

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Александра З. Вуловић

**Компјутерско моделирање
биомеханике колена**

завршни рад

Крагујевац, 2013.



Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Основи биоинжењеринга

Број индекса: 10/2010

Александра З. Вуловић

**Компјутерско моделирање
биомеханике колена
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Ненад Филиповић, редовни професор-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да

Препоручена литература:

[1]

[2]

[3]

...

Крагујевац, 2013

ментор:

др Ненад Филиповић, редовни професор

Резиме:

Циљ овог рада било је моделирање специфичног 3D модела колена на основу снимака пацијента. Основна предност оваквог начина рада је могућност уочавања критичних вредности напона и померања пре израде физичког модела. Развојем виртуелног модела, омогућено је тестирање великог броја случајева оптерећења, са циљем бољег разумевања процеса који се дешавају унутар модела.

У првом делу рада описан је поступак моделирања колена, док је у другом делу на добијеном моделу вршен прорачун померања и напона на основу задате функције

Кључне речи: колено, моделирање, померање, коначни елементи

Abstract:

Goal of this Bachelor thesis was to model specific 3D model of knee from patients data. Main advantage of this type of work is possibility to see critical value for stress and displacement before developing model. With development of virtual model, there is chance to test more different types of load, in order to understand processes going on inside of model.

First part of thesis contains detailed explanation how model was made, while the second part contains calculation of stress and displacement of the given function

Keywords: knee, modeling, displacement, finite element

Садржај

УВОД.....	1
1. БИОИНЖЕЊЕРИНГ	2
1.1. ДЕФИНИЦИЈА БИОИНЖЕЊЕРИНГА	2
1.2. БИОМЕХАНИКА.....	3
2. АНАТОМИЈА ЧОВЕКА	4
2.1. УВОД	4
2.2. МИШИЋНО – СКЕЛЕТНИ СИСТЕМ	4
2.2.1. МИШИЋНИ СИСТЕМ	4
2.2.2. СКЕЛЕТНИ СИСТЕМ	6
2.2.3. ЗГЛОБ.....	6
2.2.3.1. Непокретни зглобови.....	7
2.2.3.2. Покретни зглобови.....	7
3. КОЛЕНО.....	11
3.1. УВОД	11
3.2. ЕЛЕМЕНТИ КОЛЕНА.....	12
3.3. МЕХАНИКА ЗГЛОБА.....	16
4. МОДЕЛИРАЊЕ КОЛЕНА	20
4.1. УВОД	20
4.2. ИЗРАДА 3D МОДЕЛА.....	21
4.2.1. ПРОГРАМСКИ ПАКЕТ MIMICS.....	21
4.2.1.1. Приказ добијања модела (бутна кост).....	22
4.2.1.2. Приказ осталих добијених модела	25
4.2.2. ПРОГРАМСКИ ПАКЕТ GEOMAGIC.....	28
4.2.2.1. Приказ сређивања модела (фемур).....	28
4.2.2.2. Приказ осталих сређених модела	33
4.2.2.3. Сређивање модела за спајање (хрскавица и чашица).....	35
4.2.3. ПРОГРАМСКИ ПАКЕТ FEMAP.....	38
4.3. ДОБИЈЕНИ МОДЕЛ	41
5. ПРОРАЧУН ПОМЕРАЊА КОЛЕНА.....	42
5.1. ПРИПРЕМА ЗА ПОЧЕТАК ПРОРАЧУНА	42
5.2. РЕЗУЛТАТИ.....	48
6. ЗАКЉУЧАК	52
7. ЛИТЕРАТУРА	53

УВОД

Развојем технологије остварен је огроман утицај на све сегменте живота, на нашој планети. Имајући ово у виду, логично је да се и биоинжењеринг сваким даном све више развија.

Примена рачунарских система омогућила је муњевит напредак у процесу анализе природних процеса. Резултат анализе представља израда рачунарског модела, уз неопходност поседовања и адекватног инжењерског знања. Тиме су створени услови за правилно дефинисање задатка, односно за рачунарско моделирање.

Човеков организам представља научни изазов у циљу моделирања свих његових органа. Анализом људског мозга створена је и структура рачунарских процесора, који су у непрестаном усавршавању како би се перформансе што више приближиле истом.

Анализом и осталих људских органа обезбеђују се информације, које су веома значајне са становишта медицине, у циљу санирања разних врста повреда. Повреде колена су веома честе код спортиста, и сматрају се повредама које је тешко санирати. Анализа рада колена и израда рачунарског модела представља одговоран задатак. Тежња ка изради квалитетног модела имплицира успешно биоинжењерско решење, чиме се омогућава успешно санирање у случајевима изузетно тешких повреда.

1. БИОИНЖЕЊЕРИНГ

1.1. ДЕФИНИЦИЈА БИОИНЖЕЊЕРИНГА

Биоинжењеринг представља примену инжењерских принципа, као и сазнања, из биологије, физике, хемије, математике и рачунарских наука, како би се решили различити медицински проблеми, са циљем да се побољша квалитет људског живота на основу добијених података.

Биоинжењеринг се може поделити на следеће подобласти:

1. Биомеханика

Биомеханика проучава коштане и мишићне системе, посматрајући их као механичке структуре, на које делују различите силе и које су подложне кретањима. Ова област биоинжењеринга укључује анализу начина људског хода и истраживање сила, које утичу на деформације људског тела приликом различитих несрећа. Такође, биомеханика проучава друге системе организма као и органе, на пример, понашање крви као течности која је у константном кретању, механику дисања и размену енергије у људском телу.

2. Биохемијски инжењеринг

Биохемијски инжењеринг проучава везу између организма и вештачких материјала. Најзначајнија подобласт биохемијског инжењерства је ортопедијска хирургија. Циљ је развијање организма које неће одбацити имунолошки систем и које ће се интегрисати на најбољи начин са организмом.

3. Биоелектрицитет

Ова област биоинжењеринга се бави проучавањем биоелектричне активности организма, који представља основу неуролошког система и већине виталних процеса у организму. Биоелектрични процеси се користе за потребе дијагностике у медицини.

1.2. БИОМЕХАНИКА

Биомеханика проучава структуру и функцију биолошких система људи, животиња, биљака, органа и ћелија помоћу метода механике.

Биомеханика је уско повазана са инжењерством, због честог коришћења традиционалног инжењерства за анализу биолошких система. Примењена механика, пре свега дисциплине као што су: механика континуума, кинематика и динамика, имају веома велику улогу у биомеханици.

Без познавања биомеханичких својстава човека веома је тешко, скоро немогуће, обликовати техничка средства, која омогућују ефикасно, безбедно и продуктивно коришћење.

Биомеханика се састоји из великог броја подобласти:

- Динамика меких тела
- Кинезиологија
- Кардиоваскуларна биомеханика
- Спортска биомеханика
- Биомеханика повреда
- Мишићна и ортопедска биомеханика...

Проучавање биомеханике се креће од унутрашњег деловања на ћелију, преко кретања и развоја екстремитета, до механичких особина меких ткива и костију.

Биомеханика се широко користи у ортопедској индустрији за дизајнирање ортопедских имплантата људских зглобова, зуба... За биомеханику је веома битна биотрибологија, која проучава функцију биоматеријала који се користе за ортопедске имплантанте. Биотрибологија има велику улогу у побољшавању дизајна и производње биоматеријала за медицинске сврхе.

2. АНАТОМИЈА ЧОВЕКА

2.1. УВОД

Анатомија човека је наука о облику и грађи његовог тела. Проучава тело здравог човека, облик, положај и структуру његових многобројних органа. Такође, проучава и саме промене облика и грађе органа, које се као непрекидан процес одигравају у човечјем телу у току целог живота. Облик, грађа и функција органа су у узајамној вези и зависности.

Да би се људски организам разумео као целина, неопходно је најпре упознати његове саставне делове, пошто се без добре анализе не може извршити никаква синтеза.

2.2. МИШИЋНО – СКЕЛЕТНИ СИСТЕМ

Мишићно – скелетни систем (слика 1) или локомоторни апарат је комплексна удружена група органа који омогућавају једну од најбитнијих функција у животу - кретање. Локомоторни апарат чине кости, мишићи, зглобови, тетиве, лигаменти, нерви али и друга мека ткива која улазе у састав зглобова.

Локомоторни систем чине пасивни и активни делови. Пасивни делови су кости, зглобови и хрскавице, док активни део чине мишићи. Костур и мишићи омогућавају нам да трчимо, скачемо и савијамо се у разним правцима.

2.2.1. МИШИЋНИ СИСТЕМ

Активни део локомоторног система представља мишићни систем, приказан на слици 1, чијом акцијом долази до покрета. Покрет, настао дејством мишићног система, испољава се променом положаја појединих делова или читавог тела, у односу на природно окружење.

Мишићни систем, заједно са скелетним, чини апарат за кретање. Осим тога он учествује у многим физиолошким процесима као што су: исхрана, дисање и циркулација крви. Мишићи се за кости спајају сноповима везивних влакана – тетивама.

Основне карактеристике скелетних мишића су:

- издужен и вретенаст облика
- за кости су причвршћени тетивама
- почетни део мишића је сразмерно непокретан
- обавијени су посебним мишићним омотачем - фасцијом
- делују у функционалним групама које имају супротно дејство - савијачи и опруживачи

Компјутерско моделирање биомеханике колена



Слика 1. – Мишићно – скелетни систем

2.2.2. СКЕЛЕТНИ СИСТЕМ

Скелет, приказан на слици 1, даје телу чврстину и пружа ослонац за причвршћивање мишића.

Без скелета тело би било једна опуштена маса мишића, крвних судова и унутрашњих органа. Кости, којих у телу има 206, сачињавају скелет. Кости су јаке и телу дају чврстину и унутрашњу структуру, која држи друге његове делове и штити осетљиве органе.



Унутар тела кост је врло активна. Она није сува - једну петину њеног садржаја чини вода. Није ни крхка - може се донекле савити јер садржи влакна колагена. Кост (слика 2) је истовремено врло чврста јер садржи тврде кристале минерала, као што је калцијумфосфат. И кост, као и сви други делови тела, има своје крвне судове и нерве.

Већина костију није пуна, већ шупља, тј. у унутрашњости има шупљину. Она садржи меку, пихтијасту материју која се зове коштана срж. Ова срж производи нова црвена и бела крвна зрнца брзином од око два милиона у секунди, како би се заменила стара, истрошена крвна зрнца.

Горњи слој костију, који се назива чврсто коштаном ткивом, је тврд, густ и јак. Унутрашњи слој коштаног ткива, где је јачина мање важна, налик је на саће меда, да би био што лакши. Овај део се назива сунђераста кост.

Слика 2. – Изглед кости

2.2.3. ЗГЛОБ

Зглоб или спој (лат. *junctura*) представља скуп елемената, помоћу којих се кости спајају међусобно. Зглобови представљају место где се најпре појављују патолошке промене и због тога је њихово познавање од великог значаја. С обзиром на покретљивост, сви зглобови човечјег тела деле се на непокретне и покретне.

Сваки зглоб има своје карактеристике и своју амплитуду покрета. Те вредности се разликују до те мере, да је нормална флексија скочног зглоба 45 степени а раменог зглоба преко 100 степени. То се дешава зато што су лигаменти који обезбеђују скочни зглоб мање еластични од лигамената који врше исту функцију око зглоба рамена.

2.2.3.1. Непокретни зглобови

Непокретни зглобови или синартрозе, према врсти потпорног ткива којим су кости међусобно спојене, деле се на везивне и хрскавичне спојеве.

1. Везивни спој (*junctura fibrosa*)

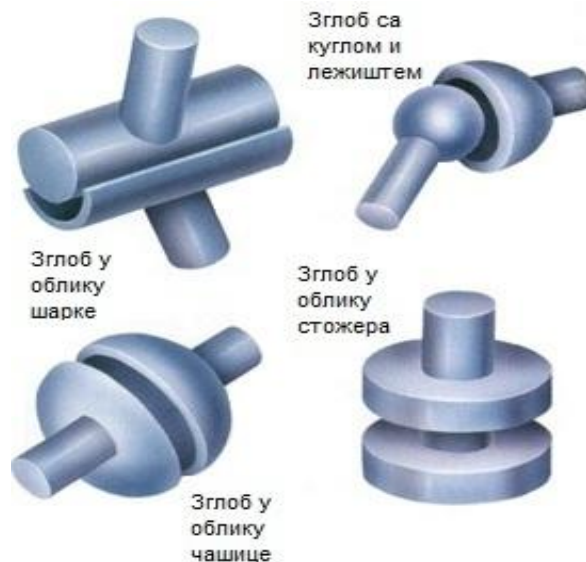
Код ове врсте зглобова спој костију омогућен је танким слојем везивног ткива или јаким фиброзним везама. Јаке фиброзне везе спајају кости, које су међусобно на извесном растојању и образују синдесмозу (*syndesmosis*). Танак слој везивног ткива постоји код шавова и клинастих спојева. Шав (*sutura*) спаја ивице две плоснате кости, а код клинастог споја (*gomphosis*) једна кост се увлачи у другу. Код одраслих и у старости везивно ткиво шавова се увек окоштава делимично или потпуно.

2. Хрскавични спој (*junctura cartilaginea*)

Спој костију омогућен је хрскавицом, и то хијалином (*synchondrosis*) или фиброзином (*symphysis*). Код одраслих хијалина хрскавица непокретног зглоба се окоштава и увек настаје коштани спој (*synostosis*).

2.2.3.2. Покретни зглобови

Код покретних зглобова кости се могу покретати једна према другој. Тело има много различитих врста покретних зглобова, у зависности од облика завршетка костију и њиховог међусобног уклапања. Налик су на зглобове који се користе у машинама да би се обезбедила одређена врста покрета (слика 3). Кук је зглоб типа кугле и лежишта и може се кретати у свим правцима, а за колена које је и тема овог рада може се рећи да је зглоб налик на шарку и може се покретати само напред и назад.



Слика 3. – Изглед зглобова који се користе у машинама

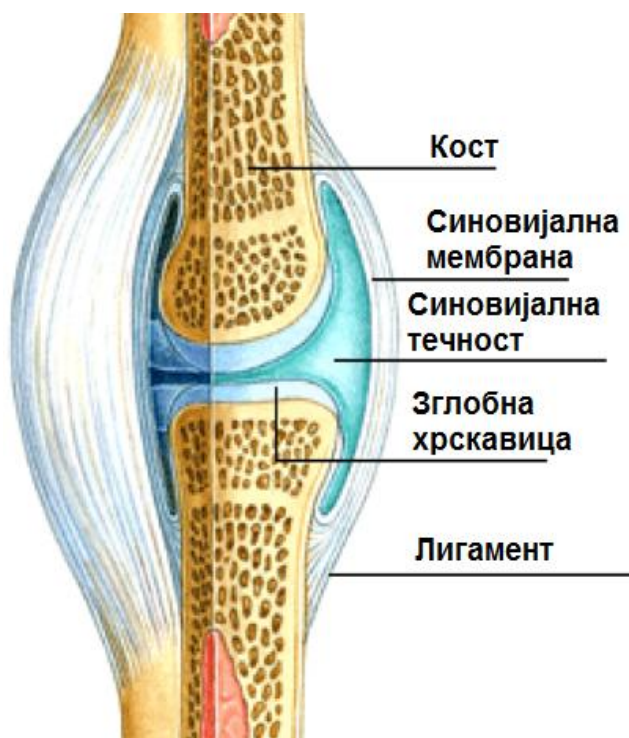
Компјутерско моделирање биомеханике колена

Код покретног зглоба или дијатрозе разликују се главни и споредни елементи.

1. Главни елементи покретног зглоба

У главне елементе или делове, који су карактеристични за сваки покретни зглоб, спадају: зглобне површине, зглобна шупљина и зглобна чаура.

- Зглобне површине (*facies articulares*)



Зглобне површине се обично допуњују међусобно својим обликом. Најчешће је једна од њих конвексна, а друга конкавна. У покретном зглобу завршеци костију покривени су глатком, сјајном, меканом материјом која се зове хрскавица. Она не дозвољава да се завршеци костију тару једни о друге и да се тако троше. Површине хрскавице налажу једна на другу и практично се не троше. Дебљина хијалина зглобне хрскавице (*cartilago articularis*), сразмерна је притиску који она трпи у зглобу. Зглобна хрскавица (слика 4) конкавних површина је дебља, мекша и еластичнија него хрскавица конвексних површина. Зглобна хрскавица је у свом најдубљем слоју калцифицирана и спојена са зглобном површином кости.

Слика 4. – Структура покретног зглоба.

По њеној површини тангенцијално се пружају колагена влакна, која долазе из влакнастог слоја периоста (фиброзни омотач). Ова влакна су управљена у правцу силе истезања, која се јавља у зглобу при покрету и преношењу притиска. Лучни распоред колагених влакана омогућава еластичност зглобне хрскавице. Услед притиска зглобна хрскавица попушта, што доводи до тога да се међусобни контакт зглобних површина повећава и притисак распоређује на већу површину. Испод зглобне хрскавице овалне ареоле сунђерастог коштаног ткива распоређују притисак такође на већу површину. Еластичност зглобне хрскавице је једна од њених основних карактеристика. Она јој даје способност прилагођавања и могућност савлађивања великих притисака, које зглобови трпе при држању тела, ношењу терета и при разним покретима.

-Зглобна шупљина (cavum articulare)



Зглобна шупљина (слика 5), је пукотинаст, капиларни простор, карактеристичан за покретне зглобове. Зглобна шупљина садржи слузаву течност, синовију (synovia), која омогућује исхрану зглобних хрскавица и лако клизање зглобних површина. Она се код прекомерног кретања ствара у већој количини, што доводи до осећања замора и тежине у зглобу.

Слика 5 – Елементи покретног зглоба

- Зглобна чаура (capsula articularis)

Зглобна чаура (слика 6) обухвата, у виду опне, зглобне крајеве костију. На зглобној чаури разликују се два слоја: спољни, фиброзни и унутрашњи, синовијални.

Фиброзни слој (membrana fibrosa), изграђен је од фиброзног везивног ткива. Спољни слој чауре може бити различите дебљине и затегнутости. Уколико је он лабавији, утолико је зглоб покретљивији. Фиброзни слој изложен је дејству механичких фактора, притиску и истезању од којих зависи распоред његових колагених влакана. Површински слој фиброзне опне састоји се од уздужних колагених влакана која су оријентисана у правцу силе истезања у томе зглобу.



Слика 6 – Зглобна хрскавица код зглоба без (лево) и са зглобним диском (десно)

Компјутерско моделирање биомеханике колена

Дубљи слој фиброзне опне састоји се из попречних влакана, која су груписана овално или параболично. Ова влакна се одупиру притисцима од стране коштаних зглобних делова, који се јављају у зглобу приликом покрета.

Синовијални слој (*membrana synovialis*) зглобне чауре представљен је танком глатком опном од везивног еластичног ткива. У њему се налазе крвни судови и живци.

Синовијални слој облаже фиброзни слој зглобне чауре и покрива делове кости који се налазе у зглобној шупљини, а нису покривени зглобном хрскавицом. Поред тога, он покрива и везе које се налазе у зглобној шупљини и, понекад, образује ресичасте наставке, који садрже у себи крвне судове и масно ткиво. Ови наставци синовијалне опне испуњавају празне, мртве просторе, који постоје у неким зглобовима.

2. Споредни елементи покретног зглоба

У споредне елементе, који се срећу само код појединих покретних зглобова, спадају зглобне везе и фиброзно хрскавичне плоче.

- Зглобне везе (*ligamentum*)

Зглобна веза представља фиброзну траку која спаја зглобне крајеве костију и појачава споља зглобну чауру. Зглобних веза има и у унутрашњости појединих зглобова, затегнутих између зглобних површина костију. Зглобне везе, поред тога што појачавају зглобну чауру, имају и активну важну улогу у динамици зглоба. Оне, правцем и распоредом својих фиброзних влакана, поједине покрете у зглобу онемогућавају или их дозвољавају само до извесних граница, а друге покрете условљавају и омогућавају.

