

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: CAD/CAM/CAE 1

Број индекса: 23 / 2010

Богдан Б Димитријевић

**Моделирање и симулација кретања доње
вилице помоћу CAD софтвера
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Горан Девеџић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да

1. Прикаже и објасни могуће методе коришћења CAD/CAM/CAE технологија у области биоинжењеринга и анализе медицинских снимака;
2. Опише поступак креирања тродимензионалног модела мандибуле и максиле на основу медицинских снимака испитаника;
3. Опише поступак снимања покрета вилице код испитаника помоћу методе инфрацрвених камера и маркера;
4. Изврши и објасни обраду добијеног сигнала покрета;
5. Креира склоп у програмском пакету CATIA на основу креираних модела и изврши симулацију покрета система на основу забележеног сигнала кретања;
6. Објасни значај и могућности оваквог експеримента у области рехабилитације и праћења стања пацијената.

Препоручена литература:

- [1] Девеџић Г.: *"CAD/CAM технологије"*, Машински факултет, ЦИРПИС центар, Крагујевац, 2009., 198 стр., ИСБН: 978-86-86663-40-5, 2009.
- [2] Девеџић Г., Ђуковић С., Максић Ј., Петровић С.: *"3D моделирање производа – методичка збирка задатака"*, Машински факултет у Крагујевцу, ЦИРПИС центар, Крагујевац, 2009.
- [3] Девеџић Г.: *CAD/CAM/CAE 1; предавања и вежбе*; Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2012.

У Крагујевцу

Септембар 2013. године

Ментор:

Проф. Др Горан Девеџић

Резиме

Примена савремених *CAD/CAM* система инжењерима омогућава значајно олакшање у процесу креирања модела сложене геометрије. Ови софтвери омогућавају аутоматизацију великог броја процеса од пројектовања до производње, и могућности њихове примене су веома велике. Иако су ови програми првенствено били развијани за потребе пројектовања система у машинској индустрији – од мањих и простијих механизма и облика до великих сложених система попут војних авиона, последњих деценија *CAD/CAM* софтвери добијају све већу улогу и у области медицине и биоинжењеринга.

У раду је приказан поступак 3Д запреминског моделирања модела на основу медицинских снимака добијених на испитанику. То подразумева, између осталог, и коришћење више различитих програма за екстраховање модела из DICOM-а, као и за обраду добијеног модела. Такође, у раду је приказано и снимање покрета испитаника посредством инфрацрвених камера и сензора. На крају, извршено је обједињавање ове две фазе симулацијом покрета доње вилице у програму CATIA на основу реконструисаних модела и закона кретања добијених снимањем покрета. Циљ и значај експеримента је приказивање методе за праћење промена у кретању доње вилице, затим поређење са просечним и нормалним вредностима покрета и праћење опоравка вилице у периоду рехабилитације после повреде.

Кључне речи:

- 3Д запреминско моделирање на основу DICOM-а
- Снимање покрета
- Обрада сигнала
- Симулација покрета

SUMMARY

Application of modern CAD/CAM systems enable engineers significant relief in modeling of complex 3D models. This software enables automatization of many processes in design of new models and systems, as well as in manufacturing. Possibilities of its appliance are very wide. Although these programs were mainly developed for designing models and systems in classic mechanical engineering, such as cars and machine industry, there has been a significant increase in the appliance of CAD/CAM software in the area of medical explorations and bioengineering lately.

In this work several items have been presented. The first phase of the work is related to extracting 3D model from medical image (DICOM) that was made on the examinee. The model has also been reconstructed. Next, the work presents motion capture using the infrared cameras and sensors on the examinee. In the final phase, a simulation has been made in CATIA based on extracted models and mathematical laws gained by signal processing. The goal of the experiment is presenting a method for monitoring changes in motion of the patient's maxilla, then comparing to average and normal parameters of motion, and finally, monitoring the rehabilitation process of the maxilla after injury.

Keywords:

- * Creating 3D models based on DICOM
- * Motion capture
- * Signal processing
- * Motion simulation

Садржај:

1. Увод	1
2. Моделирање и реконструкција модела.	3
2.1 Рад у Mimics-у	4
2.2 Обрада у Geomagic-у	23
3. Снимање покрета	37
4. Обрада сигнала	42
5. Симулација покрета	50
6. Закључак	65
7. Литература	66

1. Увод

Од првих оруђа и оружја од камена и дрвета до савремених свемирских истраживачких станица прачовек је прешао низ промена и усавршавања на путу да постане модеран човек данашњице. Оно што је пак остало непромењено у овом огромном временском периоду упркос свим променама је стална човекова тежња да осмисли и произведе предмете који ће му омогућити опстанак и олакшати живот. Како су потребе за новим изумима расле тако се и развијала и унапређивала истраживачка наука тако да савремено машинство, које представља врх овог више миленијумског брега, данас нуди мноштво праваца у којима људска мисао, у оном креативном, инжењерском смислу достиже врхунац свог изражаја.

Из непрестане тежње за опстанком, борећи се против спољашњих и унутрашњих претњи, две потпуно контрадикторне људске потребе развиле су два правца у техници и науци у врхунац људских достигнућа. Тако су војна техника и медицина постале подручја на којима се остварују најнапреднији системи. Биоинжењеринг, као пресек медицине и машинства све више добија на значају јер ова, релативно млада наука и технологија, изучава и тежи да измени и унапреди најсложенији постојећи систем – живи организам. Еволуција је на путу који је трајао стотинама хиљада година обликовала скоро савршене биолошке механизме способне да се развијају, унапређују и бране од разних спољашњих и унутрашњих опасности. Међутим, када овај систем (конкретно човеков организам) наиђе на проблем који не може самостално да савлада, улога инжењера новог доба је да осмисли и произведе средства, методе и начине за њихово савлађивање.

Један од највећих проблема и задатака у медицини увек је било одређивање узрока проблема. О томе сведочи и позната изрека „Исправна дијагноза је пола решења“. Последњих деценија све већу улогу у овој области добијају софтвери који се посебно развијају за ову намену. Анализа снимака људског тела добијених разним методама може се у све већој мери ослонити на програмски подржане алате и технике.

У овом раду проћи ће се кроз неколико области у тежњи а се постигне више циљева. Прва фаза односи се на стварање веродостојног тродимензионалног модела на основу реалних снимака добијених над испитаником. Пед интересовања биће релативно кретање горње и доње вилице (мандибуле и максиле). Овај подсистем људског тела изабран је услед сложености темпоромандибуларног зглоба (налази се на споју вилица) и сложеног кретања које тај зглоб омогућава. Друга фаза је снимање покрета вилице код испитаника коришћењем савремених инфрацрвених камера, сензора и система за аквизицију података. Овај део подразумева и извесну обраду добијеног сигнала. У последњој, трећој фази, врши се симулирање покрета вилице задавањем кретања реконструисаном моделу на основу забележеног сигнала кретања.

Основни задатак ово рада је представљање једне од могућности коришћења CAD/CAM/CAE система у сфери медицине (конкретно дијагнозе). На основу добијене симулације могу се мерити разни параметри којима се може утврдити одступање снимљеног кретања од правилног, здравог покрета. Такође се може пратити и брзина опоравка при рехабилитацији после повреде или операције. Други аспект овог рада је увид у начин рада програмских пакета који су коришћени, односно у методе и могућности које они пружају.

2. Моделирање и реконструкција

Као што је већ речено у претходном поглављу, предмет истраживања овог рада су горња и доња вилица као и њихов узајамни положај у току покрета. Основу посматраног модела чини DICOM CT снимак главе који је начињен над испитаником за потребе извесних стоматолошких захвата, а који је био погодан за овај експеримент.

DICOM (енгл. „Digital Imaging and Communications in Medicine“) је стандард за управљање, смештање, преношење и штампање информација добијених снимањем људског тела. Овај стандард представља одговарајући формат фајла као и посебан протокол за размену информација између различитих компјутера или програмских пакета. DICOM је веома распрострањен формат у медицини и биоинжењерингу па стога постоји широк асортиман програма за обраду модела оспособљен за обраду овако забележених информација (сигнала) (слика 1).

