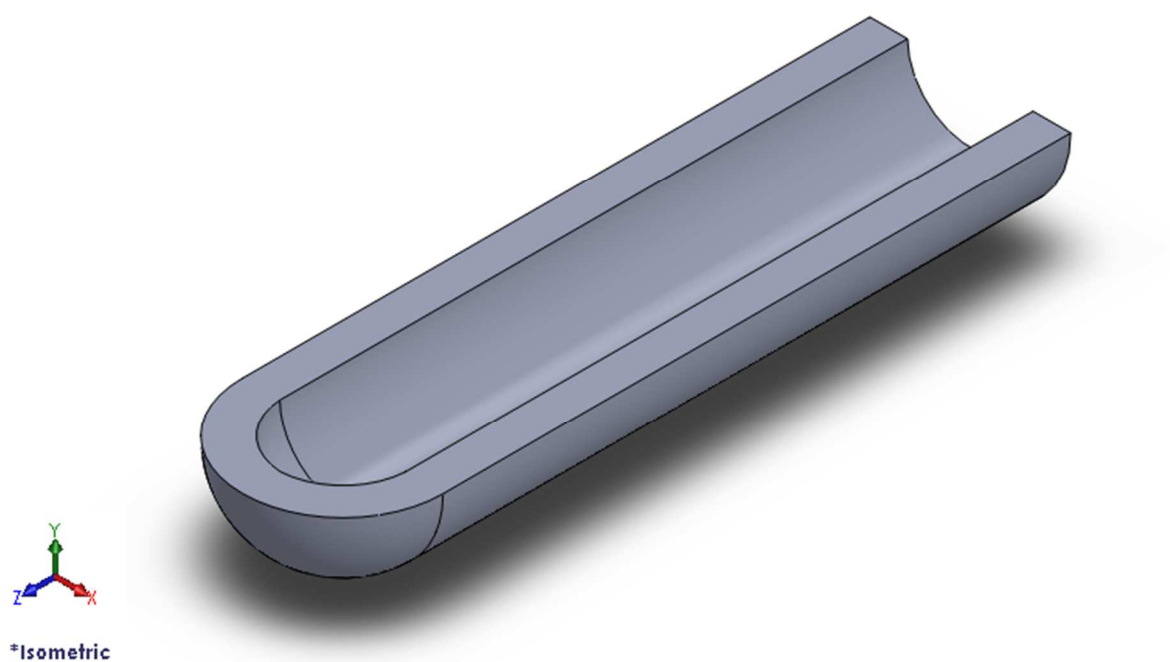
Слика 9. Прикључна цев са капицом  $\Phi 32\text{mm}$  – Изометриски приказ



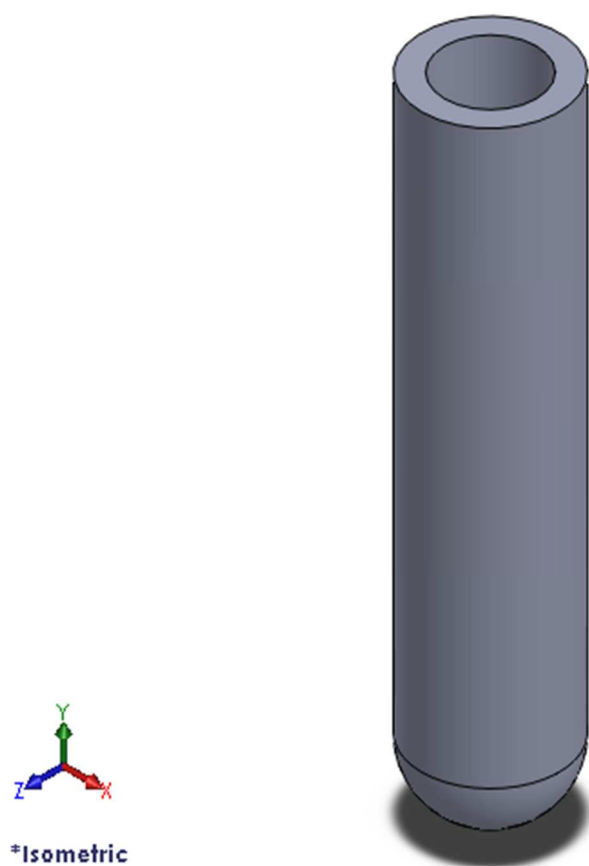
Слика 10. Пресек прикључне цеви са капицом  $\Phi 32\text{mm}$  – Изометриски приказ



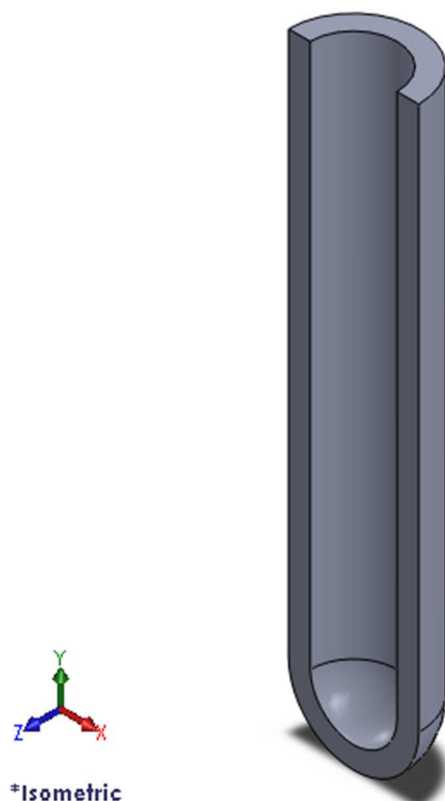
Слика 11. Прикључна цев са капицом  $\Phi 16\text{mm}$  – Изометриски приказ



Слика 12. Пресек прикључне цеви са капице  $\Phi 16\text{mm}$  – Изометриски приказ