- Везивно хрскавичне плоче

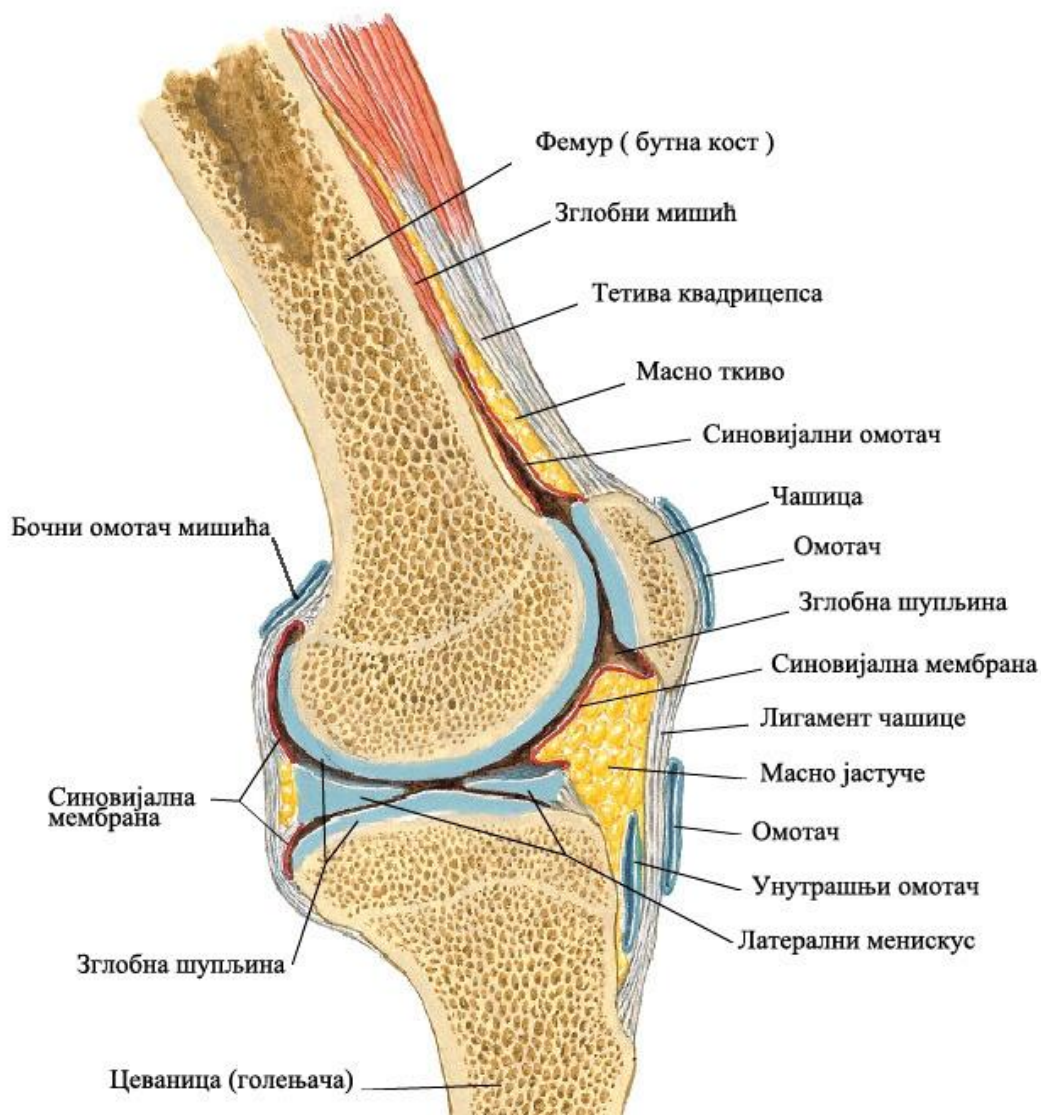
Ове плоче се налазе у унутрашњости појединих зглобова као зглобни кругови, као менискуси и као чашичне усне. Њихова је улога да ублажавају ударце код покрета или да служе као покретне допуне зглобних површина.

- **Зглобни круг (*discus articularis*)** има облик округле плоче која је својом обимном ивицом чврсто срасла са фиброзним листом зглобне чауре. Дели зглобну шупљину на два дела.
- **Менискус (*meniscus*)** је фиброзно хрскавична творевина клинастог облика у пресеку. За разлику од зглобног круга, он дели зглобну шупљину само делимично. Његова спољна страна (база) причвршћена је уз фиброзни лист зглобне чауре. Врх му је окренут ка средини зглобне шупљине, а стране, горња и доња, су глатке, слободне и належу на зглобне површине.
- **Чашична усна (*labrum*)** јесте фиброзно хрскавична творевина прстенастог облика, која у пресеку има троугласт изглед. Она је базом причвршћена за обимну ивицу зглобне јаме. Својом спољном страном срасла је за фиброзни слој зглобне чауре, а унутрашњом, слободном и глатком страном, чашична усна наставља површину зглобне јаме и на тај начин је чини дубљом и пространијом.

3. КОЛЕНО

3.1. УВОД

Колено (слика 7) спаја бутну кост са потколеницом. Овај зглоб је веома сложен у погледу своје грађе и представља највећи зглоб у људском телу. Омогућава савијање и истезање, као и благу медијалну и латералну ротацију (Бошковић 1982).

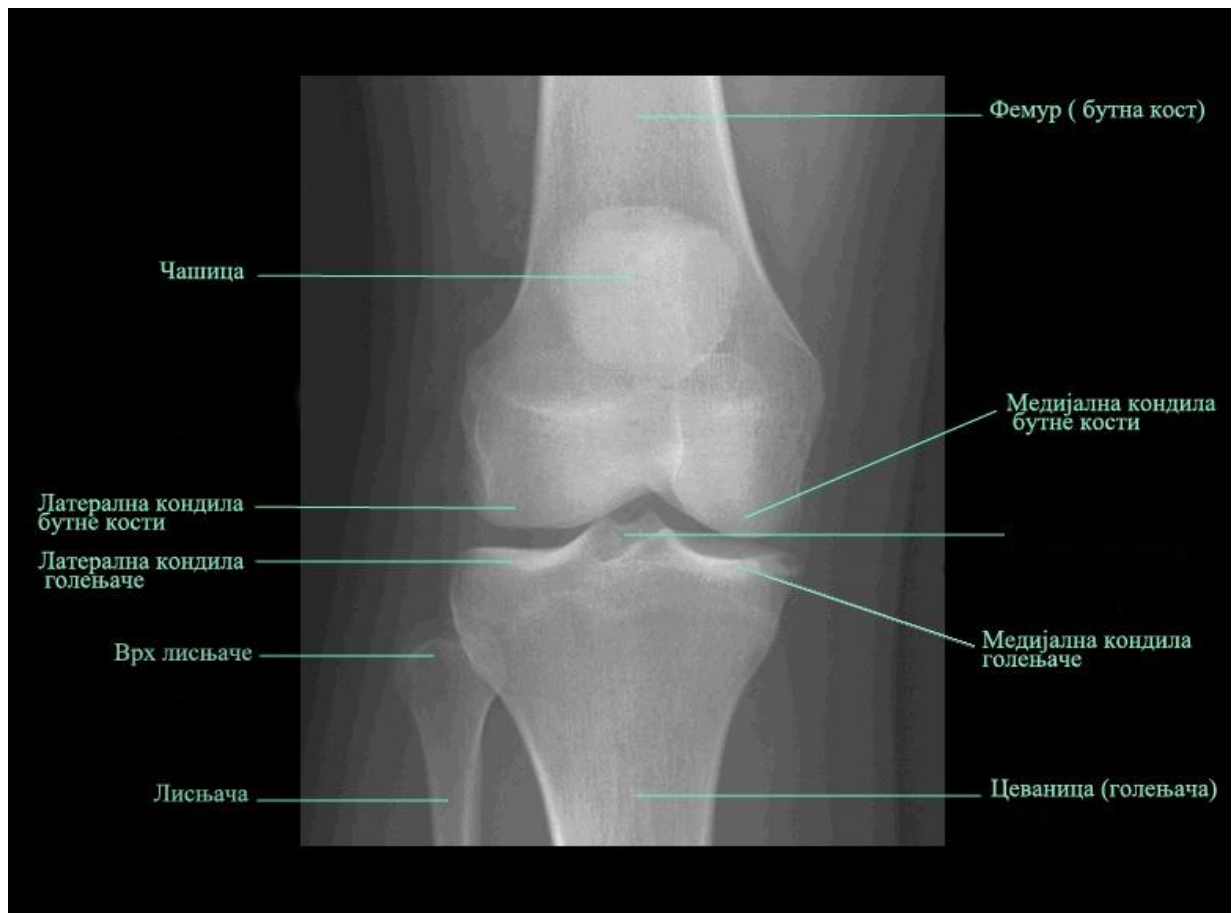


Слика 7. – Изглед колена

Компјутерско моделирање биомеханике колена

При усправном ставу колено носи око 70% телесне тежине, а при савијеним ногама око 90% телесне тежине. Спада међу најкомплексније зглобове, али и оне који се најчешће повређују у спорту. Најчешћи елемент зглоба колена који се повређује је менискус.

3.2. ЕЛЕМЕНТИ КОЛЕНА



Слика 8. – Рендгенски снимак колена

На слици 8 приказан је рендгенски снимак зглоба колена, који се састоји из следећих делова:

1. Бутна кост (femur)

Бутна кост (слика 9) је дуга кост која се горњим крајем спаја са карличном кости, а доњим са чашицом и горњим крајем голењаче.



Слика 9. – Бутна кост

Бутна кост се састоји из тела и два крајка. Тело (*corpus femoris*) је средњи, дуги део, који има предњу, спољашњу и унутрашњу страну и три ивице - спољашњу, унутрашњу и задњу. На горњем крајку (*extremitas superioris*) се разликују: глава (*caput femoris*), врат (*collum femoris*), велика (*trachanter minor*) и мала кврга (*trochanter minor*). Доњи крајак (*extremitas inferior*) је масивнији од горње. На њему се виде два коштана испупчења, спољашње (*condyles lateralis*) и унутрашње (*condyles medialis*). Ова два кондила су напред спојена глатком чашичном површином (*facies patellaris*), а позади су раздвојена дубоком међукондиларном јамом (*fossainter condylaris*).

2. Чашица (*patela*)

Чашица (слика 8) је мала, сезамовидна кост бадемастог облика која се налази у тетиви (*m. Guadriceps femoris*) испред доњег крајка бутне кости.

3. Голењача (*tibia*)

Голењача (слика 8) је дуга, унутрашња кост потколенице која се својим горњим крајком спаја са бутном кости и лисњачом, а доњим крајком са лисњачом и скочном кости. Голењача се састоји из тела и два крајка. Тело (*corpus tibiae*) има три стране: спољашњу, унутрашњу и задњу и три ивице: предњу, спољашњу и унутрашњу. Горњи крајак (*extremitas superior*) је масивнији и на њему се виде два коштана испупчења, спољашње (*condylus lateralis*) и унутрашње (*condylus medialis*). На предњој страни овог крајка налази се голењачно испупчење. Доњи крајак (*extremitas inferior*) поседује зглобне површине које служе за спој са доњим крајком лисњаче и скочном кости. На његовом унутрашњем делу види се коштани наставак, унутрашњи глежањ (*malleolus medialis*).

4. Лисњача (*fibula*)

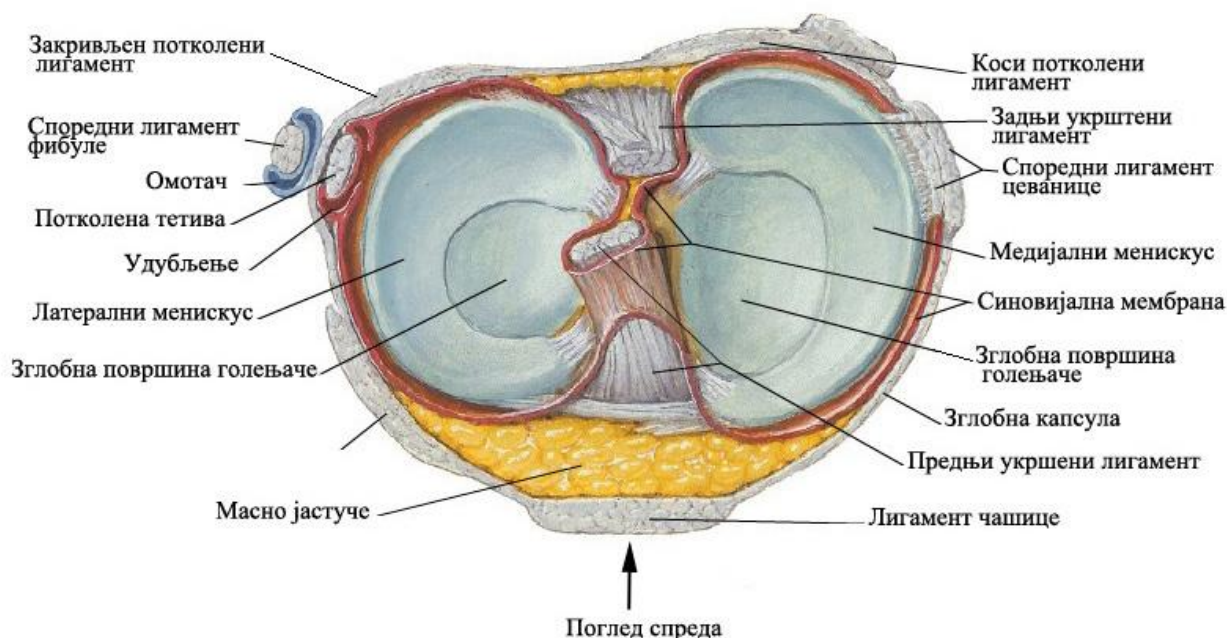
Лисњача је дуга, спољашња кост потколенице, чији се горњи крајак спаја са голењачом а доњи са голењачом и скочном кости. На лисњачи се разликују тело и два крајка. Тело (*corpus fibulae*) има три стране, спољашњу, унутрашњу и задњу (*facies lateralis, medialis et posterior*). На горњем крајку (*extremitas superior*) види се глава (*caput fibulae*) и врат лисњаче (*collum fibulae*). Доњи крајак (*extremitas inferior*) је спољашњи глежањ (*malleolus lateralis*) који се зглобљава са доњим крајком голењаче и скочног зглоба.

5. Зглобне површине

Зглобне површине кондила бутне кости, идући од спреда назад, описују лук који је у свом задњем делу јаче конвексан него у предњем, односно пречник кривине предњег дела зглобне површине је већи него пречник њеног задњег дела. Зглобне површине кондила голењаче су веома плитке. Дуж њихових периферних ивица налазе се менискуси, спољни (meniscus lateralis) и унутрашњи (meniscus medialis).

6. Менискуси

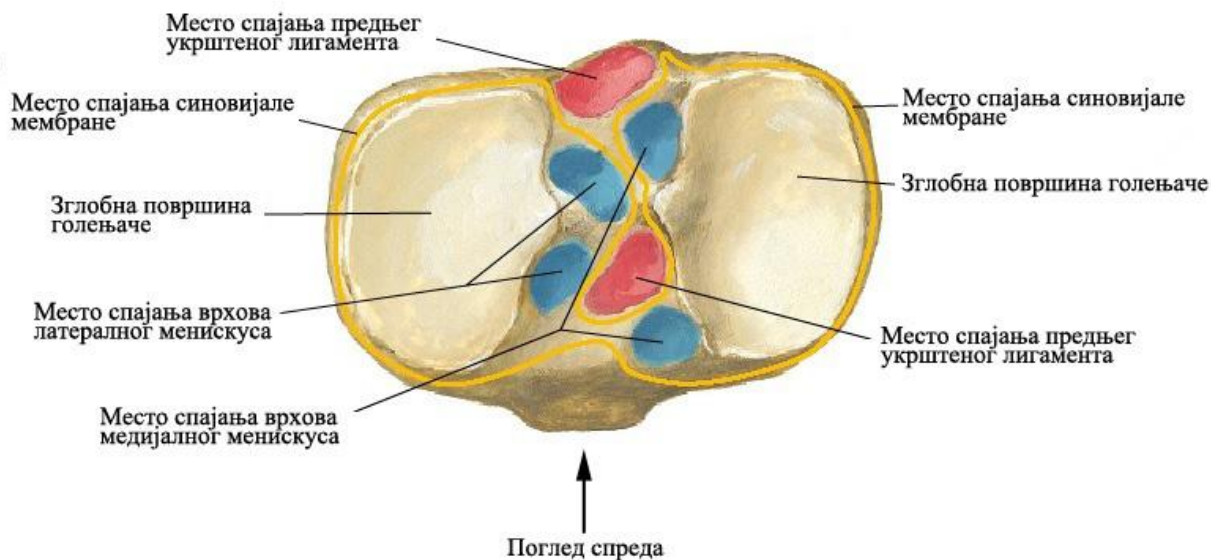
Менискуси (слика 10) су фиброзно хрскавичне творевине полумесечастог облика, које омогућују кондилима голењаче да се присно приљубе уз конвексне зглобне површине кондила бутне кости.



Слика 10. – Горњи крај голењаче са меникусима

Менискуси су на попречном пресеку троугласти, са базом која је окренута у поље. Горње стране су им конкавне, а доње равне.

Својим крајевима менискуси су причвршћени фиброзним снопићима у интеркондиларним пољима голењаче. Крајеви унутрашњег меникуса налазе се испред и иза крајева спољног меникуса, који је више затворен, кружног облика. Предње делове меникуса повезује попречна веза колена.



Слика 11. – Унутрашњост колена

7. Лигаменти

Укрштене везе зглоба колена (ligg. cruciata) заостатак су сагиталне преграде која повезује међукондиларну јаму бутне кости с интеркондиларним пољима голењаче. Предња укрштена веза (lig. cruciatum anterius) силази од задњег дела спољног кондила косо напред и унутра и завршава се у предњем међукондиларном пољу голењаче (area intercondylaris anterior) између предњих крајева менисуса. Задња укрштена веза (lig. cruciatum posterius) силази од предњег дела унутрашњег кондила бутне кости косо назад и упоље и завршава се у задњем међукондиларном пољу голењаче, иза задњих крајева менисуса (слика 11). Задњој укрштеној вези прикључује се врло често фиброзни снопић, који полази од задњег дела спољног менисуса (lig. meniseofemorale posterius).

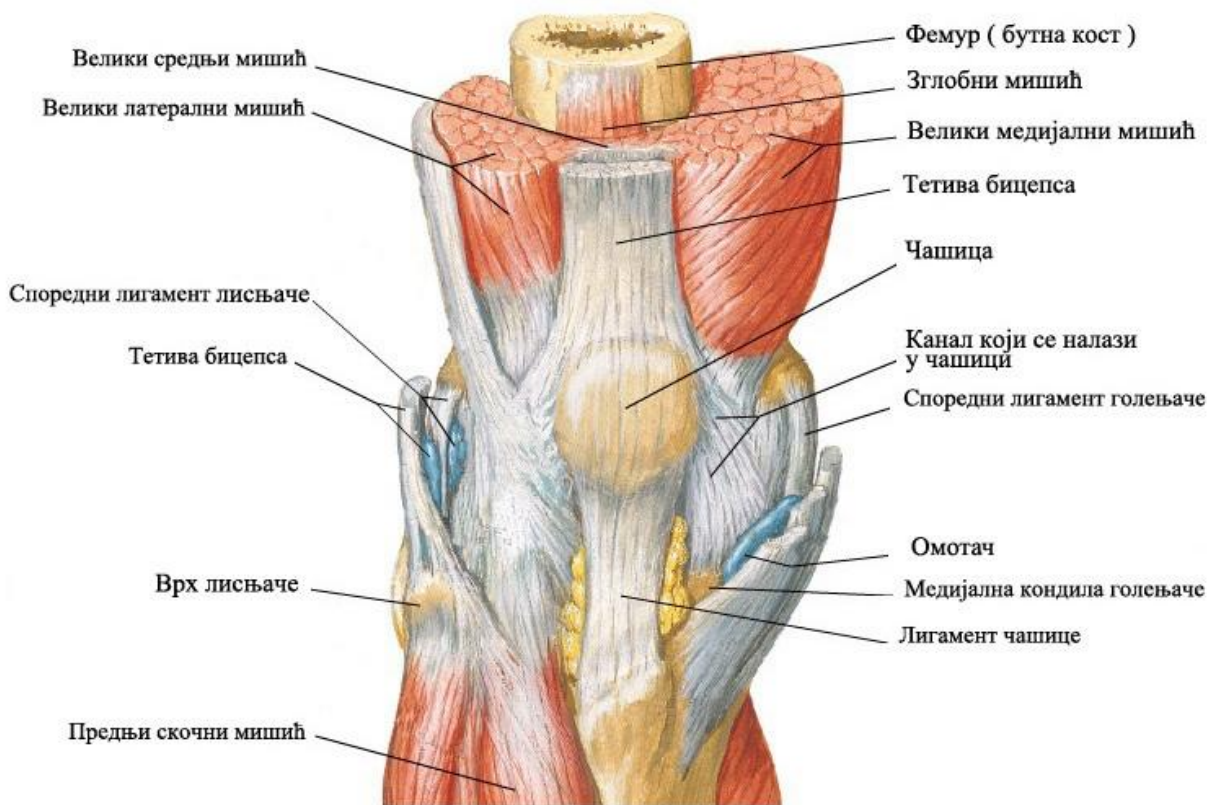
Зглобна чаура појачана је предњим, бочним и задњим везама. У предње чаурне везе спадају lig. Patellae и два крилца чашице: спољно (retinaculum patellae-laterale) и унутрашње (retinaculum patellae mediale). Крилца чашице представљају бочне наставке тетиве m. quadricepsfemoris-а, која силази поред чашице до кондила голењаче. Њихови дубоки, попречни снопови повезују чашицу с кондилима бутне кости. Крилца спречавају бочна померања чашице и у случају њене фрактуре служе као помоћне тетиве m. quadriceps femoris-а за делимичну екстензију зглоба колена.