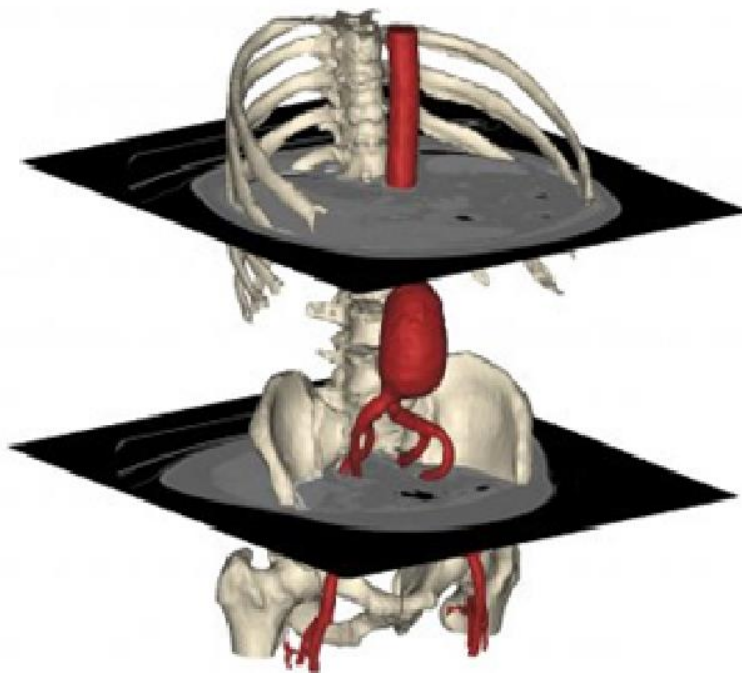


Слика 1. Пример снимка колена у DICOM формату

На путу до симулације кретања мандибуле изведене у програму CATIA, модел се мора најпре обрадити у програмима Mimics и Geomagic. Сваки од ових програма је погодан за одређене фазе обраде модела (исправљање разних неправилности модела док се не добију јасне површине).

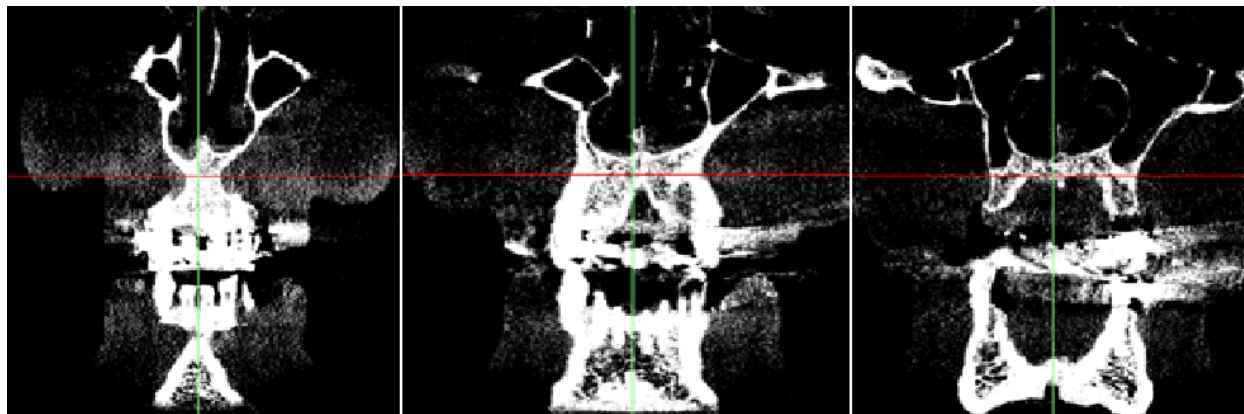
2.1 Рад у програмском пакету Mimics

Mimics је један од често коришћених програма у области реконструкције унутрашњих структура у људском организму. Овај софтвер је развијен специјално за рад на медицинским снимцима који се добијају помоћу ЦТ скенера, магнетне резонанце и других метода снимања људског тела (microCT, CBCT, Ultrasound, Confocal Microscopy). Програм је посебно оспособљен за стварање тродимензионалних објеката (модела) из дводимензионалних слика (слајсева) препознавањем густине различитих ткива на основу нијанси сиве боје на снимку (слика 2).

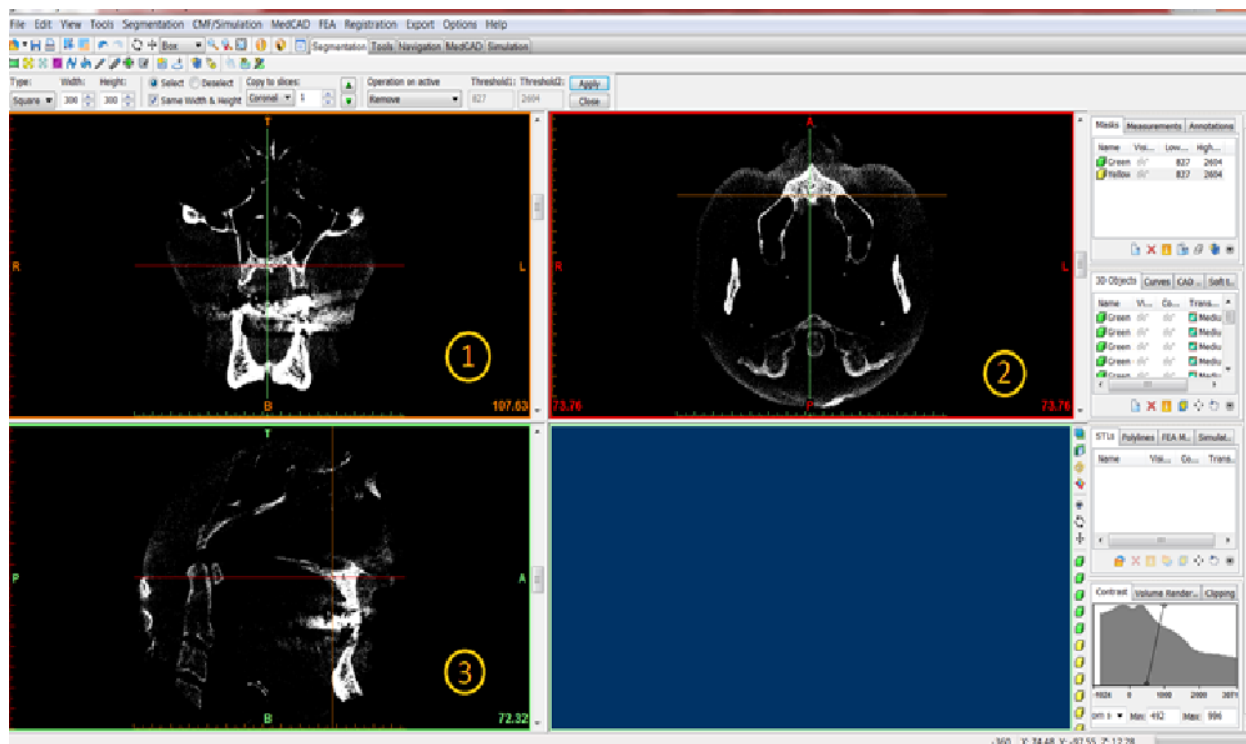


Слика 2. Принцип стварања 3Д модела из слајсева

Како би био омогућен што бољи преглед анатомије, програм је осмишљен тако да се може посматрати пресек снимљеног дела тела у било којој тачки у три узајамно нормалне равни. То су аксијална, сагитална и коронарна раван. Ови пресеци или слојеви снимка представљају слајсеве (енгл. „slice“). Прегледом различитих слајсева можемо се "кретати" кроз снимљену анатомију у три правца (слика3). На тај начин може се веома детаљно уочити положај и облик свих површина унутрашњих ткива – костију, тетива, унутрашњих органа, крвних судова и сл.



Слика 3. Различити пресеци у коронарном правцу



Слика 4. Интерфејс Mimics-a

На слици 4 приказан је интерфејс програма. Видимо да је радни простор подељен на 4 целине; 1 – пресек у коронарној равни, 2 – пресек у аксијалној равни, 3 – пресек у сагиталној равни, 4 – радни простор за модел који ће се генерисати.

Као што је већ поменуто, основна идеја програма је да се 3Д модел екстрахује из снимка препознавањем тачака које припадају заједничкој унутрашњој структури односно препознавањем тачака идентичне густине на снимку. Места на којима је ткиво веће густине манифестују се светлијом бојом на снимку. Из тог разлога, на снимку се најбоље уочавају обриси коштаног ткива као најгушћег у људском телу. Такође се може уочити и то да је густина коштаног ткива највећа на површини, где се налази компактни део кости док је у унутрашњости где је спонгијално коштано ткиво (енгл. „sponge“ – сунђерасто) густина мања (слика 5).



Слика 5. Различита густина коштаног ткива на пресеку мандибуле

Како би се добио тражени модел, уноси се одговарајући критеријум на основу интензитета светлости тачака на снимку. Основни критеријум који се овде користи је широм распрострањен у медицини и назива се Хаунсфилдова скала (Hounsfield scale). Помоћу Хаунсфилдових јединица различита ткива се карактеришу на основу њихове пропустљивости за радио зрачење. Образац за израчунавање ових јединица гласи:

$$HU = 1000 \times \frac{\mu_X - \mu_{\text{воде}}}{\mu_{\text{воде}}}$$

У овом обрасцу μ_x представља пропустљивост посматраног ткива, а $\mu_{\text{воде}}$ је пропустљивост дестиловане воде на нормалном ваздушном притиску.

