

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Композитне конструкције

Број индекса: 314/2016

Јована Б. Милићевић

**Моделирање и структурна анализа
елемената тротинета израђених од
композитних материјала**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Зорица Ђорђевић, ванр. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да изврши структурну анализу најоптерећенијих делова тротинета и испита могућност замене алуминијума, као материјала од којих се најчешће израђују ови делови тротинета, неким од композитних материјала.

Препоручена литература:

- [1] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Душан Арсић, *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2017.
- [2] Зорица Ђорђевић, *Композитне конструкције*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.
- [3] Горан Девеџић, Саша Ћуковић, Сузана Петровић, Јелена Максић, *3D моделирање производа*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2010.

Крагујевац, 09.2018

Ментор:
Др Зорица Ђорђевић, ванр. проф.

РЕЗИМЕ

Тротинет је превозно средство које се све више може видети на улицама. Људи га радо користе јер се показало да је врло ефикасан и лак за коришћење. Оно што га чини посебним јесте материјал од кога је направљен. Првобитни тротинети су били израђени од алуминијума. Развојем нових материјала, композити су се појавили као адекватна замена за алуминијум. Овај рад се бави анализом понашања различитих материјала, од којих се раде делови тротинета, под дејством оптерећења. Испитивање је извршено с обзиром на прорачунате вредности притиска на анализиране елементе тротинета. Елементи тротинета су измоделирани у програму *Catia*, док је анализа напонско-деформационог стања извршена у програмском пакету *Abaqus Cae*. Крајњи резултати су приказани графичким путем и при томе су изведени одређени закључци.

Кључне речи: тротинет, композитни материјали, *Abaqus Cae*, *Catia*, метода коначних елемената

ABSTRACT

Scooter is a transportation vehicle that can be seen more and more these days on the streets. People like it because it is really easy to use and it is proved to be very efficient. What makes it special is the material from which it is made. The original scooters were made of aluminum. By the time new materials were developed and the composite appeared as a good solution for a replacement with an aluminum. This work presents the analysis of the behavior of various materials, of which parts of the scooter are under the influence of the load. The test was carried out with regard to the calculated stress values for the analyzed elements of the scooter. The elements of the scooter were modeled in the program *Catia*, while the stress-deformation analysis were done in the program package *Abaqus Cae*. The final results are graphically displayed and some conclusions are made.

Keywords: scooter, composite materials, Abaqus Cae, Catia, finite structural analysis

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	6
2. ТРОТИНЕТ	7
2.1 Историјат развоја тротинета.....	7
2.2 Елементи тротинета	8
3. КОМОПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ.....	10
3.1 Историјат композита.....	10
3.2 Класификација композитних материјала	10
3.3 Примена композита при изради тротинета.....	13
3.3.1 Карбонска влакна	13
3.3.2 Стаклена влакна.....	14
3.3.3 Арамидна влакна	15
4. ПРОРАЧУН ПРИТИСКА НА НИСКОПОДНОЈ ПОВРШИНИ ЗА ГАЖЕЊЕ И НА УПРАВЉАЧ ТРОТИНЕТА	17
5. МОДЕЛИРАЊЕ ЕЛЕМЕНАТА ТРОТИНЕТА У СОФТВЕРУ CATIA V5R21	20
5.1 Опис поступка моделирања управљача тротинета	20
5.2 Опис поступка моделирања нископодне површине за гажење	26
6. СТРУКТУРНА АНАЛИЗА ДЕЛОВА ТРОТИНЕТА У СОФТВЕРУ ABAQUS/CAE ..	28
6.1 Покретање софтвера Abaqus	29
6.1.1 Опис поступка структурне анализе	32
6.1.2 Структурна анализа управљача	42
6.1.4 Преглед резултата структурне анализе управљача	46
6.1.5 Структурна анализа нископодне површине за гажење	48
6.1.6 Преглед резултата структурне анализе нископодне површине за гажење	52
7.0 ЗАКЉУЧАК.....	54
8.0 ЛИТЕРАТУРА.....	55

1. УВОД

Развој нових материјала је област у коју се данас највише улаже. Област примене композита је временом све више почела да се проширује. Композити су се показали као адекватна замена за челик, алуминијум и остале конвенционалне материјале. Предности примене ових материјала се огледају у много чему. Предности композитних материјала јесте да имају могућност константног развијања. Добијањем нових и бољих материјала, добијају се и боље карактеристике.

Композитни материјали се данас примењују у многим гранама индустрије као што су аутомобилска, ваздухопловна, прехранбена, бродоградња и др. [1]. Примењују се и код израде тротинета. Тротинет је превозно средство које се све више у данашње време користи. Деци и одраслима је занимљив, користан и лак за вожњу. Пословни људи који живе у већим градовима, тротинет налазе као савршено средство за превоз до радног места. Тиме избегавају сву гужву коју аутомобилом не би могли да избегну. Тротинет данас не би заузео тако важно место да нису дизајнери направили да буде ефикасан, ергономичан и лак за употребу и ношење. На слици 1.0 је приказана илустрација човека како вози тротинет.



Слика 1.0 Илустрација вожње тротинета

За добре карактеристике тротинета главну улогу има материјал употребљен за његову израду. Често су тротинети израђени од алуминијума. Мада, приликом развоја нових материјала, композити су се појавили као адекватна замена за алуминијум.

У овом раду је извршена анализа понашања различитих материјала, од којих се раде делови тротинета, под дејством оптерећења. Од композитних материја коришћена су карбонска, стаклена и арамидна влакна у комбинацији са епокси смолом. Елементи тротинета су измоделирани у програму *Catia*, притом су увезени у програм *Abaqus Caе*, где је главни задатак био да се одради структурна анализа понашања материјала. Крајњи резултати су приказани графички.

Модел тротинета се састоји од управљача (волана), виљушке и нископодне равне површине монтиране на два точка. Елементи тротинета који су узети за структурну анализу су управљач и нископодна равна површина. Првобитно је одрађен прорачун да би се добио притисак одрасле особе на управљач тј. волан и нископодне површине за гажење. Након тога у програму *Catia* је измоделиран тротинет.

Поступак моделирања је у раду детаљно објашњен. Рад је настављен у програму *Abaqus Caе* где је урађена анализа напонско-деформационог стања изабраних елемената тротинета. На крају је дат закључак о понашању елемената тротинета при примени различитих материјала.

2. ТРОТИНЕТ

Тротинет је превозно средство које се често може видети код деце. Врло је лак за употребу. Начин покретања тротинета је врло једноставан. Покреће се тако што се гура ногом по земљи, док је друга нога на равној површини, монтираној на два или више точка. Деца га већ од треће године могу користити, а деци највише помаже тротинет за развијање боље равнотеже и баланса. Најчешће су намењена деци, али постоје модели тротинета и за одрасле. У многим деловима света, пословни људи користе тротинете, јер тако брже стигну до метроа и до места где раде. Јапанци предњаче у коришћењу тротинета у те сврхе. Исто тако, користе га и поштари у америчким градовима. Оно што тротинете чини тако популарним међу одраслима је то што убрзава ходање, лаки су за ношење, а могу бити и склопљиви [2].

2.1 Историјат развоја тротинета

Први модел тротинета настао је пре више од 100 година. Модел је у то време подсећао на спој точкића од скејта, дрвене даске ослоњене на њих, комада цеви и ручке. Даска је кроз историју еволуирала од дрвене, до металне, алуминијумске и пластичне, а и сама површина подног дела се мењала. На слици 2.0 је приказан стари модел тротинета.



Слика 2.0 Приказ старог тротинета

Тротинет, до скоро, није био толико популаран као бицикл и скејт. Међутим, модел креиран 1990. године од стране *Vim Oubotera* је донео промене. *Vim* је тротинет користио како би отишао до продавнице далеко од своје куће, али не толико далеко да би узимао кола или бицикл. Модел је изгледао доста боље. Дрво је заменио са алуминијумом, и тиме допринео стабилности. Направио је модел који је лак и мали да може стати и у ранац [3].

Разор тротинети 2000. године су постали популарни у Јапану, Уједињеним нацијама и даље. Ови тротинети су направљени од алумунијума, тако да су имуни на рђу и могу да издрже већу тежину. Ови модели су доста тиши. Разор тротинети су се појавили у различитим облицима, величинама, бојама и са више точкића за лакше управљање. Разор тротинети нуде моделе и за одрасле [4].

Тротинети су данас прави избор, јефтинији су, не користи бензин, а притом је добро да се деца и одрасли активирају. Данас се на тржишту могу наћи нови електрични тротинети.



Слика 2.1 Електрични тротинет

2.2 Елементи тротинета

Тротинет се састоји од управљача (волана), виљушке и нископодне равне површине монтиране на два или више точка. Равна површина за стајање је уска, а точкови се налазе на крајевима. Напред се налази један точак, а позади се налазе један или два точка. Висина волана тротинета иде до стука возача [5]. На слици 2.2 је приказан управљач тротинета.



Слика 2.2 Управљач "T-bar"

На слици 2.3 приказана је нископодна површина за гажење.



Слика 2.3 Нископодна површина за гажење

На слици 2.4 приказана је виљушка која служи да okreће предњи точак у жељеном правцу. Налази се на крају управљача.



Слика 2.4 Виљушка

На слици 2.5 приказан је изглед дршке која се поставља на волан управљача. Дршка служи за сигурно управљање тротинетом да не би дошло до клизања руку приликом додира.



Слика 2.5 Дршка

На слици 2.6 су приказани точкови. На тротинету могу да се монтирају не само два точка, већ и више њих.



Слика 2.6 Точкови

На слици 2.7 су приказане стеге које служе да држе чврсто управљач и виљушку.



Слика 2.7 Стега

3. КОМОПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ

Композитни материјали су састављени од два или више материјала. Они се разликују по физичком и хемиском саставу. Структурно су нетопиви једно у друго, па се уз помоћ микроскопа може видети да се ради о одвојеним фазама. За разлику од индувидуалних материјала, композити имају боља својства као што су већа носивост и крутост, а мања маса. Омогућавају лаку израду делова сложене геометрије, отпорнији су на удар, отпорнији су на замор услед коришћења, имају добру хемијску отпорност и флексибилни су у дизајну. Композити су се показали као адекватна замена делова од челика и алуминијума због његових добрих особина [6].

3.1 Историјат композита

Композитни материјали се примењују још од древних времена када су се користили у грађевинарству. Међу првим композитима је била комбинација сламе и блата. Слама је обезбеђивала структуру и чврстину, а блато је било везиво. Веома познат композит, који се свакодневно виђа, је бетон. Челична конструкција арматуре даје снагу и крутост бетону, док цемент држи арматуру стационарном. Бетон представља керамичку матрицу ојачану са великим честицама. Неки од често коришћених композита су стаклопластика и шперплоча. Стаклопластика је добијена од полиестера и стаклене вуне, и представља полимерну матрицу ојачану влакнима. Шперплоча је добијена од танке дрвене плоче и лепка и представља структурни слојевит композит.

Употреба композита је временом еволуирала. Развој нових материјала је област у коју се данас највише улаже. На пример, влакна ојачана пластиком је тип композита који се интензивно користи у свакодневном животу. Јавља се код свих превозних средстава, аутомобила, авиона, бродова и спортске опреме, тениских рекета, машинских елемената, машина, грађевинских материјала, водоводних цеви, мостова и много тога још [6].

3.2 Класификација композитних материјала

Композити представљају комбинацију најмање два материјала. Један материјал се зове матрица или везиво, а други материјал служи за ојачање. Матрица служи да преноси оптерећења на влакна, да обезбеди потребну пластичност и жилавост, има способност обликовања композита и штити влакна од спољашњег утицаја. Влакна служе да носе оптерећење. Могу имати различит распоред и оријентацију, што има велики утицај на чврстоћу влакнасто ојачаних композитних материјала. Влакна, љуспице, честице, плоче и попуњивачи представљају унутрашњу структуру композита, а могу бити и додаци композиту [6].

Својства композита зависе од величине и расподеле матрице и ојачала, индивидуалних својстава, количине, облика и јачине везе. Коначни резултат о крајњим особинама композитних материјала се добија детаљним испитивањима, која морају бити спроведена за сваку комбинацију саставних елемената по питању његових најважнијих особина. За техничку примену свакако су најважнија испитивања термомеханичких карактеристика композитних материјала.

Класификација композитних материјаласе може извршити на више начина [7]:

1. Према облику структурних додатака у композиту на:

- композитне материјале ојачане честицама,
- честицама ојачане композите са металном матрицом,
- композитне материјале ојачане влакнима,
- ламинарне композитне материјале.

2. Према врсти матрице на:

- синтетичке,
- природне.

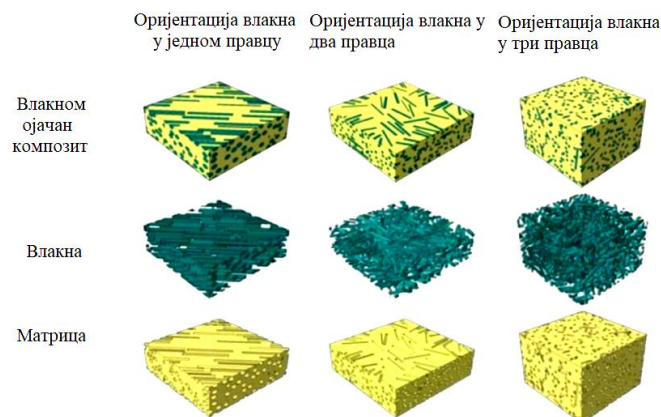
Функција матрице код влакнасто ојачаних композита:

I функција матрице: Она међусобно повезује влакна и ђелије као посредник који спољна оптерећења преноси и распоређује на влакна. Материјал матрице треба да има способност пластичне деформације пошто су оптерећења која примају чврста и најчешће крта влакна, знатно већа од оних што прима матрица. Неопходно је да модул еластичности влакна буде много већи него код матрице.

II функција матрице: Треба да штити влакна од механичких оштећења или хемијских утицаја средине у којој функционише. Површинска оштећења влакана су извори формирања прслина које могу проузроковати лом и при мањим вредностима затежућих напона.

III функција матрице: Матрица служи као баријера ширењу прслина. Раздвајањем влакана и захваљујући њеној пластичности спречава евентуално ширење кртог лома од влакна до влакна, што би довело до коначног лома конструкције. Чак и ако поједина влакна попусте услед ширења прслине, до лома композитног материјала неће доћи, осим ако се велики број влакана одједном не прекине, а затим одвоји и извуче из матрице.

На слици 3.0 су приказане различите оријентације влакна што утиче да композит има боља својства.



Слика 3.0 Влакном ојачан композит

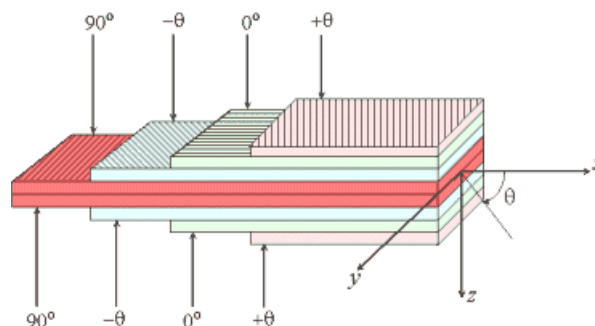
Континуирана влакна се теже производе и уграђују у матрицу, али сигурно дају најбоља својства. Дисконтинуирана влакна с великим коефицијентом знатно се лакше уграђују у матрицу и тако чине материјал високе крутости и чврстоће.

Развој композита се одвија у смеру прављења нових комбинација са керамичким, металним и шупљим влакнима изаједно са калупима који су јачи, чвршћи и отпорнији на високе температуре.

Материјали који се користе за матрицу композита углавном су алуминијум, алуминијум - литијум, олово, бакар, магнезијум и титан. Материјали који се највише користе за производњу влакана су: карбонска влакна, стаклена, угљенична, арамидна и природна влакна (бор, лан, конопља...). Врсте пластичних полимера су Ероху, Vinyl Ester, Polyester, Polyurethane, Polypropylene.

Сви синтетички материјали: пластика, гума, керамика и метал се сада ојачавају влакнима. Влакна се бирају тако да је једно влакно изабрано због његових механичких особина, а друго због сасвим другог разлога на пример због топлотне отпорности. На пример комбинација од азбестно/ метално/влакнастог композита је добра за прављење преносних каишева који се користе за пренос тешких врелих материјала.

Ламинарни композити су састављени од неколико различитих слојева. Слојеви су сложени и међусобно чврсто повезани, а својства варирају с обзиром на оријентацију влакана у појединим слојевима. Композити обавијени нитима могу бити произведени са варијабилном расподелом влакана. На слици 3.1 приказан је ламинарни композит.



Слика 3.1 Ламинарни композит

Код хомогених и ламинарних композита, структурни елементи (влакна и честице) могу бити смештени или у оријентисаном или произвољном распореду. Различите врсте матричних система композита најразличитијег ткања у две или три димензије даје небројено много могућих комбинација које могу поседовати веома различите механичке, физичке, хемијске и термичке особине.

Ојачавајући елементи служе да дају композитним материјалима боље механичке, топлотне и електричне карактеристике. Они представљају носиви елемент композита, обезбеђују висок ниво еластичности, већу чврстоћу и отпорност на хабање.

Додавање ојачавајућих елемената полимерној матрици служи ради [7]:

- повећања густине,
- модула еластичности,
- савојне чврстоће,
- смањење коефицијента топлотног ширења,
- повећање тврдоће и топлотне постојаности,
- побољшање квалитета површине,
- модификација топлотне и електричне проводљивости,
- повећање вискозности, итд.

3.3 Примена композита при изради тротинета

Предност примене композитних материјала у односу на конвенционалне материјале се огледа у могућности широког варирања практично свих својстава материјала од којих су састављени. Тражена својства се постижу путем избора компонената са циљем да се искористе њихове најбоље особине. У неким случајевима најбољи резултати могу бити постигнути употребом комбинације композита са металном матрицом у односу на композите са полимерном матрицом јер имају већу отпорност на повишеним температурама, већу пластичност и жилавост [7].

3.3.1 Карбонска влакна

Карбонска влакна је патентирао *Roger Bacon* 1957. године. Карбонска влакна се карактеришу низом особина и представљају композитне материјале састављене од много ситних угљичних влакана пречника 0,005 – 0,010 mm, веома добрих механичких карактеристика. Да би се могла користити као материјал, постављају се у матрицу од епоксидних смола (слика 3.2).