Слика 13. Прикључна цев са капице  $\Phi 12\text{mm}$  – Изометриски приказ

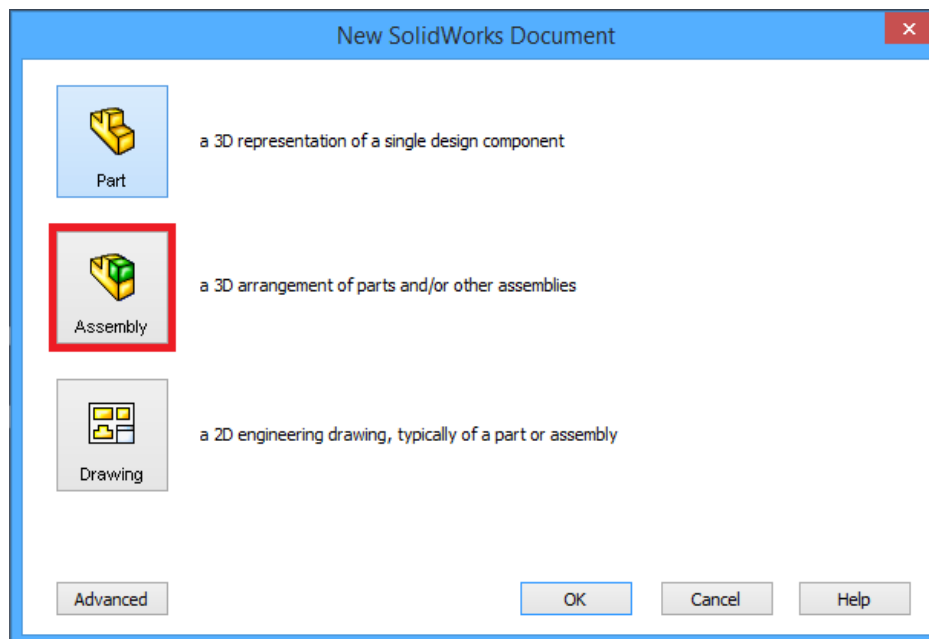


Слика 14. Пресек прикључне цеви са капицом  $\Phi 12mm$  – Изометриски приказ

### 5.3. Креирање склопа

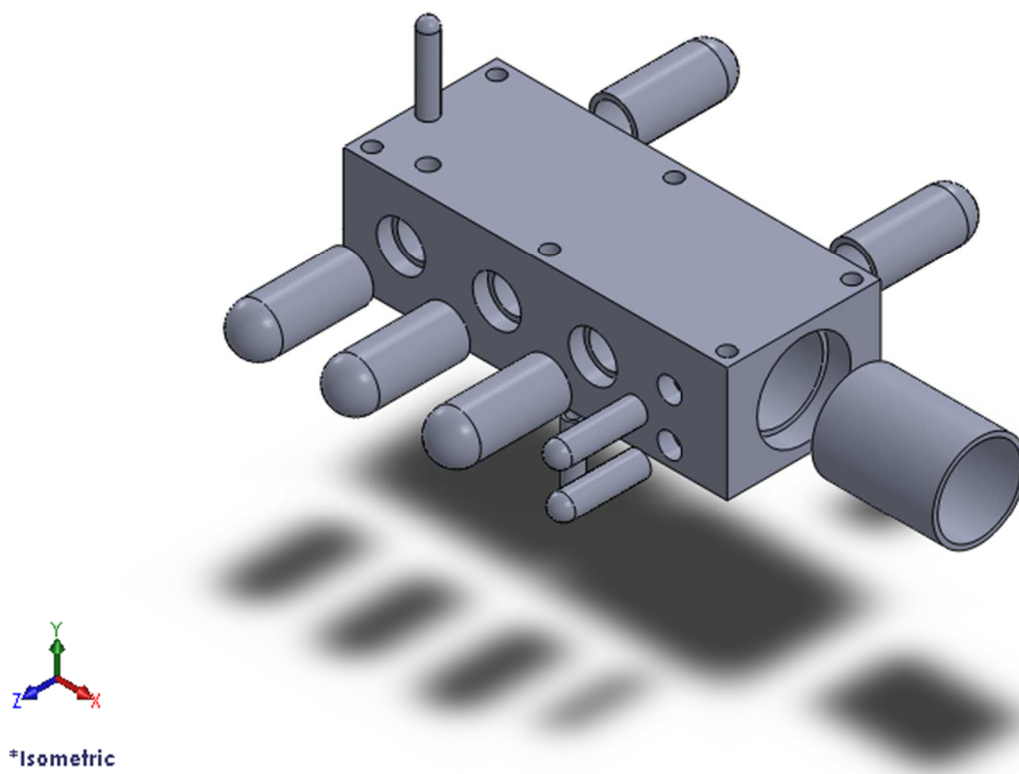
*SolidWorks* поседује алате за прецизно позиционирање и монтажу делова у склопу, чиме практично, добијамо виртуелни прототип производа. Делови се повезују тако што се дефинишу односи између геометријских елемената који их чине као што су површине, равни, ивице, кривине. Истовремено се тиме дефинишу и механички и кинематски односи тако да се могу анализирати и евентуалне колизије и проблеми у функционисању самог склопа. Могу се и аутоматски постављати стандардни делови у склопу, креирати паметне компоненте које у себи имају информације о уградњи.

Након што су моделиране све компоненте хидрауличног блока и прикључних цеви потребно је креирати склоп. Када смо стартовали *SolidWorks* потребно је изабрати опцију *Assembly* која служи за креирање 3D склопова, (Слика 15).



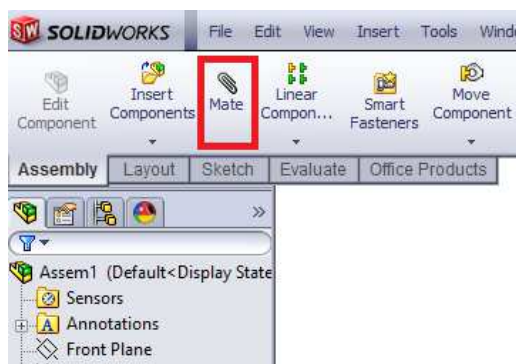
Слика 15. Избор опције Asembly

Након тога на радну површину убацујемо све потребне компоненте да би склоп био потпун. Хидраулични блок са свим прикључним цевима приказан је на Слици 16.



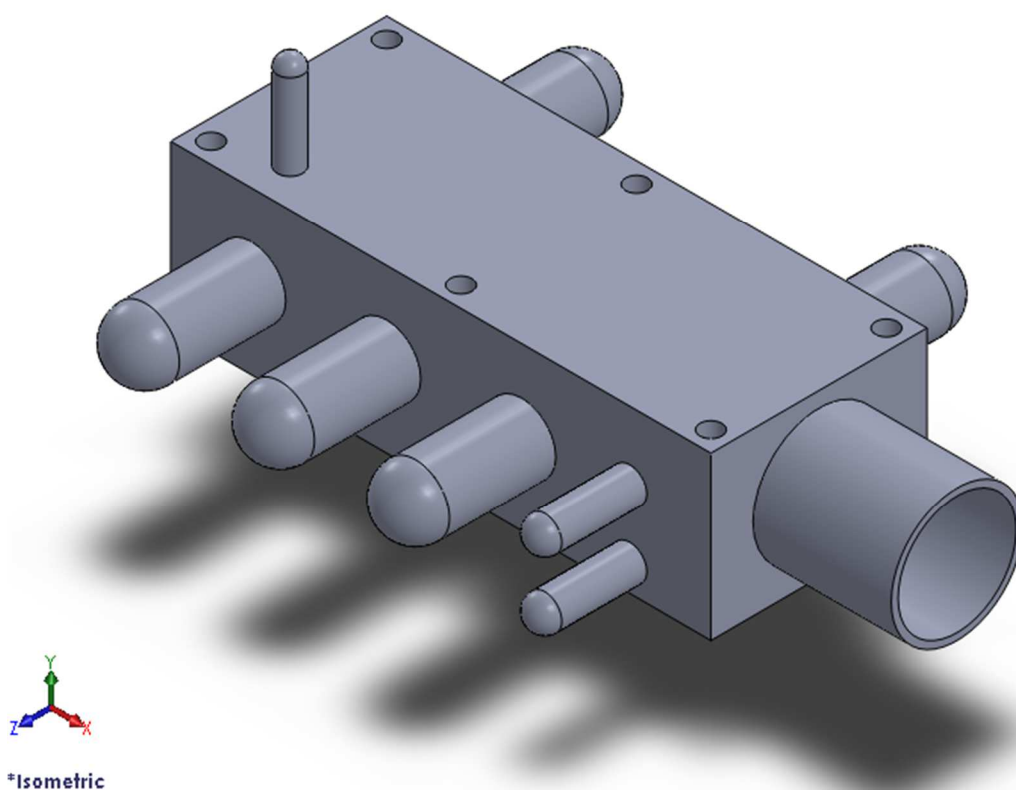
Слика 16. Радна површина са свим компонентама склопа

Затим се опцијом *Mate*, која се налази у горњем левом углу прозора креира потпуни склоп, тако што се означе одговарајуће површине и линије на цевима и споје се са одговарајућим површинама и линијама на хидраулчном блоку.