Од бочних чаурних веза снажнија је спољна (lig. collaterale fibulare). Она је у облику врпце, одвојена је од зглобне чауре и повезује epicondylus lateralis бутне кости с главом лисњаче. Унутрашња бочна веза (lig. collaterale tibiale) има облик траке. Она је срасла са зглобном чауром и базом унутрашњег менисуса. Она се спушта, с epicondylus medialis-а бутне кости до унутрашње стране тела голењаче.

3.3. МЕХАНИКА ЗГЛОБА

У зглобу колена врше се покрети флексије и екстензије око попречне осовине, кондила бутне кости. Када је зглоб колена у екстензији, бутна кост и голењача образују угао од 180° . Амплитуда активне флексије под утицајем контрације задњих мишића бута износи 130° , а пасивна флексија је већа за 20° . Пасивна флексија омогућује приљубљивање потколенице уз натколеницу.

Код екстензије зглоба (слика 12) затежу се снажно бочне везе, јер се између њих постављају делови кондила с већим пречником своје кривине. Поред тога затежу се и задње чаурне везе и предња укрштена веза. Предња укрштена веза својим затезањем при завршној екстензији ноге окреће потколеницу у поље за око 5° и тиме фиксира зглоб колена и повећава његову чврстину.

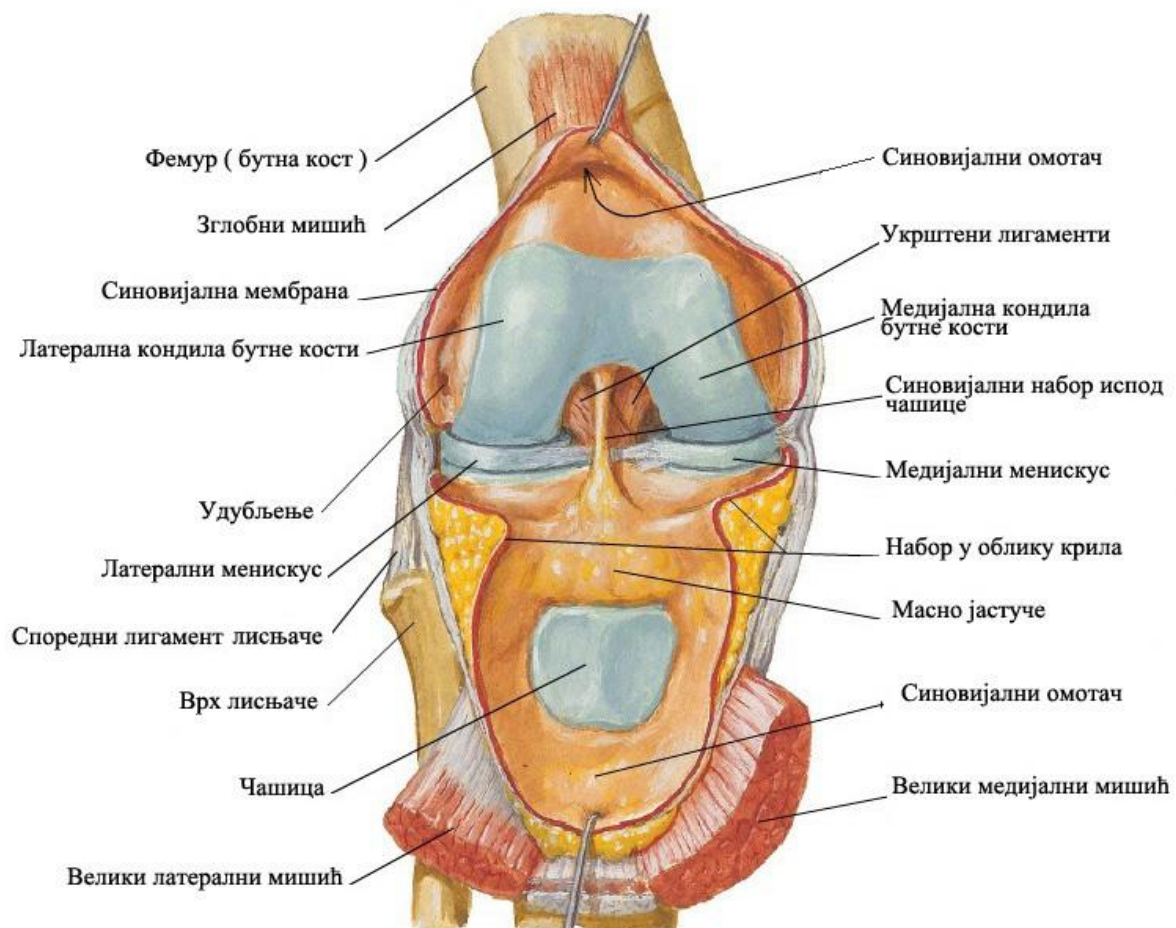


Слика 12. – Зглоб колена у екстензији

Компјутерско моделирање биомеханике колена

У току флексије (слика 13) бочне везе се опуштају и дозвољавају у зглобу колена покрете обртања. око вертикалне осовине. Пошто је латерална бочна веза олабављена више него медијална, вертикална осовина ротације налази се унутра од средишта зглоба колена. Она пролази кроз медијалне кондиле и при покретима обртања латерални кондили, било голењаче или бутне кости код стојне ноге, врше покрет веће амплитуде него медијални. Унутрашња ротација износи свега 5° јер је ограничена увртањем и затезањем укрштених веза. Спољна ротација је 3 до 4 пута већа, јер се том приликом укрштене везе одвијају и олабављују у току флексије зглоба колена.

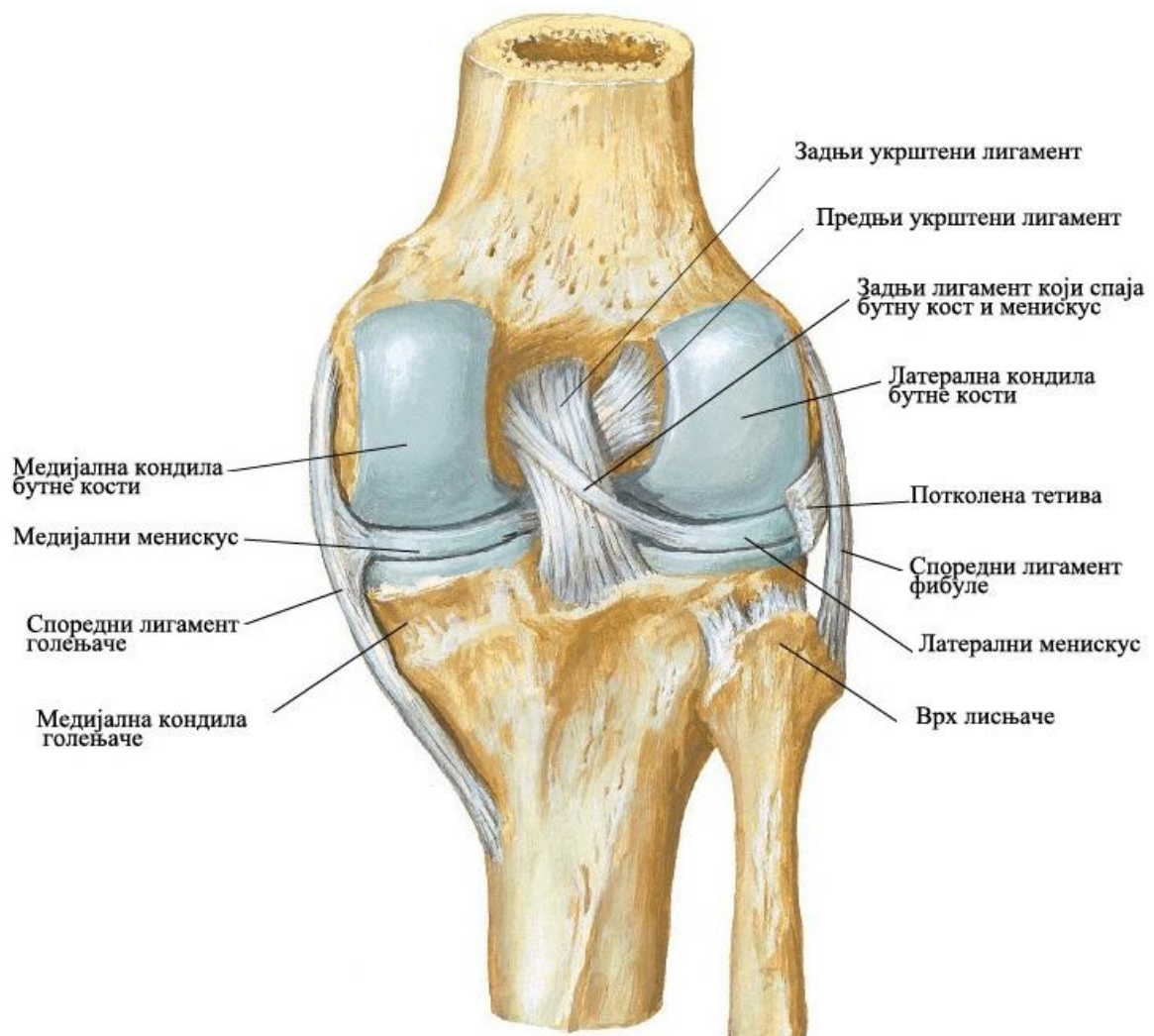
Приликом покрета, у зглобу колена, менискуси се постављају увек на место где је највећи притисак. Код екстензије зглоба њихови предњи крајеви су притиснути између кондила бутне кости и голењаче. Том приликом површина контакта између зглобних површина у зглобу колена је највећа. У току флексије менискуси клизе назад, савијају се и постављају иза задњих делова бутне кости, који су конвекснији и захтевају дубљу а ужу зглобну површину кондила голењаче. Спољни менискус је знатно покретљивији од унутрашњег, који је фиксиран уз медијалну чаурну везу.



Слика 13. – Зглоб колена у флексији

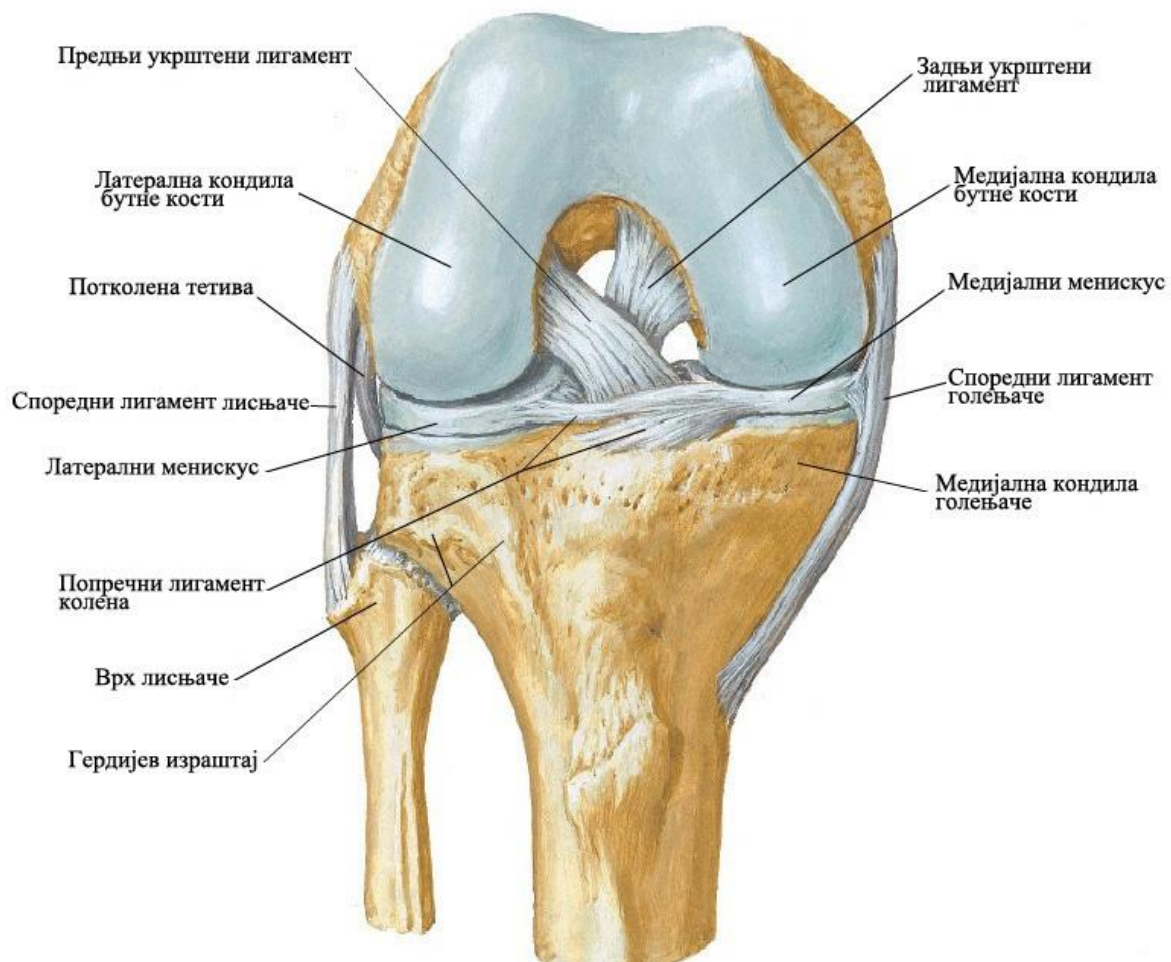
Компјутерско моделирање биомеханике колена

Повреда менисуса, и то углавном цепање предњег дела *meniscus medialis*-a, дешава се приликом нагле спољне ротације у зглобу колена. Ако је зглоб колена у спољној ротацији и врши се нагла екстензија, предњи део унутрашњег менисуса се обично укљешти између унутрашњих кондила голењаче и бутне кости. Укљештење је праћено јаким болом и прскањем менисуса. Након одстрањивања менисуса отежан је ход по стрмим теренима.



Слика 14 – Положај лигамената када је зглоб колена у екстензији

Укрштене везе својим затезањем спречавају прекомерну екстензију, флексију и унутрашњу ротацију у зглобу колена. Код крајње екстензије затегнути су предњи део *lig. cruciatum anterius*-a и задњи део *lig. cruciatum posterius*-a, а обрнут је случај код крајње флексије.



Слика 15. – Положај лигамената када је зглоб колена у флексији

Према томе, у току флексије зглоба увек су извесни делови укрштених веза затегнути и осигуравају стално присан контакт зглобних површина бутне кости и голењаче. Укрштене везе су веома снажне и при прекомерним покретима чупају средњи део голењаче и у зглобу колена јавља се покрет хоризонталног померања напред и назад.

Зглобна површина чашице налази се изнад зглобне површине бутне кости (*facies patellans*), у коју она упада само када је колено у флексији. Приликом флексије зглоба колена, нарочито из стојећег става, чашица врши веома снажан притисак на кондиле бутне кости, потискујући их назад. Потискивање бутне кости назад спречавају укрштене везе зглоба колена.

Клизање чашице навише и наниже, које износи од 5 cm до 6 cm, олакшавају две слузне кесе: горња (*bursa suprapatellaris*) и доња (*bursa infrapatellaris profunda*).

4. МОДЕЛИРАЊЕ КОЛЕНА

4.1. УВОД

За реализацију завршног рада било је неопходно користити више програмских пакета за моделирање, за обраду добијеног модела, као и за прорачун направљеног модела. У првом делу овог поглавља ће бити наведени и описани коришћени програми, а затим ће бити описана њихова примена, током рада на сваком од елемента колена.

- Програмски пакет Mimics



Програмски пакет Mimics (Materialise Interactive Medical Image Control System) је развијен од стране белгијске компаније, специјализоване за софтвере и технологију који су потребни за 3-D штампу. Намењен је за 3-D дизајн и моделирање. Mimics се користи за креирање 3-D површинских модела на основу низа 2-D слика, а такође се користи за рачунање површине 3-D модела на основу низа слика као што су СТ снимци, MRI, ултразвук...

Овај програмски пакет је пронашао највећу примену у биоинжењерингу као и у различитим гранама медицине (ортопедија, пулмологија, кардиоваскуларна медицина...)

- Програмски пакет Geomagic



Програмски пакет Geomagic налази примену код означавања и моделирања 3-D модела, најчешће сложених физичких објеката, креирање CAD модела и њихову припрему за производњу. Налази велику примену због великог броја формата које подржава, као и због директног извоза модела за програме, као што су CATIA, SolidWorks...

Овај програмски пакет налази примену у инжењерству, дизајну производа, уметности, археологији као и у медицини.

- Програмски пакет Femap



Femap (Finite Element Modeling And Postprocessing) је програм за инжењерску анализу, који се користи за креирање коначних елемената модела добијених из комплексних инжењерских проблема као и за приказивање резултата решења.

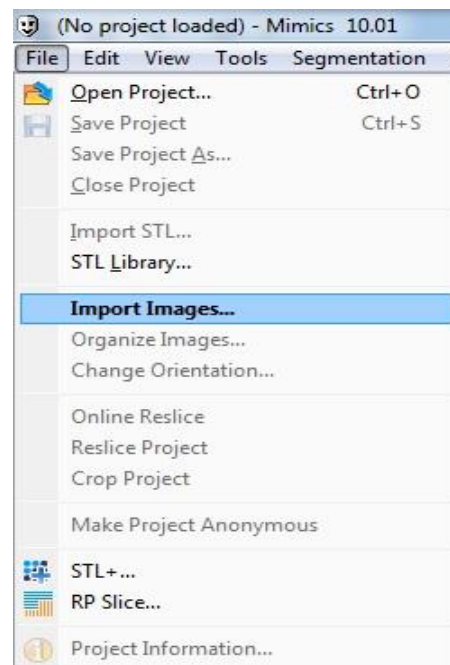
Користи се за моделирање сложених производа, система и процеса.