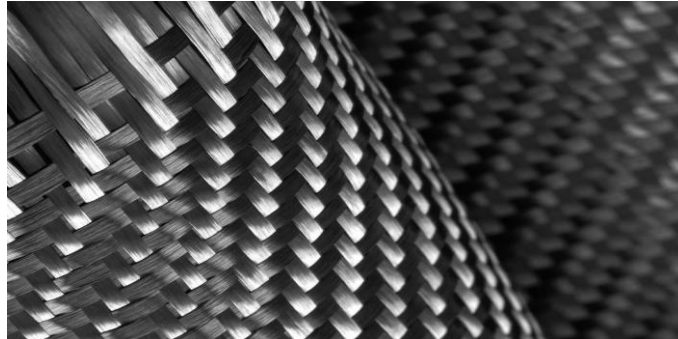
Применом карбонских влакана се добија мала маса конструкције, управо због тога што карбонска влакна немају велику густину. Њихова просечна густина је 1,60 g/cm³. Затезна чврстоћа се креће од 2100 МПа па навише, док су граничне дилатације до 2%. Карбонске траке показују чак боље механичке карактеристике од карбонских влакана.

Данас се могу видети модели тротинета израђени од карбонских влакана.

Особине карбонских влакана [8]:

- 1) Висока чврстоћа,
- 2) Велики однос чврстоће према специфичној тежини,
- 3) Висок модул еластичности,
- 4) Корозиона отпорност,
- 5) Добра електрична проводљивост,
- 6) Заморна отпорност на истезање,
- 7) Ударна отпорност,
- 8) Нису запаљива,
- 9) Висока топлотна проводљивост у неким формама влакана,
- 10) Мали коефицијент термалне експанзије,

- 11) Нетоксичност,
- 12) Пропустљивост за X-зраке,
- 13) Самовлажење,
- 14) Одлична заштита екрана од електромагнетних сметњи,
- 15) Релативно су скупа.



Слика 3.2 Карбонска влакна

3.3.2 Стаклена влакна

Стаклена влакна су настала пре карбонских влакана. Она су тежа од карбонских влакана, али имају већу ударну отпорност. У зависности од врсте стакла, пречника нити, хемијске величине и облика влакана, може се постићи широк спектар својстава и перформанси. Стаклопластика је лагана, јака и мање крта. Стаклена влакна се обично стављају у плочу, случајно распоређена или ткана. Према употреби стаклопластике, стаклена влакна се могу направити од различитих врста стакла.

Најбољи део стаклених влакана је његова способност да се обликује у различите комплексне облике. Ово прилично објашњава зашто се стаклопластика широко користи код авиона, аутомобила, када, чамаца, кровова и др.

На слици 3.3 су приказана стаклена влакна.

Особине стаклених влакана [9]:

- 1) Специфични отпор већи од челика,
- 2) Дobar електрични изолатор чак и при малој дебљини,
- 3) Природно су незапаљива,
- 4) Неосетљивост на варијације температуре и влажност ваздуха,
- 5) Низак коефицијент линеарног ширења,
- 6) Компатибилност са органским матрицама. Могућност комбиновања са много синтетичких смола и одређених минералних матрица као што је цемент,
- 7) Стаклена влакна се не троше и остају непромењена дејством глодара и инсеката,

- 8) Стаклена влакна имају ниску топлотну проводљивост што их чини веома корисним у грађевинарству,
9) Диелектрична пропустљивост чини их погодним за електромагнетне прозоре.



Слика 3.3 Стаклена влакна

3.3.3 Арамидна влакна

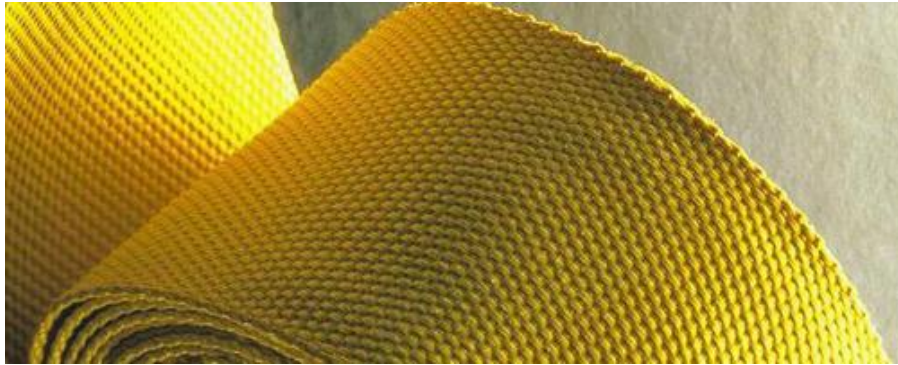
Арамидно влакно је познато по имену кевлар. Припада породици синтетичких производа које карактерише висока чврстоћа (неких пет пута већа од челика) и висока топлотна отпорност (нешто виша од 500°C). Арамидна влакна су вештачка влакна високих перформанси, са молекулима који карактеришу релативно чврсти полимерни ланци. Ови молекули су повезани снажним водоничним везама које веома ефикасно преносе механичко напрезање, омогућавајући коришћење ланаца релативно ниске молекулске тежине.

Арамидна влакна се користе за различите примене као што су ваздухопловство, бродоградња, аутомобилска индустрија, заштитна одећа од топлоте, зрачења и хемикалија, арамид као замена за азбест, телекомуникације (каблови од оптичких влакана) и многе друге. На слици 3.4 су приказана арамидна влакна.

Особине арамидних влакна су [10]:

- 1) Висока чврстоћа,
- 2) Добра отпорност на абразију,
- 3) Отпорна су на замор,
- 4) Добра отпорност на органске раствараче,
- 5) Непроводљивост,
- 6) Нема тачке топљења,
- 7) Ниска запаљивост,
- 8) Дobar интегритет ткања на повишеним температурама,

- 9) Под дејством оптерећења арамидна влакна се пре кидања прво пластично деформишу,
- 10) Са порастом температуре преко 100°C , својства арамидних влакана се нагло смањују.



Слика 3.4 *Арамидна влакна*

4. ПРОРАЧУН ПРИТИСКА НА НИСКОПОДНОЈ ПОВРШИНИ ЗА ГАЖЕЊЕ И НА УПРАВЉАЧ ТРОТИНЕТА

- Прорачун притиска на нископодној површини за гажење

Прво је потребно прорачунати силу притиска на површину за гажење. За овај прорачун је узет пример мушкараца тежине 80 kg. Сила F је једнака [11]:

$$F = m \cdot g = 80 \cdot 9.81 = 784.8 \text{ N} \quad (4.1)$$

Добија се сила од **784.8N**. Сада се рачуна притисак. Притисак p је количник силе F која делује нормално на површину A .

$$p = \frac{F}{A} = \frac{784.8}{0.083} = 9455.42 \text{ Pa} = 0.00945 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

Добија се притисак од **0.00945 MPa**.

Прорачун је извршен и за случај жене од 60 kg. Поступак је исти као код претходног прорачуна.

$$F = m \cdot g = 60 \cdot 9.81 = 588.6 \text{ N} \quad (4.3)$$

Добија се сила од **588.6 N**.

$$p = \frac{F}{A} = \frac{588.6}{0.083} = 7091.56 \text{ Pa} = 0.007091 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

Добија се притисак од **0.007091MPa**.

- Прорачун притиска на управљачу

У табели 4.0 је приказан тест стиска шаке код мушкараца у kg [12].

Табела 4.0 Тест стиска шаке код мушкараца

STAROST	SLABO	NORMALNO	SNAŽNO
10-11	< 12.6	12.6-22.4	> 22.4
12-13	< 19.4	19.4-31.2	> 31.2
14-15	< 28.5	28.5-44.3	> 44.3
16-17	< 32.6	32.6-52.4	> 52.4
18-19	< 35.7	35.7-55.5	> 55.5
20-24	< 36.8	36.8-56.6	> 56.6
25-29	< 37.7	37.7-57.5	> 57.5
30-34	< 36.0	36.0-55.8	> 55.8
35-39	< 35.8	35.8-55.6	> 55.6
40-44	< 35.5	35.5-55.3	> 55.3
45-49	< 34.7	34.7-54.5	> 54.5
50-54	< 32.9	32.9-50.7	> 50.7
55-59	< 30.7	30.7-48.5	> 48.5
60-64	< 30.2	30.2-48.0	> 48.0

За прорачун усвојен је стисак шаке од **50 kg**. Поступак прорачуна је исти као претходни.

$$F = m \cdot g = 50 \cdot 9.8 = 490,5 \text{ N} \quad (4.5)$$

Добија се сила од **490,5 N**.

$$p = \frac{F}{A} = \frac{490,5}{0.009} = 54500 \text{ Pa} = 0.0545 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

Притисак шаке износи **0.0545 MPa**

У табели 4.1 је приказан тест стиска шаке код жене у kg.

Табела 4.1 Тест стиска шаке код жене.

STAROST	SLABO	NORMALNO	SNAŽNO
10-11	< 11.8	11.8-21.6	> 21.6
12-13	< 14.6	14.6-24.4	> 24.4
14-15	< 15.5	15.5-27.3	> 27.3
16-17	< 17.2	17.2-29.0	> 29.0
18-19	< 19.2	19.2-31.0	> 31.0
20-24	< 21.5	21.5-35.3	> 35.3
25-29	< 25.6	25.6-41.4	> 41.4
30-34	< 21.5	21.5-35.3	> 35.3
35-39	< 20.3	20.3-34.1	> 34.1
40-44	< 18.9	18.9-32.7	> 32.7
45-49	< 18.6	18.6-32.4	> 32.4
50-54	< 18.1	18.1-31.9	> 31.9
55-59	< 17.7	17.7-31.5	> 31.5
60-64	< 17.2	17.2-31.0	> 31.0

За прорачун усвојен је стисак шаке од **30kg**. Поступак прорачуна је исти као претходни.

$$F = m \cdot g = 30 \cdot 9.81 = 294.3 \text{ N} \quad (4.7)$$

Добија се сила од **294.3 N**

$$p = \frac{F}{A} = \frac{294,3}{0.009} = 32700 \text{ Pa} = 0.0327 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

Притисак шаке износи **0.0327 MPa**

5. МОДЕЛИРАЊЕ ЕЛЕМЕНАТА ТРОТИНЕТА У СОФТВЕРУ CATIA V5R21

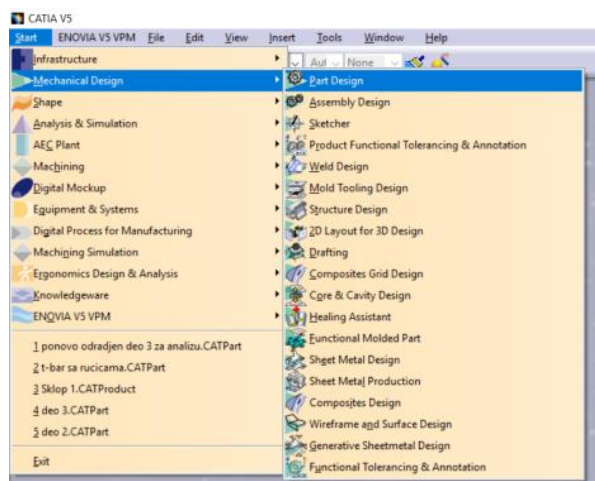
Catia спада у врло моћне софтверске програме који омогућава креирање тродимензионалних модела. Програм подржава CAD – Computer Aided Design (Конструисање помоћу рачунара), CAM – Computer Aided Manufacturing (Рачунаром подржана производња) и CAE – Computer Aided Engineering (Рачунаром подржано инжењерство).

Софтвер *Catia* даје решење за развој производа за сваку врсту производње. Дизајнери га користе у свакодневној пракси. Програм може дати и развити јасну слику симулационих механизма. Распон капацитета програма *Catia* омогућава да се примени у широком спектру индустрије, као што су машинска индустрија, ваздухопловство, аутомобилска индустрија, електрична опрема, електроника, бродоградња, дизајн биљака и производи за широку потрошњу.

Catia је један од програма који је у стању да реши целокупни процес развоја производа, да спецификацију производа, дизајна, опреме, систем инжењеринга, машинску обраду, цртеже, анализе и симулације [13].

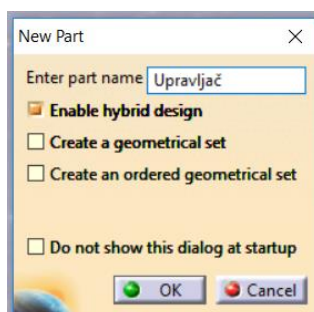
5.1 Опис поступка моделирања управљача тротинета

Покретањем програма *Catia* отвара се празан прозор. За креирање модела бира се Start, Mechanical Design, па онда Part design. На слици 5.0 је приказан први корак ка отварању прозора са алаткама за моделирање.



Слика 5.0 Бирање радног простора "Part design"

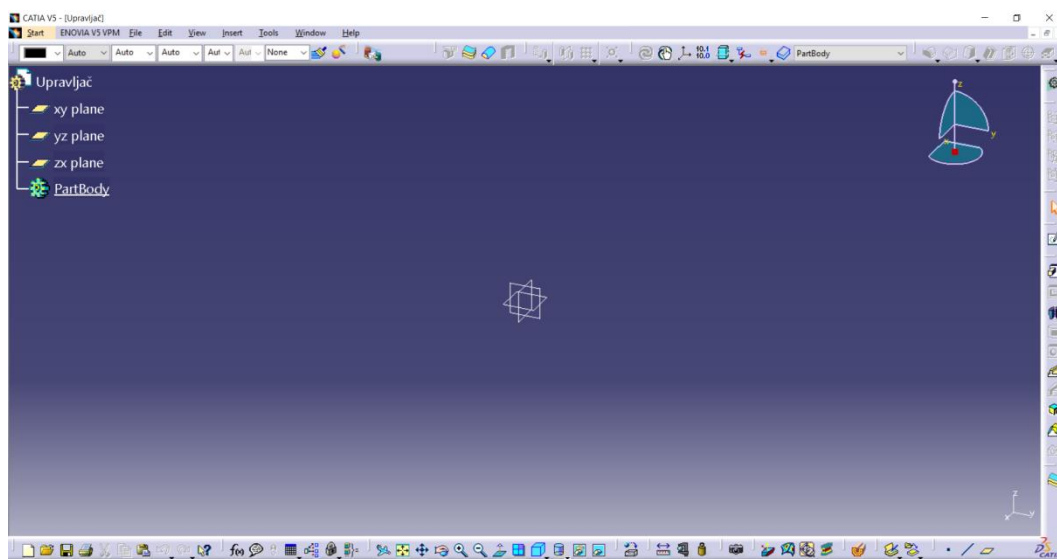
Одмах након изабраних опција појављује се мали прозорчић који тражи да се упише назив модела (слика 5.1).



Слика 5.1 Прозор за потврду креирања новог модела

На слици 5.2 дат је радни простор за креирање новог модела. На левој страни је стабло. У делу Part Body биће снимљени сви кораци креирања модела, који се увек могу видети и променити у случају да је то потребно.

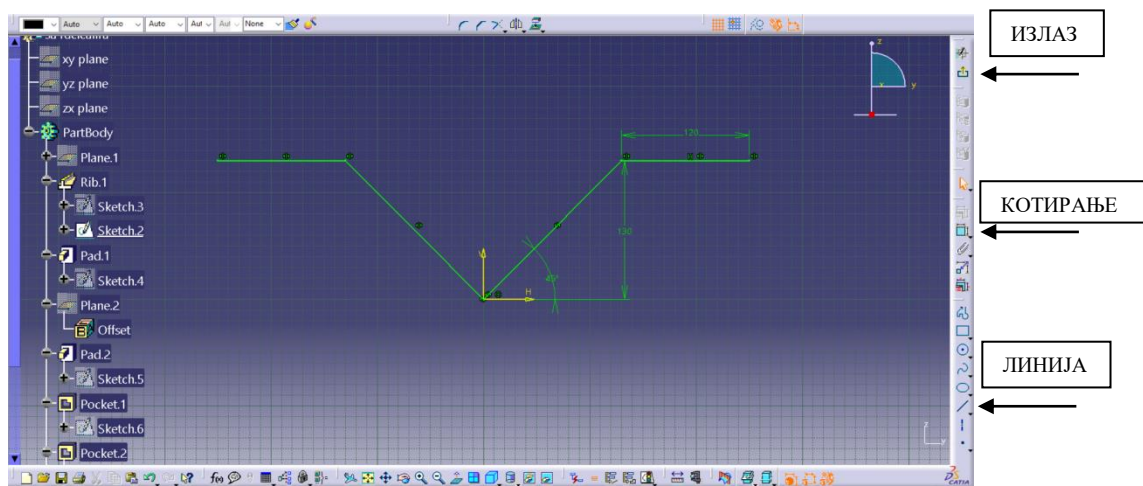
На десној страни углавном стоје главне алатке везане за обраду модела, док са доње стране су алатке које омогућавају да се мења изглед модела, постави материјал и још тога. У средини радне површине дате су равни. За почетак се бира погодна раван за цртање и кликне се на алатку *Sketch* [14].



Слика 5.2 Радни простор за моделирање

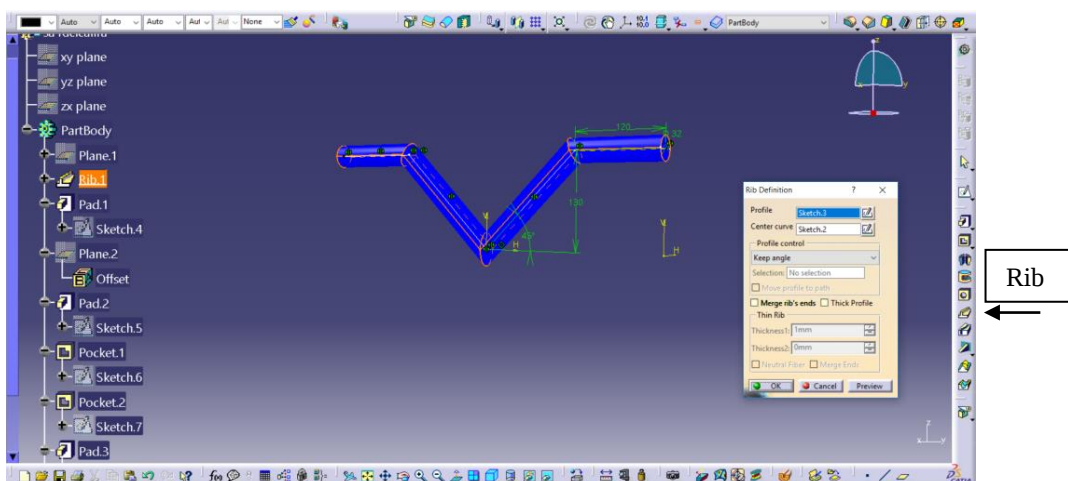
Сада програм даје нове алатке. За цртање се користи линија, након тога се котира. Када је цртеж позеленео, враћа се у првобитно радно окружење.