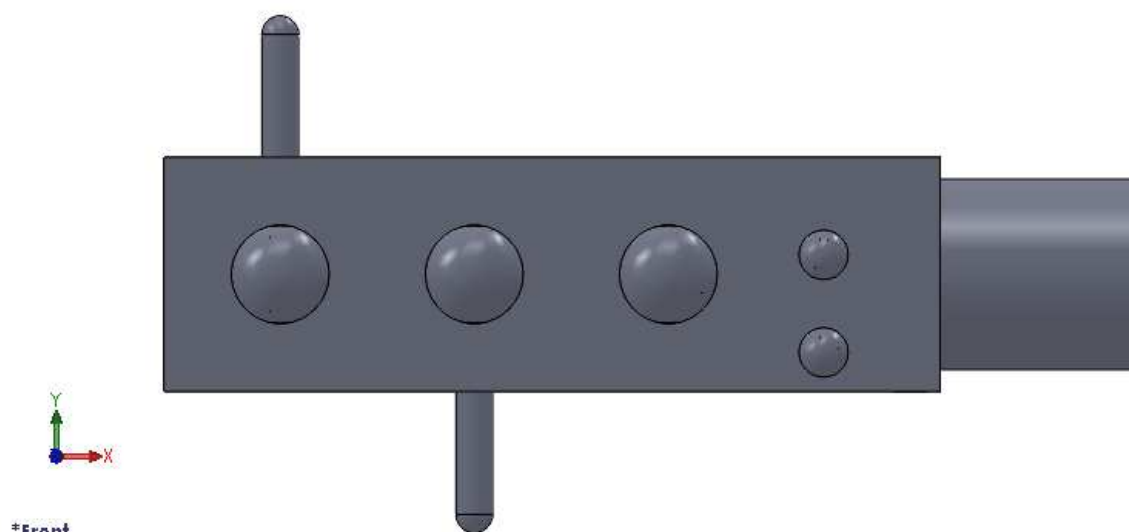


Слика 17. Избор опције *Mate*

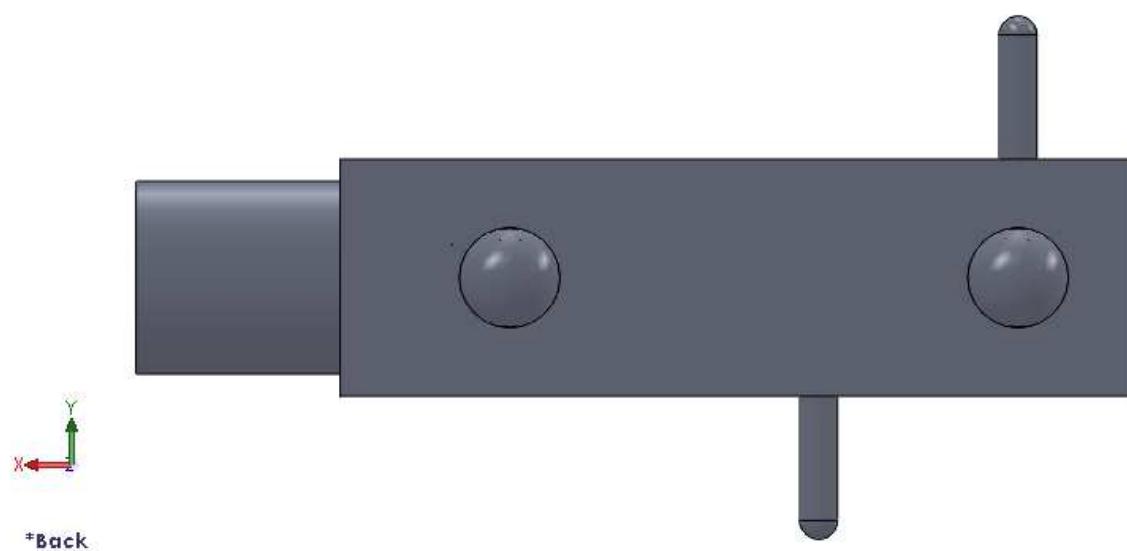
Након спајања- свих компоненти добијамо модел, потребан за даљу анализу. На сликама 18 - 22 приказан је склоп хидрауличног блока у неколико различитих приказа.



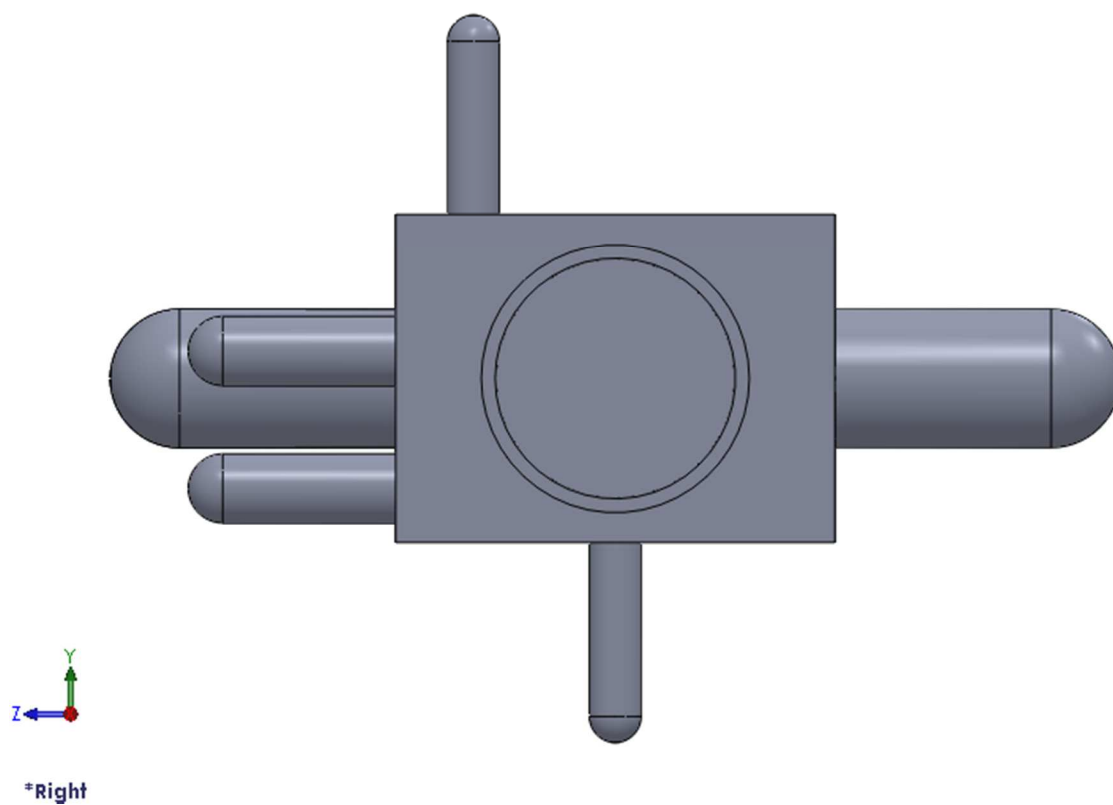
Слика 18. Склоп - Изометриски приказ



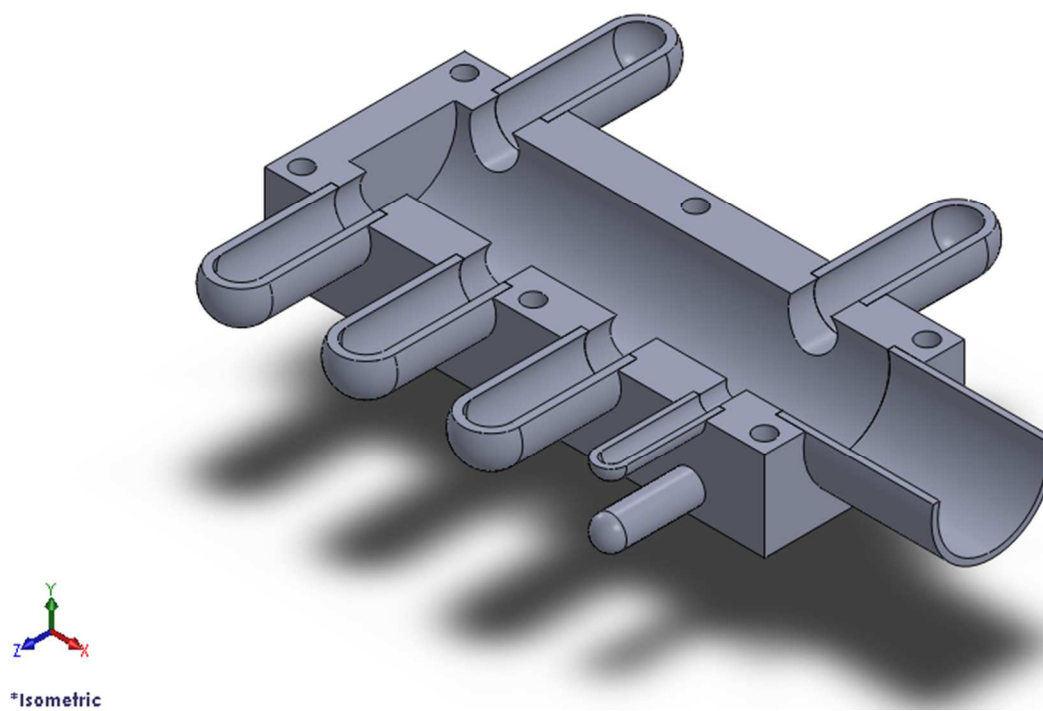
Слика 19. Склоп – Приказ у ХУ равни, поглед са предње стране