4.2. ИЗРАДА 3D МОДЕЛА

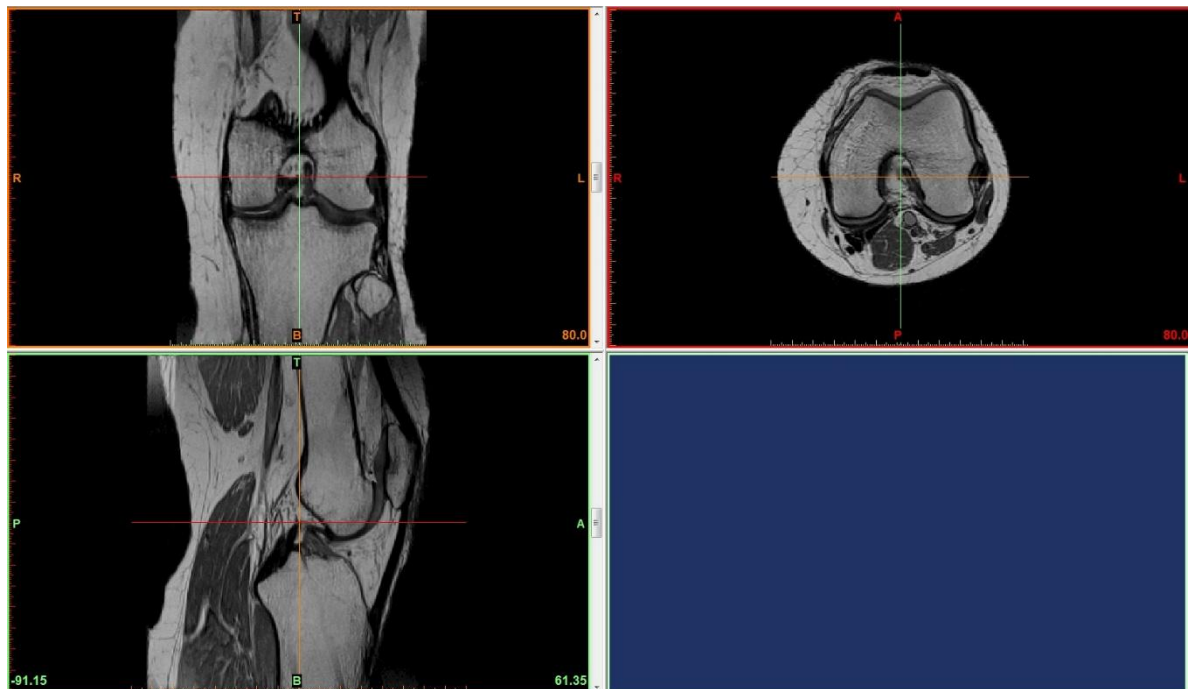
4.2.1. ПРОГРАМСКИ ПАКЕТ MIMICS

За почетак израде модела колена коришћен је програмски пакет Mimics. Рад је обухватио следеће:

1. Учитавање постојећих СТ снимака - потребно је изабрати опцију File, па из падајућег менија селектирати опцију Import Images и изабрати снимак из одговарајућег фолдера (слика 16).
2. Означавање делова колена - након што је отворен жељени фајл, на екрану ће бити видљив снимак колена, на коме ће вршити означавање делова, што је приказано на слици 17. Екран је подељен на четири дела. У горњем левом углу је поглед спреда, а у горњем десном поглед одозго. У доњем делу екрана је поглед с лева (леви део) и простор на коме се приказује добијени модел (десно). Затим се на уčitаном снимку означава део који нас занима. За сваки од наведених елемената модела колена било је неопходно урадити посебан модел, тако да је на крају постојало 11 различитих модела (бутна кост, голењача, лисњача, менискус, хрскавице и лигаменти), чијим спајањем је настао коначни модел, што је и био циљ рада.



Слика 16. – Учитавање снимака

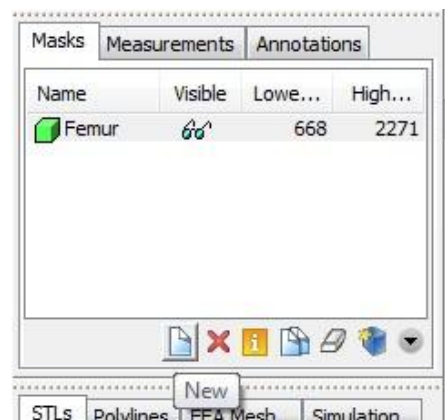


Слика 17. – Означавање делова колена

3. За детаљнији приказ добијања модела, као пример, узет је део бутне кости (фемур), за који је у наставку рада детаљно описан поступак моделирања. Како је поступак моделирања осталих елемената колена исти као и за поменути део, то ће у наставку рада бити дат само приказ добијених модела осталих елемената колена.

4.2.1.1. Приказ добијања модела (бутна кост)

Да би се започело са означавањем бутне кости са приказаног модела, неопходно је направити нову маску. Из падајућег менија прво изабрати View, Project Managment Tabs, а затим чекирати Masks. Изабрана палета ће се отворити у горњем десном делу екрана, поред погледа одозго (слика 18). Након тога потребно је изабрати иконицу за формирање нове маске и унети жељено име, у овом случају Фемур.



Слика 18. – Креирање маске

Компјутерско моделирање биомеханике колена

Потребно је још подесити праг, како би се разликовали кости и ткива на снимку. За то се користи Threshold, до кога се долази преко падајућег менија Segmentation, а затим избором опције Thresholding. (слика 19)

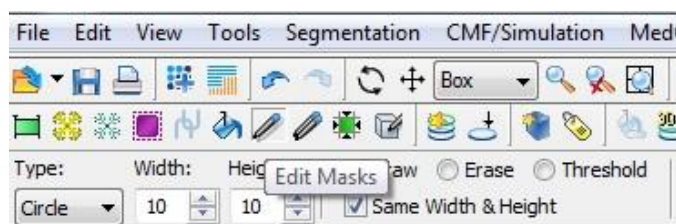


Слика 19. – Подешавање прага

У опцији Predefined thresholds set, изабрати кост (Bone), како би се лако разликовала од ткива које се налази око кости.

Остало је да се уради још један корак, пре почетка означавања модела. Из падајућег менија Segmentation, треба изабрати Edit Masks, чиме се покреће опција која омогућава означавање слоја снимка (слика 20). Оловка може бити у облику круга, квадрата или слободног облика који корисник може нацртати приликом означавања.

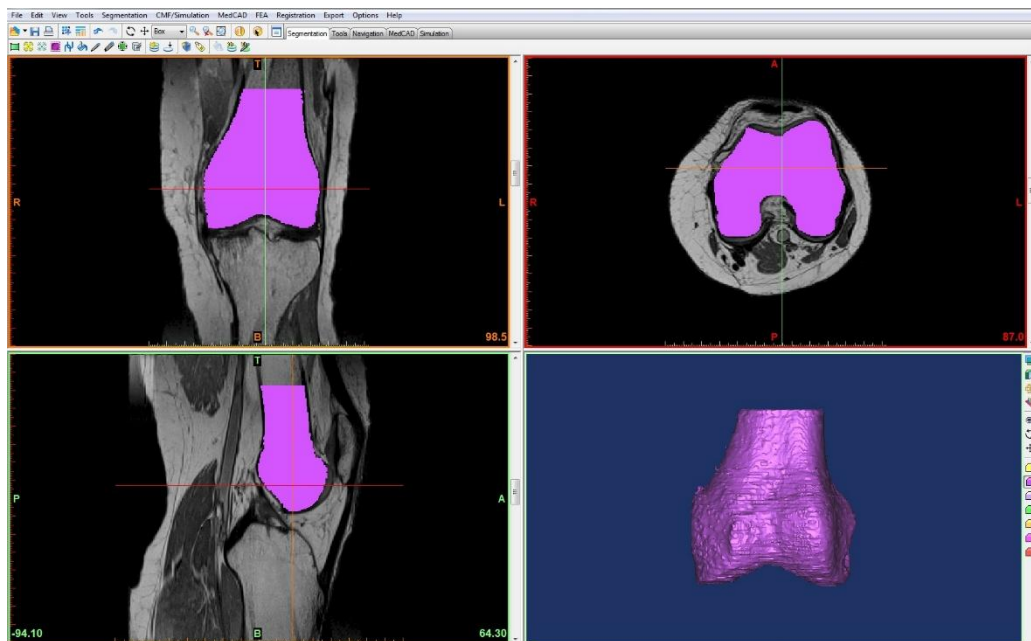
При изради модела колена, коришћена је оловка у облику круга. Такође, осим за означавање модела, ова опција се може користити и за уклањање означеног вишка.



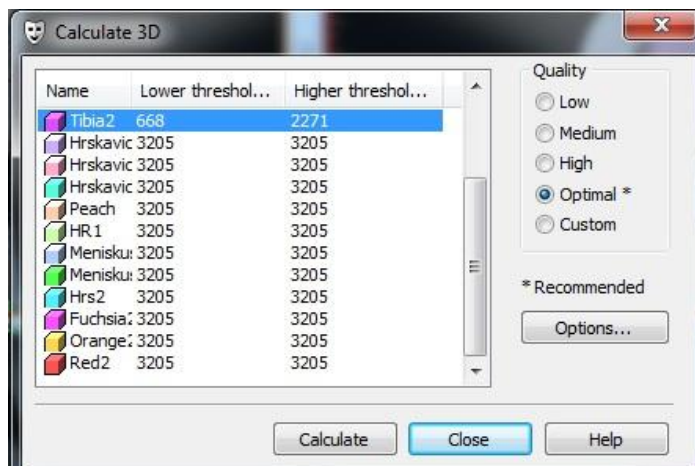
Слика 20. – Избор оловке за означавање снимка

Након формирање маске, избора прага и оловке, могуће је даље кренути са формирањем модела. На почетку је веома битно изабрати добру раван, како би било могуће прецизно означити тај слој снимка. Код моделирања фемура, означавање је започето код погледа одозго, јер је то био најбољи начин да се кост лепо види и прецизнозначи. Након означавања почетног слоја, корисник прелази на нижи слој (или виши у зависности од места почетка означавања), где се процес понавља. Ова операција се наставља све до последњег слоја на снимку, након чега модел изгледа као на слици 21.

Компјутерско моделирање биомеханике колена



Слика 21. – Означавање слојева бутне кости



Слика 22. – Креирање модела

Поступак добијања осталих модела је исти, с тим што је веома важно водити рачуна да модели буду анатомски веома прецизни, како би се процес обраде модела олакшао.

Да би се добио модел приказан у доњем десном углу, на слици 21, потребно је још из падајућег менија Segmentation изабрати опцију Calculate 3D. Након што се отвори прозор за ову опцију, потребно је изабрати одговарајућу маску и кликнути на дугме Calculate.

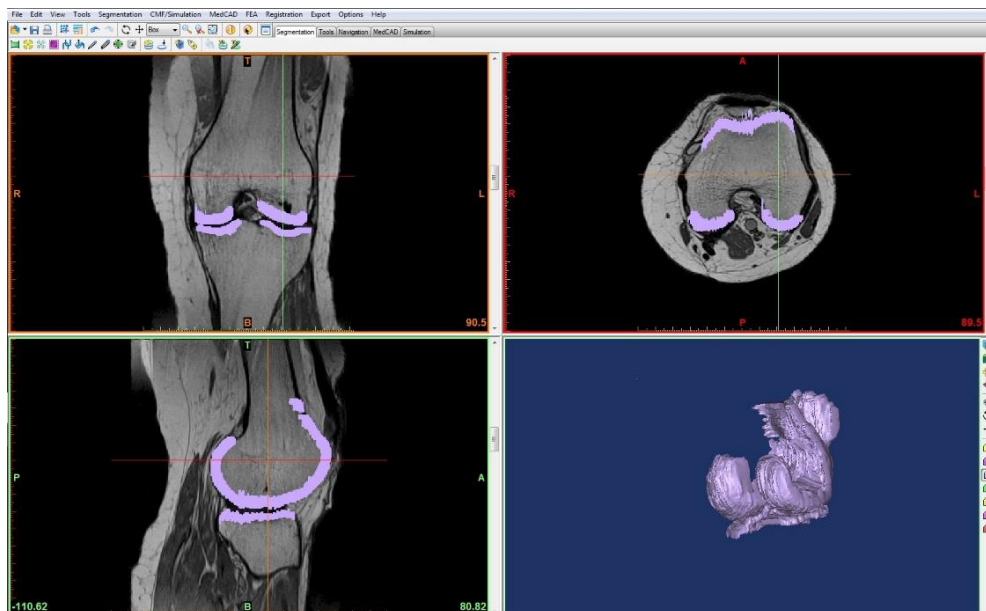
Резултат ове опције приказан је у доњем десном углу слике 22.

4.2.1.2. Приказ осталих добијених модела

Остали добијени модели приказани су на сликама у следећем делу рада. Као што је већ речено у даљем делу рада неће се опет објашњавати приказ добијања, јер је поступак већ објашњен у тачки 4.2.1.

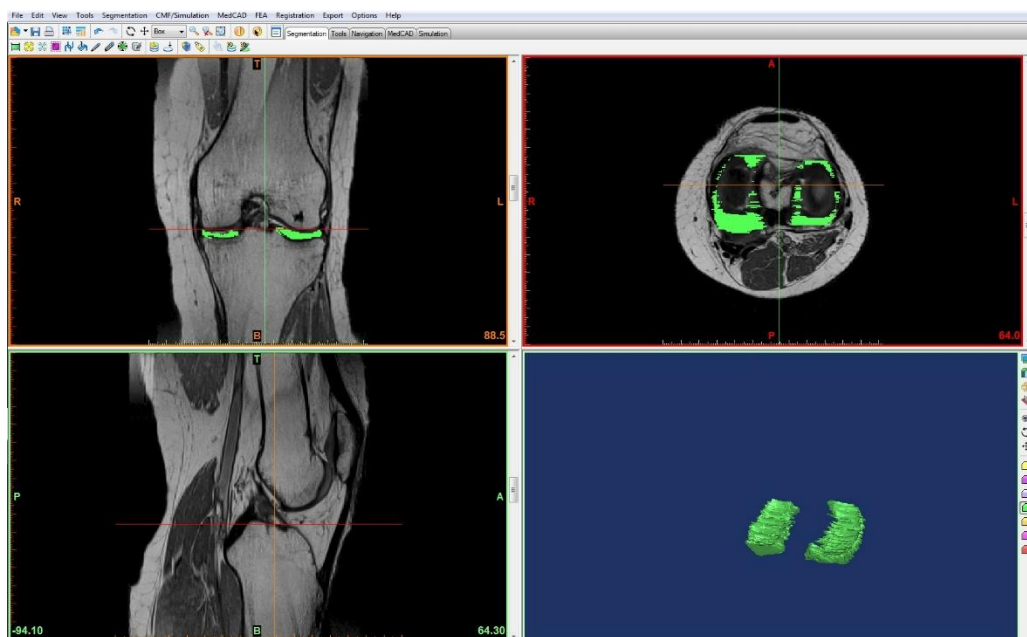


Слика 23 – Модел лисњаче и голењаче

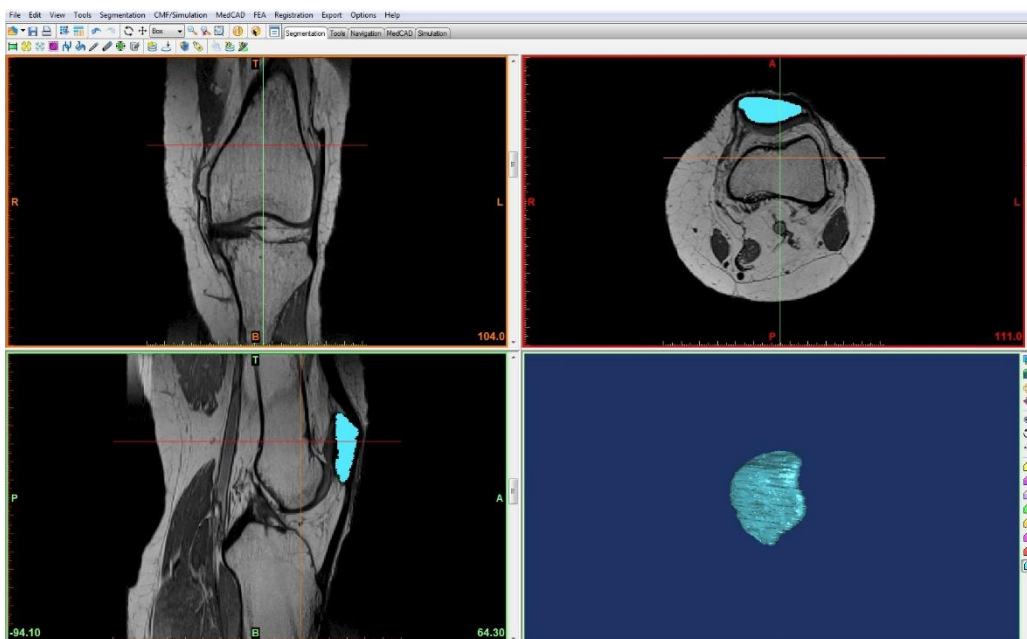


Слика24. – Модел хрскавице

Компјутерско моделирање биомеханике колена

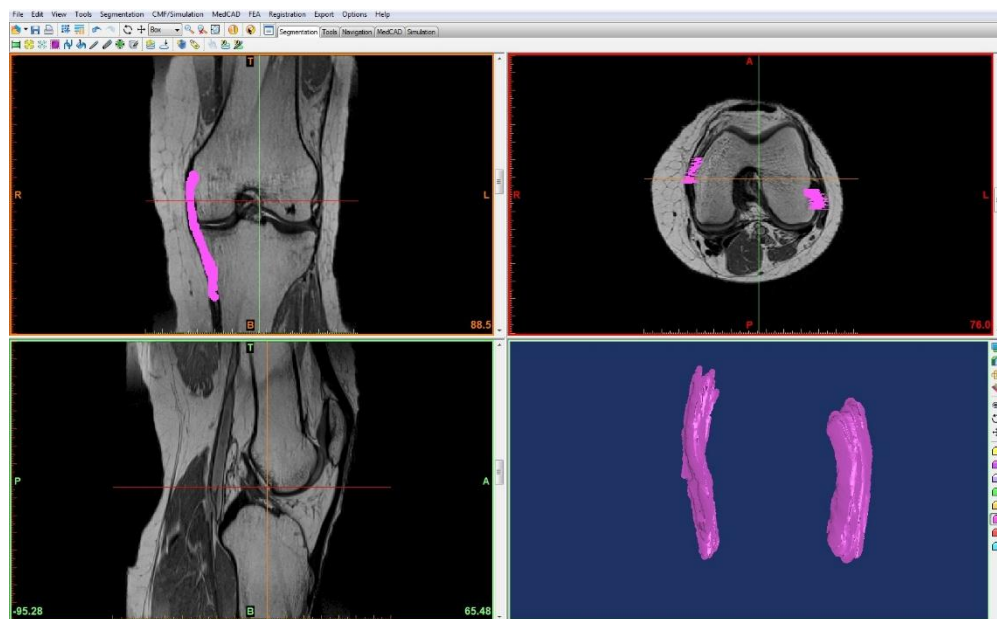


Слика 25. – Модел менисуса

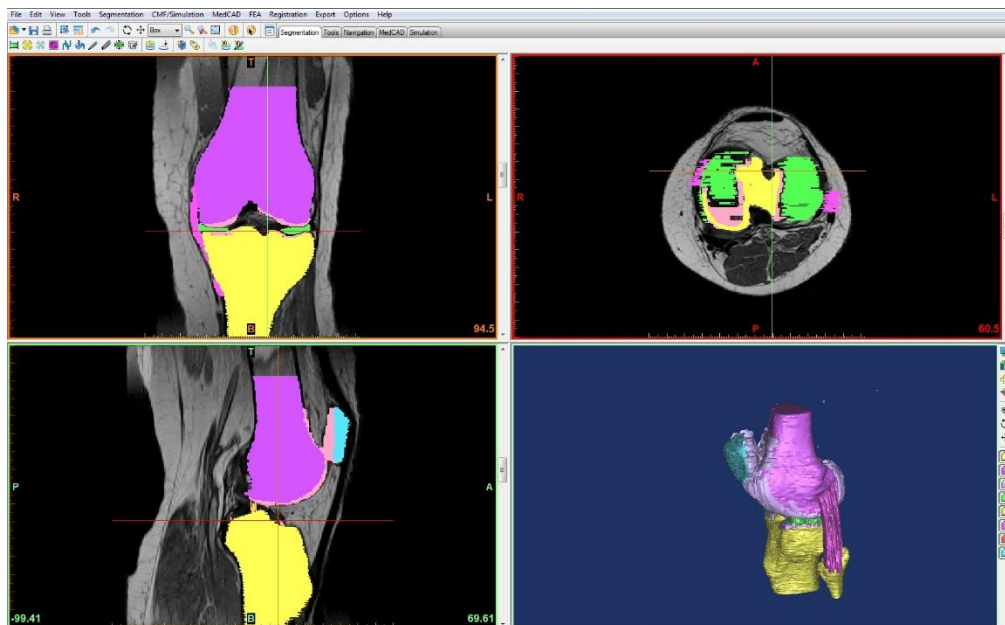


Слика 26. – Модел чашице

Компјутерско моделирање биомеханике колена



Слика 27. – Модел лигамената



Слика 28. – Модел колена састављен од претходних елемената

Добијени модели елемената колена, су експортирани из програма у формату .stl, како би се омогућила даља обрада у програму Geomagic.