На слици 5.3 приказано је ново радно окружење за цртање.



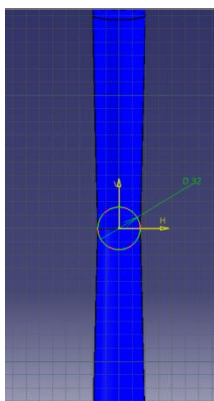
Слика 5.3 Радно окружење Sketch

На слици 5.4 је приказана коришћена алатка Rib. Пре коришћења ове алатке, одрађен је још један цртеж у управној равни, који подразумева кружницу постављену на врх линије.



Слика 5.4 Алатка Rib

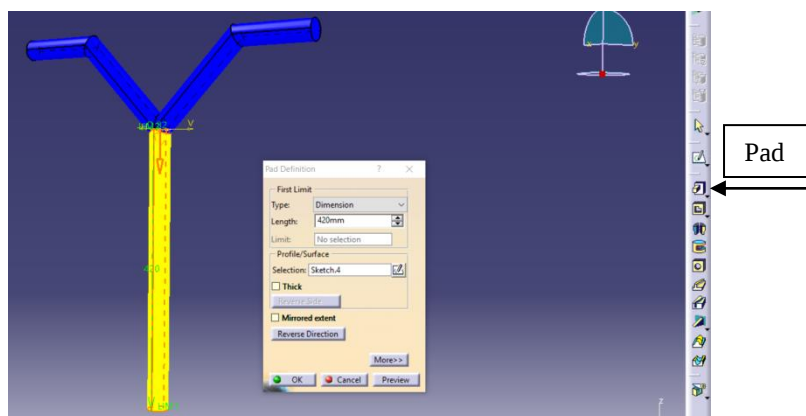
На слици 5.5 је приказано цртање врата управљача. Улази се у нов Sketch и одрађује се кружни облик са пречником од 32 mm.



Слика 5.5 Цртеж кружног облика управљача

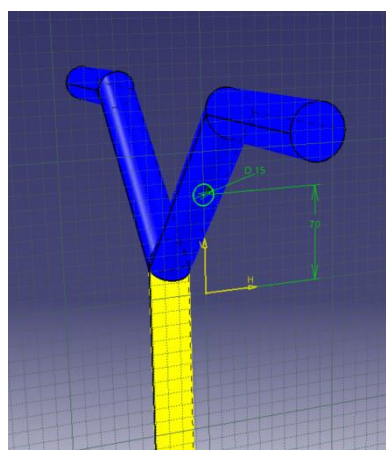
Након цртежа излази се из *Sketch-a*. Потребно је користи опцију *Pad* за издужење нацртаног облика.

На слици 5.6 је приказана опција *Pad*. Висина врата управљача је 420 mm.



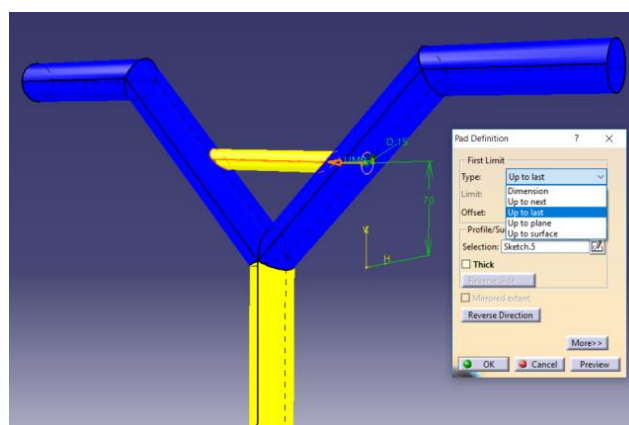
Слика 5.6 Опција *Pad*

На слици 5.7 је приказан цртеж ојачивача кружног облика пречника 15 mm.



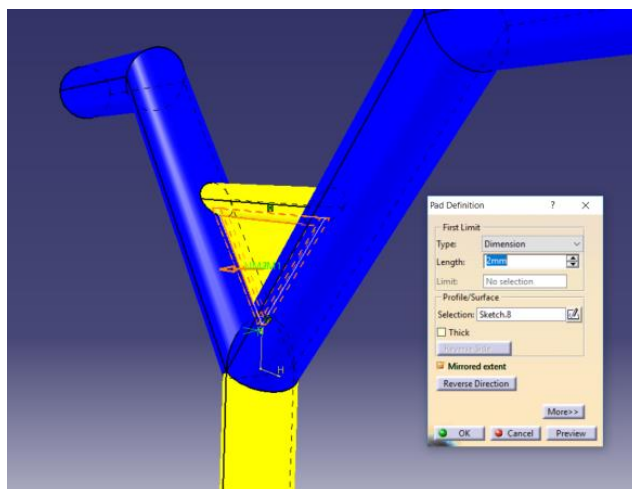
Слика 5.7 Цртеж ојачивача

На слици 5.8 је приказано извлачење ојачивача у једну страну уз помоћ опције *Pad*. У делу *Type* се бира опција *Up to last*, што значи извлачење до завршетка друге стране модела.



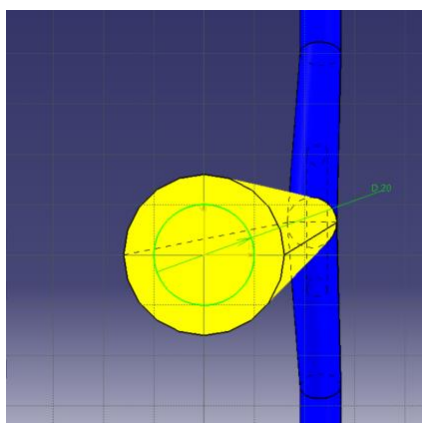
Слика 5.8 Извлачење ојачивача

На слици 5.9 је приказано попуњавање дела троугаоног облика који је исто заслужан за ојачавање. Дебљина дела је 2 mm.



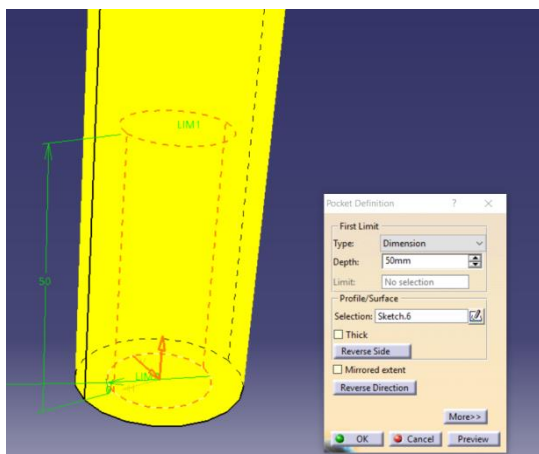
Слика 5.9 Изглед ојачивача

На слици 5.10 је одрађен цртеж на крају врата управљача, кружног облика пречника 20 mm. Циљ овог поступка је да се направи рупа ради постављања другог дела елемента.



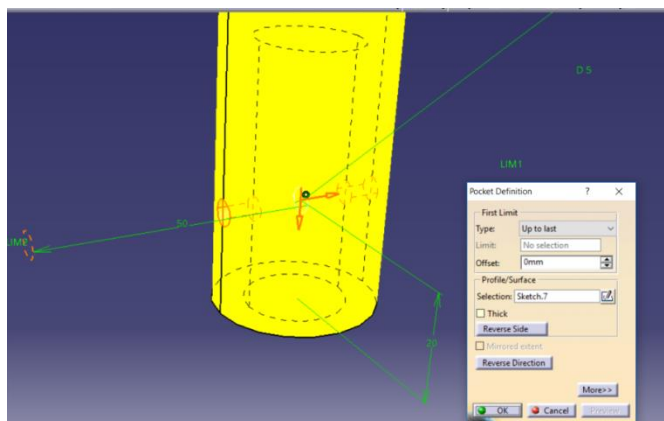
Слика 5.10 Приказ облика рупе пре скидања материјала

На слици 5.11 је приказана алатка Pocket  уз помоћ које се скида материјал.



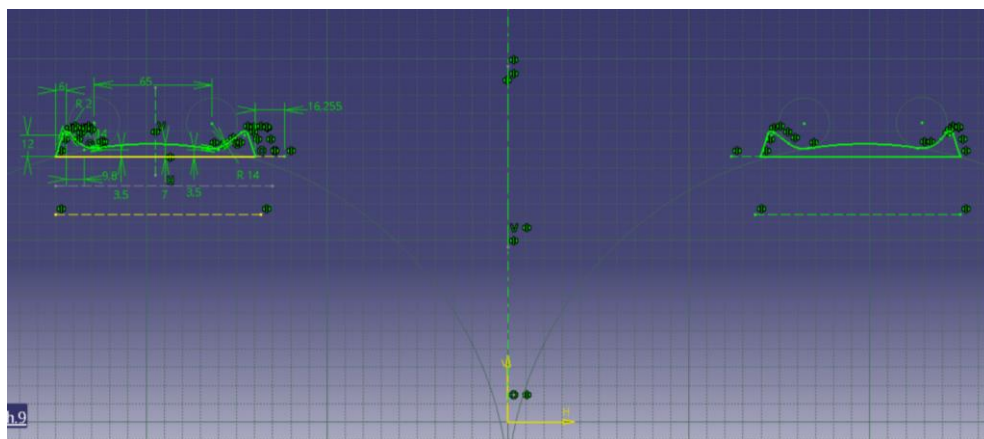
Слика 5.11 Приказ облика рупе пре скидања материјала

На слици 5.12 је приказан отвор за чивију која ће држати неке елементе тротинета.



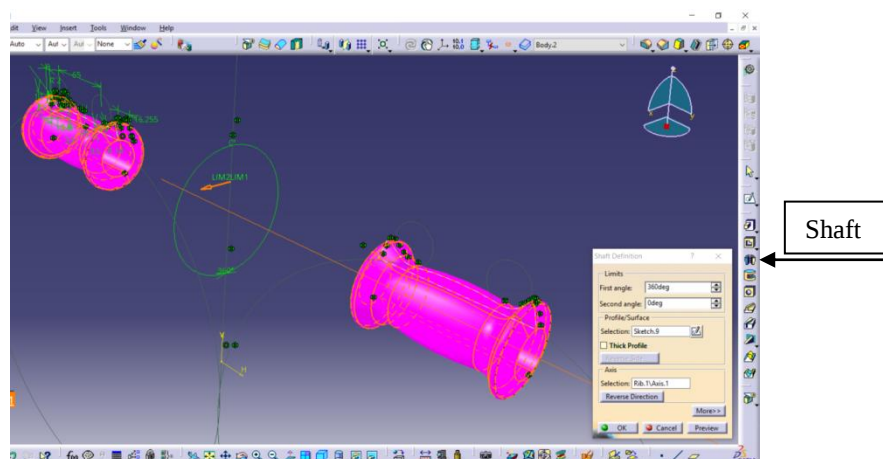
Слика 5.12 Приказ отвора за чивију

На слици 5.13 је приказан модел дршки на управљачу. На слици се могу видети његове димензије.



Слика 5.13 Приказ Sketch дршки

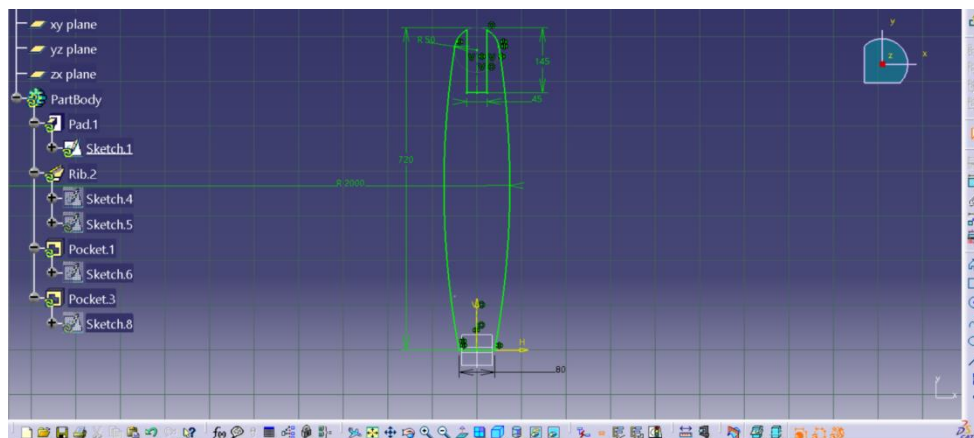
На слици 5.14 је приказан изглед модела дршки. За добијање оваквог облика користи се алатка *Shift*.



Слика 5.14 Приказ модела дршки

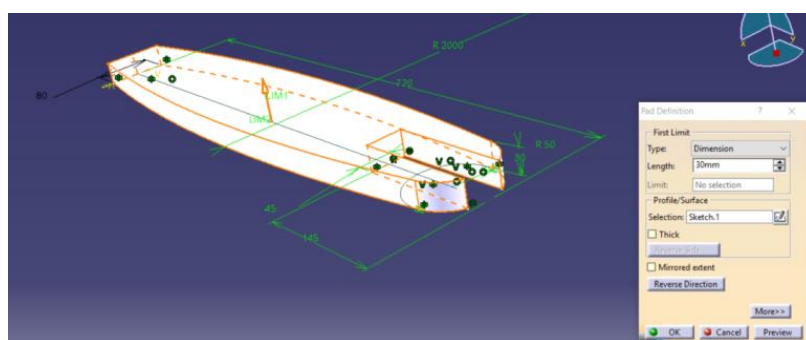
5.2 Опис поступка моделирања нископодне површине за гажење

Прво се покреће нови *Part Design* под називом нископодна површина за гажење. Када се отвори радна површина бира се прво раван и кликне се на *Sketch*. На слици 5.15 је приказан облик елемента са свим димензијама.



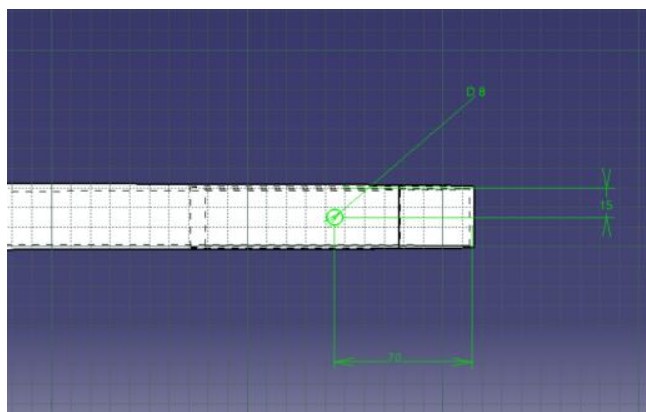
Слика 5.15 Облик нископодне површине за гажење

На слици 5.16 је одрађен *Pad* модела. У прозору се уписује колико ће модел бити издигнут.



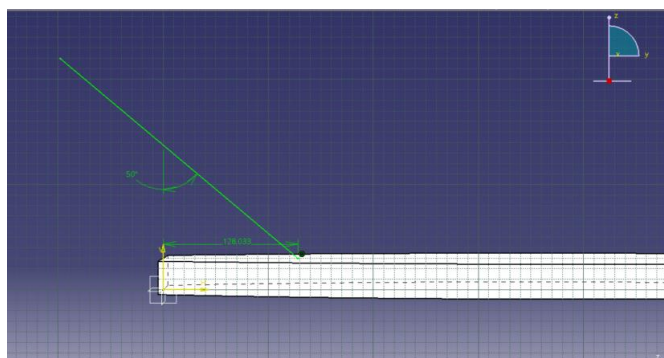
Слика 5.16 Изглед модела нископодне површине за гажење

На слици 5.17 је приказан цртеж рупе коју треба избушити ради постављања осовинице које ће држати тачкове. Након тога рупа се ради уз помоћ алатке *Pocket*.



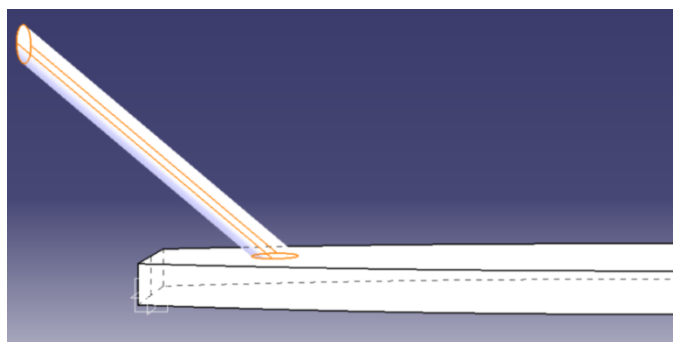
Слика 5.17 Цртање рупе за постављање осовинице

На слици 5.18 се црта елемент који ће, у програму *Abaqus*, бити искоришћен за постављање ограничења при структурној анализи. Елемент који се моделира се налази на моделу тротинета.



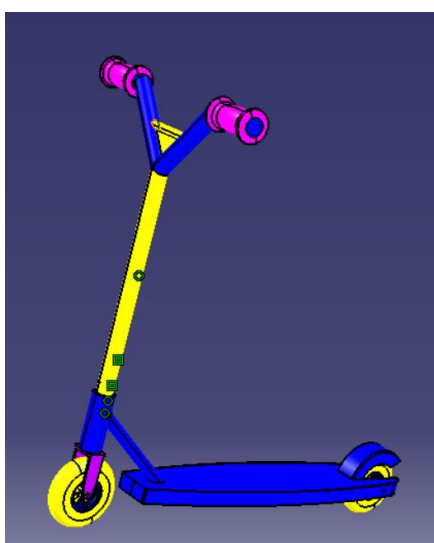
Слика 5.18 Цртање елемента нископодне површине за гажење

На слици 5.19 се види извучен део који се ради уз помоћ алатке *Rib*.



Слика 5.19 Модел елемента нископодне површине за гажење

Крајњи изглед модела тротинета је приказан на слици 5.20. Модел се састоји из управљача тј. волана, нископодне површине за гажење, виљушке и два монтирана точка на крајевима.