Слика 20. Склоп – Приказ ХУ равни, поглед са задње стране



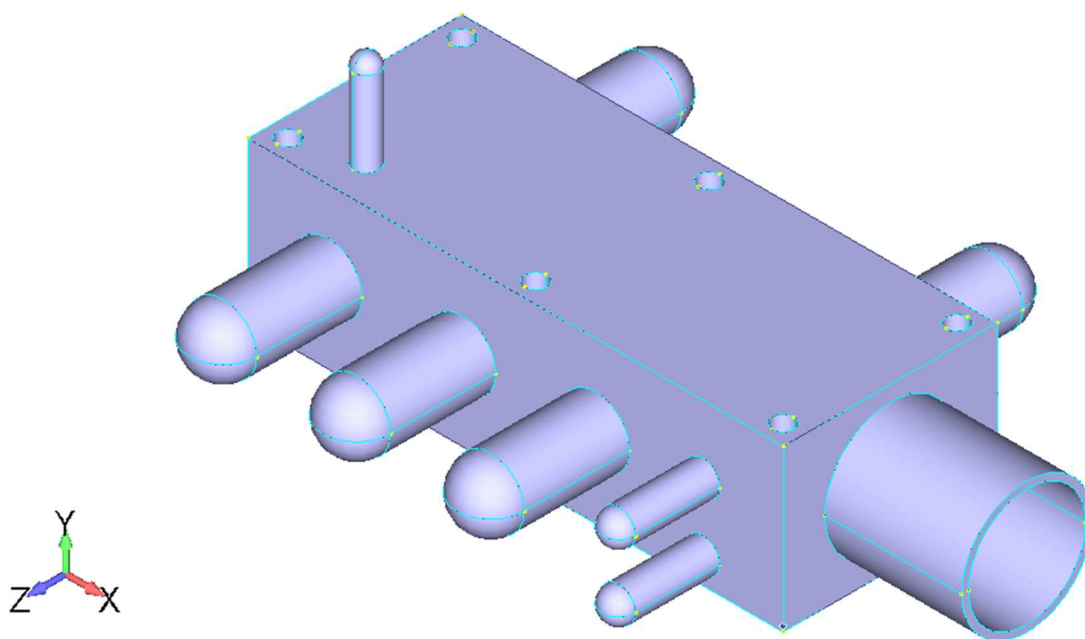
Слика 21 Склоп – Приказ XY равни, поглед са десне стране



Слика 22. Пресек склопа – Изометриски приказ

## 6. Анализа модела

Након што је извршен увоз тродимензионалног модела креираног у програмском пакету *SolidWorks 2012* у програмски пакет *Femap v11* опцијом *File>Import>Geometry* морамо подесити *Scale* фактор на 1000 да би све јединице биле у милиметрима [mm]. После тога уносимо основне карактеристике материјала, креирамо мрежу коначних елемената, задајемо ограничења и оптерећења.



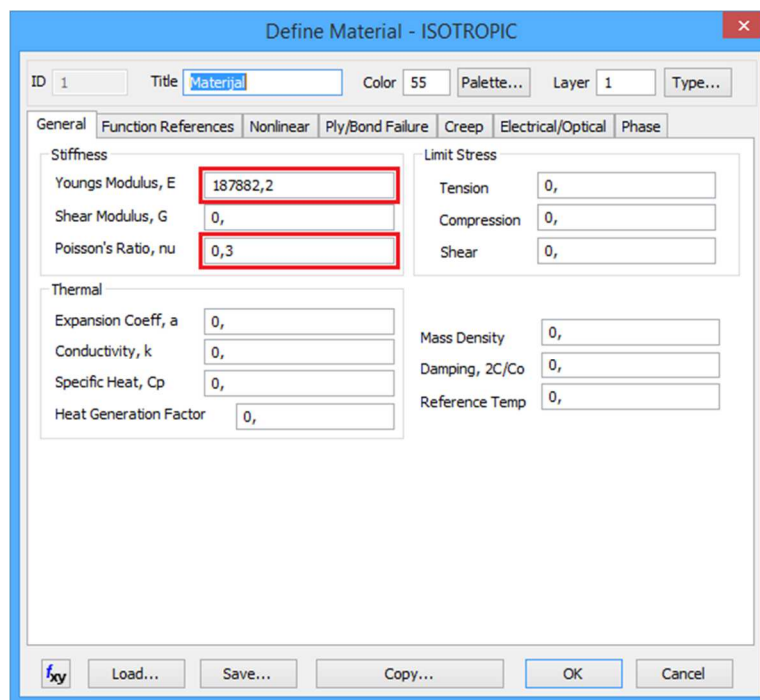
Слика 23. Изглед геометрије модела увезеног у *Femap v11*

### 6.1. Креирање материјала и мреже коначних елемената

Прво дефинишемо карактеристике материјала модела и тип коначног елемента. Карактеристике материјала дате су у Табели 1. Приказане карактеристике материјала за све делове склопа су исте, па нема потребе да креирамо више, већ ћемо креирати један материјал за цео склоп. Избором опције *Model>Material* из падајућег менија уносимо потребне карактеристике из Табеле 1, уносимо модул еластичности, као и *Poisson-ov* коефицијент (Слика 24).

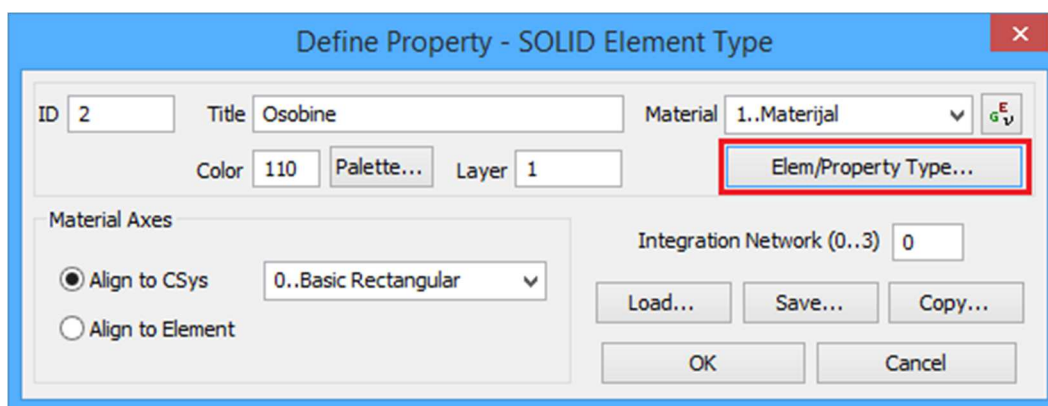
Табела 1. Карактеристике материјала за све компоненте склопа

|                                | Материјал 1      | Материјал 2              | Материјал 3              |
|--------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| Материјал                      | SA-479 316       | SA-312 TP 316            | SA-403 316               |
| Компонента                     | Хидраулични блок | Прикључна цев без капице | Прикључна цев са капицом |
| $\sigma_m$ <sub>[Мра]</sub>    | 137,90           | 137,90                   | 137,90                   |
| $\sigma_y$ <sub>[Мра]</sub>    | 169,61           | 169,61                   | 169,61                   |
| $\sigma_{ya}$ <sub>[Мра]</sub> | 206,84           | 206,84                   | 206,84                   |
| $\sigma_{ta}$ <sub>[Мра]</sub> | 517,11           | 517,11                   | 517,11                   |
| $E_1$                          | 1,0              | 1,0                      | 1,0                      |
| $E_2$                          | 1,0              | 1,0                      | 1,0                      |
| $E$ <sub>[Мра]</sub>           | 187882,19        | 187882,19                | 187882,19                |
| $\nu$                          | 0,30             | 0,30                     | 0,30                     |
| Coef                           |                  |                          |                          |



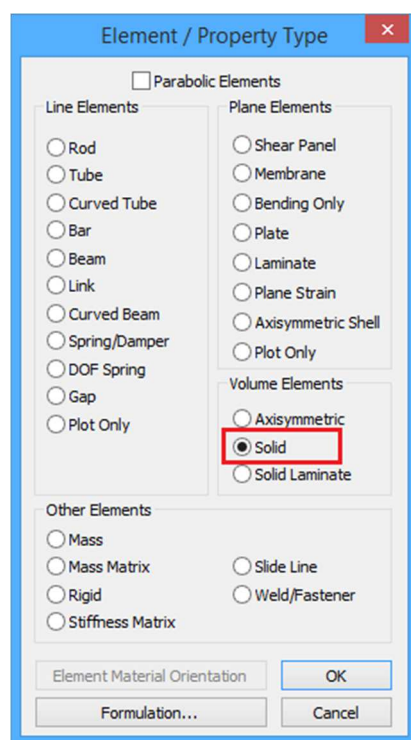
Слика 24. Унос потребних карактеристика материјала

Након тога из падајућег менија отварамо прозор *Модел>Property* у коме дефинишемо особине коначних елемената (Слика 25), у зависности од тога да ли се ради о линијском, раванском или запреминском типу коначног елемента.