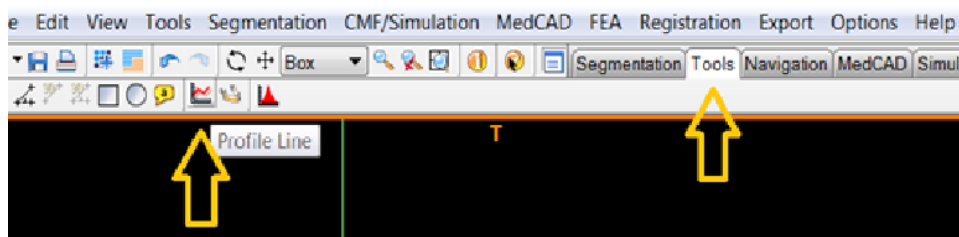
Вредности које различите материје имају на Хаунсфилдовој скали приказане су на слици 6.

ТКИВО	ХАУНСФИЛД. ЈЕД.
КОСТ	+1000
ЈЕТРА	40-60
БЕЛА МАТЕРИЈА	-20 to -30
СИВА МАТЕРИЈА	-37 to -45
КРВ	40
МИШИЋ	10-40
БУБРЕЖНО ТКИВО	30
ВОДА	0
САЛО	-50 to -100
ВАЗДУХ	-1000

Слика 6. Вредности ткива на Хаунсфилдовој скали

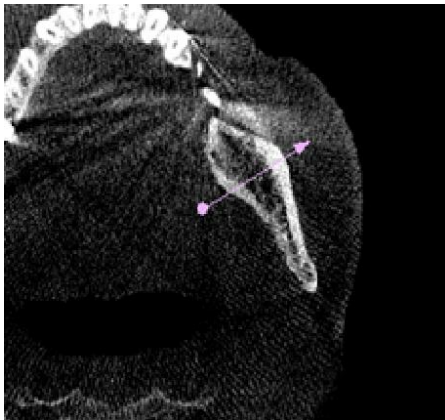
Међутим, као што је већ речено, због различите густине коштаног ткива у различитим областима, неопходно је посебно подесити и изабрати доњу и горњу граничну вредност у овим јединицама, како би се из снимка издвојио само коштани део. Ово ограничење (енгл. „threshold“, праг) задаје се на дследећи начин:

- 1) Отварамо алатку **profile line** са палете алатки **tools** (слика 7);



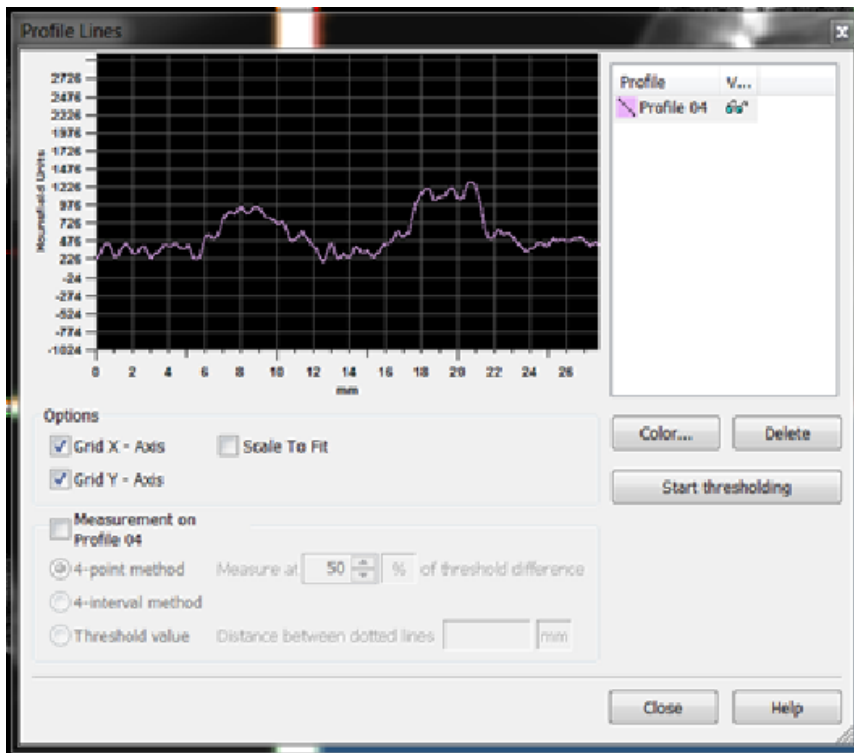
Слика 7.
Алатка
Profile line

- 2) Бира се пресек снимка на коме се најјасније виде контуре коштаног ткива (слика 8), и повлачи се линија преко коштаног дела (нпр. доње вилице);



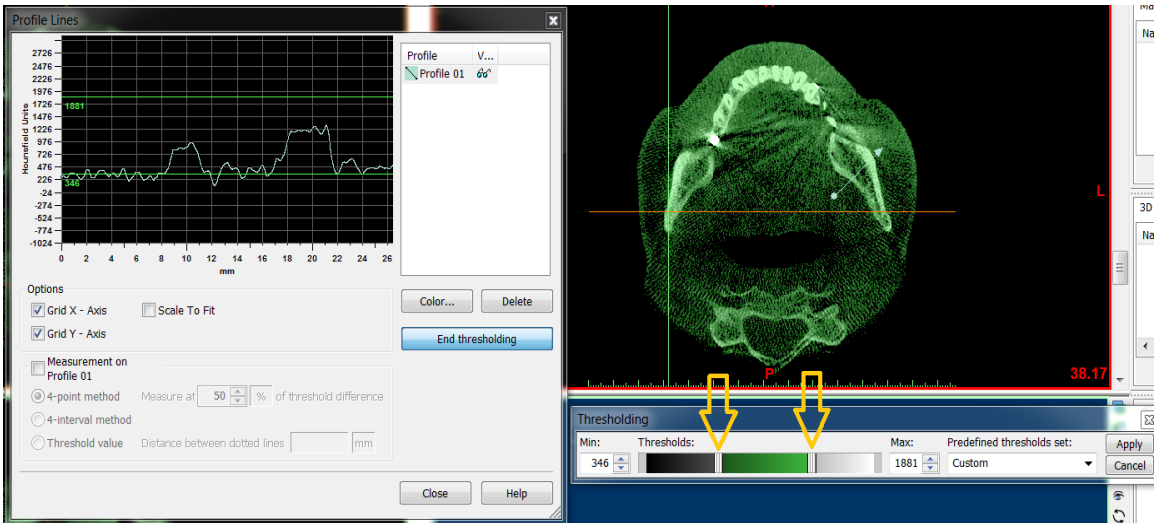
Слика 8. Повлачење линије на погодном месту због одређивања **threshold-a**

- 3) У менију **profile lines** (слика 9) може се видети какав је интензитет светлости тачака на линији која је повучена. Након тога, бира се команда **start thresholding**.

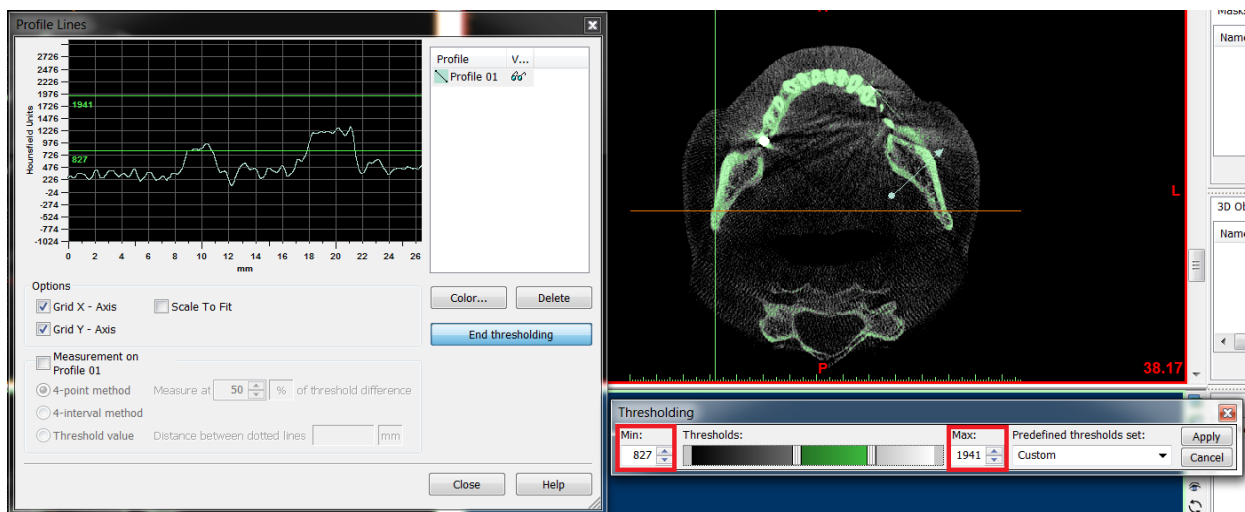


Слика 9. **Profile line** мени

- 4) Следећи корак је дефинисање горњег и доњег прага интензитета светлости. У радном делу може се видети колики део снимка је обухваћен.