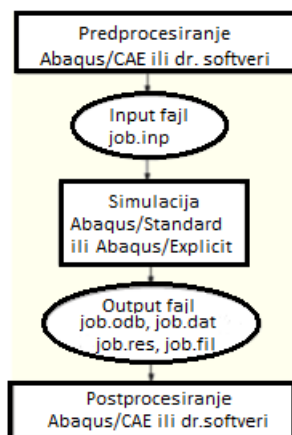


Слика 5.20 Модеран изглед тротинета

6. СТРУКТУРНА АНАЛИЗА ДЕЛОВА ТРОТИНЕТА У СОФТВЕРУ ABAQUS/CAE

Софтвер *Abaqus CAE* је скуп моћних инжењерских симулационих програма заснованих на методи коначних елемената. Јединствене карактеристике овог програма су могућност моделирања било које геометрије, увожење модела из разних САД софтвера, могућност избора разних материјала као што су метали, гума, полимери, композити, армирани бетон, ломљива и еластична пена и геотехнички материјали као што су земљиште и стена. Дизајниран је као симулациони алат за општу намену. Софтвер *Abaqus* се може користити за проучавање не само структурних проблема као што су анализа напона или деформација, он може симулирати услове кад је упитању пренос топлоте, извршити анализу термичко/електричних компоненти, масовне дифузије, акустике, механике тла и за пиезоелектричне анализе. *Abaqus* нуди широк спектар могућности за симулацију линеарних и нелинеарних анализа, статичких и динамичких анализа. У нелинеарној анализи *Abaqus* аутоматски бира повећана оптерећења и толеранције конвергенције и стално их прилагођава током анализе како би се осигурало да се добије тачно решење [15].

Анализа *Abaqus* се састоји из три нивоа, а то су: предпроцесирање, симулација и постпроцесирање. На слици 6.0 су приказани нивои програма за анализу.



Слика 6.0 Приказ нивоа анализе

1. Први ниво - Предпроцесирање (Abaqus/CAE)

У овом делу се дефинише проблем модела и креира *input file*.

2. Други ниво – Симулација (Abaqus /Standard or Abaqus /Explicit)

У позадини се извршава симулација у делу којем *Abaqus/Standard* или *Abaqus/Explicit* решава нумеричке проблеме дефинисане у моделу. Примери из *output file*, из напонске анализе укључују померања и напоне који су смештени у бинарне датотеке спремне за завршно процесирање.

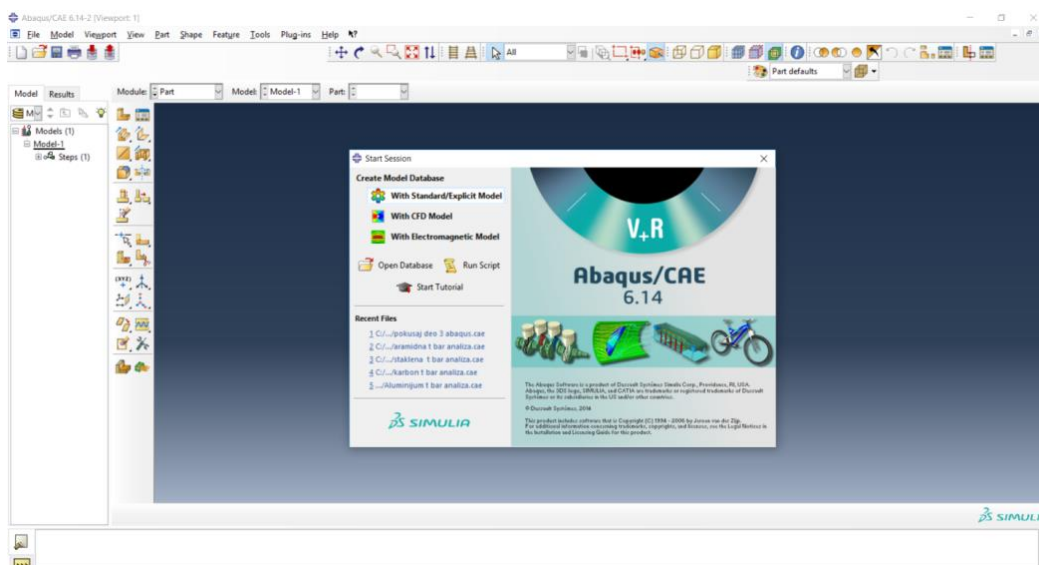
3. Трећи ниво – Постпроцесирање (Abaqus /CAE)

Резултати се процењују када се симулација заврши, када померања, напони и остале фундаменталне промене буду израчунате. Процена је генерално одрађена користећи интерактивно *Visualization module of Abaqus/CAE* или други постпроцесор. Визуални модул који чита неутрални бинарни *output file* има различите опције приказивања резултата, а то су контурна плоча боја, анимације, деформисани облици и графички подаци [16].

6.1 Покретање софтвера Abaqus

Abaqus пружа једноставан интерфејс за креирање модела. Подељен је на модуле, где сваки модул има своју сврху у току моделирања: дефинисање геометрије, дефинисање материјала и генерисање мреже. Када је модел комплетан, *Abaqus* генерише *input file* као анализирани продукт. *Input file* може исто да се креира ручно.

За покретање програма потребан је дупли клик на иконицу програма *Abaqus*. Прозор *Start Session* се отвара (слика 6.1).



Слика 6.1 Изглед програма *Abaqus CAE*

У прозору су дате разне опције. Главне опције се налазе у делу за креирање модела *Create Model Database*.

Прва опција је са стандардним/експлицитним моделима, *With Standard/Explicit Model*. Ова опција се користи у раду за покретање нове анализе.

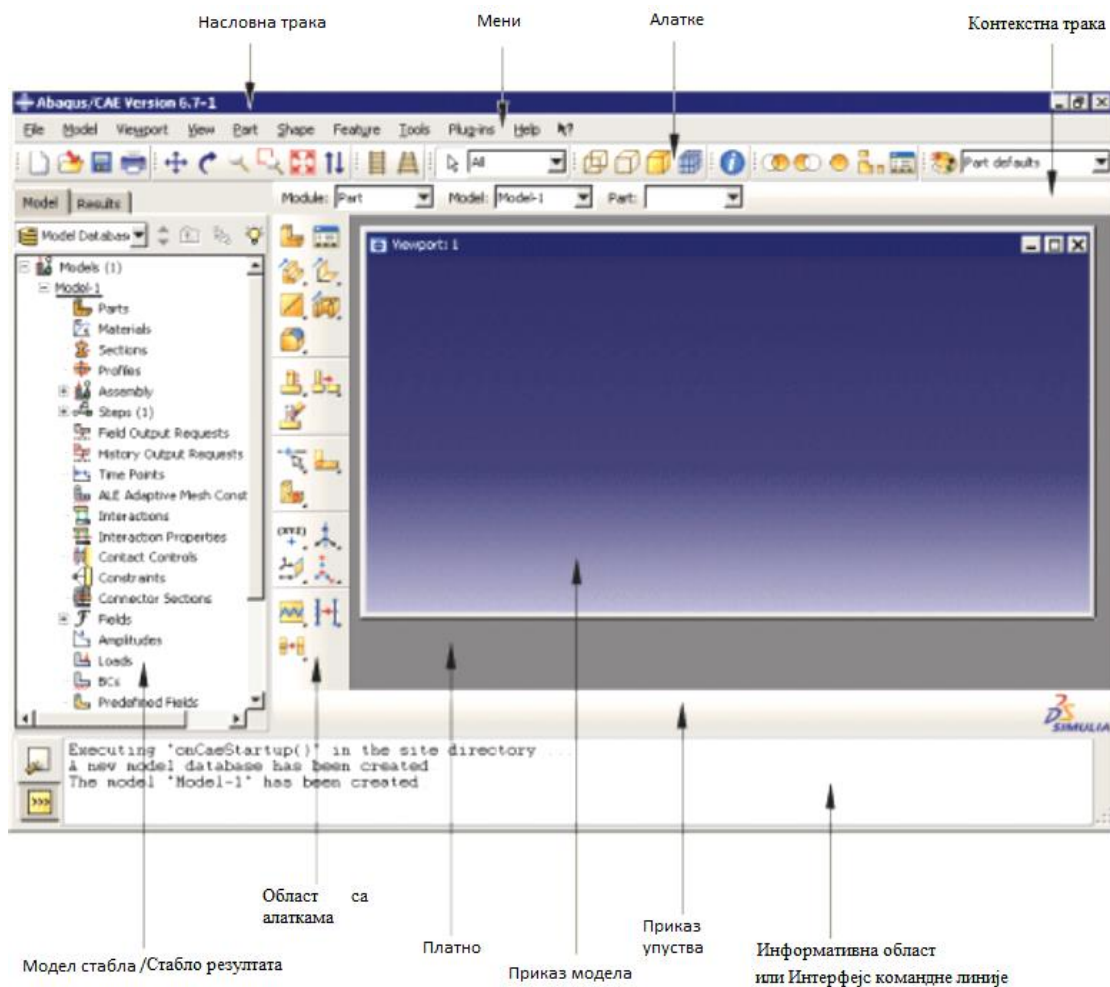
Open Database служи да се покрене претходно снимљен модел или излазна база података. *Run Script* служи да покрене *file* са командама *Abaqus/CAE*. *Start Tutorial* служе да покрену уводни туторијал.

Покретањем програма *Abaqus* отвара се прозор који омогућава креирање новог модела. За чување модела бира се *File→Save* из главног менија. За позивање сачуваног модела са диска, кликне се на *File→Open*.

Листа важних модула који служе за израду модела су [16]:

- *Part* – Креирање материјала ,
- *Property* – Дефинисање особина материјала,
- *Assembly* – Склоп модела,
- *Step* – Конфигурирање процедуре анализе,
- *Load* – Постављање ограничења и оптерећења,
- *Mesh* – Генерисање мреже,
- *Job* – Креирање и подношење аналитичког поступка,
- *Visualization* – Преглед резултата анализе.

На слици 6.2 је приказано објашњење радног окружења, компоненти и алата.



Слика 6.2 Изглед радног окружења са упуштима програма Abaqus CAE

Компоненте главног прозора су:

Title bar - Насловна трака означава верзију *Abaqus-a* која је покренута и име тренутног модела.

Menu bar - Линија менија садржи све расположиве меније. Мени даје приступ свим функцијама производа.

Toolbars - Траке са алаткама омогућавају брз приступ ставкама које су такође доступне у менијима.

Контекстна трака - Контекстна трака садржи скуп модула, где сваки од њих омогућава рад на једном аспекту модела. Сваки модул има своју функцију. Листа модула у контекстној траци омогућава лакше кретање између њих.

Модел стабла - Стабло пружа графички преглед модела и предмета које садржи, а то су: делови, материјали, кораци, оптерећења и излазни захтеви. Осим тога стабло пружа згодан, централизован алат за кретање између модула и за управљање објектима. Ако база података садржи више од једног модела може се користити стабло за бирање другог модела.

Стабло резултата - Стабло резултата пружа графички преглед излазних база података и других података везаних за X–Y осу. Ако постоји више отворених излазних база, може се користити модел стабла за покретање између њих.

Област са алаткама - Када се изабере модул, отварају се алатке које се користе за израду модела.

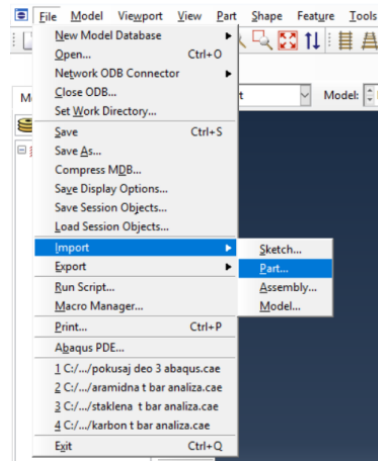
Област са упуштвима - У овом делу се приказују упуства током процедуре које је потребно пратити ради извршења задатка.

Информативна област- Информативна област приказује поруке о статусу и упозорења.

Интерфејс командне линије - Интерфејс командне линије је подразумевано сакривен, али користи исти простор где је информативна област. Кликом на иконицу  у доњем левом углу главног прозора пребацује се са информационе области на интерфејс командне линије. Кликом на иконицу  врши се повратак. Интерфејс командне линије служи за унос *Python* команди.

6.1.1 Опис поступка структурне анализе

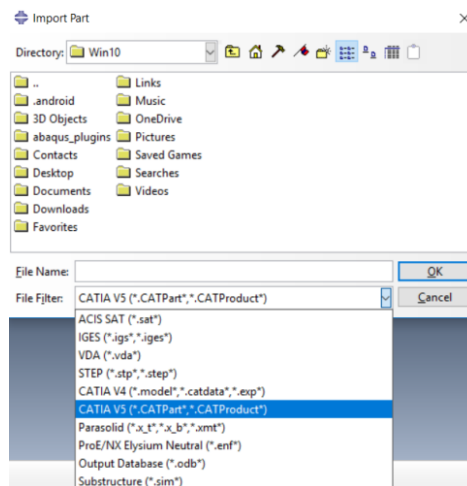
Модел тротинета је измоделиран у програму *Catia*. Сада је потребно увести одређене елементе тротинета у *Abakus Cae* ради поставке материјала, оптерећења и спровођења поступка анализе. На слици 6.3 је приказ како се увози већ постојећи модел.



Слика 6.3 Приказ увозења постојећег модела

За позивање модела кликне се на *File*, иде се на *Import* и бира се опција *Part* из разлога што се увози само део тротинета.

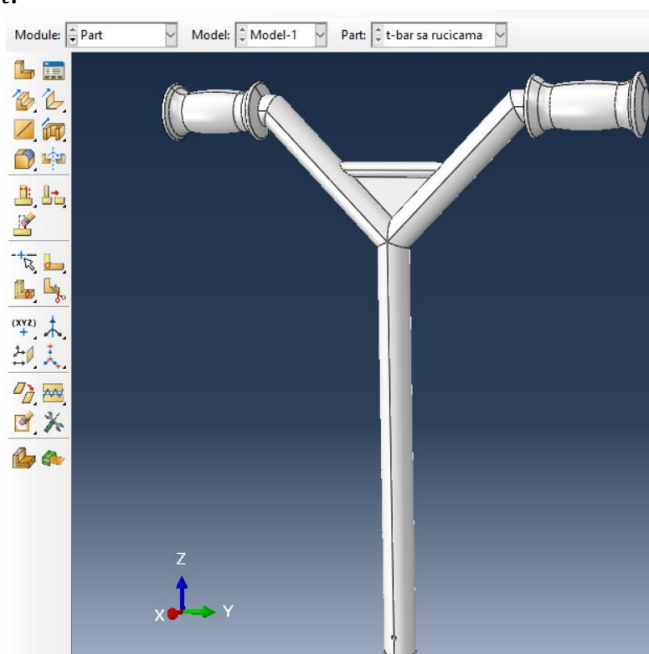
На слици 6.4 је приказано бирање опција за одговарајућу верзију *Catia V5*, да би се увезао модел.



Слика 6.4 Приказ верзије *Catia V5*

Отвара се прозор *Import Part*. У *File Filter* бира се верзија програма у ком је рађен модел. У овом случају је *Catia V5*.

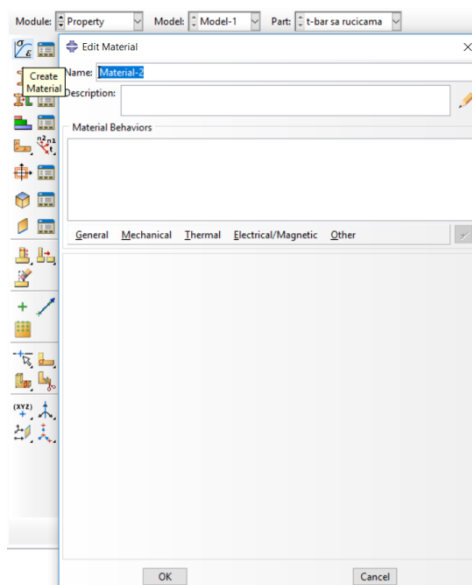
На слици 6.5 је приказан увезен део тротинета, управљач. Елемент, када се увезе, отвара се у делу *Part*.



Слика 6.5 Модел управљача

Следећи корак који треба да се уради јесте да се изабере материјал. На листи модула бира се *Property*. Модул *Property* даје потребне алатке које се користе за избор материјала и дефинисање његових својстава.

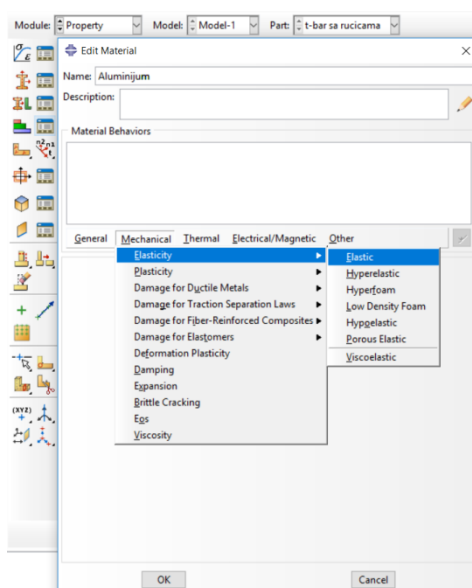
На слици 6.6 је приказан прозор *Edit Material*.



Слика 6.6 Изглед прозора за дефинисање материјала

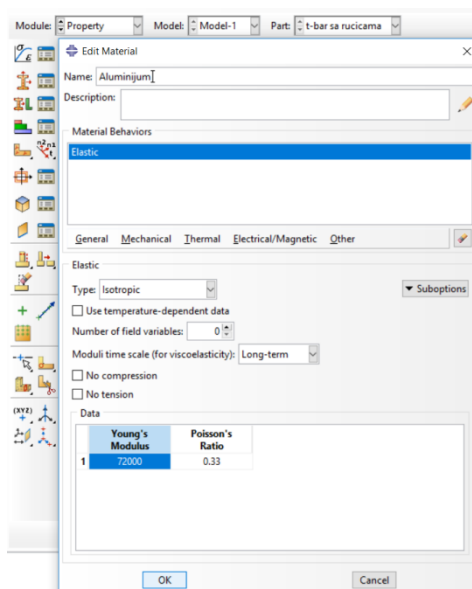
Прва иконица *Edit Material* је најважнија. Када се кликне на њу отвара се прозор. У делу *Name* је први изабран материјал, а то је алуминијум.