Слика 25. Дефинисање особина коначних елемената

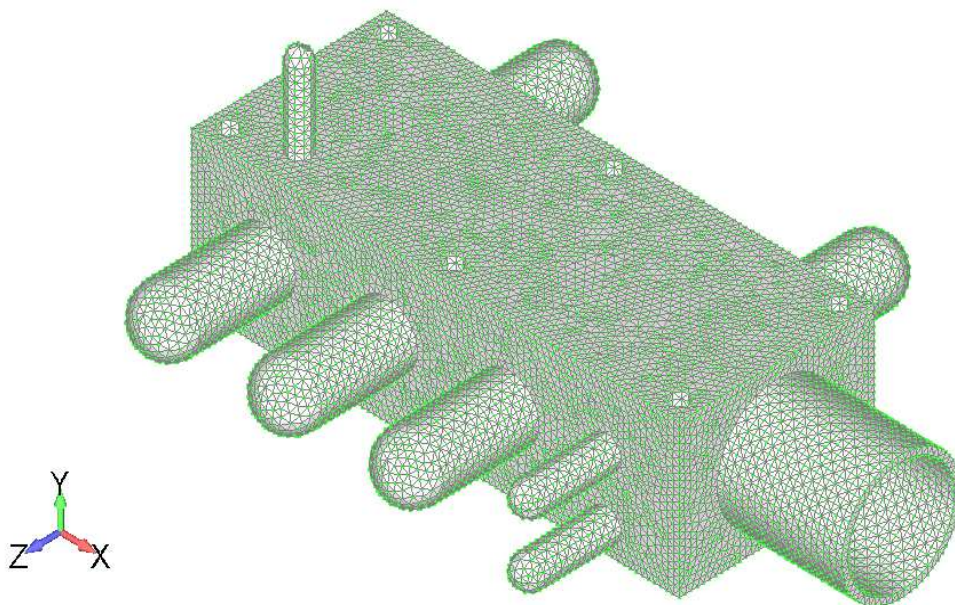
Након тога избором команде *Element/Property Type* отвара се прозор у коме дефинишемо тип коначног елемента, чекирамо команду *Solid* пошто се ради о чврстом телу (Слика 26).



Слика 26. Дефинисање типа коначног елемента

Мрежу коначних елемената на моделу креира користећи команду *Mesh>Mesh Control>Suze On Solid*. Избором те команде отвориће се прозор где ћемо изабрати врсту мреже као и величину елемента. У овом раду коришћена је величина елемента од  $3,175mm$  као и тетраедарска мрежа.

Након одабира величине елемента командом *Mesh>Geometry>Solids* креирамо тетраедарку мрежу коначних елемената на моделу приказану на Слици 31.

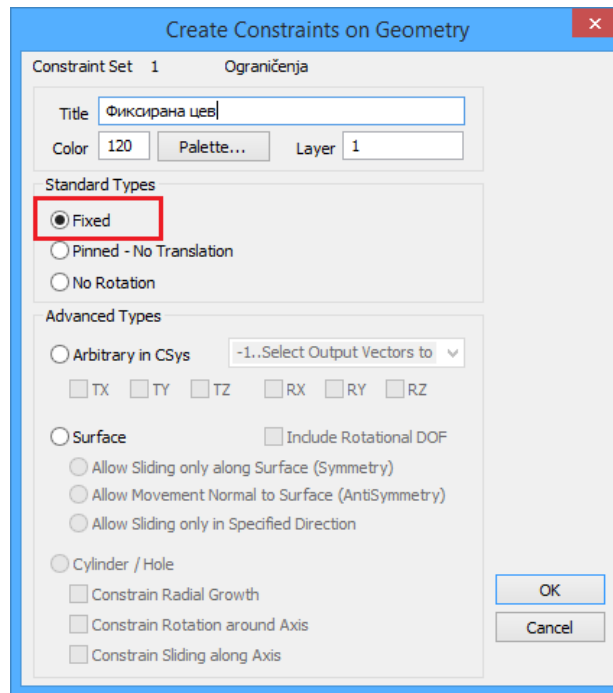


Слика 27. Модел мреже коначних елемената креиран софтвером Femar

## 6.2. Задавање ограничења и оптерећења

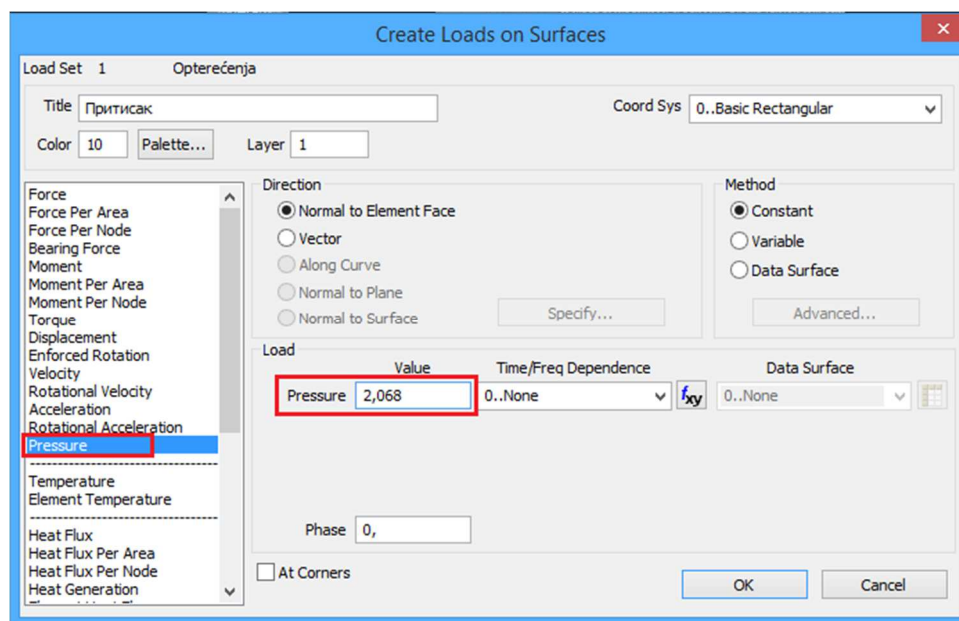
После креирања мреже коначних елемената модела потребно је задати ограничења и оптерећења.

Ограничење се поставља на чворовима који се налазе на чеоној површини прикључне цеви без капице која заправо служи као улазна цев. Задавањем ограничења на челу цеви омогућено је да се хидраулички блок услед деловања притиска правилно деформише. Ограничења задајемо тако што из падајућег менија бирамо команду *Model>Constraint>Surface* и означимо чеону површину прикључне цеви. Након тога појавиће нам се прозор (Слика 34) у коме треба да обележимо о којој врсти ограничења је реч. У овом случају цев је фиксирана што значи да нема translације ни ротације око оса X, Y и Z.