Слика 10-а, пример превише ниске доње границе

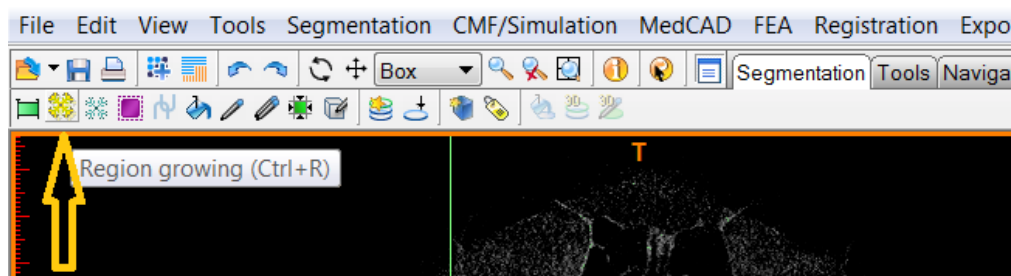


Слика 10-б. Одређивање *Threshold-a*

- 5) Након одабира горњег и доњег прага (у овом случају доњи је 827 а горњи 1941) бира се опцију **apply** и затварају се оба прозора.

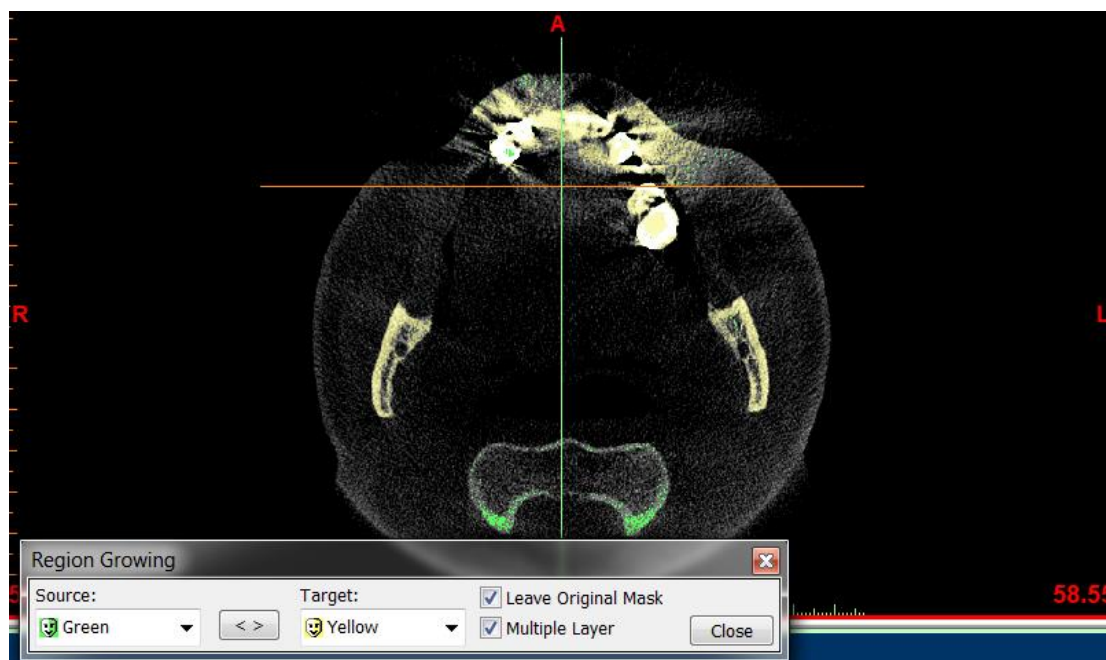
Извршавањем описаног поступка унето је све што је потребно како би програм препознао које области треба да обухвати при извлачењу 3Д модела из DICOM-а. Програм ће на сваком пресеку обележити све тачке које на Хаунсфилдовој скали спадају у одговарајући опсег и формираће од њих прву "маску" (у овом случају зелену).

Проблем који сада следи је то што се услед слабијег квалитета снимка обухватају и многе тачке које не би требало да сачињавају жељени модел. Због тога се користи алатка: **region growing** из палете **segmentation** којом ће се обележити на зеленој маски све области које су предмет интересовања (слика 11).



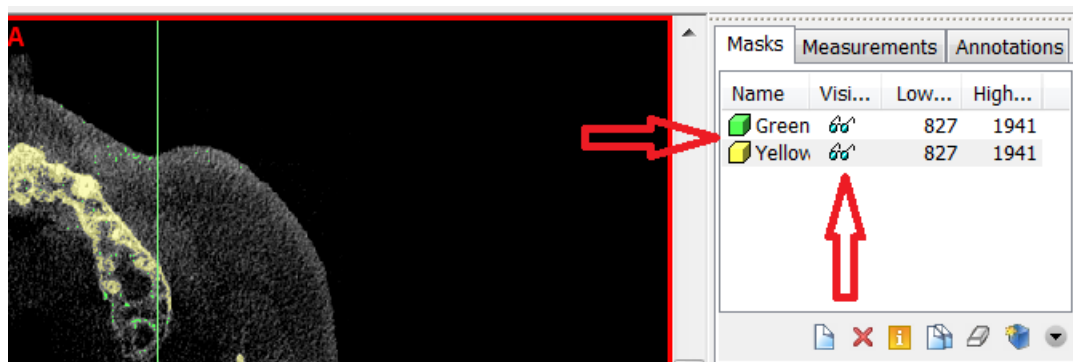
Слика 11. Алатка *region growing*

Појединачним обележавањем свих целина које треба да сачињавају модел дефинише се све што треба да буде обухваћено. На пример, делови кичме који се уклапају у задати опсег по Хаусфилдовој скали не треба да се нађу у оквиру маске, јер је циљ само креирање модела горње и доње вилице (слика 12). Такође, због слабијег квалитета снимка, неки делови вилица, попут тањих костију синуса, нису обухваћени у целину, па се морају овако означити.



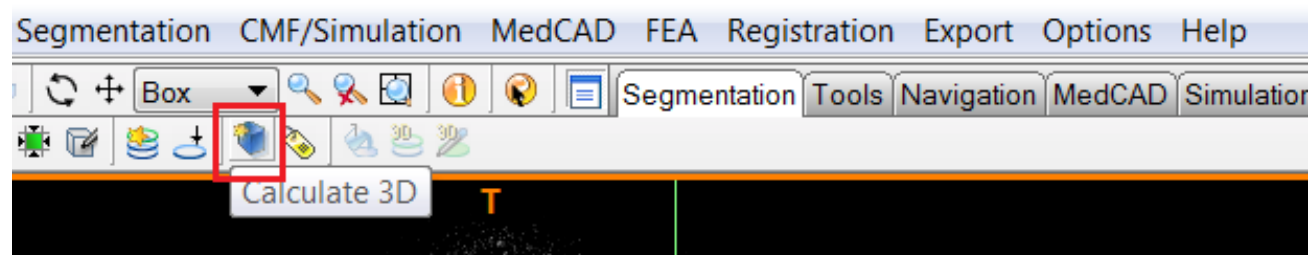
Слика 12.
Дефинисање
нове маске

Коришћењем алатке **Region growing**, направљена је нова маска (жута). Свака маска представља одређен скуп тачака на снимку, и посебном командом програм од ње креира 3Д модел. Омогућено је истовремено стварање више маски, које су, ради разликовања, обојене другим бојама. У прозору са десне стране може се изабрати која маска ће бити видљива у радном простору (слика 13).

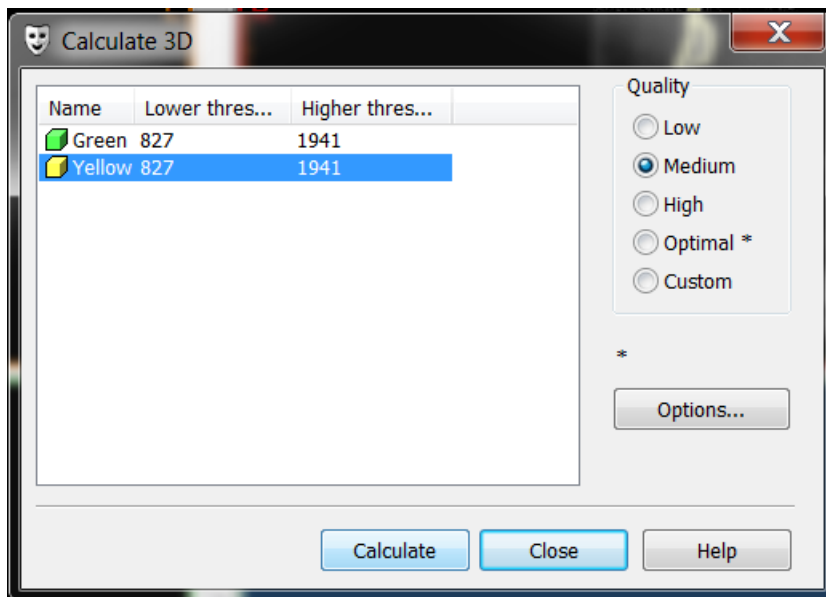


Слика 13. Списак доступних маски и избор видљиве маске

Следећа фаза је прављење 3Д модела од изабране маске (жуте). За овај поступак користи се алатка **calculate 3D** са палете **segmentation** (слика 14). Извршавањем ове команде, програм ће на радном простору приказати модел који је извучен из изабране маске (слика 15).