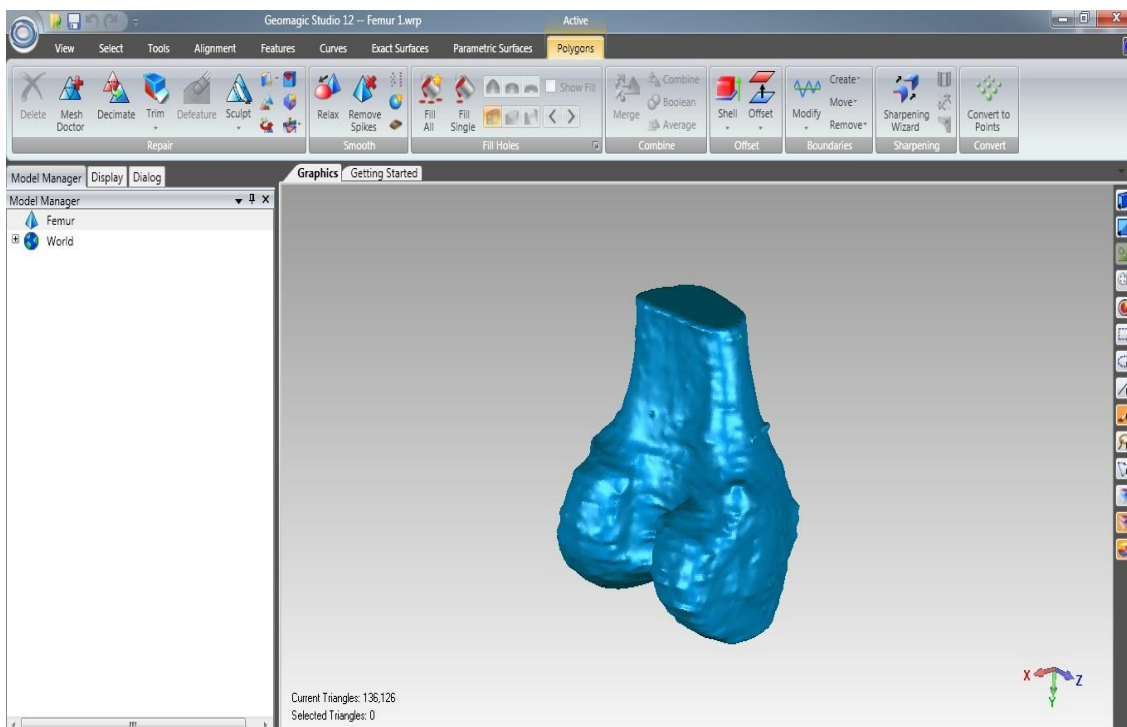
4.2.2. ПРОГРАМСКИ ПАКЕТ GEOMAGIC

4.2.2.1. Приказ сређивања модела (бутна кост)

Програм Geomagic се користи како би се добијени 3D модел даље обрадио. Сваки од претходно приказаних елемената је прошао кроз обраду, која је имала за циљ смањење броја елемената мреже, као и обраду ивица како би се уклонила оштре ивице и добила уједначена мрежа.

Као и у претходном делу рада, биће детаљно описан начин обраде за један елемент, док ће остали елементи бити приказани помоћу слика, без додатног објашњења, јер је процес исти.

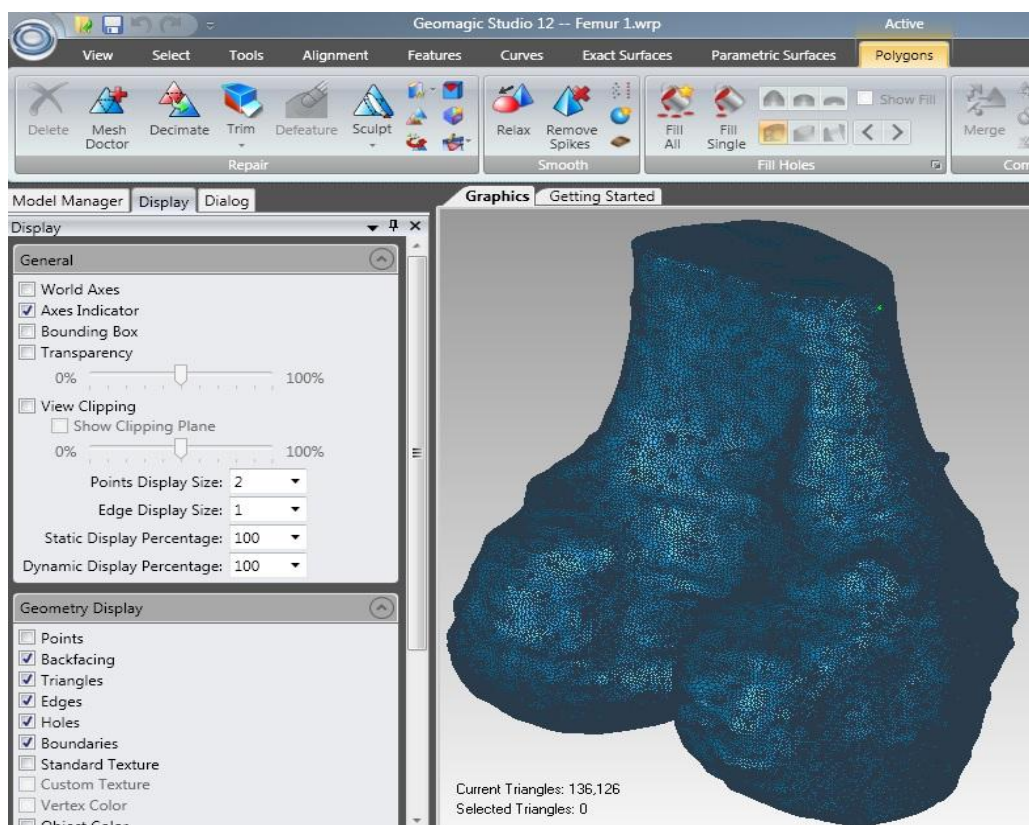
Снимањем фајла из програма Mimics у одговарајућем формату (.stl), омогућено је повезивање ова два програма, односно могуће је учитати добијени модел (слика 29). За објашњење процеса, опет ће се користити модел бутне кости.



Слика 29. – Учитан модел из Geomagic-a

Компјутерско моделирање биомеханике колена

Да би се видела мрежа модела, потребно је кликнути на Display, који се налази на левој страни програма, а затим из дела Geometry Display, чекирати опцију Edges. Резултат ове опције приказан је на слици 30.



Слика 30. – Изглед модела са укљученом мрежом

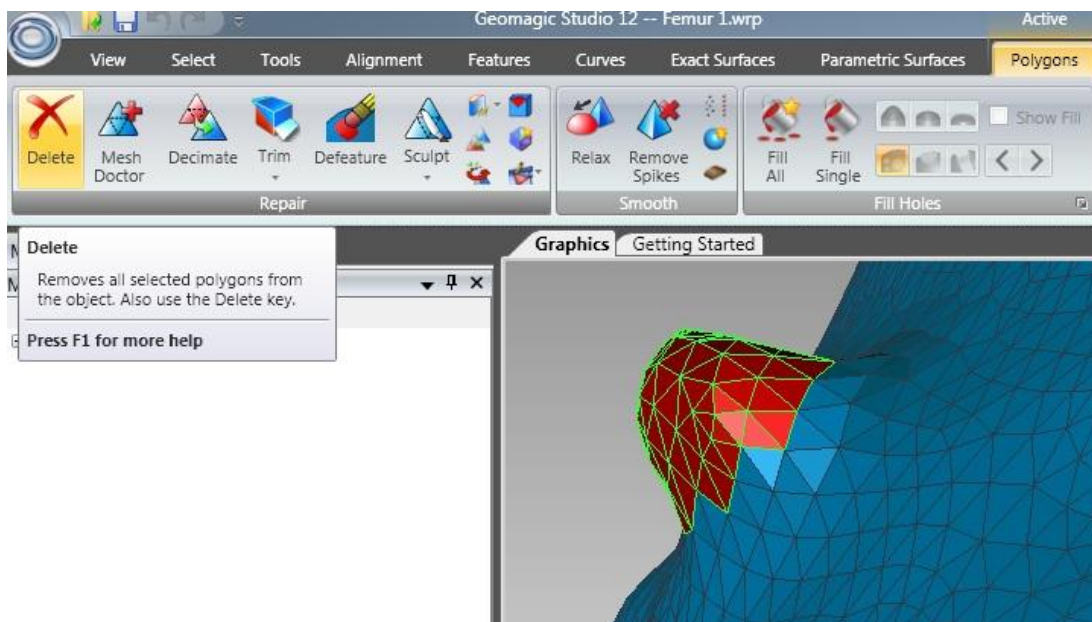
За означавање елемената користе се алати који се налазе у палети Tools, у делу Mode, где се бира између селекције елемената по површини или селекција кроз цео модел и Tools, где се бира облик селекције елемената, као што је нпр. правоугаоник, елипса и сл. (слика 31).



Слика 31. – Палета Select

Компјутерско моделирање биомеханике колена

Коришћени модел има велики број оштрих ивица које је неопходно уклонити. Уклањање вишка материјала се врши тако што се прво изабере облик селекције елемената и да ли се селекција врши по површини или по целом моделу. Након тога означени део мреже се уклања притиском на опцију Delete, која се налази у палети Polygons, у делу Repair. (слика 32)



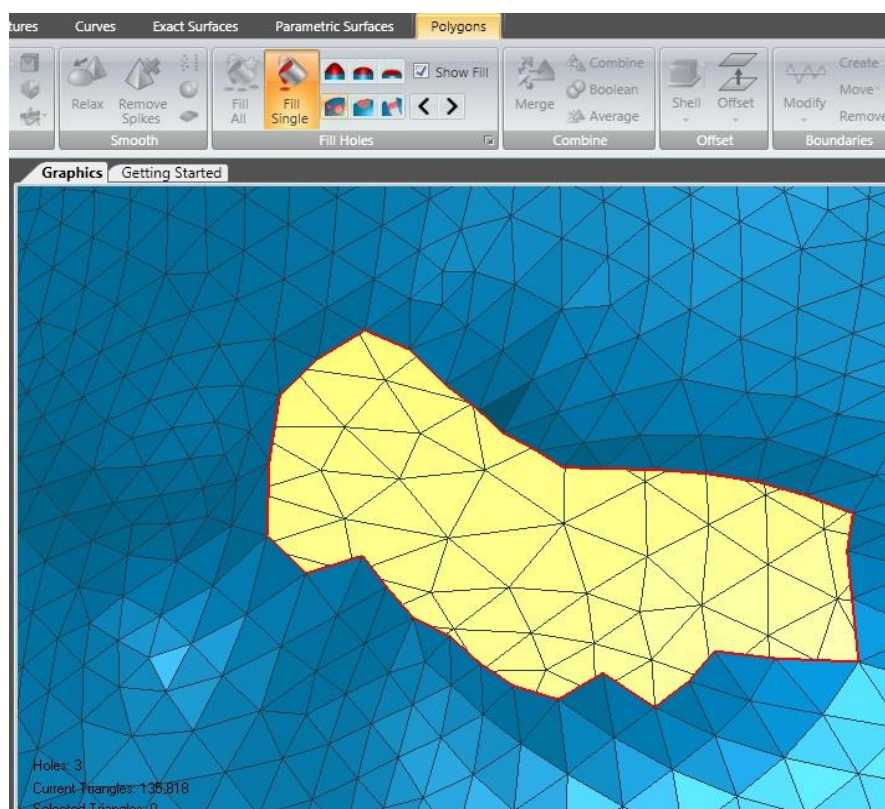
Слика 32. – Означавање дела модела за брисање

Након тога потребно је попунити мрежу, али тако да прати одговарајућу геометрију мреже. За то се користи опција Fill Holes из палете Polygons. У оквиру ове опције могуће је бирати између три начина попуњавања рупа (слика 33):

Complete – цела рупа ће бити попуњена одмах. Потребно је само кликнути на ивицу рупе.

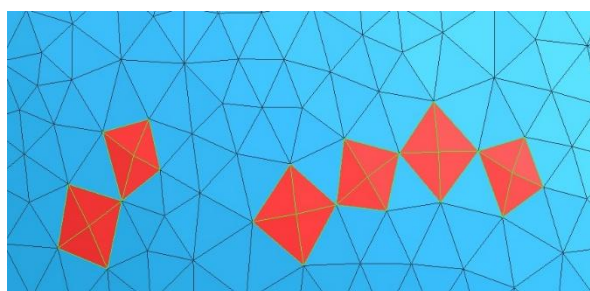
Partial – попуњава се само жељени део рупе. Потребно је изабрати почетак и крај области која се попуњава, а затим изабрати да ли ће рупа бити попуњена са леве или десне стране границе.

Bridge – користи се за прављење моста између две стране рупе, с тим што се добијају две независне мање рупе, које се након тога могу лакше и правилније попуњавати. Потребно је изабрати две ивице које ће спајањем формирати мост и раздвојити рупу.

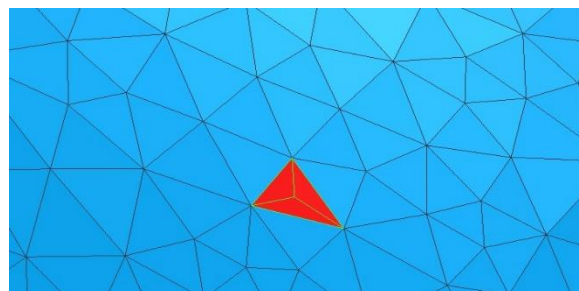


Слика 33. – Изглед модела након брисања елемената

Када је процес уклањања вишка и попуњавања рупа завршен, прелази се на сређивање мреже модела бутне кости. Потребно је проверити положаје суседних елемената, који су приказани као троуглићи. На слици 34 приказани су примери недозвољених положаја суседних елемената мреже.



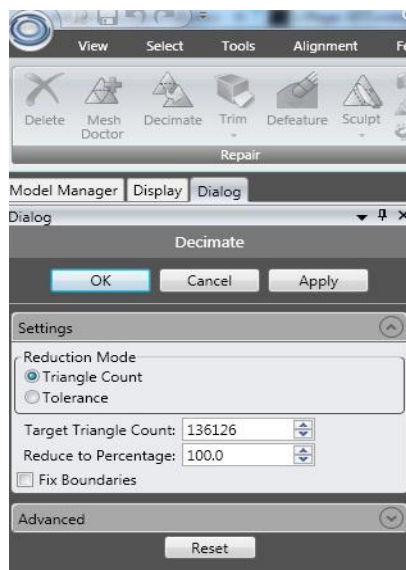
a)



b)

Слика 34. – Недозвољени изгледи елемената модела

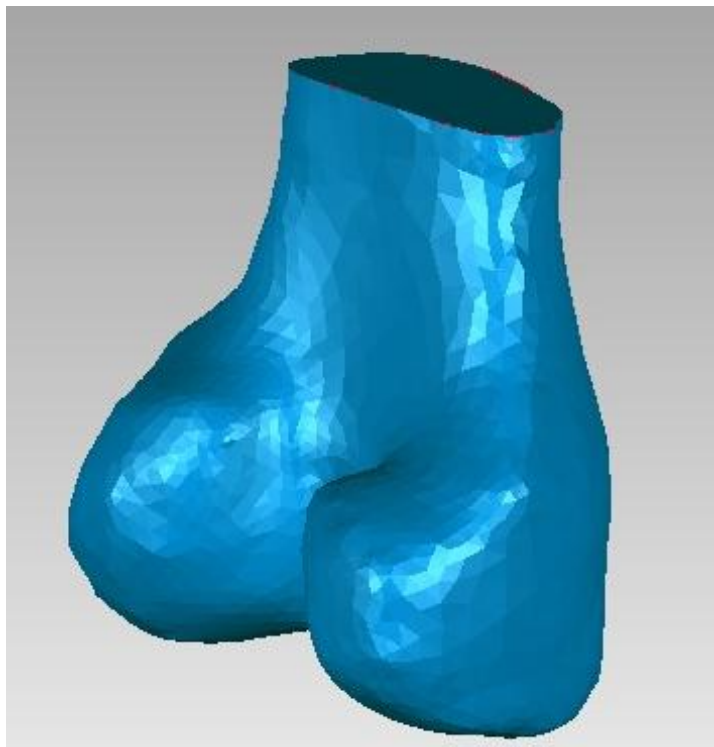
Након откривања недозвољеног међусобног положаја суседних елемената, неопходно је селектирати их, а затим их обрисати из мреже модела. Празнина која је настала, услед отклањања неодговарајућих елемената, се попуњава на начин који је већ описан.



Циљ сређивања мреже је, осим сређивања облика, смањење броја елемената. Опција којом се може смањити број елемената се налази у палети Polygons, и затим се изабере Decimate код опција Repair (слика 35). Важно је водити рачуна да се број елемената нагло не смањи за велики број, да не би дошло до нарушавања геометрије.

Слика 35. – Смањење броја елемената

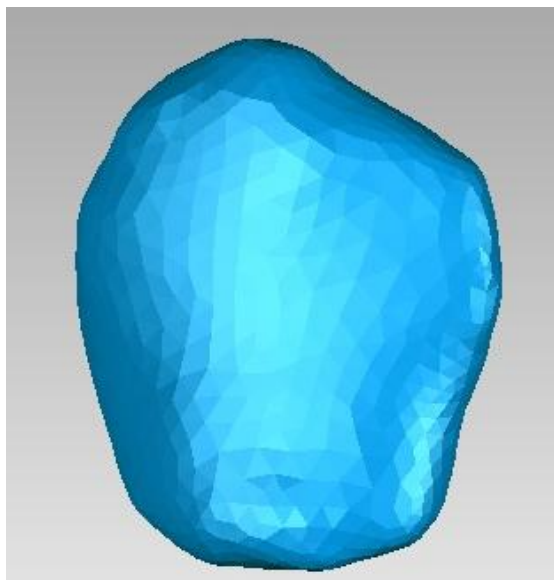
Након завршетка свих претходно описаних корака, модел бутне кости изгледа као на слици 36.



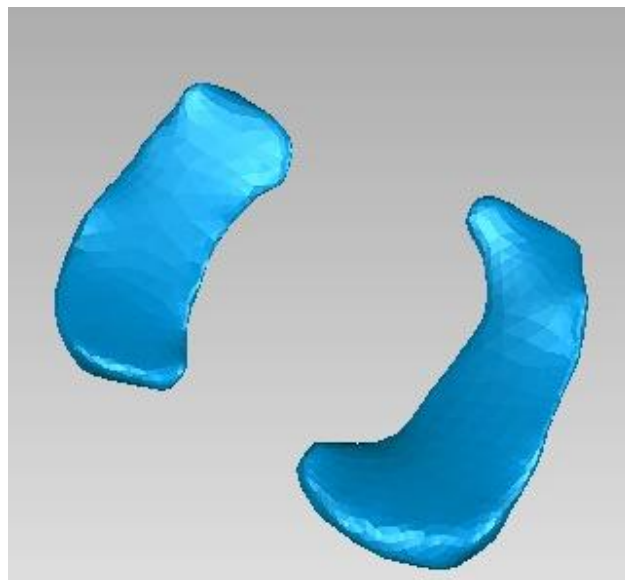
Слика 36. – Сређени модел бутне кости

4.2.2.2. Приказ осталих сређених модела

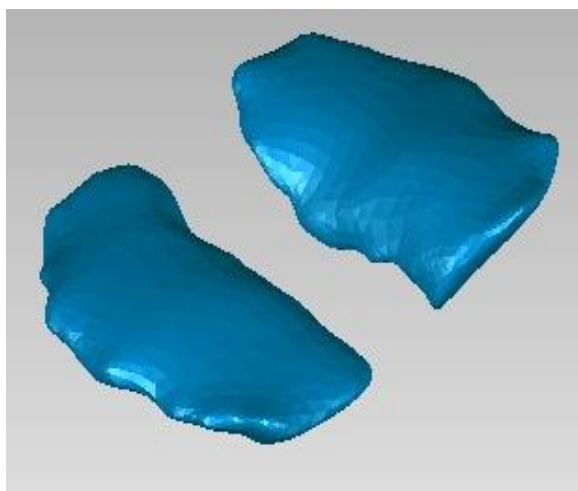
Као што је већ написано, биће само дат приказ осталих следећих модела, без додатног објашњења.