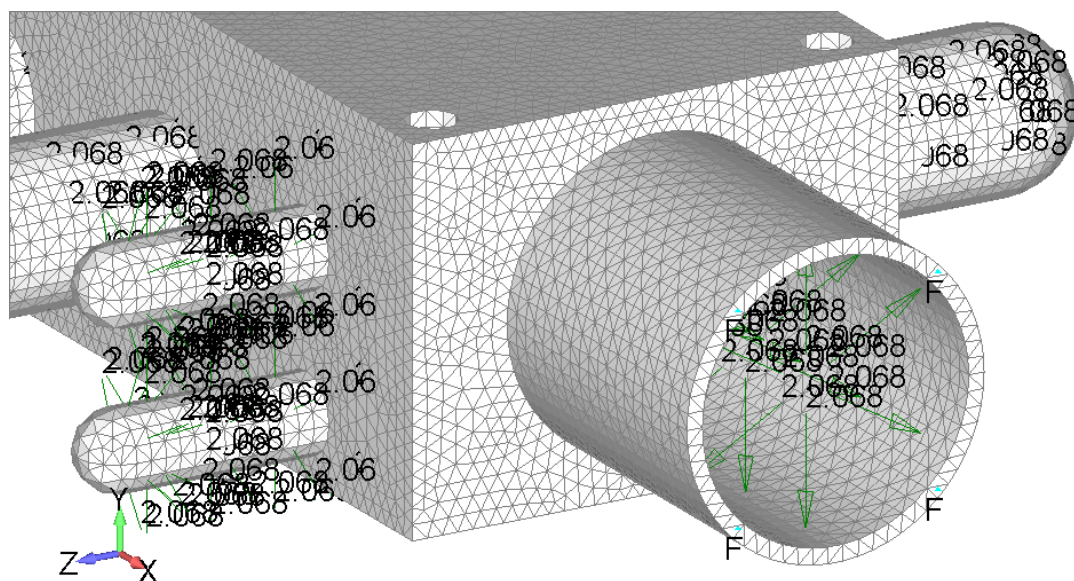
Слика 28. Фиксирање прикључне цеви – задавање ограничења

Задавање оптерећења, притисак од 2,068 МПа, који делује на све унутрашње површине хидрауличног блока и прикључних цеви дефинисано је избором команде *Model>Load>On Surface*. Када изаберемо команду и означимо све унутрашње површине модела појавиће нам се прозор (Слика 29) где се бира врста оптерећења, притисак, и уноси вредност притиска.



Слика 29. Избор врсте оптерећења и задавање одговарајуће вредности притиска

На тај начин смо задали оптерећење приказано на Слици 30.

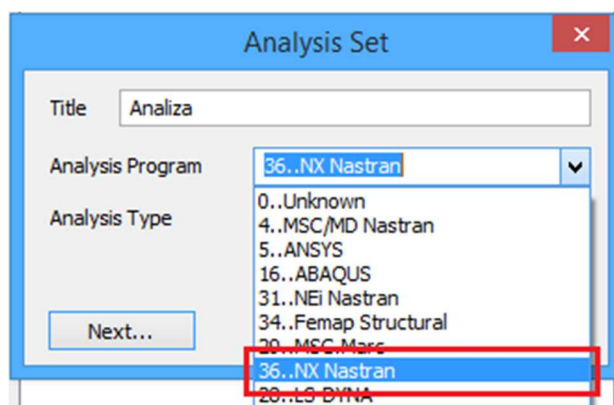


Слика 30. Ограничење и оптерећење модела

### 6.3. Анализа

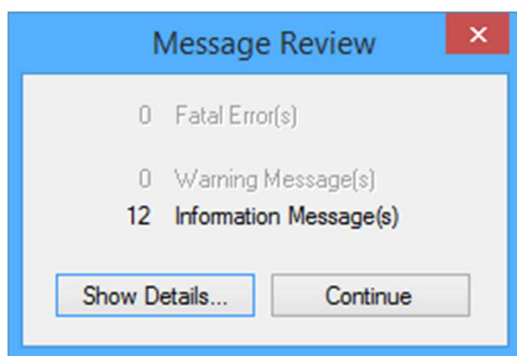
За анализу модела коришћен је солвер *NX Nastran*. Циљ анализе је провера напонско-деформационих стања на хидрауличком блоку са прикључним цевима услед притиска  $P=2,068\text{MPa}$  на унутрашње површине блока и цеви од којих је једна цев фиксирана са чеоне стране.

Прво што треба урадити је креирату нову анализу командом *Model>Analysis*. Отвара се прозор (Слика 31) где уносимо назив анализе и бирамо солвер за анализу у овом случају *NX Nastran*.



Слика 31. Избор *NX Nastran* солвера за анализу

Једнаставним избором команде *File>Analyze Model* започињемо процес анализе. По завршетку анализе на екрану ће се појавити прозор (Слика 32) који нас обавештава о евентуалним грешкама током анализе. Ако грешака нема настављамо даље.

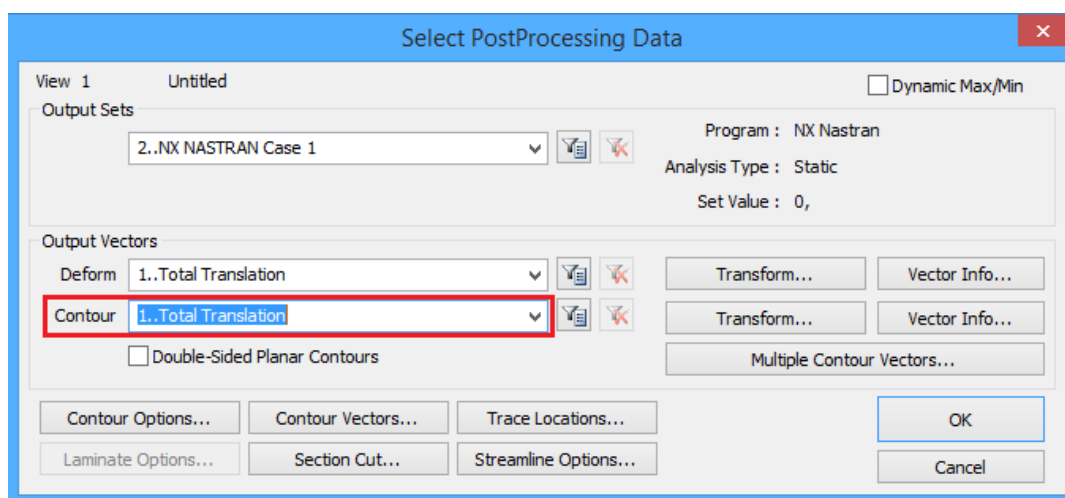


Слика 32. Прозор који нас обавештава да ли има грешака

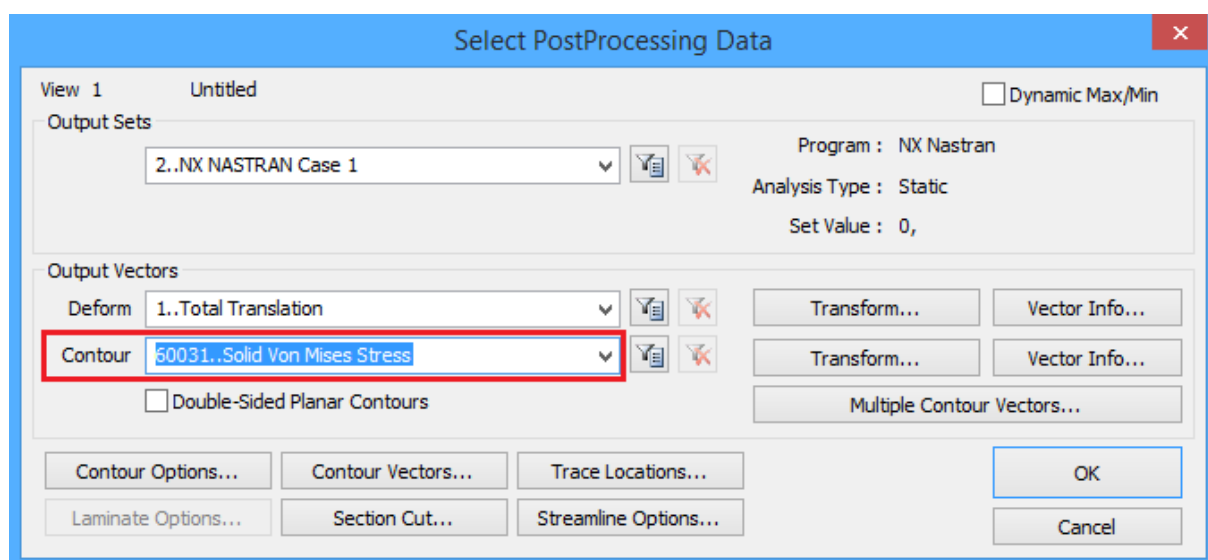
## 6.4. Тумачење резултата

Након успешно завршене анализе прелазимо на део у коме ћемо анализирати и протумачити добијене резултате анализе. Циљ ове анализе јесте да се прорачунају деформације (померања) модела као и одређивању максималног напона који се јавља у хидрауличном блоку.