На слици 6.7 приказани су кораци дефинисања материјала. Прво се бира опција *Mechanical*, након тога опција *Elasticity*, па *Elastic*.



Слика 6.7 Приказ корака дефинисања материјала

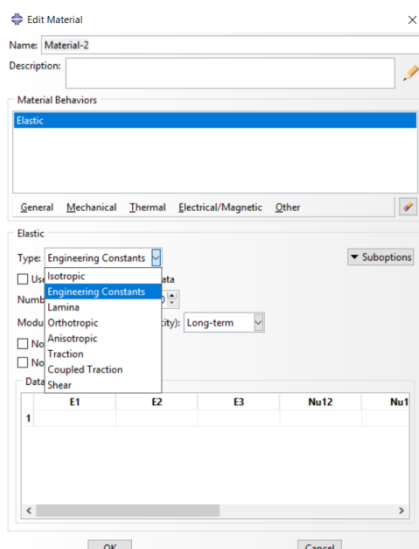
На слици 6.8 је приказан поступак дефинисања алуминијума. У делу *Type*, изабран је *Isotropic*, а за алуминијум у делу *Data*, *Young's Modulus* је 72000 MPa, а *Poisson's ratio* је 0.33.



Слика 6.8 Дефинисање карактеристика алуминијума

За анализу управљача и нископодне површине за гажење од композита бира се опција у делу *Type*, *Engineering Constants* (слика 6.9).

Карактеристике композита добијених комбинацијом карбонских (табела 6.0), стаклених (табела 6.1) и арамидних влакана (табела 6.2) са епокси смолом се уписују након изабране опције.



Слика 6.9 Приказ изабраног типа композитног материјала

Табела 6.0 Карактеристике материјала карбонска влакна/епокси композит

	E_1	E_2	E_3	N_{U12}	N_{U13}	N_{U23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
1	131600	8200	8200	0.281	0.281	0.281	4500	4500	3500

Табела 6.1 Карактеристике материјала стаклених влакна/епокси композит

	E_1	E_2	E_3	N_{U12}	N_{U13}	N_{U23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
1	43300	14700	14700	0.3	0.3	0.3	4400	4400	3500

Табела 6.3 Карактеристике материјала арамидних влакна/епокси композит

	E_1	E_2	E_3	N_{U12}	N_{U13}	N_{U23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
1	81800	5100	5100	0.31	0.31	0.31	1510	1510	1820

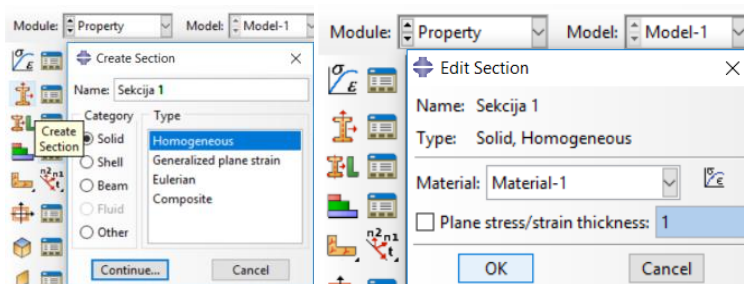
Величине у табелама 6.0, 6.1 и 6.2 су:

$E_1, E_2, E_3 \rightarrow$ Модули еластичности у три различита правца,

$N_{U12}, N_{U13}, N_{U23} \rightarrow$ Поасонови коефицијенти,

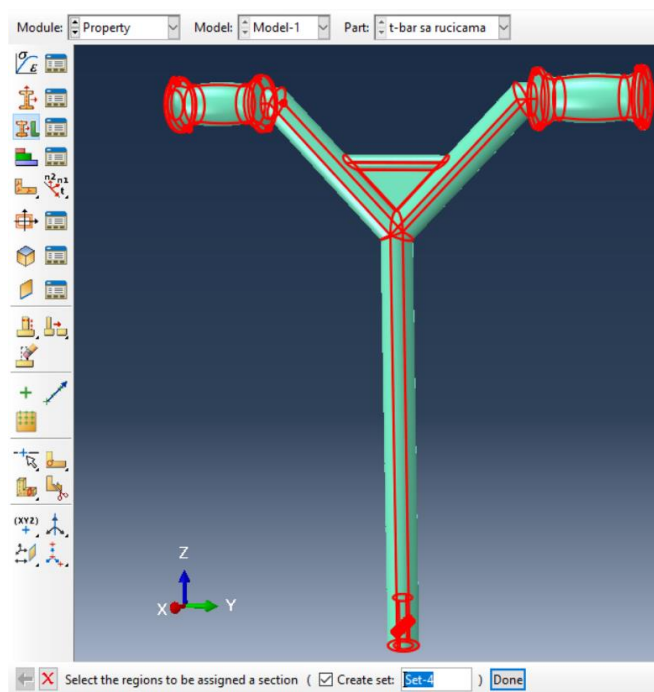
$G_{12}, G_{13}, G_{23} \rightarrow$ Модули клизања.

Следећи поступак је везан за креирање секције. Овде се потврђује *Category Solid* и *Type Homogeneous*. На слици 6.10 су приказане опције за дефинисање типа материјала и селектовања дела који је израђен од изабраног материјала.



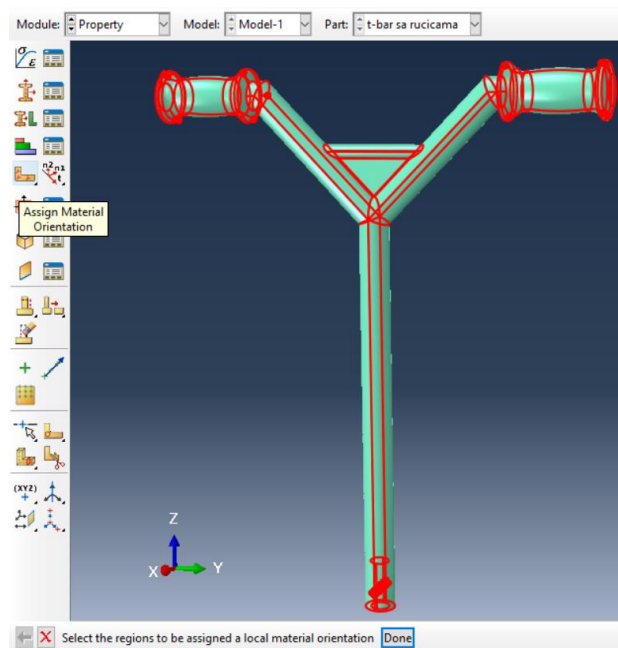
Слика 6.10 Креирање врсте материјала

На слици 6.11 је приказан селектован модел коме се додељује материјал. После избора алатке *Assign Section* селекује се модел и кликне *Done*.



Слика 6.11 Обележавање управљача за доделу материјала

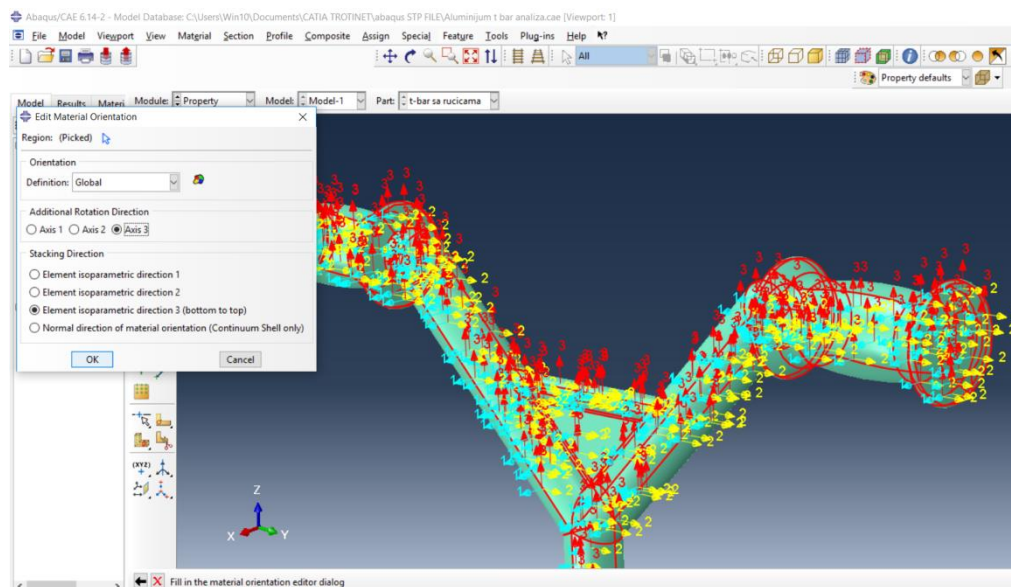
На слици 6.12 је приказана иконица *Assign Material Orientation*. Када је изабран композитни материјал, потребно је поставити и оријентацију. Када је иконица изабрана, програм поставља питање да се селекује модел.



Слика 6.12 Приказ алатке за оријентисање материјала

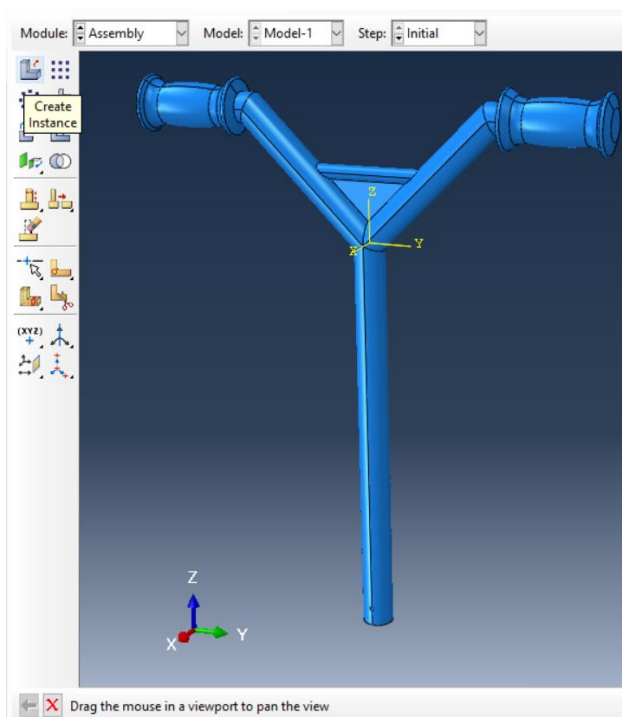
Модел се селекује и кликне се на *Done*, тада програм поставља ново питање *Use Default Orientation or Other Method*. На шта се само потврди.

Отвара се притом нов прозор. У њему је потребно изабрати у ком правцу поставити оријентацију материјала. Изабран је *Axis 3* и *Element isoparametric direction 3 (bottom to top)* (слика 6.13).



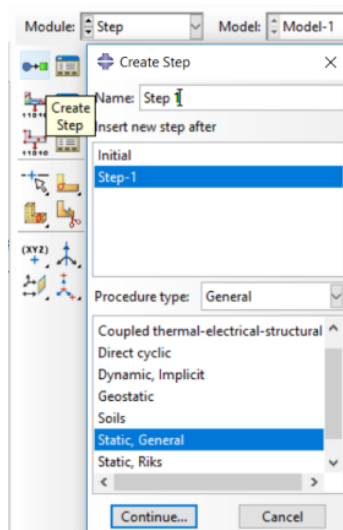
Слика 6.13 Оријентација композита

На слици 6.14 је приказан модул *Assembly*. Пошто се испитује један део модела кликне се на *Create instance* да се модел појави.



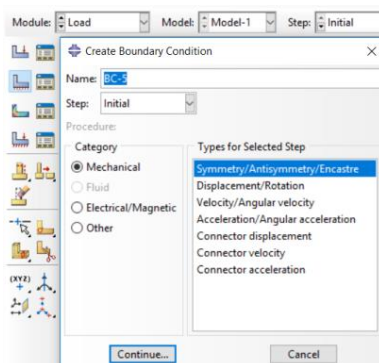
Слика 6.14 Приказ алатке *Create instance*

На слици 6.15 кликне се на *Create Step*. У отвореном прозору бира се *Static*, *General* кликне се на *Continue* и потврди се нов прозор кликом на ОК.



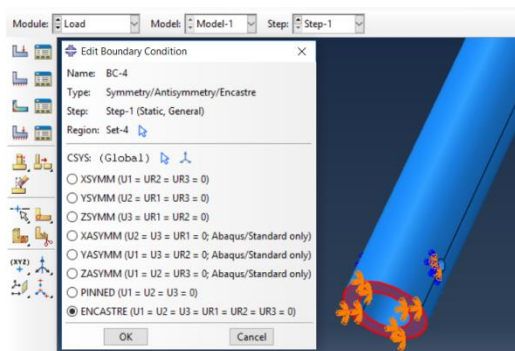
Слика 6.15 *Create Step*

На слици 6.16 је приказан прозор *Create Boundary Condition* који служи за креирање ограничења. Изабрана је опција *Initial* у делу *Step* и у делу *Types for Selected Step* изабран је *Symmetry/Antisymmetry/Encastre*.



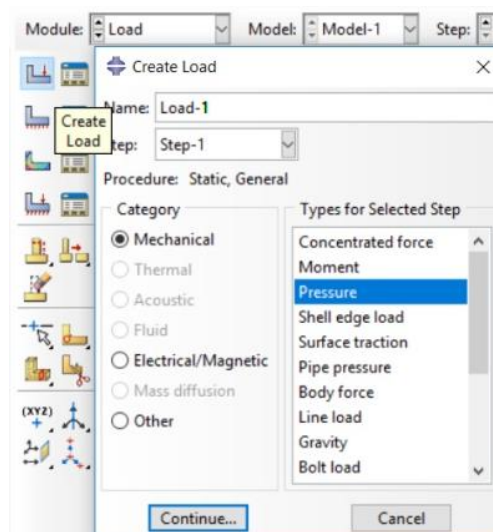
Слика 6.16 *Креирање ограничења*

Када се кликне на *Continue*, програм пита да се изабере уклештен део. На крају управљача поставља се уклештење. Потврђује се на *Done*. У отвореном новом прозору чекира се последња опција и тиме се ограничава кретање у свим правцима (слика 6.17).



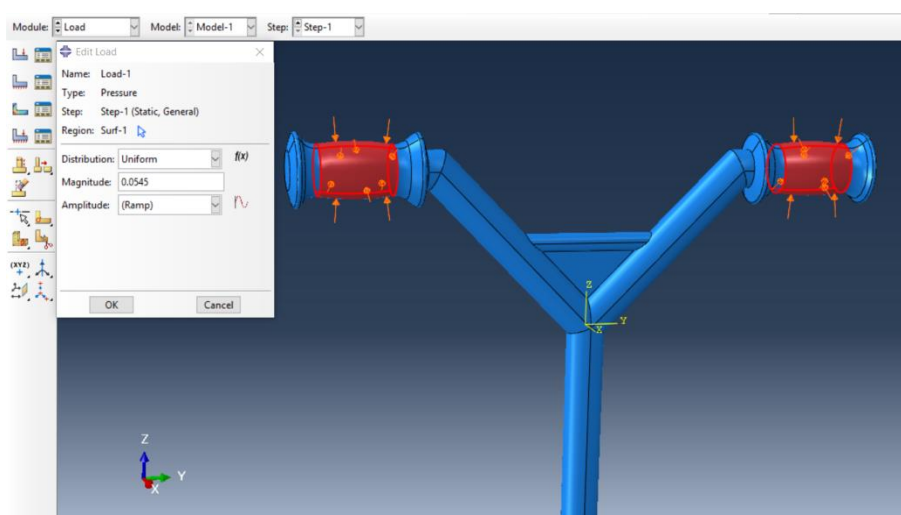
Слика 6.17 *Опција за уклештење*

На слици 6.18 дати су начини како се може оптеретити модел у делу *Types for Selected Step*. Изабран је *Pressure*. Кликне се на *Continue*.



Слика 6.18 Тип оптерећења

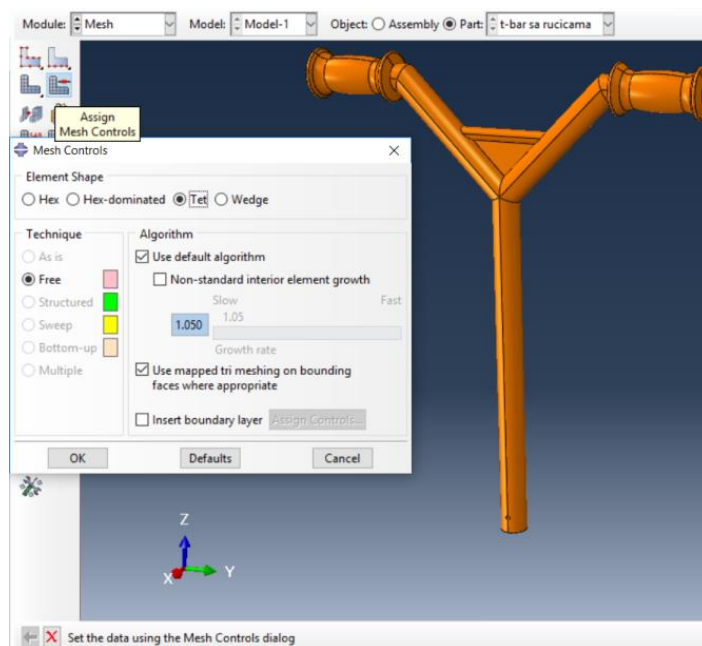
Отвара се прозор и тражи се да се селекује оптерећен део. Оптерећује се део са ручкама. Вредност притиска се уноси у делу *Magnitude*. Уписује се израчунат притисак шаке код мушкарца 0.0545 МПа и жене 0.0327 МПа. За анализу је узет већи притисак. На слици 6.19 су приказане оптерећене ручке.