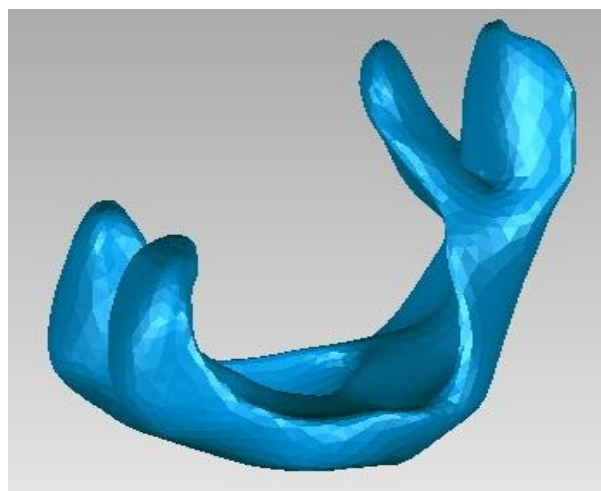
Слика 37. – Сређена чашаца



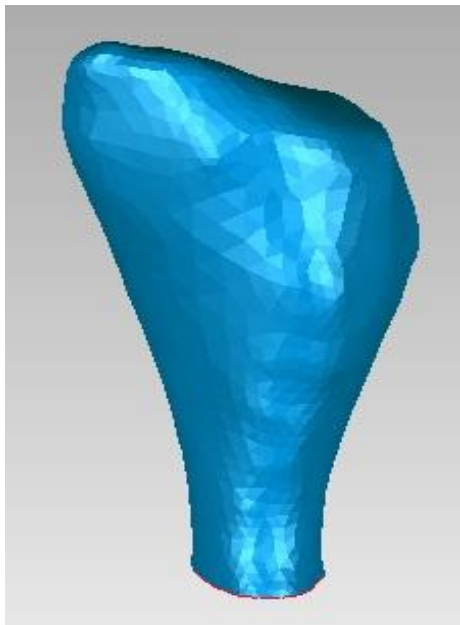
Слика 38. – Сређени менискус



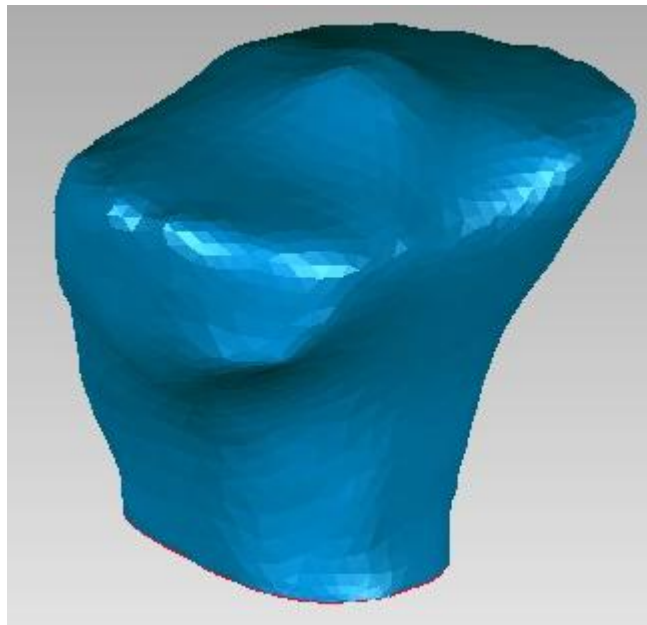
Слика 39. – Сређена хрскавица



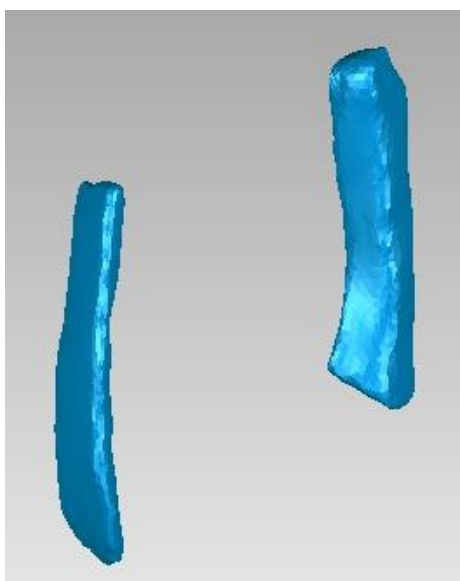
Слика 40. – Сређена хрскавица



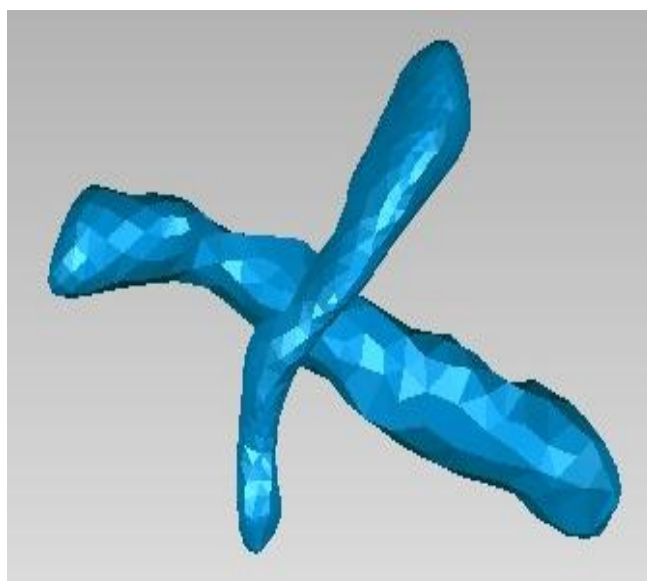
Слика 41. – Сређена лисњача



Слика 42. – Сређена голењача



Слика 43. – Сређени лигаменти

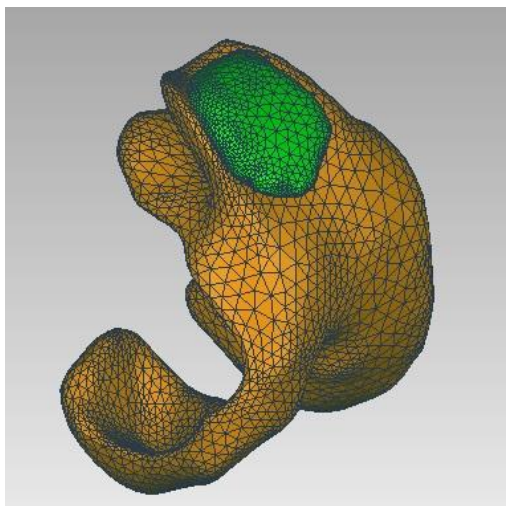


Слика 44. – Сређени лигаменти

4.2.2.3. Сређивање модела за спајање (хрскавица и чашица)

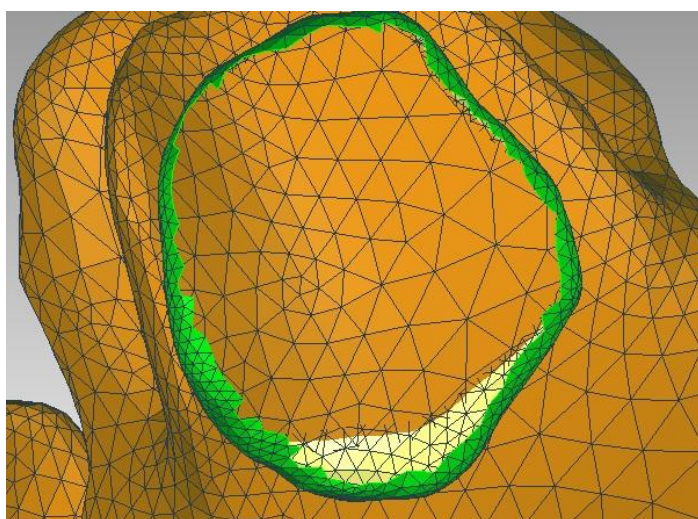
Како се модел колена састоји од већег броја елемената, неопходно је појединачне моделе припремити како би било могуће налагање чвор на чвор.

У овом делу процес спајања ће бити приказан помоћу модела хрскавице и чашице. Пре почетка спајања неопходно је да модели буду сређени као што је приказано на претходним сликама.



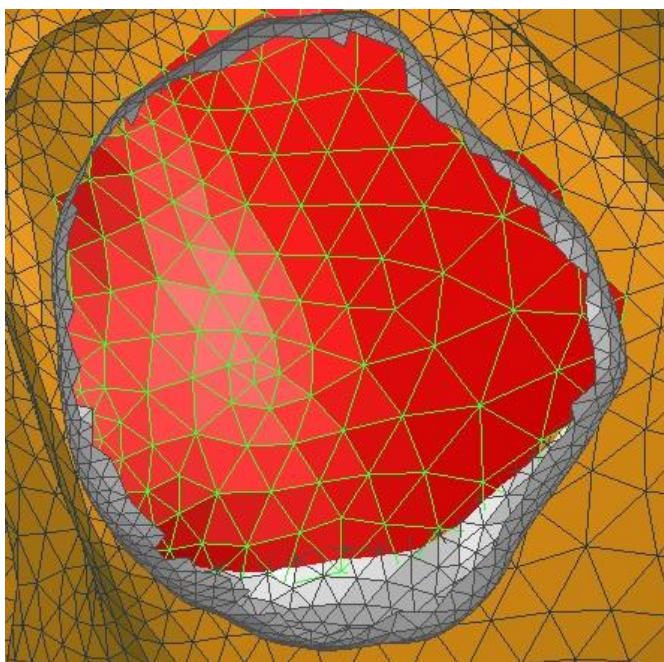
На почетку је потребно учитати оба модела у један фајл, у овом случају модел чашице и хрскавице (слика 45). Наранџасто је приказана хрскавица, а зелено чашица.

Слика 45. – Учитани модели хрскавице и чашице



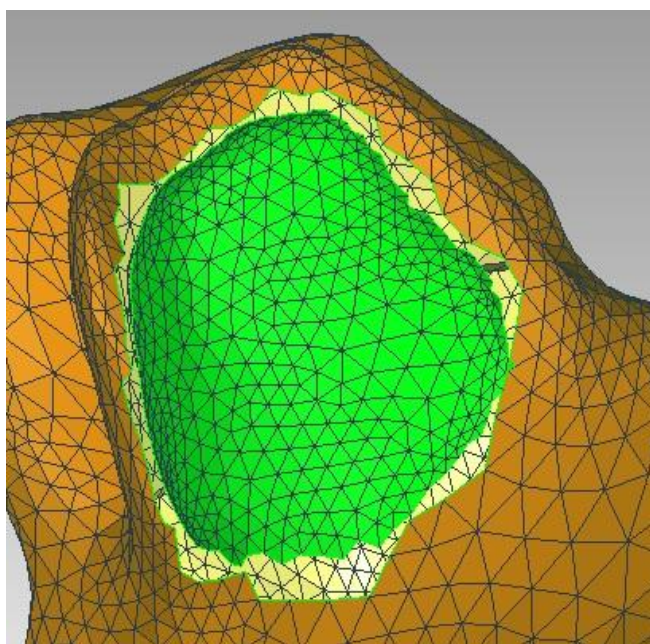
Поступак рада је следећи. Најпре је уклоњења горња површина чашице, како би се видело место на коме се преклапају површине ова два модела (слика 46)

Слика 46. – Уклањање вишка материјала



Са слике се примећује да је доња површина чашице испод површине хрскавице. Због тога је неопходно означити површину хрскавице која се налази унутар чашице (слика 47)

Слика 47 – Означавање вишка материјала хрскавице



Означена површина се уклања, као и вишак мреже хрскавице, а резултат је приказан на слици 48.

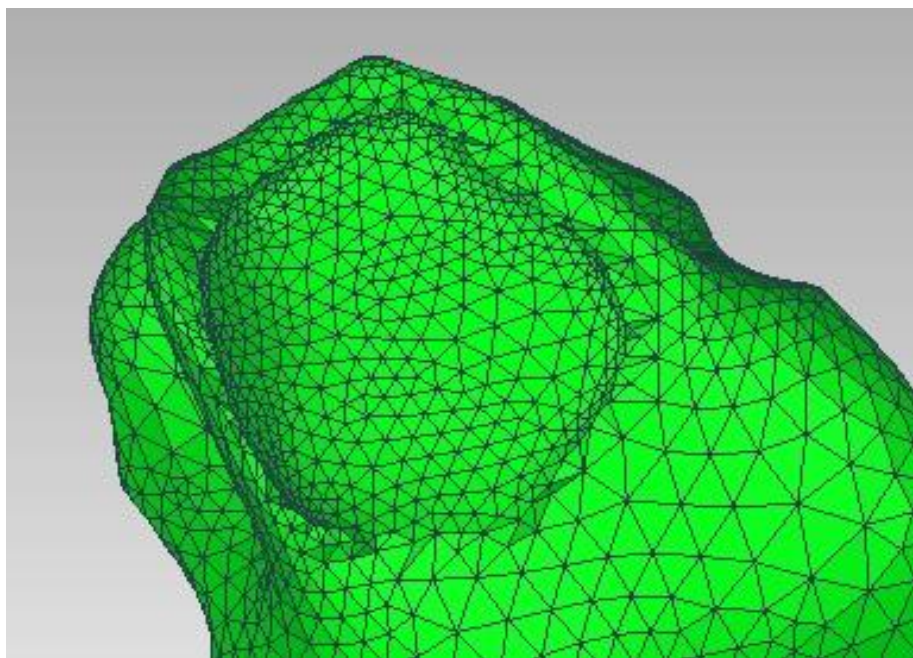
Слика 48 – Модел спреман за почетак спајања елемената

Компјутерско моделирање биомеханике колена

Следећи корак је изабрати чашицу из стабла, а затим из палете Polygons, изабрати опцију Repair, а затим изабрати Repair Tools. Из падајућег менија треба изабрати Flip Normals, која ће заменити стране површине чашице, односно оно што је то тад била унутрашња страна, сад прелази у спољашњу, како би се омогућило спајање. Након ротирања нормале, потребно је спојити ова два модела у један, помоћу опције Combine, која је се налази у палети Polygons, а потом снимити у нови фајл.

На крају је још потребно спојити ове две површине, при чему је веома важно водити рачуна о томе, да се елементи, који су преостали од чашице, не помере, јер касније при спајању модела, неће бити могуће спојити чвор на чвор. Спајање се врши коришћењем функције Bridge, која је претходно описана, са циљем да се формирају мањи отвори који ће се лако и правилно попунити.

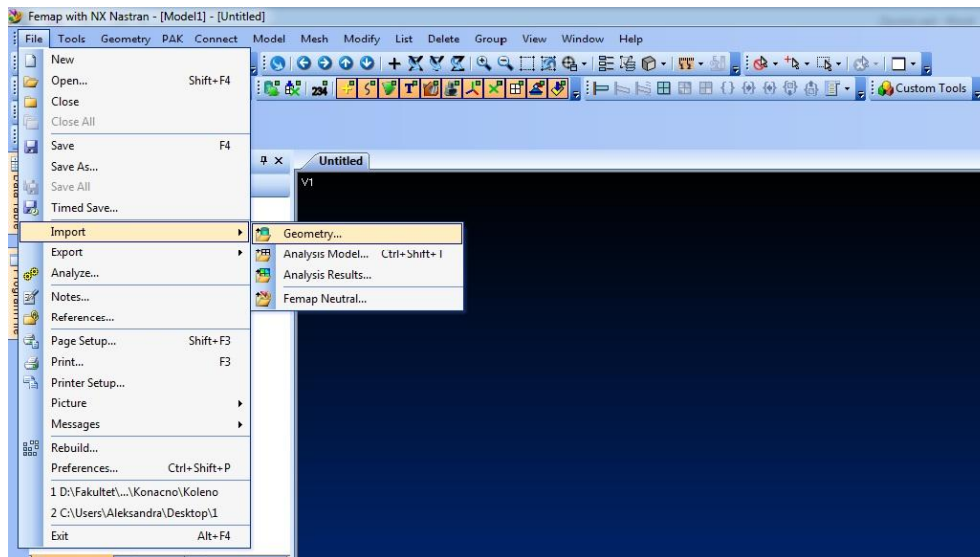
На слици 49 је приказан добијен модел, који ће се касније користити при спајању модела целог колена. Након попуњавања простора, потребно је проверити да ли је при спајању настала нека оштра ивица или се појавио неки од недозвољених изгледа суседних елемената, који су претходно описани.



Слика 49 – Спојени елементи хрскавице и чашице

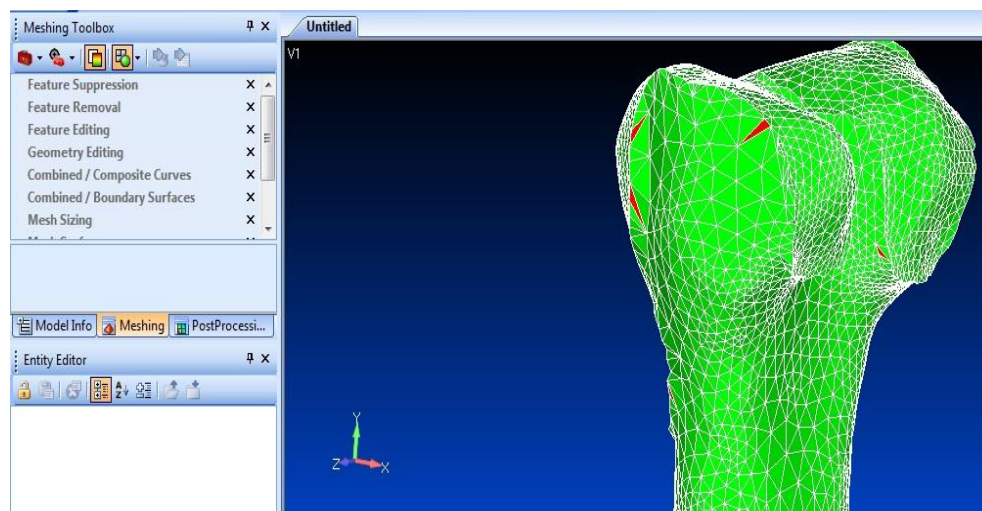
4.2.3. ПРОГРАМСКИ ПАКЕТ FEMAP

Након завршетка израде модела и његове обраде у програму Geomagic, неопходно је покренути програм Femap, где се врше провере и измене мреже, као и спајање елемената.



Слика 50 – Учитавање модела

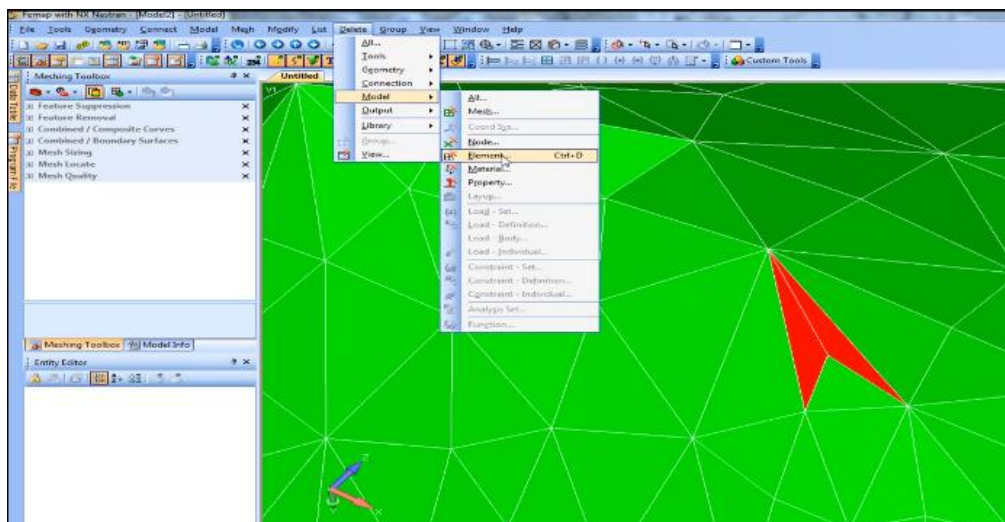
На слици 50 је приказан начин учитавања фајлова обрађених у Geomagic-у. Неопходно је да фајлови буду снимљени у .stl формату.