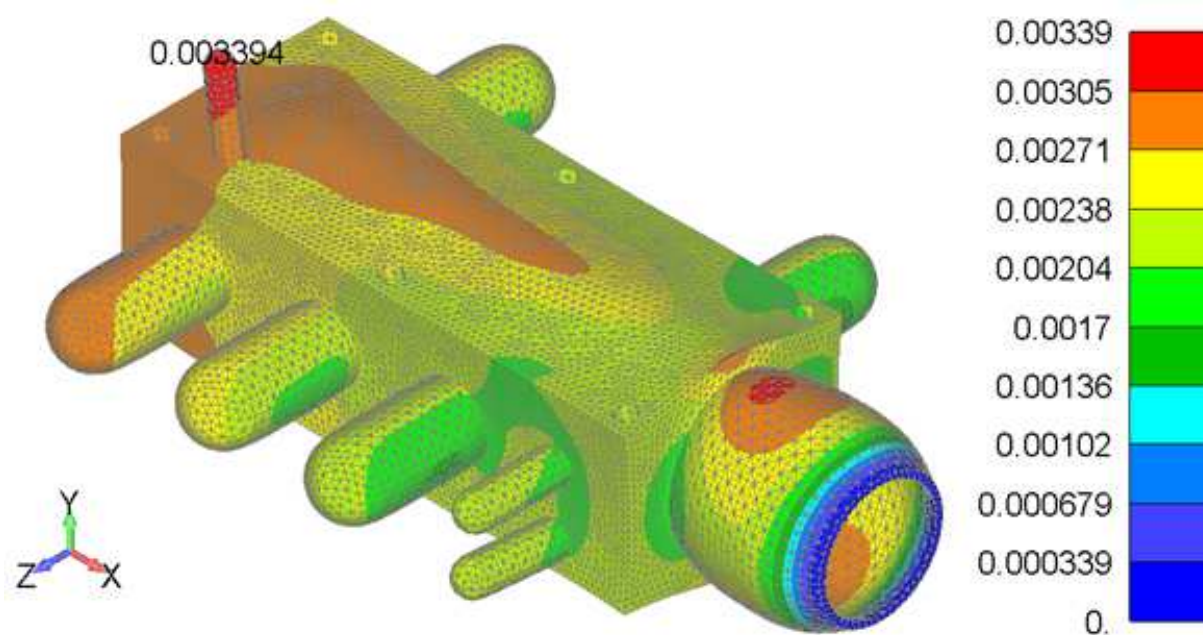
Избором команде *View>Select Post Processing Data* па са падајуће листе бирамо податке анализе које желимо да прикажемо, а то су померања (*Total Translation*), као и напоне у хидрауличном блоку (*Solid von Mises Stress*) (Слике 33 и 34).



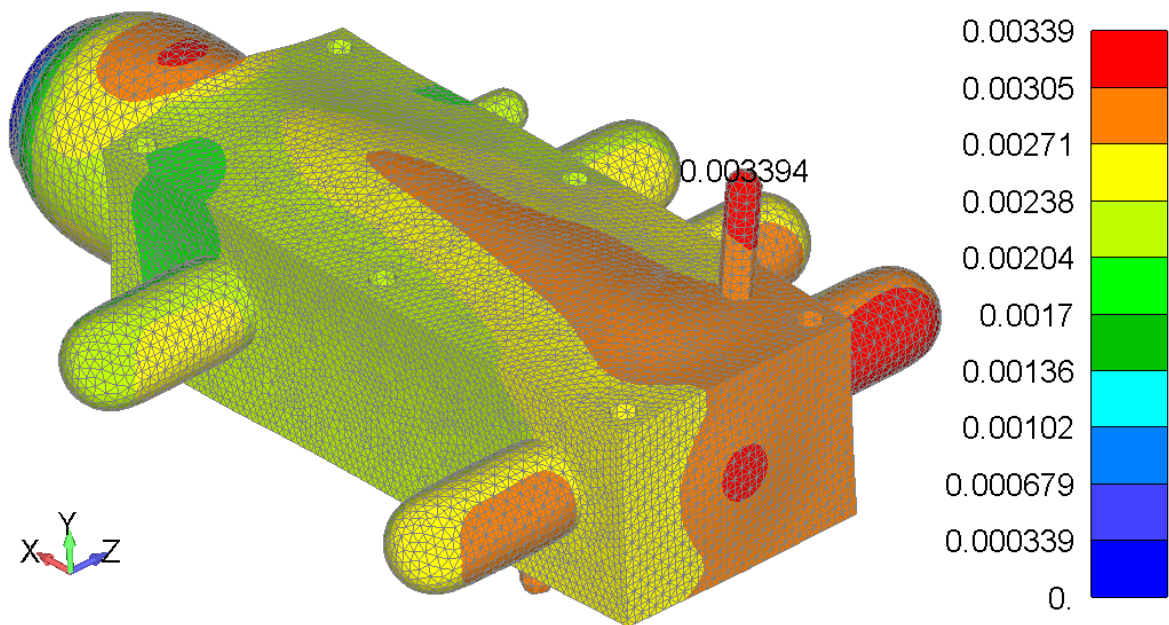
Слика 33. Избор за приказ поља укупног померања склопа