Слика 6.19 Постављање оптерећења

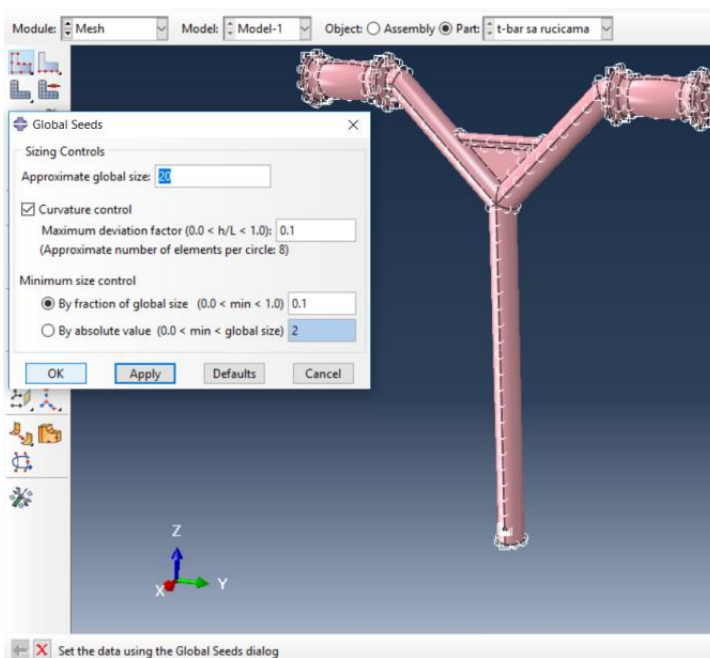
Након постављања ограничења и оптерећења, потребно је изабрати мрежу.

Када се изабере модул *Mesh*, прва алатка која се узима је *Mesh Controls* (слика 6.20).



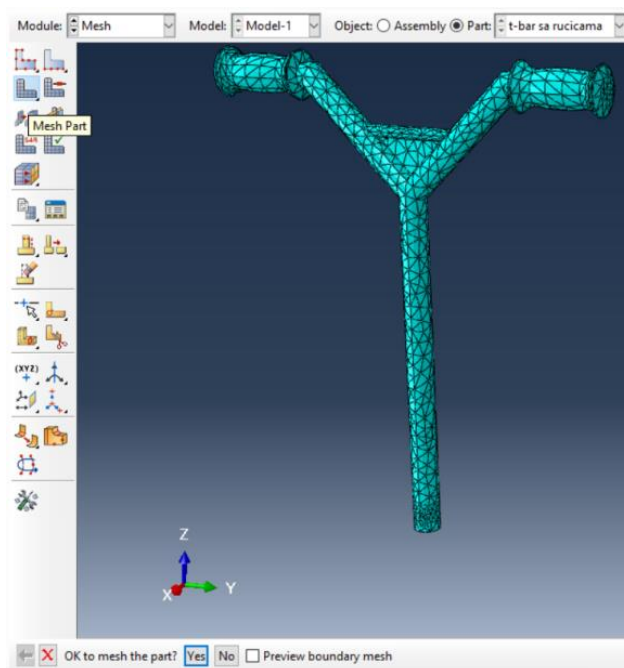
Слика 6.20 Приказ прозора *Mesh Controls*

На слици 6.21 је приказан отворен прозор алатке *Global Seeds* који служи за поставку чворова на модел. Програм је аутоматски изабрао број чворова у делу *Approximate global size* и подједнако их расподелио по целом моделу.



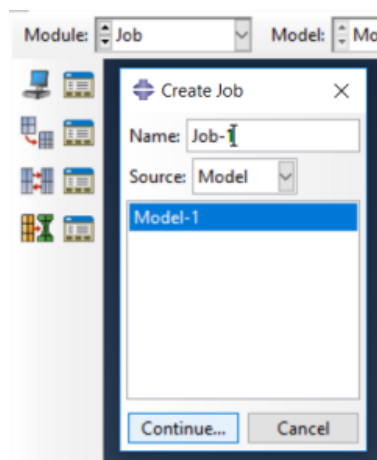
Слика 6.21 Приказ поставке чворова

На слици 6.22 је приказан модел са генерисаном мрежом коначних елемената.



Слика 6.22 Приказ генерисане мреже

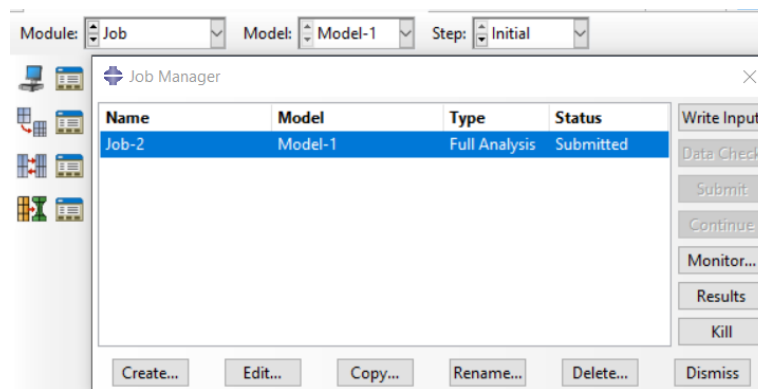
Након тога, иде се на следећи модул *Job*. Отвара се прва алатка *Create Job* (слика 6.23).



Слика 6.23 Опција за креирање крајње анализе

Када је направљен *Job*, може се радити анализа. Бира се друга алатка *Job Manager* (слика 6.24). У делу статуса прво пише *None*. Што значи да треба да се покрене анализа. Кликне се на *Submit*. У делу статуса пише *Running*, што значи обрађивање анализе.

Када се заврши анализа у делу статуса пише *Submitted*.

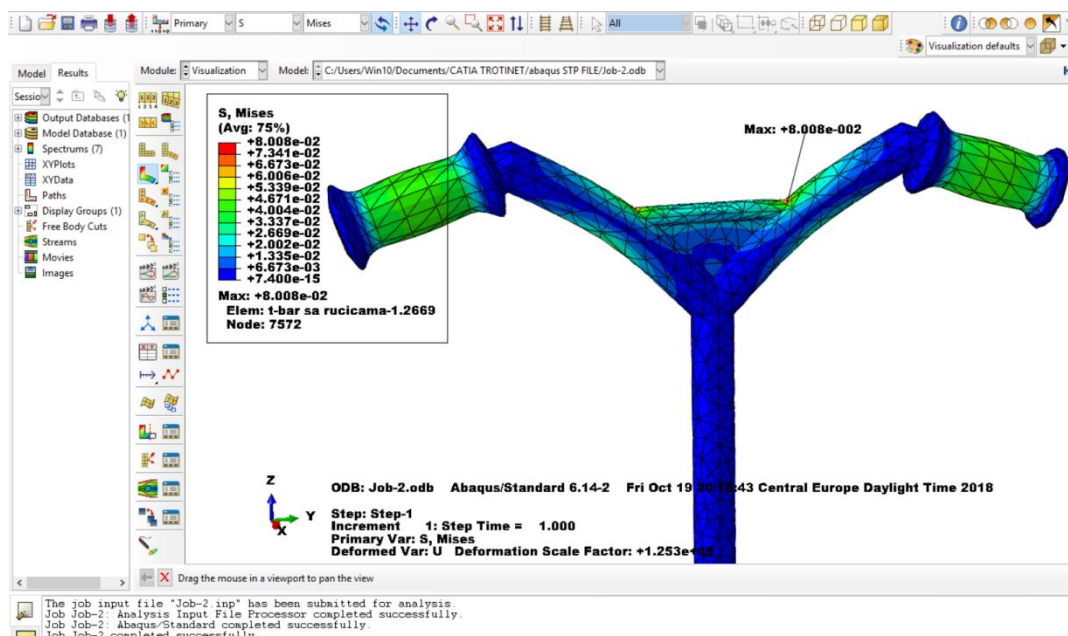


Слика 6.24 Покретање анализе

Приказ анализе се може видети када се кликне на *Results*. Тада се аутоматски пребацује на модул *Visualization*. Изабере се *Plot Contours on Deformed Shape* за приказ модела у деформисаном стању.

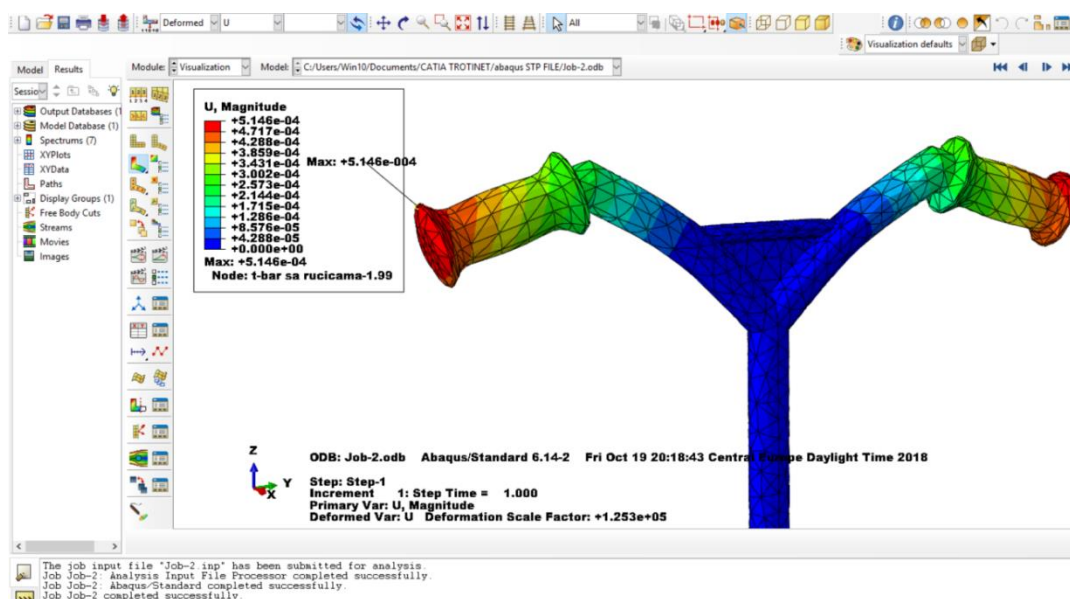
6.1.2 Структурна анализа управљача

Анализа је спроведена за максимално оптерећење, када тротинетом управља мушкарац. Анализиране су вредности напона и деформација које се јављају у управљачу тротинета и то најпре за случај када је управљач израђен од алуминијума. Највећи напон који се јавља има вредност $+8.008e^{-002} \frac{N}{mm^2}$. На слици 6.25 је приказана расподела напона у управљачу израђеном од алуминијума.



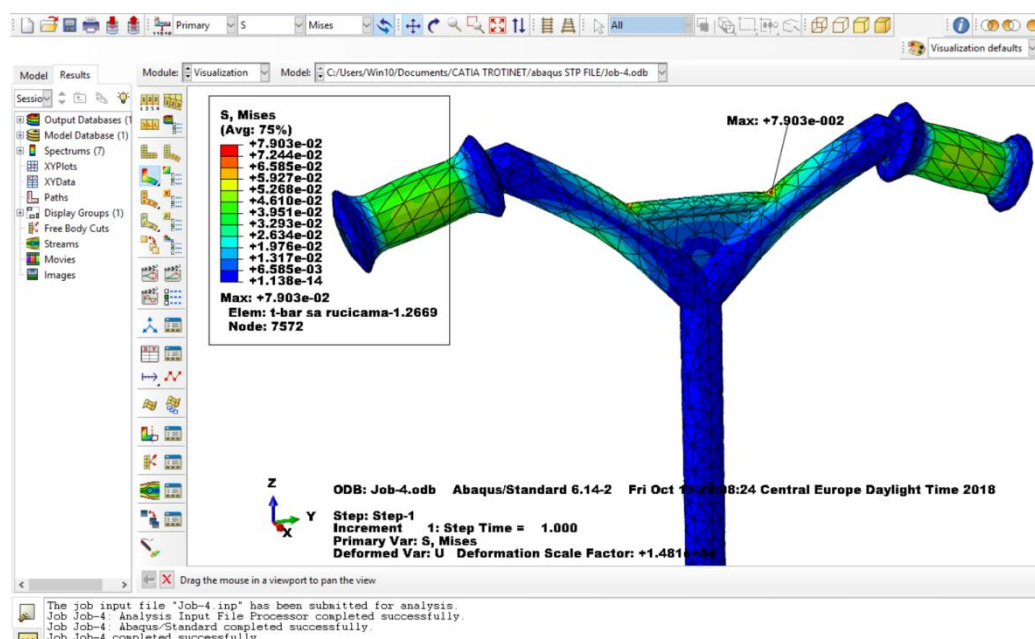
Слика 6.25 Вредности напона у управљачу од алуминијума

На слици 6.26 су приказане деформације управљача од алуминијума. Може се видети да максимална деформација има вредност $5.146e^{-004}mm$.



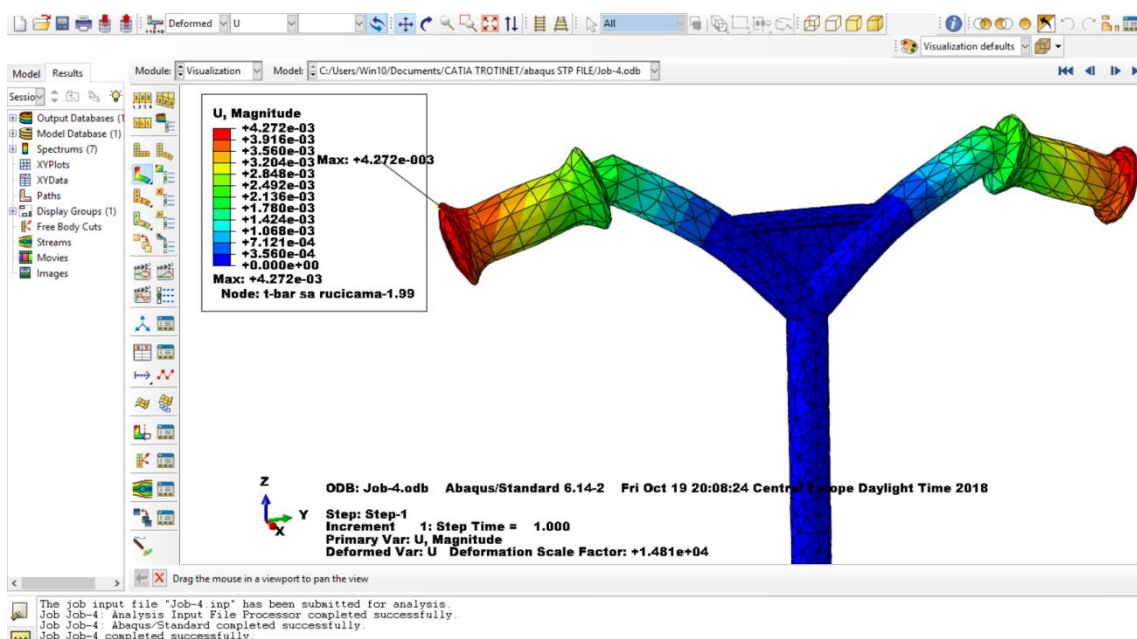
Слика 6.26 Приказ деформација управљача од алуминијума

На слици 6.27 је приказана расподела напона на управљачу који је израђен од карбонских влакана/епокси композита. Може се видети да у овом случају максимални напон има вредност $7.903e^{-002} \frac{N}{mm^2}$.



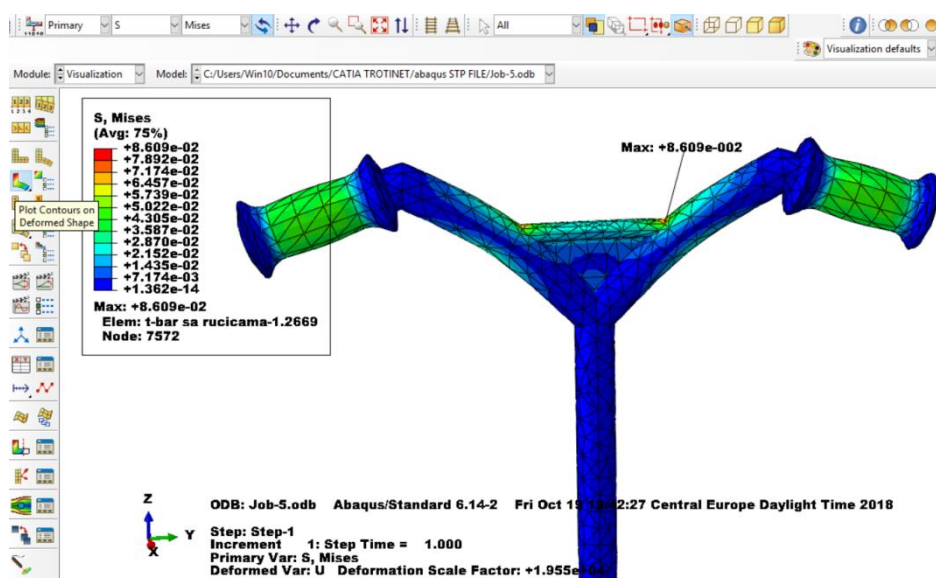
Слика 6.27 Расподела напона на управљачу од карбонских влакана/епокси композита

На слици 6.28 је дат приказ деформација управљача израђеног од карбонских влакана/епокси композита. Резултати показују да највећа деформација има вредност $4.272e^{-003} \text{ mm}$.



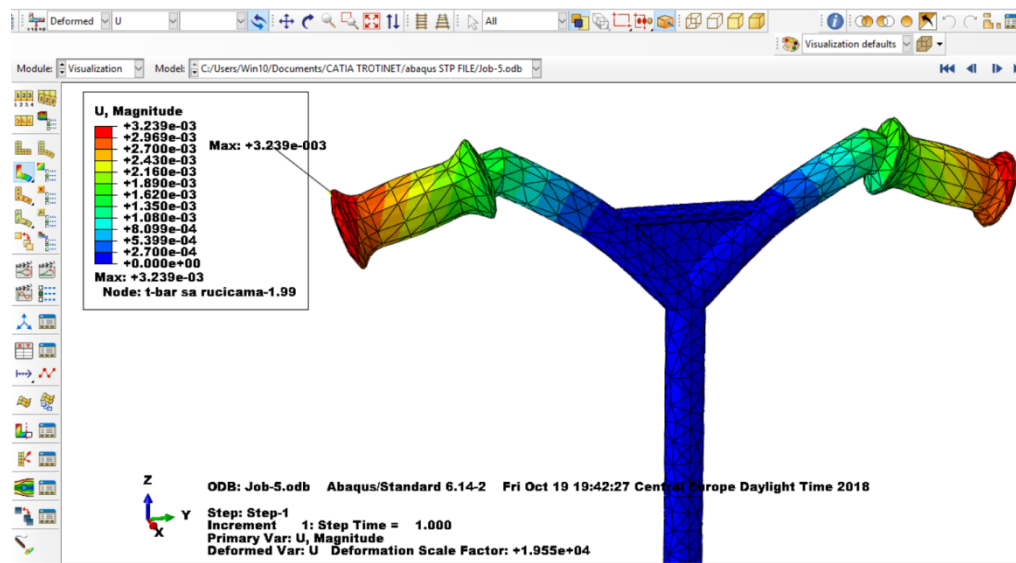
Слика 6.28 Приказ деформација управљача од карбонских влакана/епокси композита

На слици 6.29 је приказана расподела напона на управљачу који је израђен од стаклених влакана/епокси композита. Може се видети да у овом случају максимални напон има вредност $+8.609e^{-002} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.