Слика 51. – Проверавање грешака модела

Компјутерско моделирање биомеханике колена

Након учитавања модела, неопходно је укључити опцију Quality која омогућава приказ елемената. То је неопходно како би се видело да ли постоје неке грешке, које нису уклоњене током рада у програму Geomagic. Уколико постоје неке грешке, ти елементи биће приказани црвеном бојом (слика 51).



Слика 52 – Елементи које је потребно уклонити

Уклањање неодговарајућих елемената се врши избором команде Delete > Model > Element. На почетку је потребно изабрати елементе који се бришу. Након брисања неодговарајућих елемената, потребно их је заменити. То се врши избором команде Model > Element, и затим бирањем три одговарајуће координате елемента. Након формирања нових елемената, потребно је опет проверити помоћу команде Quality да ли је све у реду. Поступак се понавља докле год постоје елементи који су означени црвеном бојом.

Када се заврши са провером и сређивањем мреже, потребно је прво на основу елемената направити модел са запремином. То се постиже избором Mesh > Geometry > Solids from Elements. На крају је потребно још извршити ренумерацију елемената и чворова. Ово се врши коришћењем команде Modify > Renumber > Element за елементе и Modify > Renumber > Node за чворове.

У табели 1 дат је приказ вредности за елементе (први и последњи) и чворове (први и последњи) након ренумерације.

Лигамент_u_1 представља унутрашњи лигамент који спаја бутну кост и голењачи.

Лигамент_u_2 представља унутрашњи лигамент који спаја бутну кост и хрскавицу

Компјутерско моделирање биомеханике колена

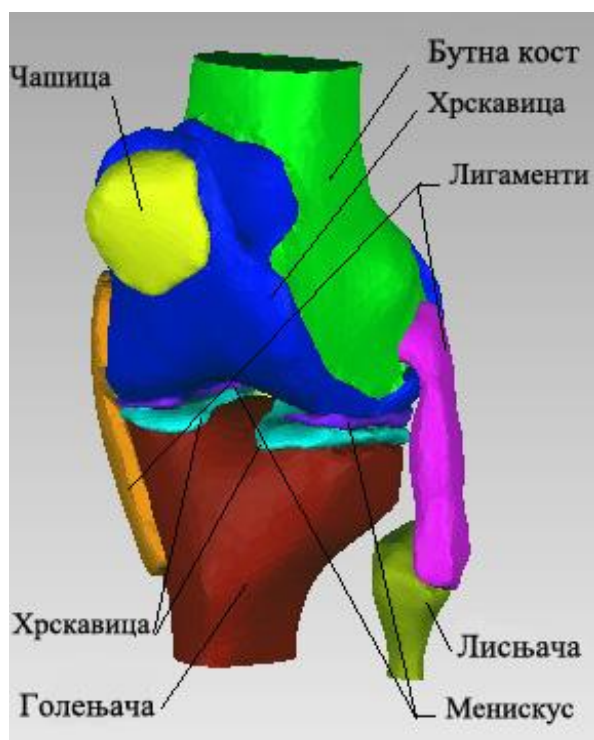
Табела 1 . – Вредности елемената и чворова након ренумерације

Елемент склопа	Елементи		Чворови	
Бутна кост	1	12667	1	4221
Голењача	12668	20838	4222	7011
Лисњача	20839	23744	7012	8098
Чашица	23745	27480	8099	9377
Хрскавица_бутна кост	27481	45899	9378	15391
Хрскавица_голењача	45900	52812	15392	17944
Менискус	52813	59917	17945	20604
Лигамент_голењача	59918	62852	20605	21654
Лигамент_лисњача	62853	64883	21655	22410
Лигамент_у_1	64884	65724	22411	22760
Лигамент_у_2	65725	66294	22761	23008

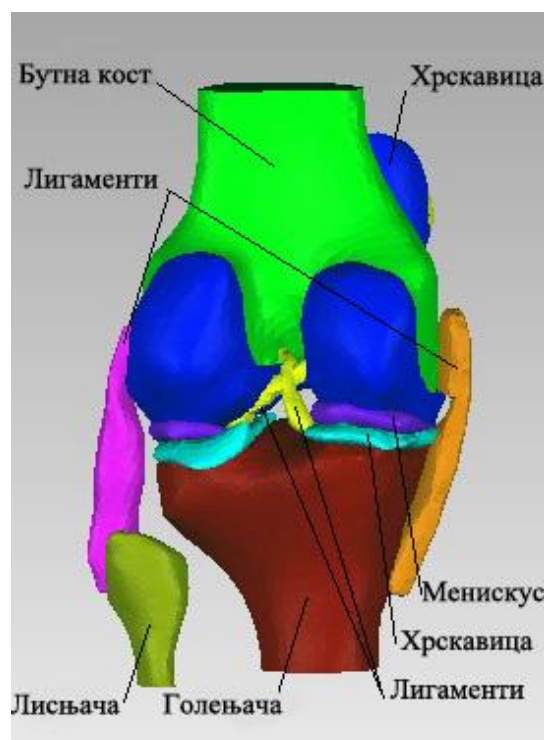
Ренумерација елемената и чворова се врши одвојено за сваки део колена. Након ренумерације сви делови се извозе из програма Femap у облику .dat фајла. Када се заврши извоз сваког дела, отвара се нови фајл, при чему се сви елементи увозе у .dat формату. Када се заврши увоз, потребно је проверити да ли се неки чворови поклапају. Ако има таквих чворова потребно је да се изврши њихово спајање. Након тога се врши ренумерација чворова целог колена и следи извоз добијеног модела у .dat формату за даљу обраду.

4.3. ДОБИЈЕНИ МОДЕЛ

Након завршетка свих операција, које су описане у претходна три програма, добија се 3D модел колена. На слици 53 приказан је добијени модел.



a)



b)

Слика 53- Добијени модел колена

У наредном делу рада, користе се .dat фајлови, претходно извезени из програма Femap. Ове фајлове је потребно прилагодити и средити, како би било могуће извршити прорачун.

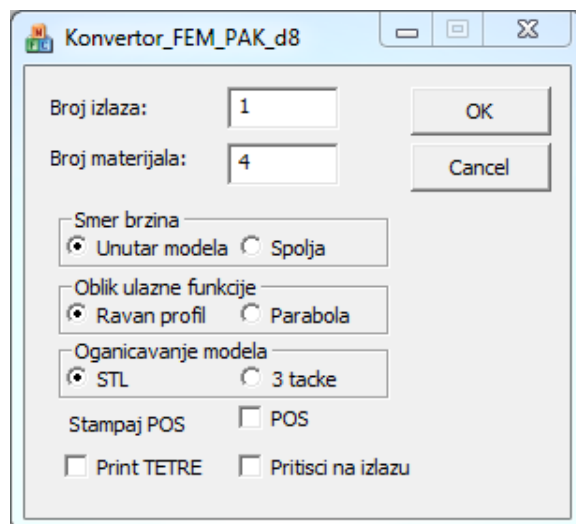
5. ПРОРАЧУН ПОМЕРАЊА КОЛЕНА

5.1. ПРИПРЕМА ЗА ПОЧЕТАК ПРОРАЧУНА

Као што је већ речено, добијени .dat фајлови, нису погодни да би се прорачун одмах извршио, већ је потребно прво њих прерадити.

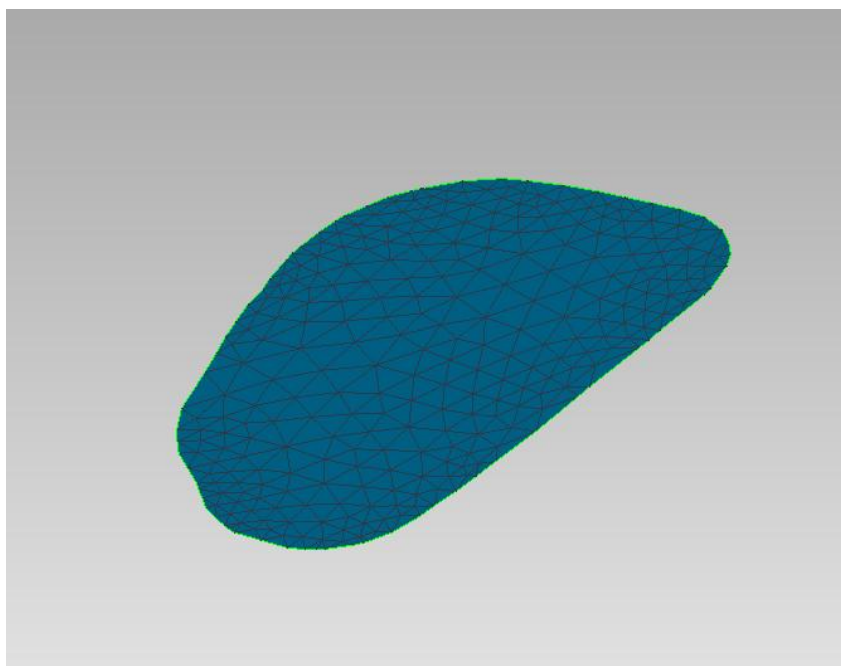
За сређивање је коришћен програм за конверзију елемената из Femap-а у одговарајући облик како би се могли учитати у програму РАКС.

Конвертор је приказан на слици 54. Када се програм стартује потребно је на почетку унети број излаза (у овом случају 1) и број елемената (у овом случају 4 – кост, хрскавица, менискус и лигаменти)



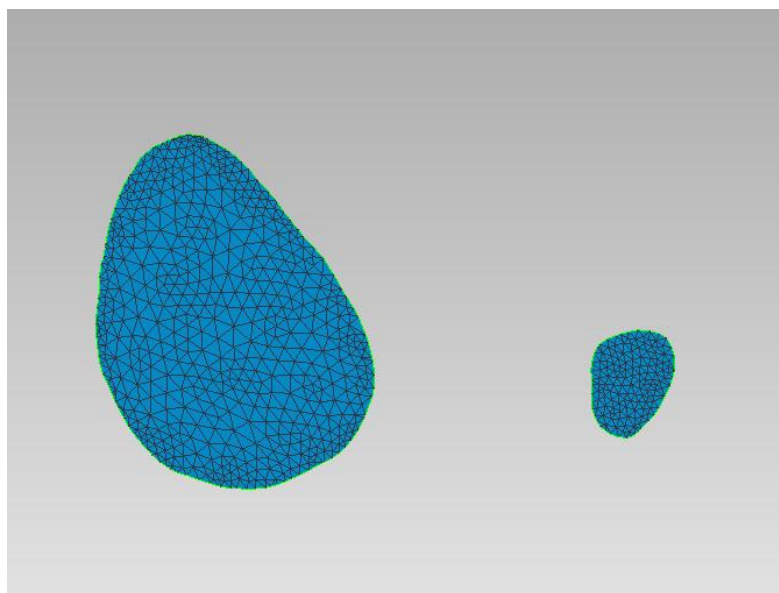
Слика 54 – Програм за конвертовање

Након уношења ових података, програм ће тражити да се унесе улазни фајл у .stl формату. Тај улазни фајл представља површину која је оптерећена (слика 55), у овом случају површина бутне кости.



Слика 55 – Изглед улазног фајла

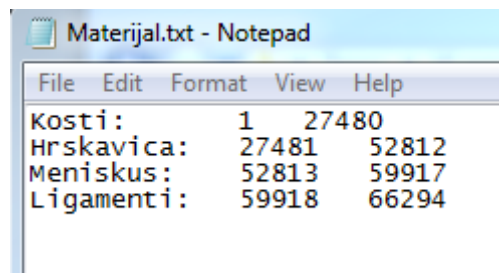
Када се заврши са учитавањем улазног фајла, потребно је унети и излазни, у овом случају површине лисњаче и голењаче, које су укљештене. (слика 56).



Слика 56 – Изглед излазног фајла

Компјутерско моделирање биомеханике колена

На крају од података је потребно још унети .txt фајл који садржи информације о материјалима, тачније распоред материјала у мрежи елемената (слика 57).

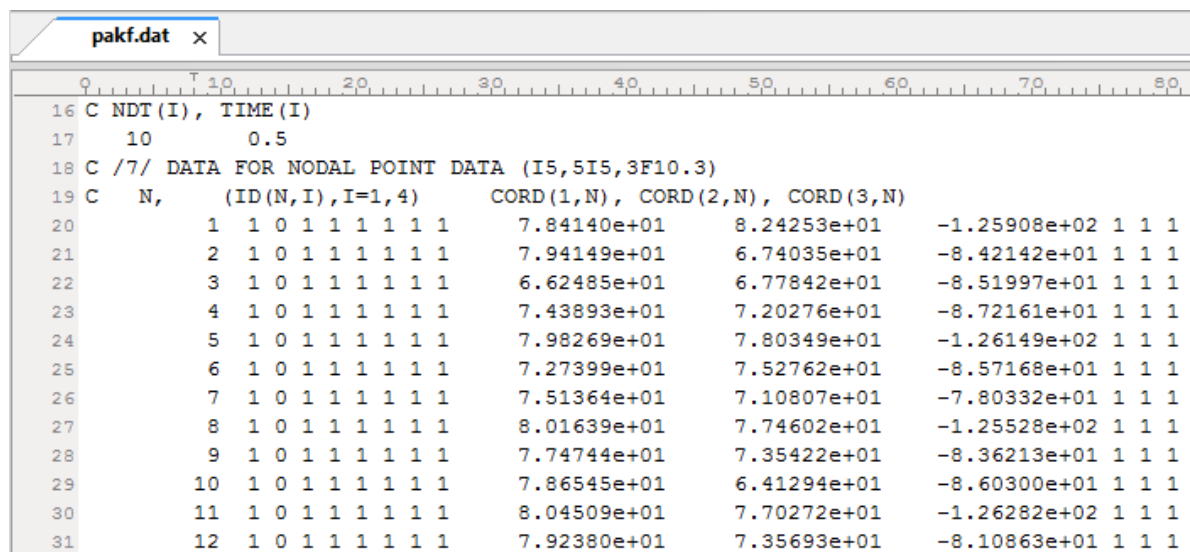


Слика 57 – Подаци о материјалима

Када програм заврши са конверзијом, на основу унетих података добија се нови фајл, у коме је потребно направити још неке измене пре почетка прорачуна. Потребно је дефинисати ограничења, затим функцију по којој се врши померање колена итд.

За отварање и обраду добијеног фајла, коришћен је програм UltraEdit.

У првом делу фајла, дат је списак свих чворова елемената са ограничењима и координатама чворова у простору (слика 58).

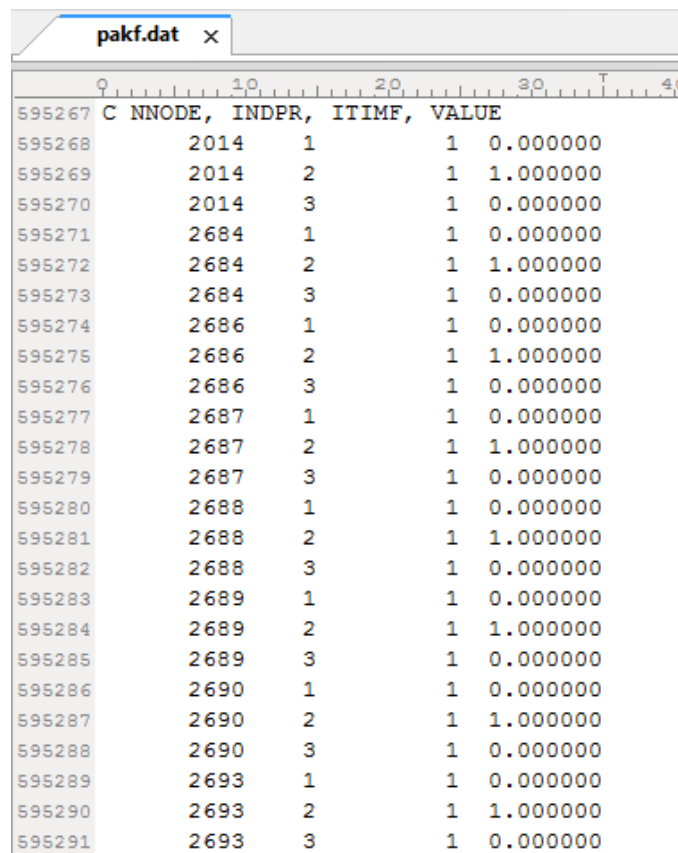


Слика 58 – Ограничење чворова

Након редног броја чвора, следеће три цифре представљају ограничење чвора по x, y, z оси. Модели су ограничени тако, да је могуће померање само дуж y осе, док су сви елементи ограничени по x и z оси. Површине лисњаче и голењаче су укљештене, тако да су елементи који се налазе на тим површинама ограничени и по y осе.

Компјутерско моделирање биомеханике колена

Након ограничавања чворова, потребно је подесити функцију која делује на чворове површине бутне кости (слика 59).



	C	NNODE	INDPR	ITIME	VALUE
595267		2014	1	1	0.000000
595268		2014	2	1	1.000000
595269		2014	3	1	0.000000
595270		2684	1	1	0.000000
595271		2684	2	1	1.000000
595272		2684	3	1	0.000000
595273		2686	1	1	0.000000
595274		2686	2	1	1.000000
595275		2686	3	1	0.000000
595276		2687	1	1	0.000000
595277		2687	2	1	1.000000
595278		2687	3	1	0.000000
595279		2688	1	1	0.000000
595280		2688	2	1	1.000000
595281		2688	3	1	0.000000
595282		2689	1	1	0.000000
595283		2689	2	1	1.000000
595284		2689	3	1	0.000000
595285		2690	1	1	0.000000
595286		2690	2	1	1.000000
595287		2690	3	1	0.000000
595288		2693	1	1	0.000000
595289		2693	2	1	1.000000
595290		2693	3	1	0.000000

Слика 59 – Ограничење чворова

Први број означава чвор на који се делује, а следећи број означава у ком правцу се делује на модел (1 - x; 2 - y; 3 - z оса). Трећи број означава број функције која делује на осе. У овом случају коришћена је само једна функција, па су из тог разлога све јединице. Последњи број представља интензитет деловања функције. Пошто се посматра померање само дуж у осе, вредности за x и z осу је 0.

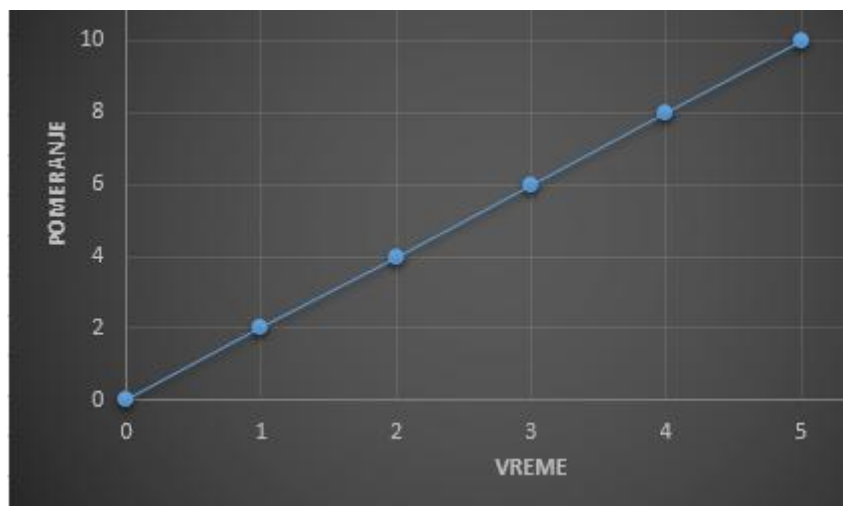
У следећем кораку се задаје функција померања. Коришћена је линеарна функција у трајању од 5 секунди са 10 корака од по 0.5 секунди. Коришћена функција је приказана на слици 60.