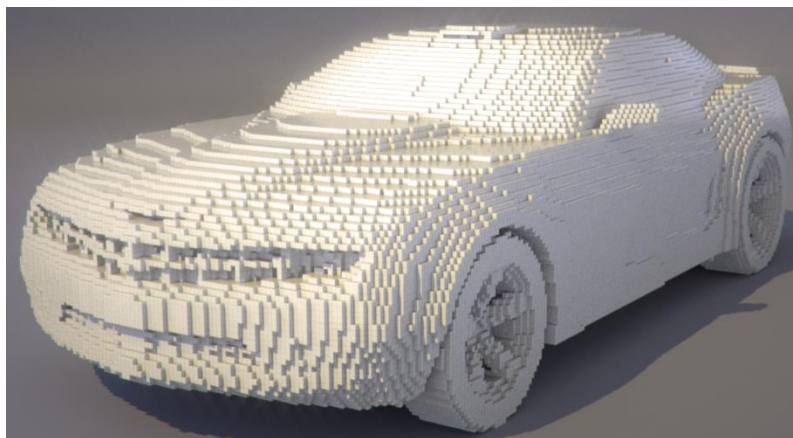


Слика 14. Алатка Calculate 3D

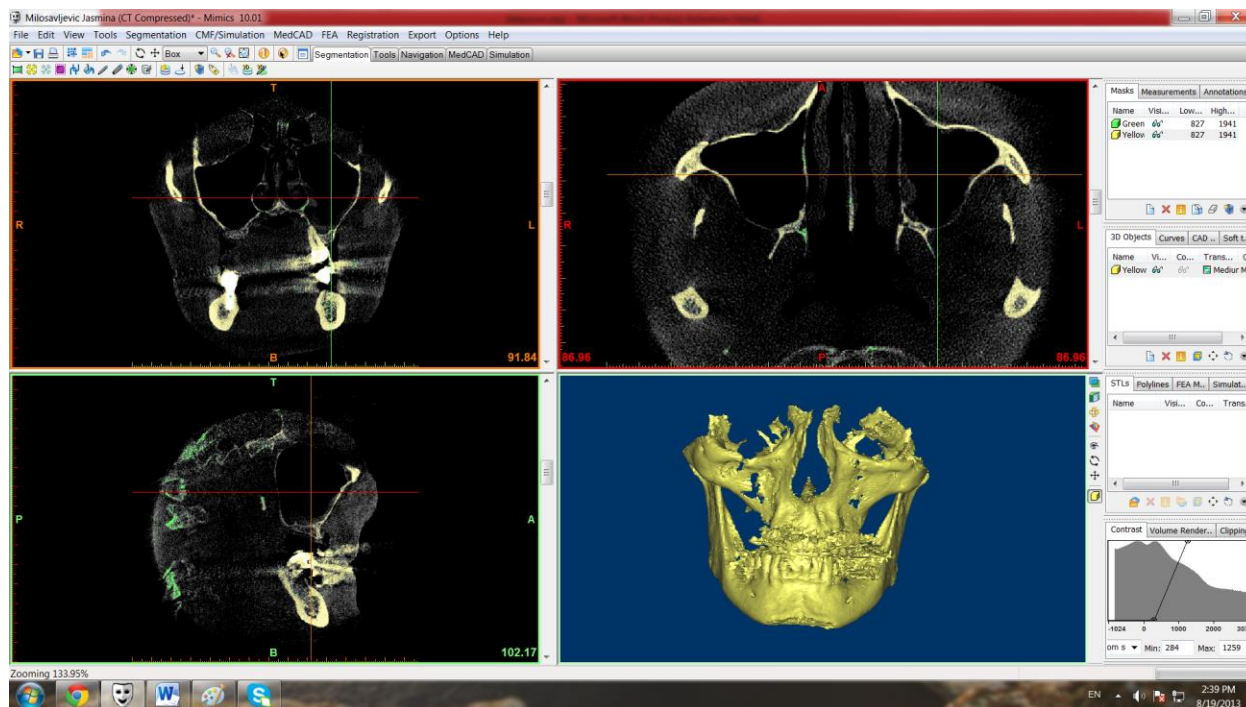


Слика 15. Избор основе за 3Д модел

Поступак извлачења 3Д модела из DICOM-а у Mimics-у сличан је поступку брзе израде прототипова. Програм на сваком пресеку прави од сваког пиксела који сачињава изабрану маску, тродимензионални јединични објекат – воксел. Воксел (енл. volumetric picture element), је најмањи запремински елемент који сачињава 3Д модел (слика 16). Крећући се од првог до последњег пресека, програм прави тродимензионални објекат који уз поједина одступања доста верно представља унутрашњу структуру коју смо изабрали (слика 17).

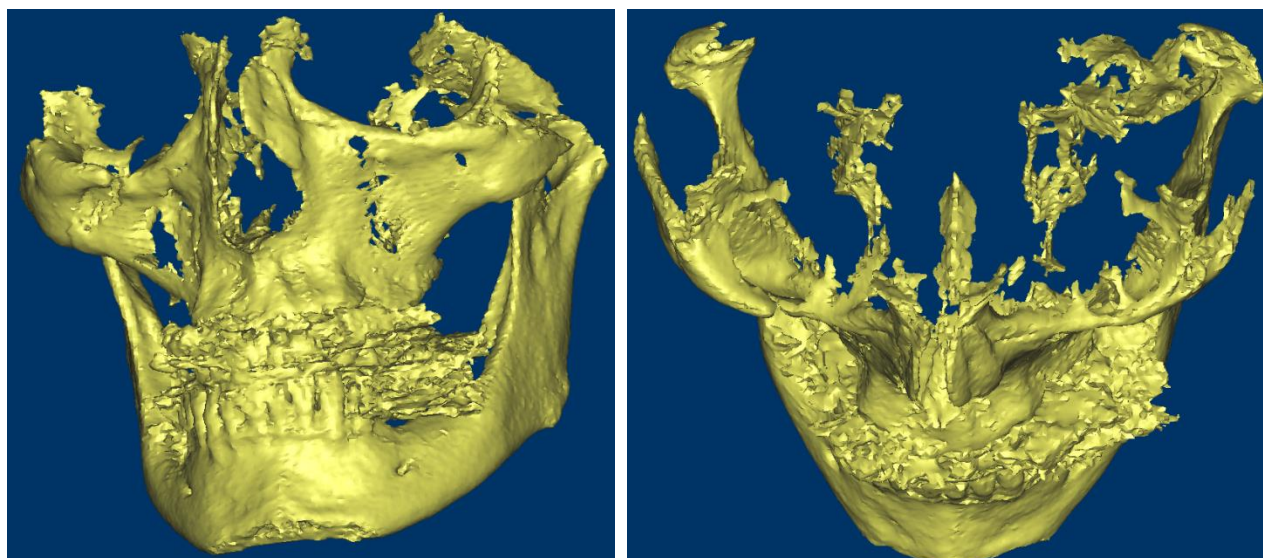


Слика 16. Репрезентација 3Д модела вокселима



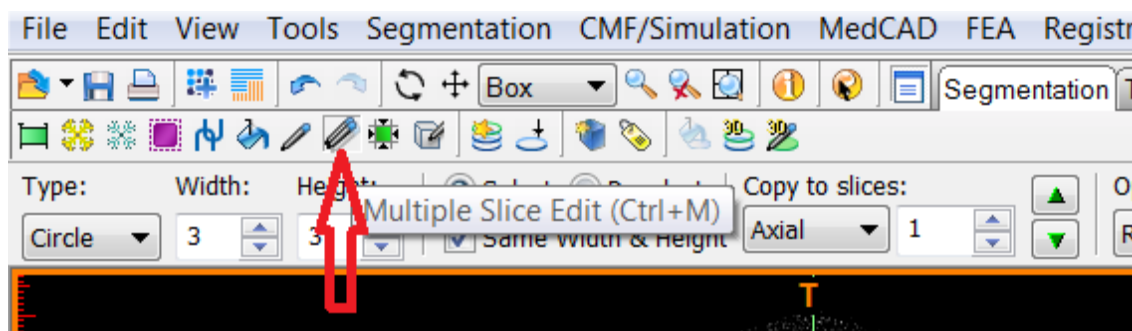
Слика 17. 3Д модел у радном простору програма

Као што можемо да видимо, модел је у великој мери непотпун и јасно се могу видети недостаци услед слабијег квалитета снимка (слика 18). Додатни проблем при извлачењу модела било је и то што је пацијент имао пломбе у зубима, које су значајно помутиле снимак својим одсјајем, па је стога област око зуба у великој мери "надограђена". Проблема ће бити и око моделирања синуса, јер су те кости танке, и не виде се јасно на снимку.