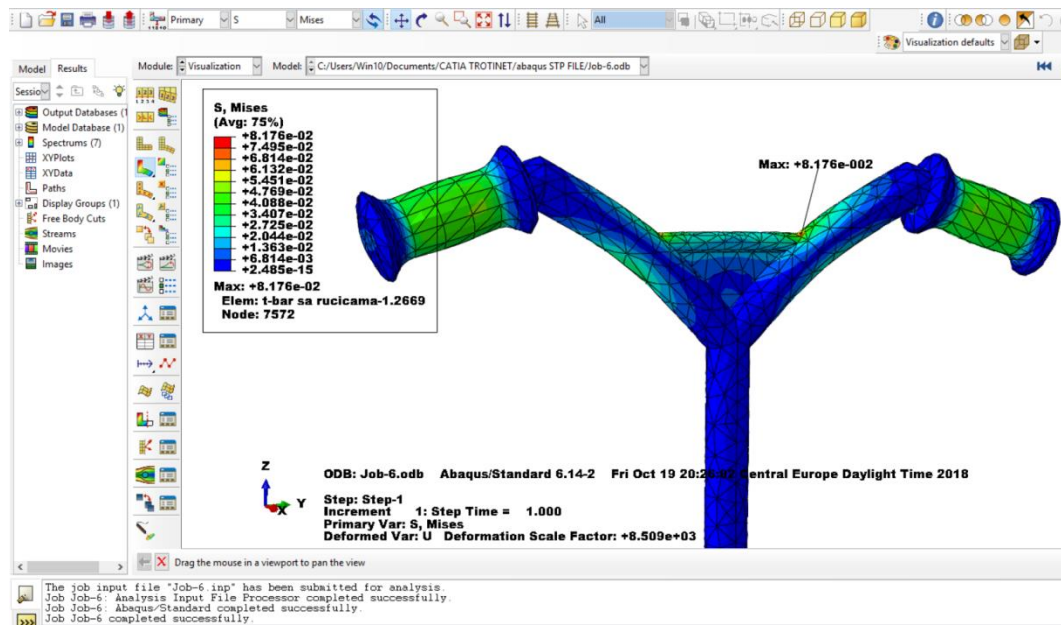
Слика 6.29 Расподела напона на управљачу од стаклених влакана /епокси композита

На слици 6.30 је дат приказ деформација управљача израђеног од стаклених влакана/епокси композита. Резултати показују да највећа деформација има вредност $+3.239e^{-003}mm$.



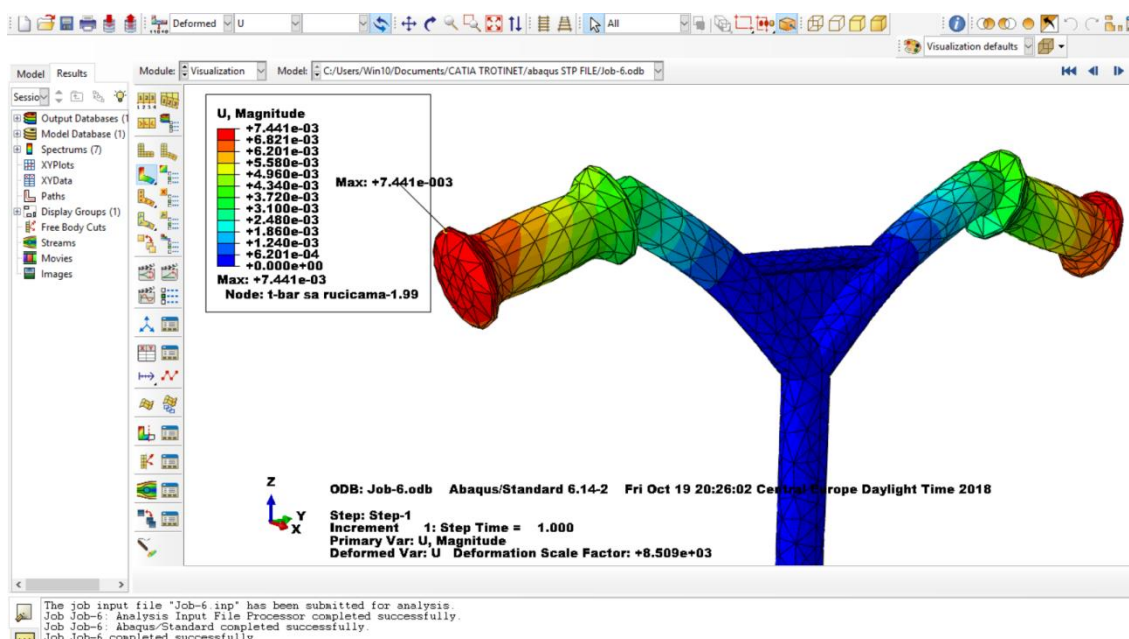
Слика 6.30 Приказ деформација управљача од стаклених влакана/епокси композита

На слици 6.31 је приказана расподела напона на управљачу који је израђен од арамидних влакана/епокси композита. Може се видети да у овом случају максимални напон има вредност $+8.176e^{-002} \frac{N}{mm^2}$.



Слика 6.31 Расподела напона на управљачу од арамидних влакана /епокси композита

На слици 6.32 је дат приказ деформација управљача израђеног од арамидних влакана/епокси композита. Резултати показују да највећа деформација има вредност $+7.441e^{-003}mm$.



Слика 6.32 Приказ деформација управљача од арамидних влакана/епокси композита

6.1.4 Преглед резултата структурне анализе управљача

У табели 6.4 су приказане густине материјала које служе да се боље упореде карактеристике материјала који су коришћени за израду управљача. Што се тиче густине композитних материјала она увек варира па су узете средње вредности густина.

Табела 6.4 Приказ густина материјала

Материјал	Алуминијум	Карбонска влакна/ епокси композит	Стаклена влакна/ епокси композит	Арамидна влакна/ епокси композит
Густина, $\frac{g}{cm^3}$	2.7	1.625	2.415	1.425

Анализом података из табеле 6.4 може се закључити да је део израђен од карбонских влакана/епокси композита негде око 1,5 пута лакши у поређењу са истим алуминијумским делом, док је маса истог дела израђеног од арамидних влакана/епокси композита готово два пута мања у поређењу са алуминијумским делом.

У табели 6.5 су приказани добијени резултати структурне анализе управљача.

Табела 6.5 Приказ резултата напона и деформација управљача

Материјал	Алуминијум	Карбонска влакна/ епокси композит	Стаклена влакна/ епокси композит	Арамидна влакна/ епокси композит
Напон, N/mm^2	0.08008	0.07903	0.08609	0.08176
Деформација, mm	0.005146	0.004272	0.003239	0.007441

На графику 6.0 су приказане добијене вредности напона при структурној анализи.

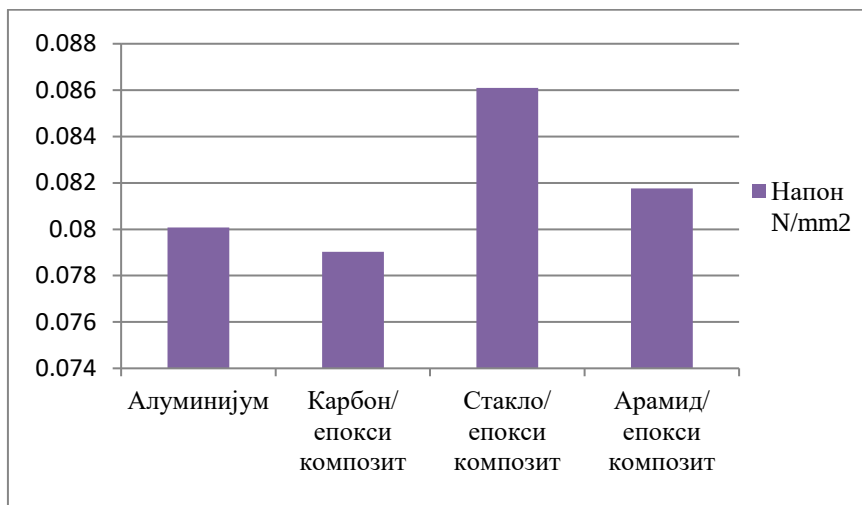


График 6.0 Приказ добијених вредности напона

На графику 6.1 су приказане вредности деформација управљача.

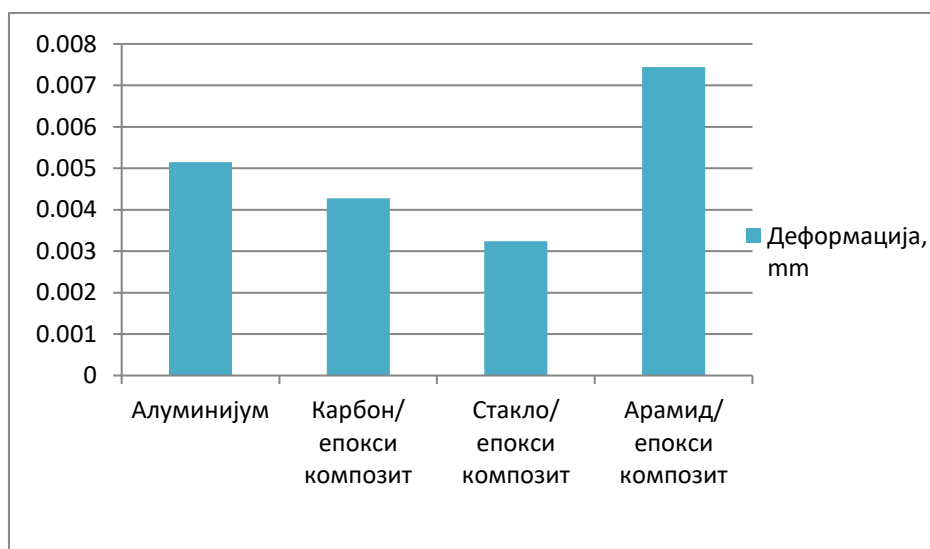


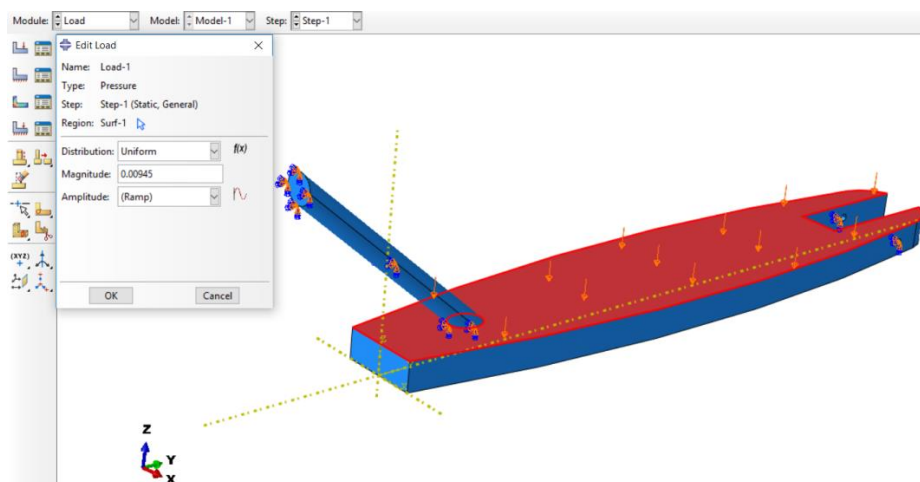
График 6.1 Приказ вредности деформација

Анализом добијених резултата напона и деформација код управљача тротинета израђених од различитих материјала може се закључити да најбоље особине имају композити добијени комбинацијом карбонских влакна и епокси смоле. Управљач, израђен од овог композитног материјала показује боље карактеристике у погледу напона и деформација у поређењу са алуминијумским делом, а уз то долази и до знатног смањења масе дела што је од велике важности.

6.1.5 Структурна анализа нископодне површине за гажење

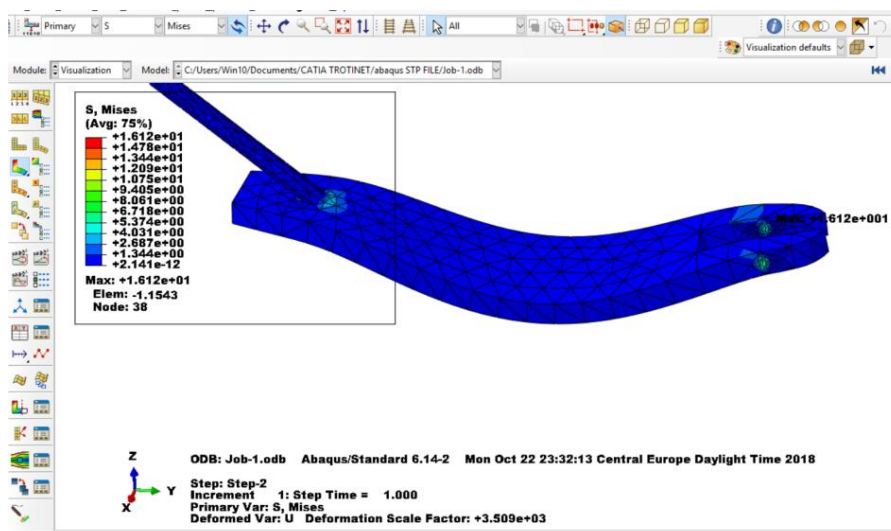
Следеће испитивање се ради на другом елементу модела, на нископодној површини. Поступак анализе је исти.

На слици 6.33 је приказан део који је уклештен и оптерећен. У модулу Load, Magnitude пише се да је $p = 0.00945$ МПа, што одговара прорачунатој вредности притиска на подлогу. На слици 6.35 је приказан део са постављеним оптерећењем и ограничењима.



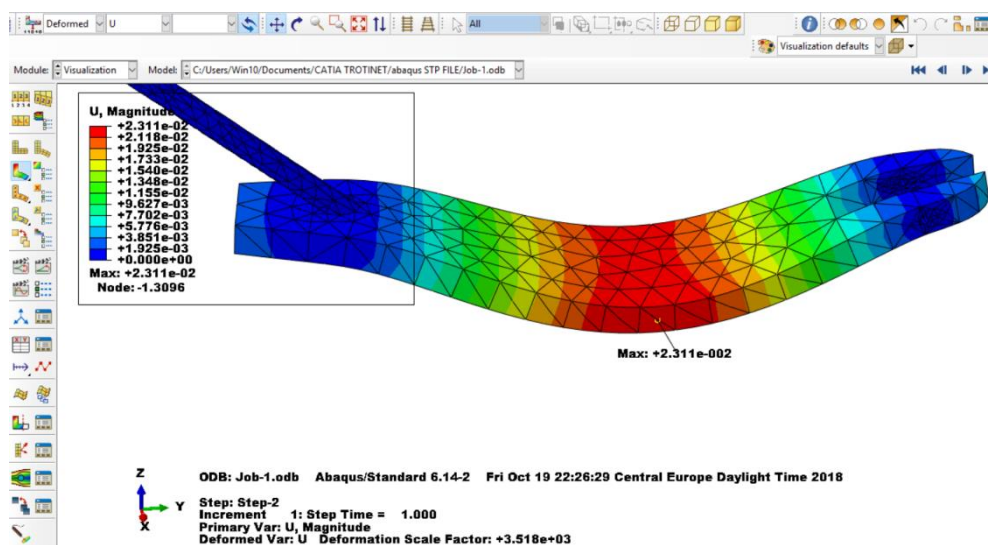
Слика 6.33 Приказ поставке оптерећења

На слици 6.34 је приказан максималан напон на газишту од алуминијума. При анализи добијена је максимална вредност напона у износу $1.612e^{+001} \frac{N}{mm^2}$.



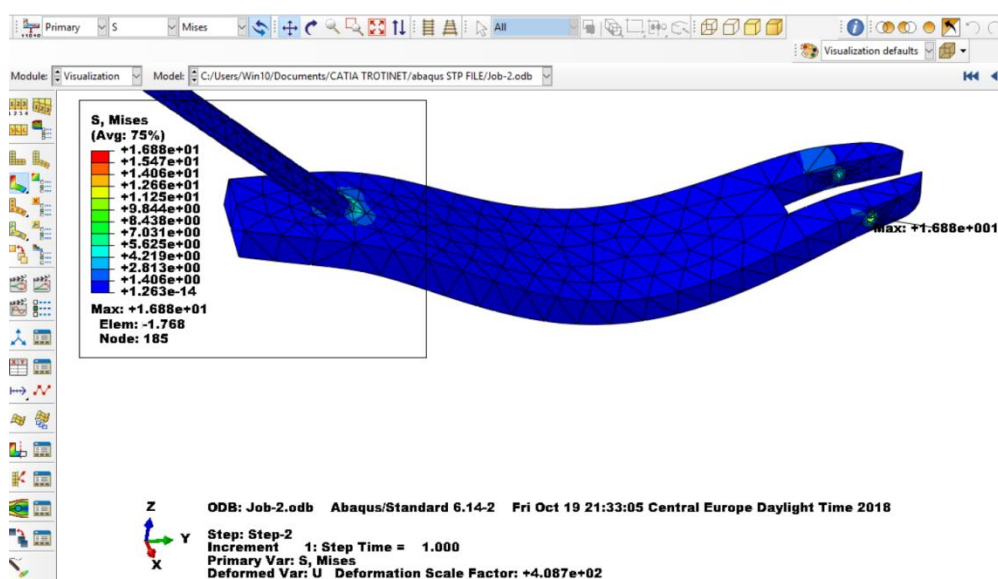
Слика 6.34 Приказ максималног напона на газишту од алуминијума

На слици 6.35 су приказане вредности деформација газишта приликом коришћења алуминијума. Максимална вредност деформације, добијена при анализи, износи $2.311e^{-002}mm$.