Слика 34. Избор за приказ поља ефективних напона

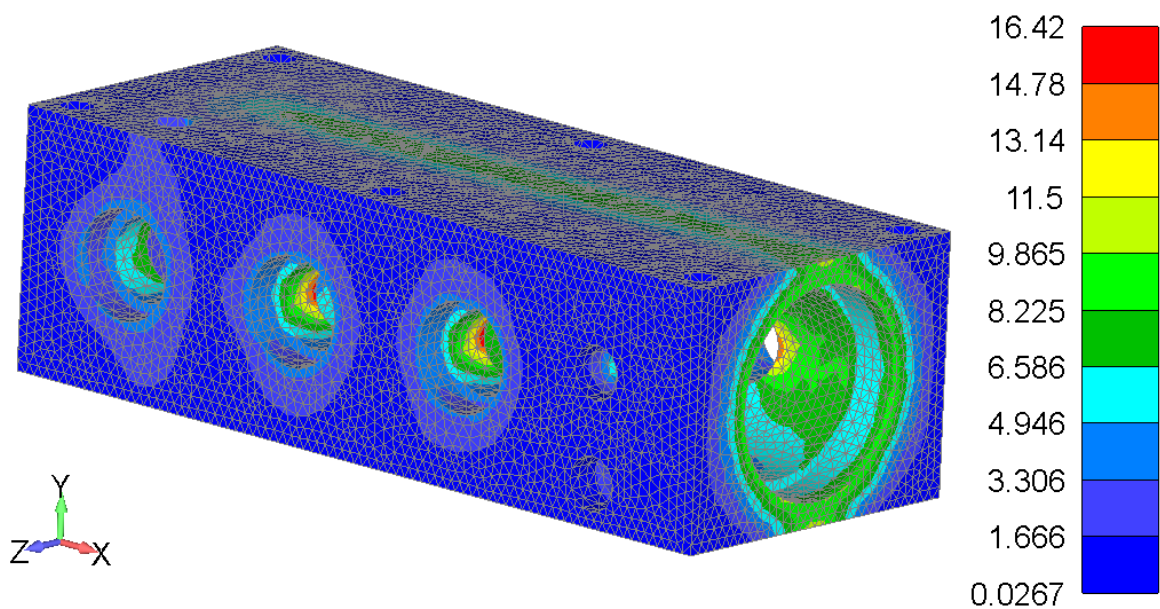


Слика 35. Поље укупних померања

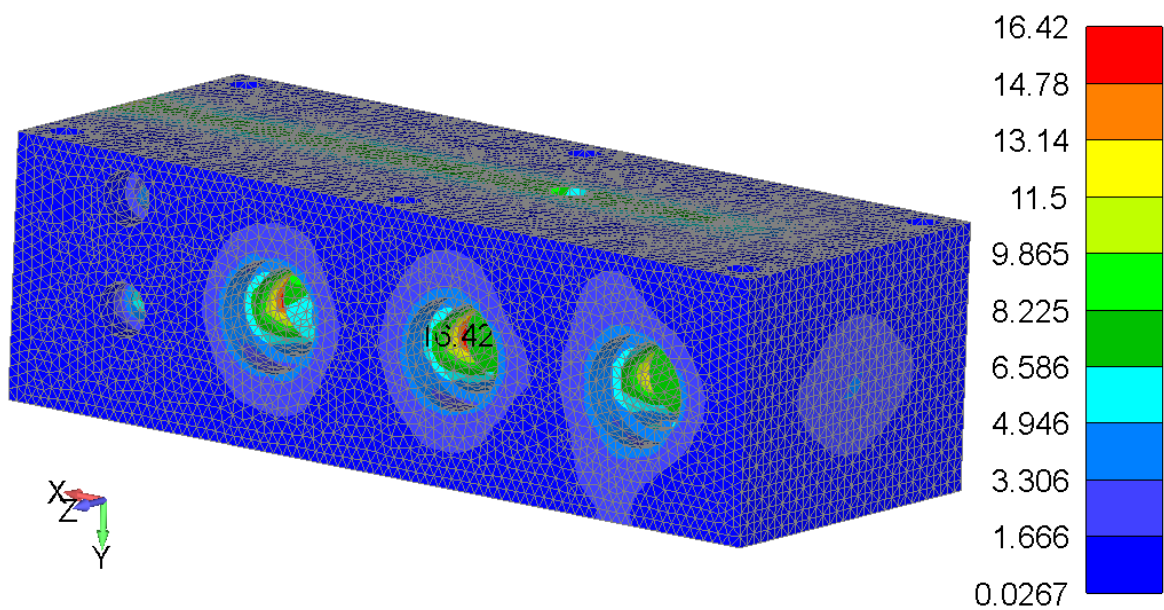


Слика 36. Поље укупних померања

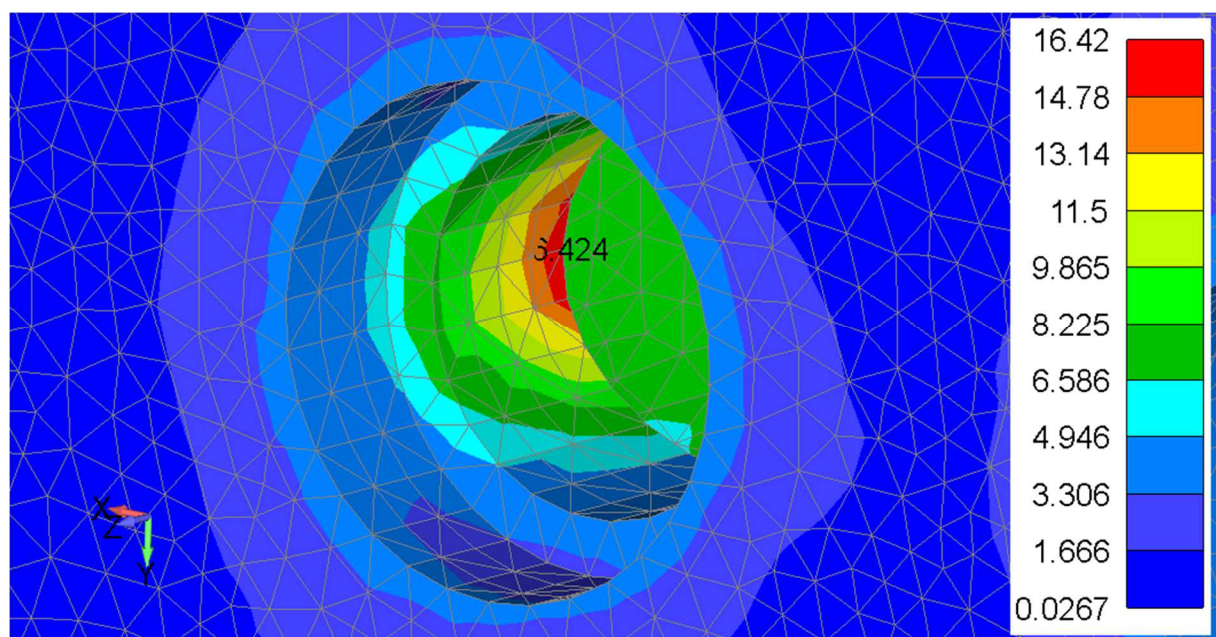
На Сликама 35 и 36 приказано је поље укупних померања модела у два погледа. Модел се шири радијално ка споља и издужује се аксијално од фиксиране цеви што је и очекивано. Максимално померање модела је  $0.00339\text{mm}$ .



Слика 37. Поље ефективног напона



Слика 38. Поље ефективног напона



Слика 39. Поље ефективног напона – место максималног напона

На Сликама 37, 38 је приказано поље ефективног напона хидрауличног блока услед унутрашњег притиска. Место максималног напона је приказано на Сlici 39 и налази се на отвору  $\Phi 25\text{mm}$  и износи  $16,42\text{MPa}$ .

## 7. Закључак

Метод коначних елемената је нумеричка метода која је незаобилазна у анализи инжењерских конструкција. Заснива се на физичкој дискретизацији, при чему се континуум са бесконачно много степени слободе замењује са дискретним моделом међусобно повезаних елемената са коначним бројем степени слободе. Решавање проблема своди се на примену рачунара за решавање система алгебарских једначина са огромним бројем непознатих величина у дискретним тачкама.

У овом завршном раду извршена је анализа, односно провера напонско-деформационих резултата хидрауличног блока са прикључним цевима при дејству унутрашњег притиска. Анализа је заснована на примени комерцијалних софтверских пакета за моделирање и анализу методом коначних елемената. Тродимензионално моделирање хидрауличног блока као и прикључних цеви извршено је у програмском пакету *SolidWorks*. Док је анализа методом коначних елемената извршена применом програмског пакета *Femap v11* са *NX Nastran* солвером.

Анализом добијених резултата напонских и деформацијских стања хидрауличног блока и прикључних цеви уочено је следеће:

- Да је максимално померање модела услед притиска  $0,00339mm$ .
- Напона у хидрауличном блоку је највећи на местима отвора  $\Phi 25mm$  и износи  $16,42MPa$
- Вредности деформација и максималних притисака су у границама дозвољених.

Уз овај закључак свакако треба имати у виду да је метода коначних елемената приближна нумеричка метода. Добијена решења су приближна, а реалним вредностима могу се приближити само уз правилан избор прорачунског модела и уз правилно одабране коначне елементе који су у стању да опишу реални физички процес. У том смислу, за примену ове методе при анализи конструкција потребно је пре свега разумети физичко понашање конструкције која се анализира. Потребно је познавати и теоријску основу методе коначних елемената, а на тај начин и ограничења њене примене. На крају, потребно је добијене резултате правилно и критично анализирати. У

супротно, решења добијена помоћу расположивих програмских пакета могу бити погрешна, што може довести до погрешне процене стања напона и деформација, а то може угрозити чврстоћу и стабилност конструкције.

# Литература

- [1] Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н.: Метод коначних елемената I, Машински факултет, Крагујевац, 1998.
- [2] Мирослав Живковић, Снежана Вуловић, *Linear static and dynamic structural analysis, Pre-andpost- processing examples in program Femap for program package PAK, Faculty for Mechanical Engineering, Kragujevac, University of Kragujevac*, 2013
- [3] <http://www.pveng.com/FEA/FEASamples/StepByStep/StepByStep.php>
- [4] <http://itcr.hr/femap/femap/>
- [5] <http://www.solfins.com/strana/solidworks-3d-cad/>
- [6] <http://www.mobilehydraulictips.com/>
- [7] [Femap with NX Nastran](#)