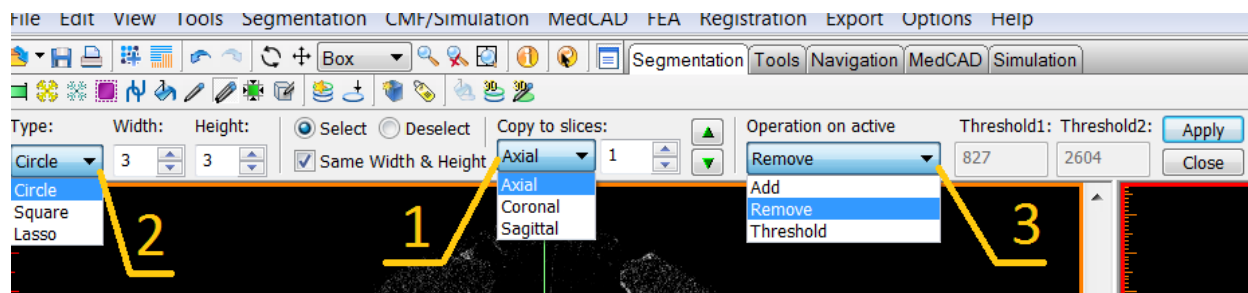
Слика 18. Модел након првог извлачења

Mimics има широку палету алата за исправљање неправилности на моделу управо због оваквих случајева. Основни приступ поправљању површина модела је мало спорији, али је зато доста темељан. Заснива се на појединачној допуни маске на нивоу појединачних пресека, а затим се модел поново извлачи алатом calculate 3D. Притом се на сваком пресеку у било којој равни могу или додавати или брисати области које припадају посматраној маски. За овај посао користи се алатка **multiple slice edit** са палете **segmentation** (слика 19).



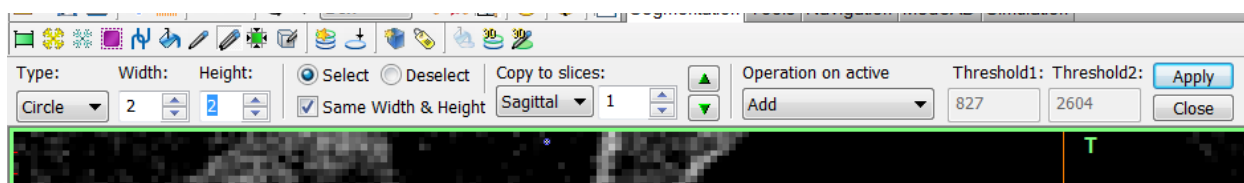
Слика 19. Multiple slice edit

У менију који се накнадно отвара (слика 20), може се изабрати у којој равни ће бити извршене измене (позиција 1), затим одабир величине и облика алата за исправљање неправилности (позиција 2) и да ли се област која је обележена брише или додаје жутој маски (позиција 3).

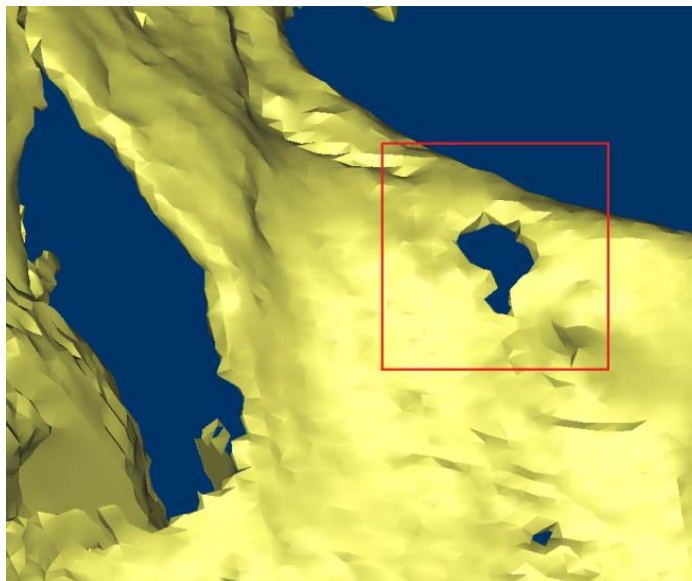


Слика 20. Алати за исправљање неправилности и подешавања

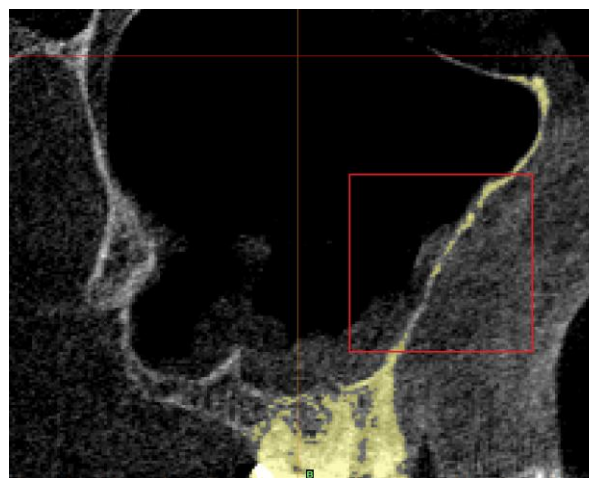
Након што су подешени параметри алата за измене на маски, може се почети са поправљањем површина. Поправљање се у суштини своди на обележавање необележених површина на пресецима, које би требало да се нађу у оквиру маске, на основу нијансе на снимку. На моделу се најпре уочава неки недостатак (слика 22), потом се прелиставају слајсеви док се не пронађе та одређена област коју треба преправити (слика 23) и на крају се допуњују празнине (слика 24). Пре преправљања потребно је подесити параметре алата према делу који се попуњава (слика 21).



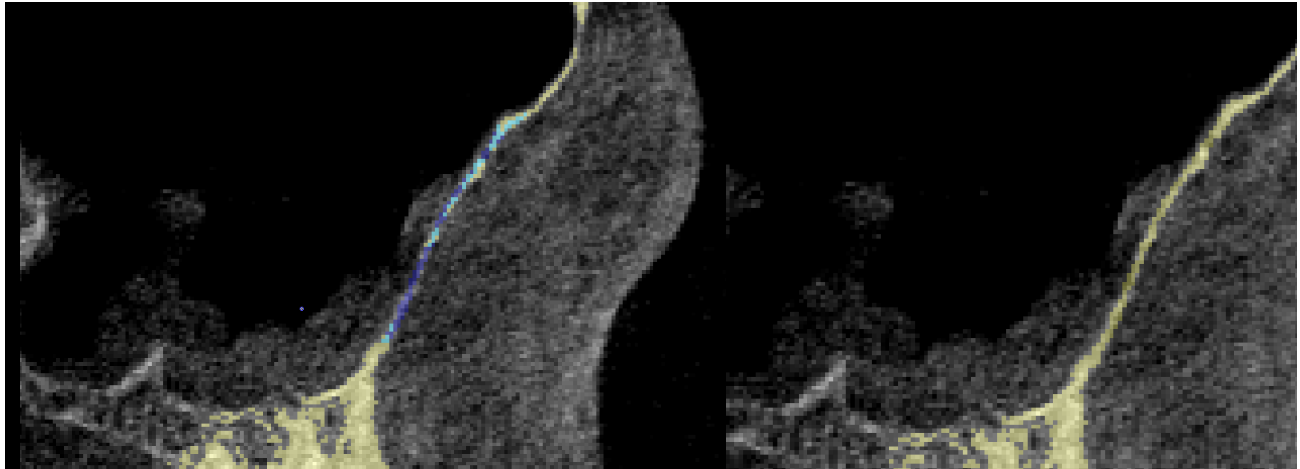
Слика 21. Подешавање параметара алата за преправљање