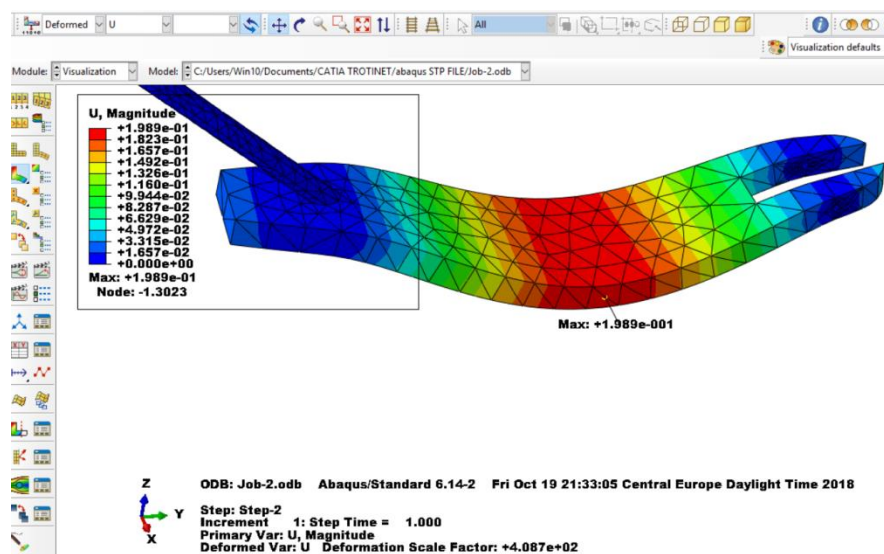
Слика 6.35 Приказ деформације на газишту од алуминијума

На слици 6.36 је приказан максималан напон на газишту од карбонских влакна/епокси композита. При анализи добијена је максимална вредност напона у износу $+1.688e^{+001} \frac{N}{mm^2}$.



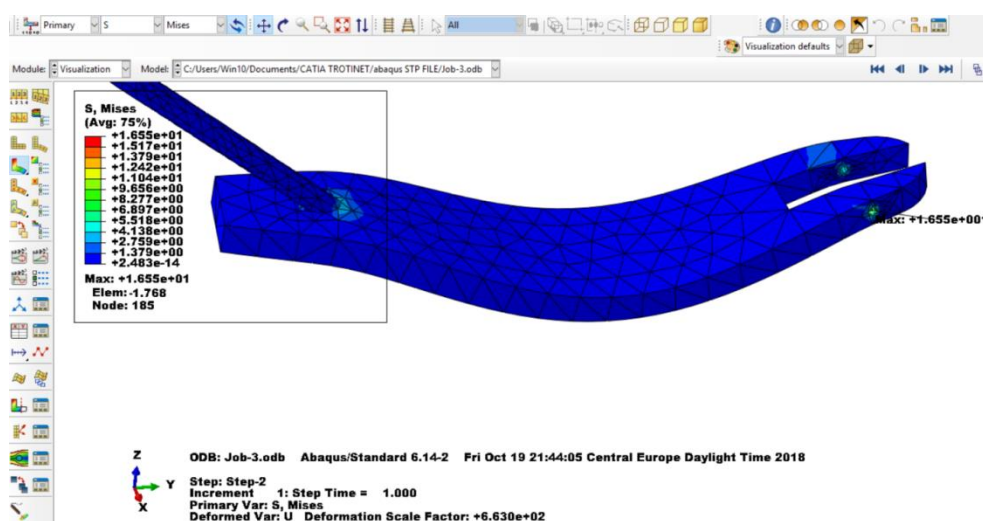
Слика 6.36 Приказ максималног напона на газишту од карбонских влакана/епокси композита

На слици 6.37 су приказане вредности деформација газишта приликом коришћења карбонских влакна/епокси композита. Максимална вредност деформације, добијена при анализи, износи $+1.989e^{-001}mm$.



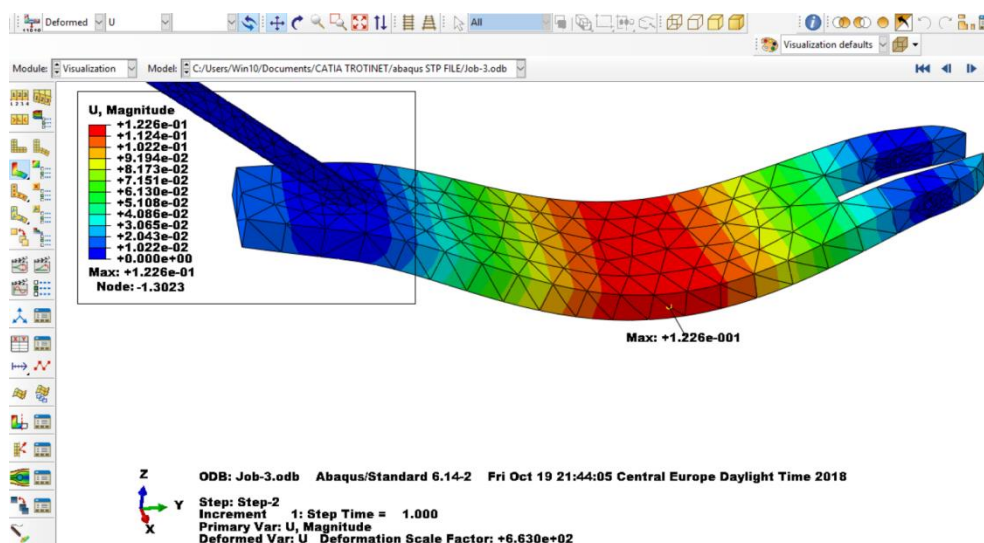
Слика 6.37 Приказ деформације на газишту од карбонских влакна/епокси композита

На слици 6.38 је приказан максималан напон на газишту од стаклених влакна /епокси композита. При анализи добијена је максимална вредност напона у износу $+1.655e^{+001} \frac{N}{mm^2}$.



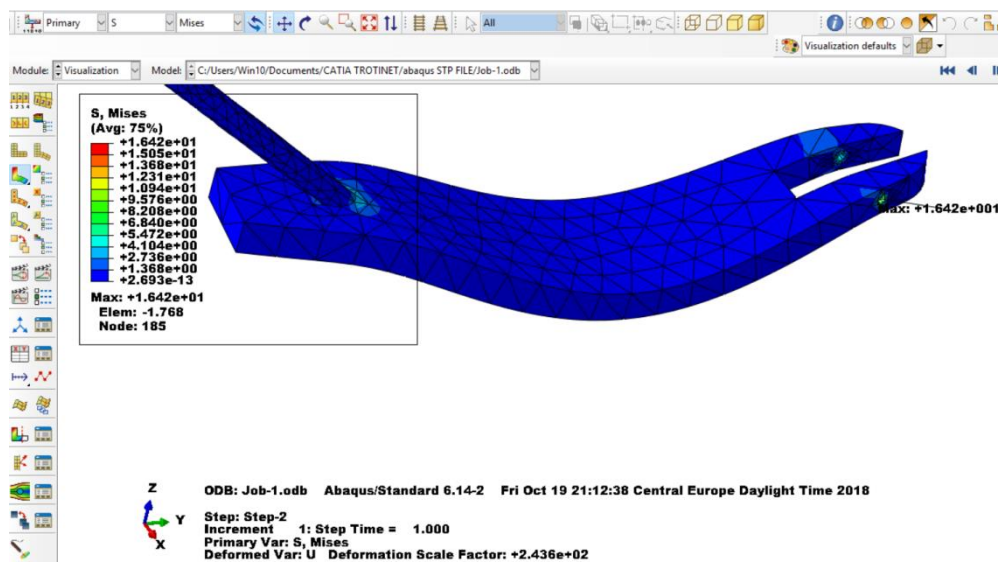
Слика 6.38 Приказ максималног напона на газишту од стаклених влакана/епокси композита

На слици 6.39 су приказане вредности деформација газишта приликом коришћења стаклених влакна/епокси композита. Максимална вредност деформације, добијена при анализи, износи $+1.226e^{-001}mm$.



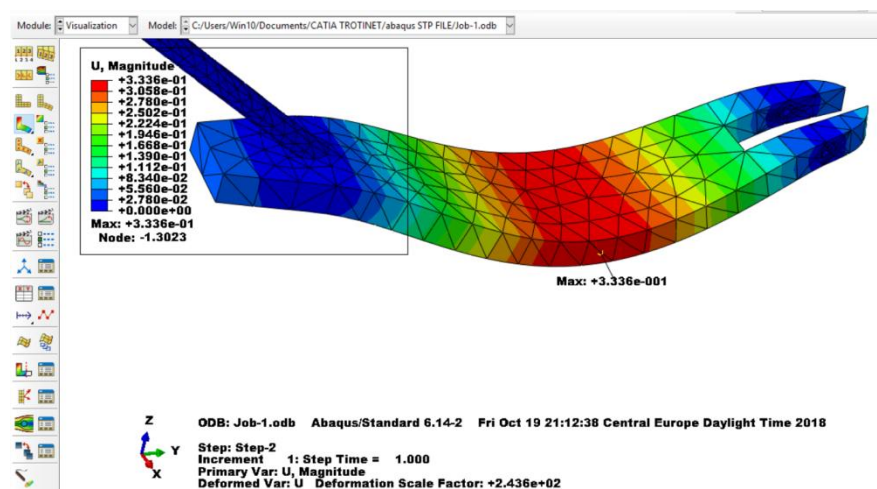
Слика 6.39 Приказ деформације на газишту од стаклених влакана/епокси композита

На слици 6.40 је приказан максималан напон на газишту од арамидних влакна/епокси композита. При анализи добијена је максимална вредност напона у износу $+1.642e^{+001} \frac{N}{mm^2}$.



Слика 6.40 Приказ максималног напона на газишту од арамидних влакна/епокси композита

На слици 6.41 су приказане вредности деформација газишта приликом коришћења арамидних влакна/епокси композита. Максимална вредност деформације, добијена при анализи, износи $+3.336e^{-001}mm$.



Слика 6.41 Приказ деформације на газишту од арамидних влакна/епокси композита

6.1.6 Преглед резултата структурне анализе нископодне површине за гажење

У табели 6.6 су приказани добијени резултати структурне анализе површине за гажење.

Табела 6.6 Приказ резултата напона и деформација управљача код површине за гажење

Материјал	Алуминијум	Карбонска влакна/епокси КОМПОЗИТ	Стаклена влакна/епокси КОМПОЗИТ	Арамидна влакна/епокси КОМПОЗИТ
Напон, N/mm ²	16.12	16.88	16.55	16.42
Деформација, mm	0.02311	0.1989	0.1226	0.3336

На графику 6.2 приказане су вредности напона добијене структурном анализом површине за гажење.

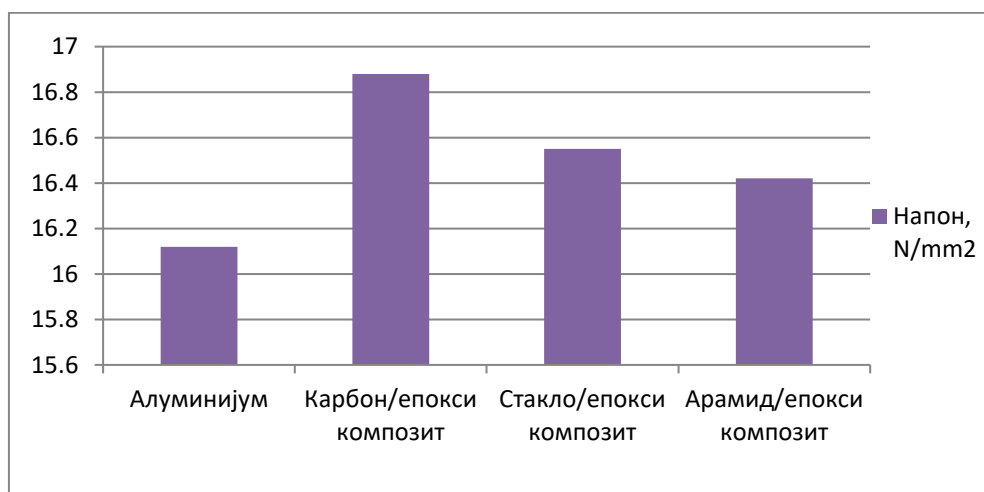


График 6.2 Приказ вредности напона код површине за гажење

На графику 6.3 су приказани резултати деформација добијени структурном анализом.

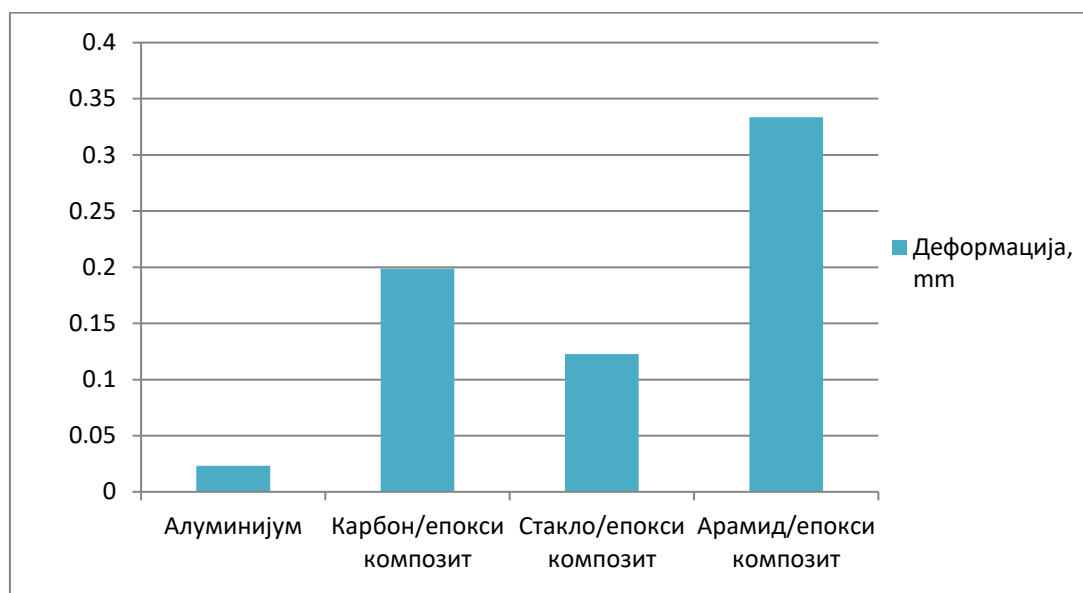


График 6.3 Приказ вредности деформација

Резултати напонско-деформационе анализе су показали да је за израду нископодне површине за гажење ипак најбоље користити алуминијум. Што се тиче композитних материјала најбоље се показао композит добијен комбинацијом стаклених влакана и епокси смоле, али су и у том случају вредности напона и деформација изнад вредности у случају алуминијума.

7.0 ЗАКЉУЧАК

Циљ овог рада је био да се изврши анализа напонско-деформационог стања најоптерећенијих делова тротинета и испита могућност замене алуминијума, који се најчешће користи за израду ових елемената, неким композитним материјалом.

Данас композити имају широку примену. Њихова добра особина је што се стално могу развијати и комбиновати са осталим материјалима ради добијања што бољих својстава. Такође, делови израђени од композитних материјала су знатно мање масе у поређењу са деловима од конвенционалних материјала (конкретно алуминијума), што је код тротинета од велике важности.

Последњих година приметна је експанзија примене тротинета не само у спортске сврхе већ и као превозног средства, поготово у градовима са густим саобраћајем. Отуда се дизајну, конструкцији и материјалима од којих се праве делови тротинета данас поклања велика пажња.

Структурна анализа најоптерећенијих делова тротинета извршена је у софтверу *Abaqus Cae*, док је за моделирање искоришћен програм *Catia*. Анализирани су управљач и нископодна површина за гажење, док су од материјала коришћени алуминијум, карбонска влакна/епокси композит, стаклена влакна/епокси композит и арамидна влакна/епокси композит.

Добијени резултати напонско-деформационе анализе су показали да је за израду управљача најбоље искористити композит добијен комбинацијом карбонских влакана и епокси смоле јер има боље особине у поређењу са алуминијумом, а при том би и маса овог дела била око један ипо пута мања. Анализом напонско-деформационог стања површине за гажење закључено је да предложена комбинација композита није препоручива за израду овог елемента тротинета, јер ни један од испитиваних материјала није показао боље особине у поређењу са алуминијумом. Међутим, треба наставити са истраживањем и пронаћи одговарајућу комбинацију материјала која ће имати задовољавајућа својства.

С обзиром да су композитни материјали, за разлику од алуминијума, лакши и једноставнији за употребу свакако се препоручује замена наведених делова тротинета, поготово управљача, композитним материјалима.

8.0 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Милорад Јовановић, Драган Адамовић, Вукић Лазић, Нада Ратковић, *Машински материјали*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2003.
- [2] <https://www.streetdirectory.com/etoday/the-history-of-kick-scooters-uppfpp.html>, преузето 5.09.2018.
- [3] <https://thegioitienganhvietnam.wordpress.com/history-about-kick-scooter/>, преузето 6.09.2018.
- [4] <https://www.razor.com/about-us/>, преузето 6.09.2018.
- [5] <https://www.monsterscooterparts.com/kick-scooter-parts>, преузето 9.09.2018.
- [6] Милорад Јовановић, Вукић Лазић, Душан Арсић, *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2017.
- [7] Зорица Ђорђевић, *Композитне конструкције*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2018.
- [8] Алдин Махмутовић, Санин Цидић, *Карбонска влакна - Материјал нових могућности*, Технички факултет Универзитета у Бихаћу, 2017.
- [9] <https://www.phelpsgaskets.com/blog/fiberglass--types-properties-and-applications-across-industries> , презуто 20.09. 2018.
- [10] <https://www.teijinaramid.com/en/what-is-aramid/> , преузето 20.09.2018.
- [11] <https://socratic.org/questions/how-much-pressure-will-a-man-of-weight-80-kgf-exert-on-the-ground-if-1-he-is-lyi> , презето 12. 09. 2018
- [12] <https://www.topendsports.com/testing/norms/handgrip.htm> , преузето 12.09.2018.
- [13] Nader G. Zamani, Jonathan M. Weaver, *CATIA V5 Дизајн механизма и њихова анимација*, Издавач "Компјутер библиотека" , 2007.
- [14] Горан Девеџић, Саша Ћуковић, Сузана Петровић, Јелена Максић, *3D моделирање производа*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2010.
- [15] Suvranu De, *Abaqus Handout*, Одељење за машинство, ваздухопловство и нуклеарно инжењерство.
- [16] Приручник за креирање и анализирање једноставног модела у програму Abaqus Сае <http://perso.mines-albi.fr/~penazzi/emboutissage/getting-start-cae.pdf>, преузето 10.10.2018