Компјутерско моделирање биомеханике колена

```
pakf.dat x
0 10 20 30 40
600149 C /14/ DATA ABOUT TIME FUNCTIONS (2I5)
600150 C NTABFT,MAXTFT
600151      1      6
600152 C a) data about function in a table form
600153 C IBR,IMAX      (IMAX.LE.MAXTFT)
600154      1      6
600155 C b) values for argument - function (2F10.0)
600156 C ((FN(I,IBR,J),I=1,2),J=1,IMAX)
600157      0.      0.
600158      1.      2.
600159      2.      4.
600160      3.      6.
600161      4.      8.
600162      5.     10.
```

Слика 60 – Задата функција померања

На слици 61, приказан је график коришћене функције померања.

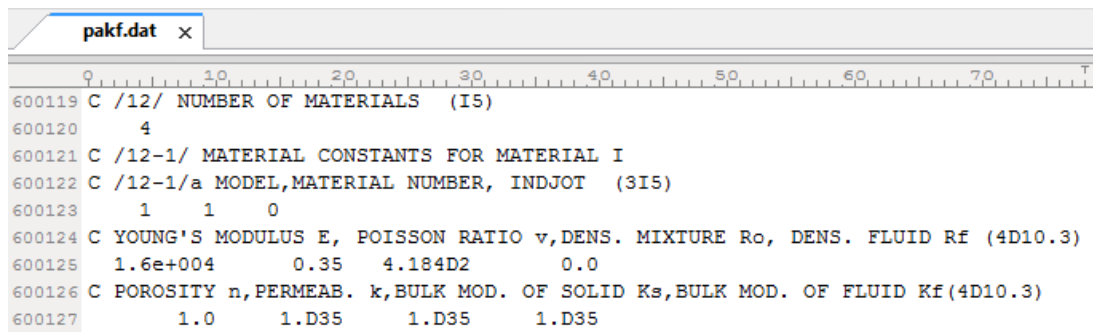


Слика 61 – График задате функција померања

На крају је још потребно унети карактеристике материјала, у овом случају кости, хрскавице, менисуса и лигамента. Од података се уносе: Јангов модул еластичности E и Поасонов коефицијент μ .

Компјутерско моделирање биомеханике колена

На слици 62, приказан је начин уношења података карактеристика материјала.



Слика 62 – Уношење карактеристика материјала

У табели 2, дат је приказан коришћених вредности карактеристика материјала. (Kubiček and Florian 2009;)

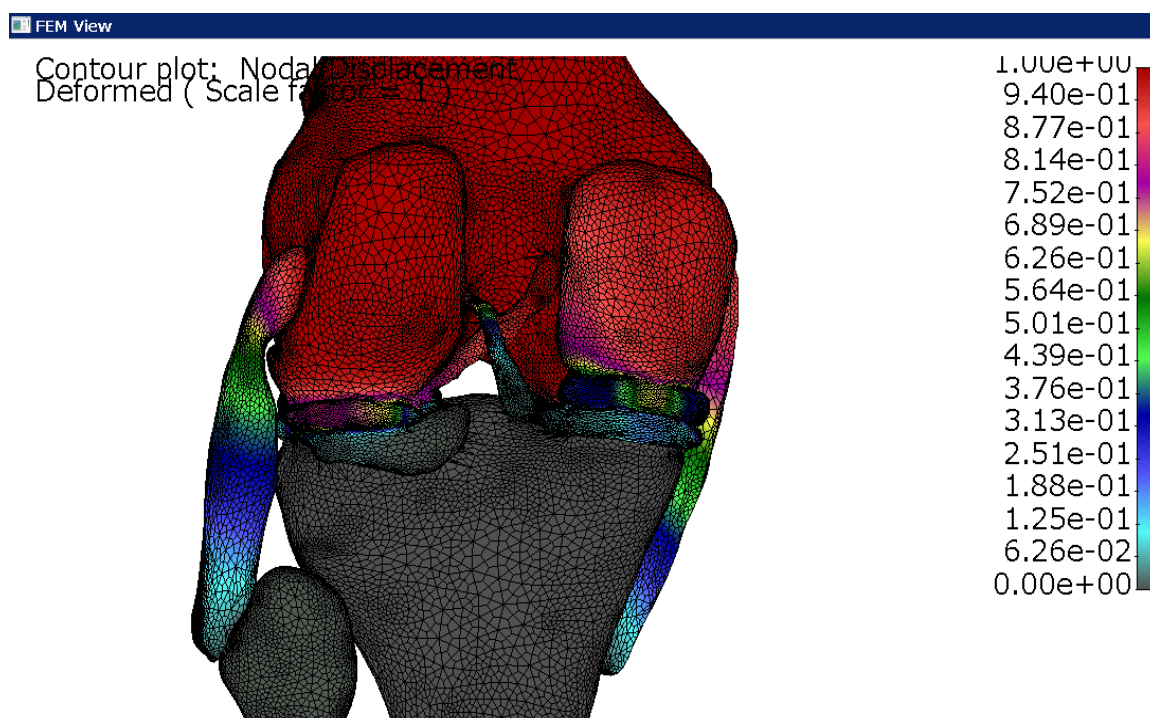
Табела 2 – Карактеристике материјала

	Јангов модуло еластичности E [MPa]	Поасонов коефицијент μ
Кости	1600	0.35
Хрскавица	1	0.45
Менискус	0.4	0.5
Лигаменти	350	0.22

5.2. РЕЗУЛТАТИ

У овом делу рада биће приказани резултати померања колена за корак 1 и 9. Корак 10 неће бити приказан, јер при померању задатом у последњем кораку, долази до сударања материјала и програм престаје да ради. Биће дат упоредан приказ померања целог колена за ова 2 корака, као и упоредан приказ напона и померања менисуса, из разлога што је велики број повреда управо везан за повреде менисуса.

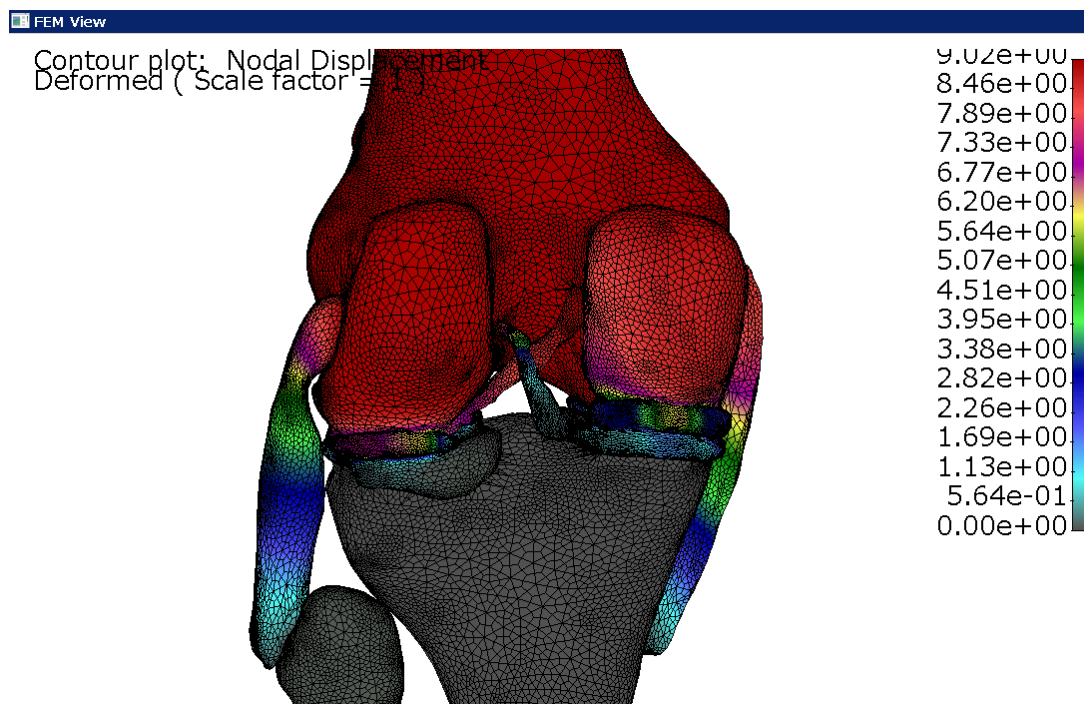
На слици 63, приказано је померање целог колена у кораку 1. Са слике се може закључити да је највеће померање код бутне кости, што је очекивано, с обзиром да је померање задато управо на овом делу. Такође, највеће померање је на месту спајања лигамената са бутном кости.



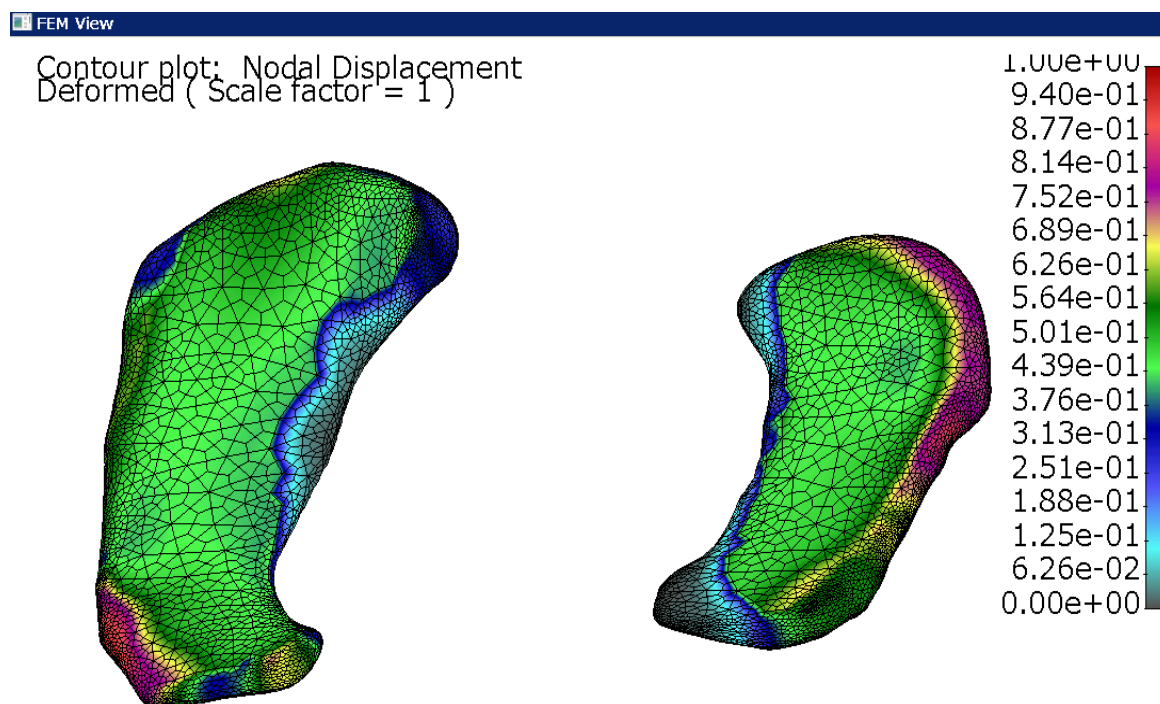
Слика 63 – Померање колена – први корак

На слици 64, приказано је померање модела колена након деветог корака. Због разлике у величини померања, може се приметити повећање померања на хрскавици, која се наслања на голењачу.

Компјутерско моделирање биомеханике колена



Слика 64 – Померање колена – девети корак

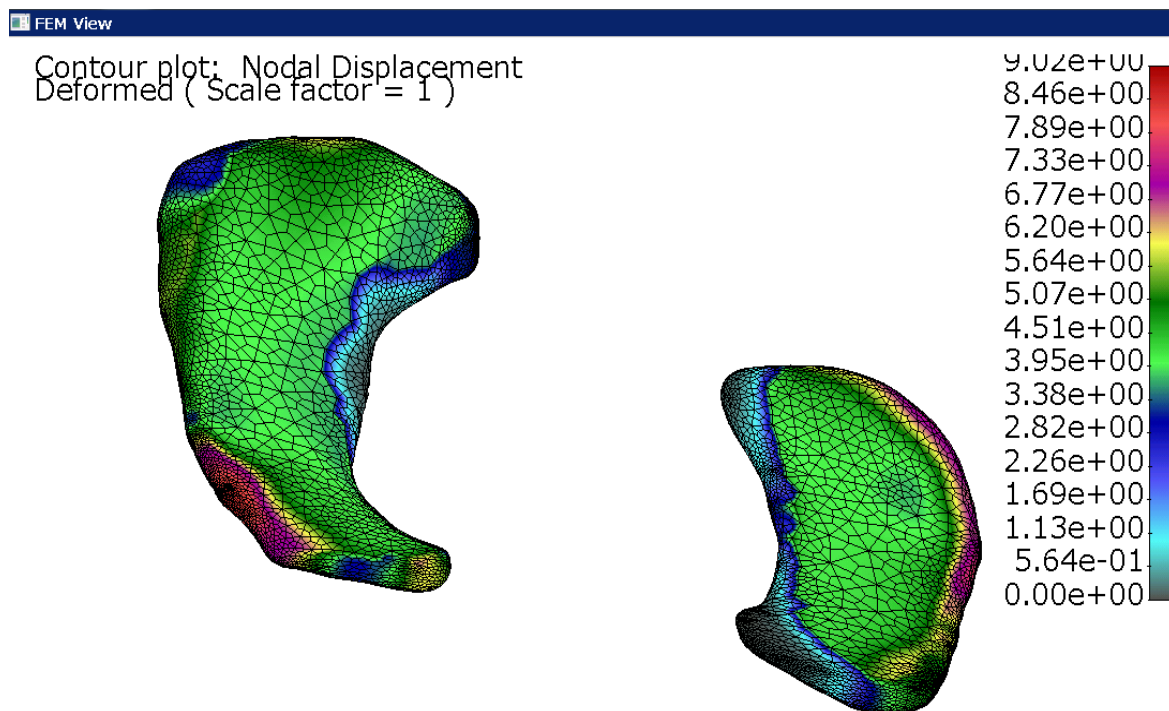


Слика 65 – Померање менисуса – први корак

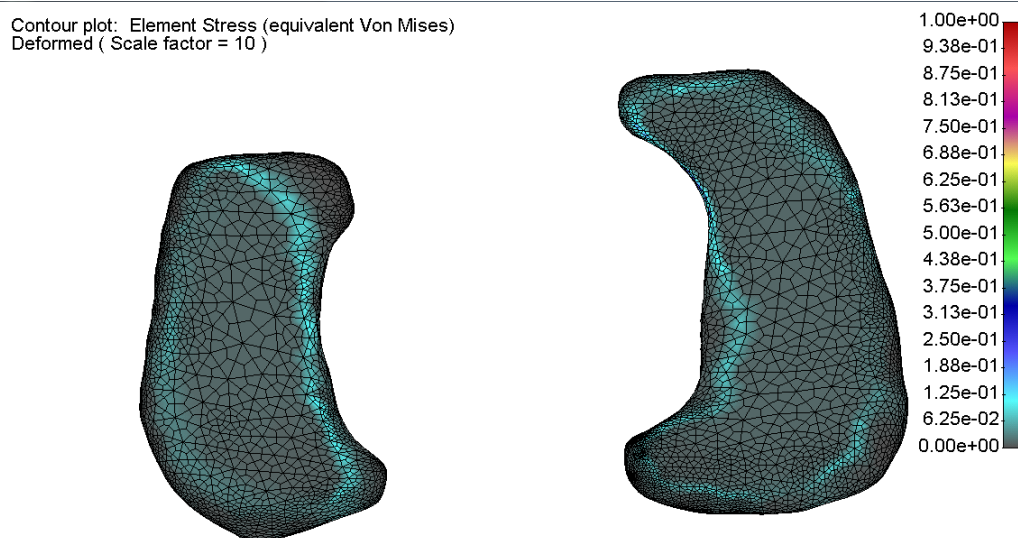
Компјутерско моделирање биомеханике колена

На слици 65, приказано је померање менисуса након првог корака. Спољашње ивице менисуса су се много више помериле, у односу на унутрашње, услед бољег налегања на хрскавицу.

Области највећег померања код корака девет су исте као код првог корака, и то су спољашње ивице менисуса. Разлика је у величини тог померања. У деветом кораку максимално померање износи 9 mm (слика 66).



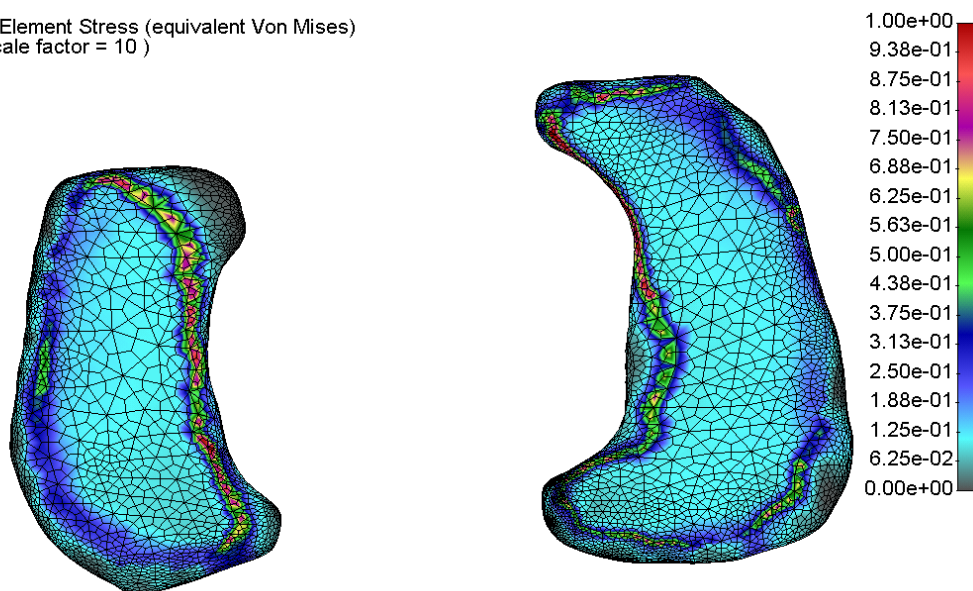
Слика 66 – Померање менисуса – девети корак



Слика 67 – Напон на менискусу – први корак

На слици 67, приказан је напон на менискусу након првог корака. Као што се може видети на слици, напони су веома мали. Разлог томе је задата функција, која након првог корака задаје веома мало померање, а самим тим и напон. Максимални напон на менискусу се налази на ивицама где се менискус спаја са хрскавицама

Contour plot: Element Stress (equivalent Von Mises)
Deformed (Scale factor = 10)



Слика 68 – Напон на менискусу – девети корак

Области највећег напона су на ивици где се менискус спаја са хрскавицама, као и након првог корака. Напони након деветог корака су знатно већи у односу на напоне након првог корака, услед функције која је задата. Са слике се може видети да је централни део меникуса најмање оптерећен, док са одаљавањем од центра напон се повећава.

6. ЗАКЉУЧАК

Као што је већ речено у почетку, анализа рада колена и израда његовом модела преставља одговоран задатак. У овом раду темељно је приказан поступак стварања модела колена, конкретно за четири елемента: кост, хрскавица, менискус и лигаменти. Добијени резултати указују да је стварање модела одрађено успешно.

За комплексније прорачуне и адекватну израду модела неопходно је додатно време и ангажовање моћнијих рачунарских ресурса, у циљу обраде веће количине информација.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Филиповић, Н. (2012). Основи биоинжењеринга, Крагујевац
- [2] Бошковић, М. (1982). Анатомија човека дескриптивна и функционална, Медицинска књига, Београд - Загреб
- [3] Kubiček M., Florian Z., Stress strain analysis of knee joint, Engineering MECHANICS, Vol. 16, 2009, No. 5, p. 315–322
- [4] Soni A., Chawla A., Mukherjee S., Effect of muscle contraction on knee loading for a standing pedestrian in lateral impacts, Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Delhi, India, Paper Number 07-0458