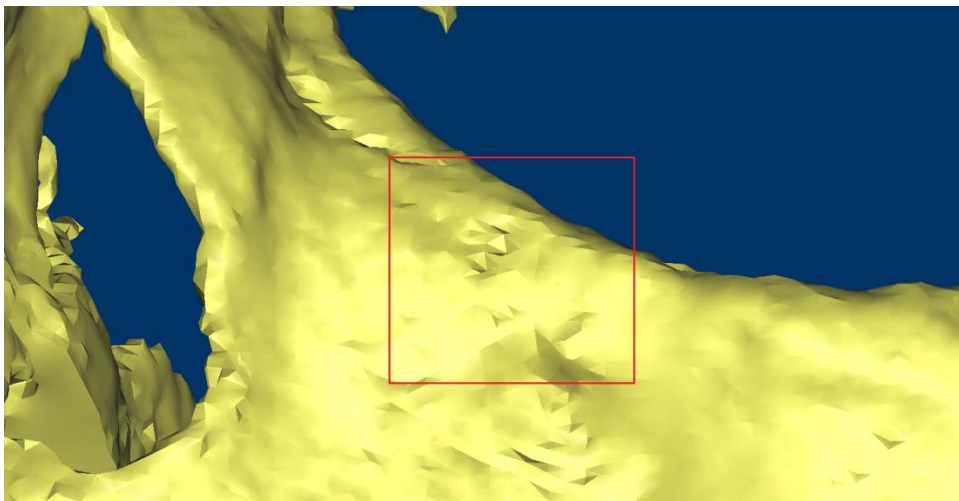
Слика 22. Неправилност модела која треба да се поправи



Слика 23. Проналажење пресека у сагиталној равни у којима се јасно виде прекиди на маски

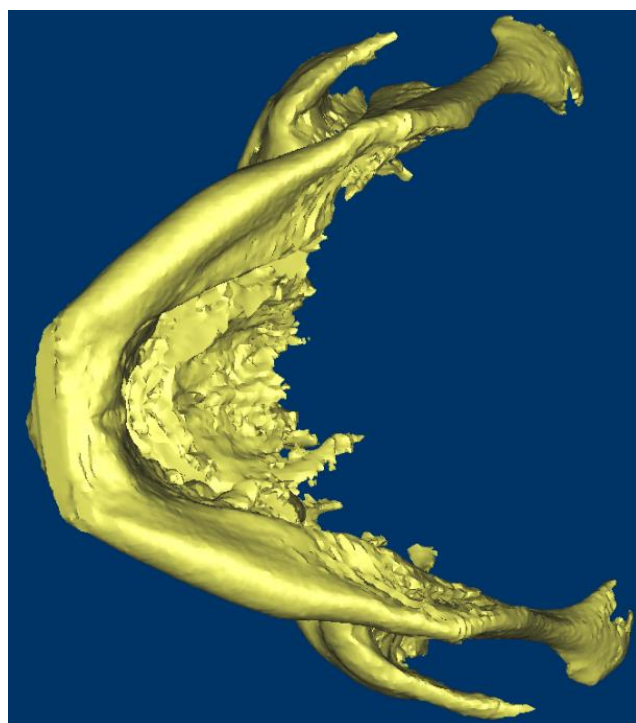
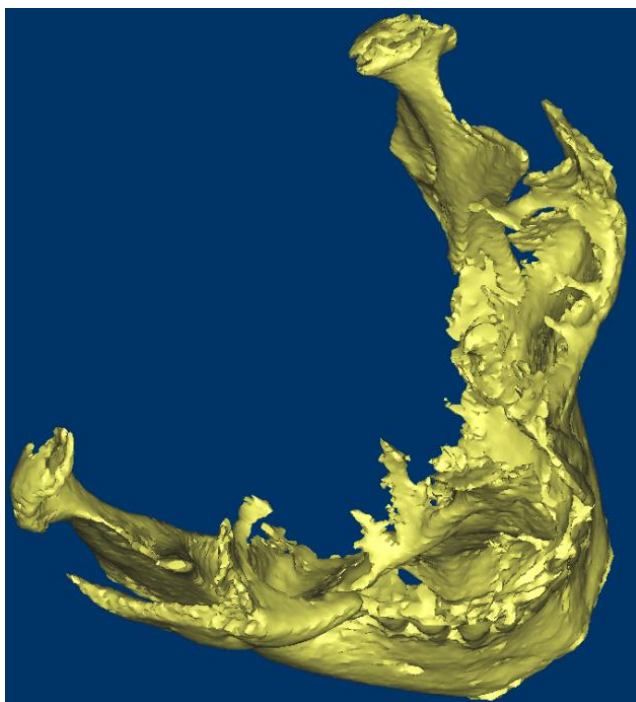


Слика 24. Попуњавање празнина на маски. Плавом бојом обележени су пиксели који су накнадно обухваћени и додати посматраној маски

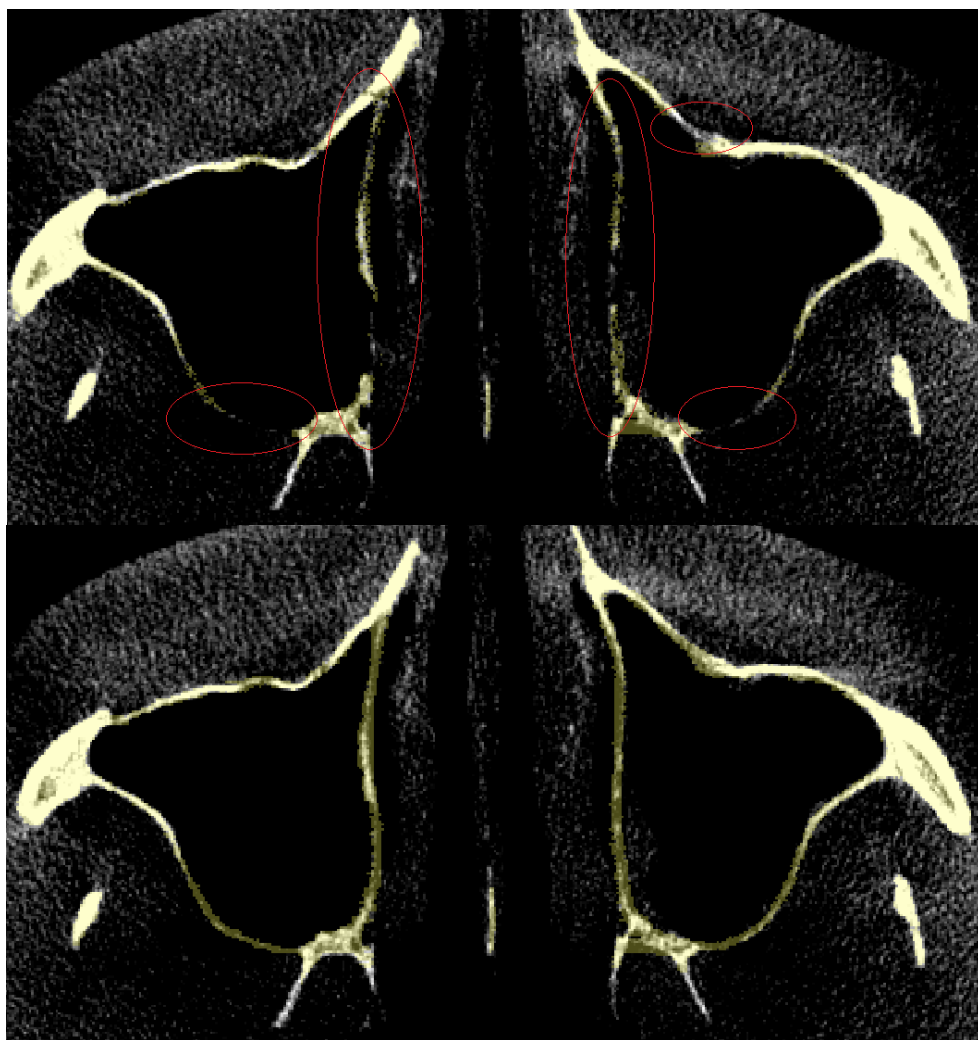


Слика 25. Изглед модела након што је празнина попуњена

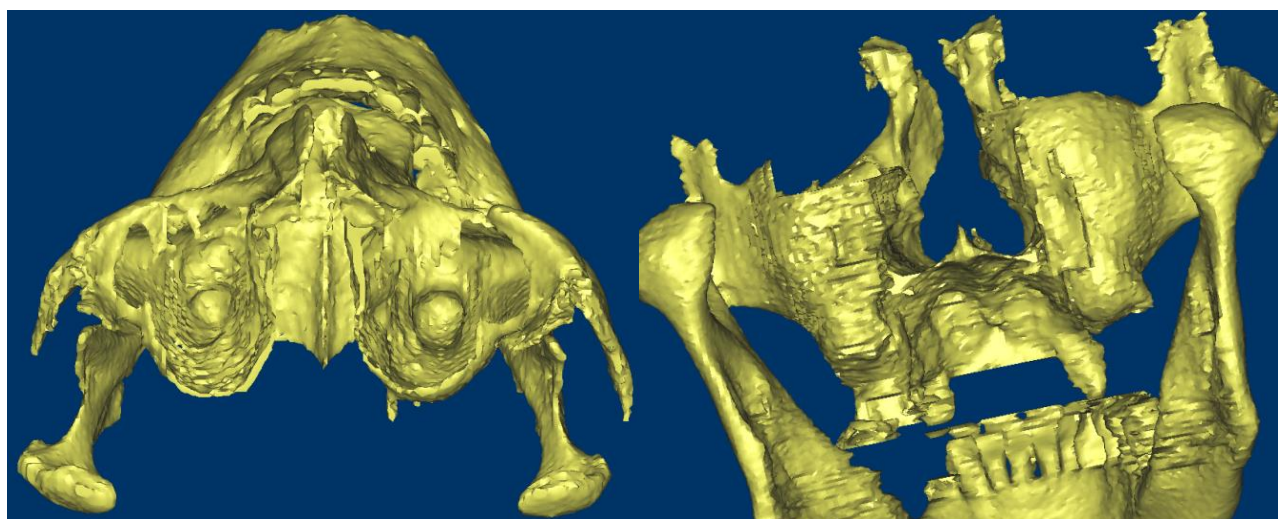
Област синуса је "извучена" лоше (већи део недостаје) због слабе видљивости тог дела коштаног ткива на снимку (слика 26). Реконструкција овог дела треба се радити у два правца. Најпре ће се додавање области моделу вршити у аксијалној равни (слика 27).



Слика 26. Приказ лоше аутоматске реконструкције синуса

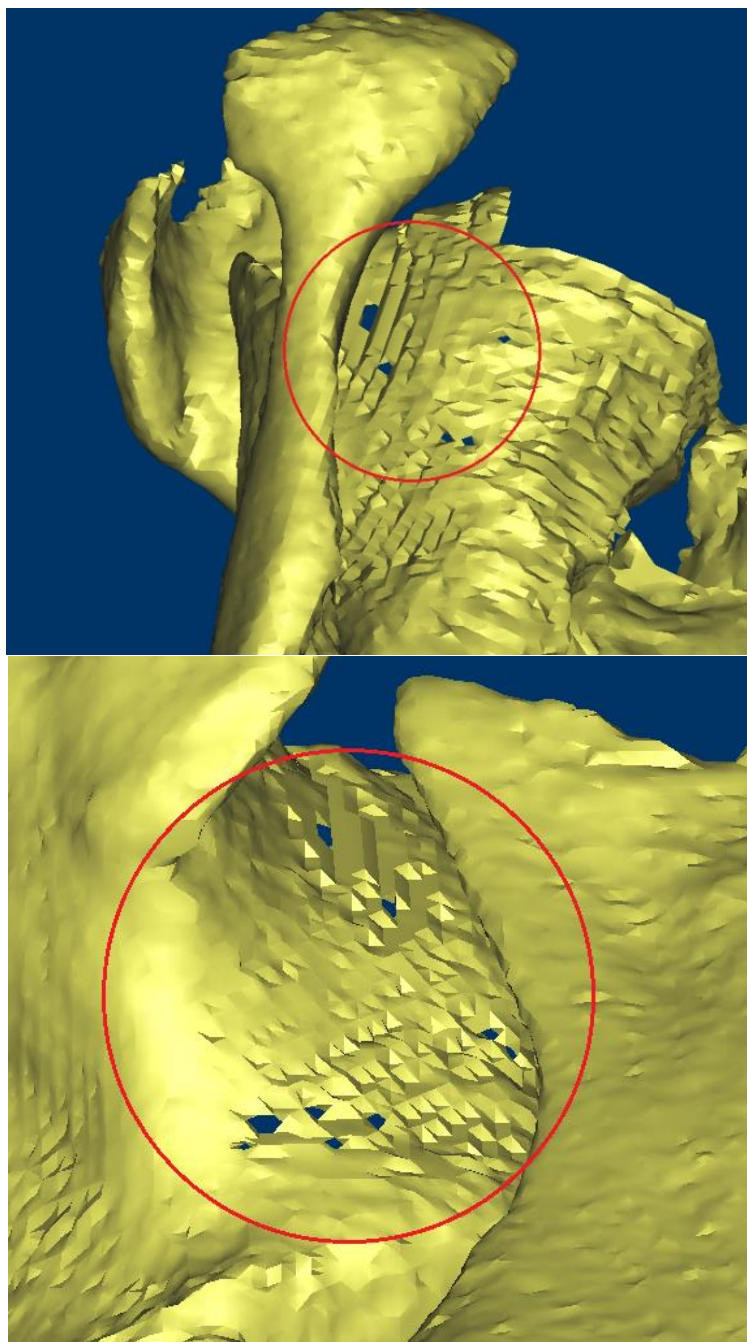


Слика 27. Реконструкција области синуса у аксијалној равни



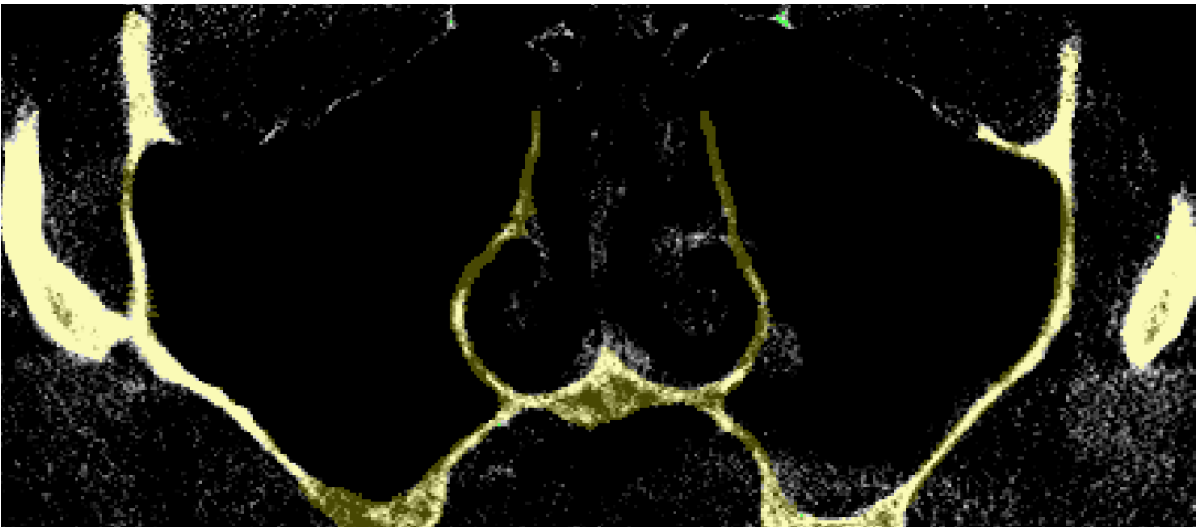
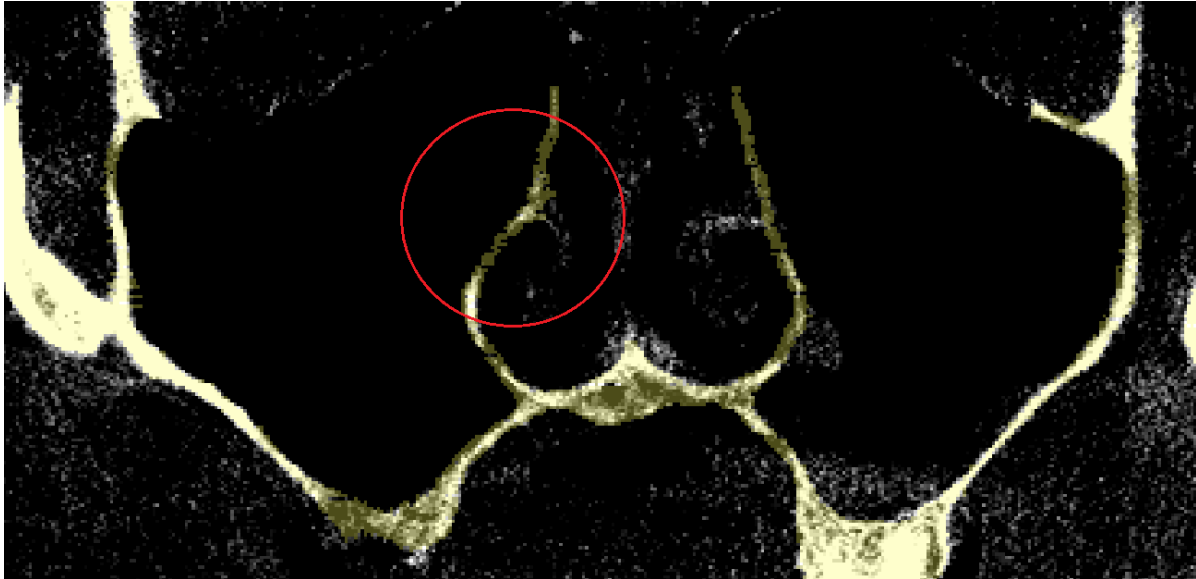
Слика 28. Синуси након прве обраде

Како би се што боље обрадио модел, често је потребно вршити корекције у два правца. Тако да ће се обрада области синуса вршити и други пут, из коронарног правца. На слици 29 може се видети зашто је недовољно сређивање модела само у једном правцу. Грешке се јављају услед немогућности потпуног поклапања области додатих моделу у различитим пресецима.

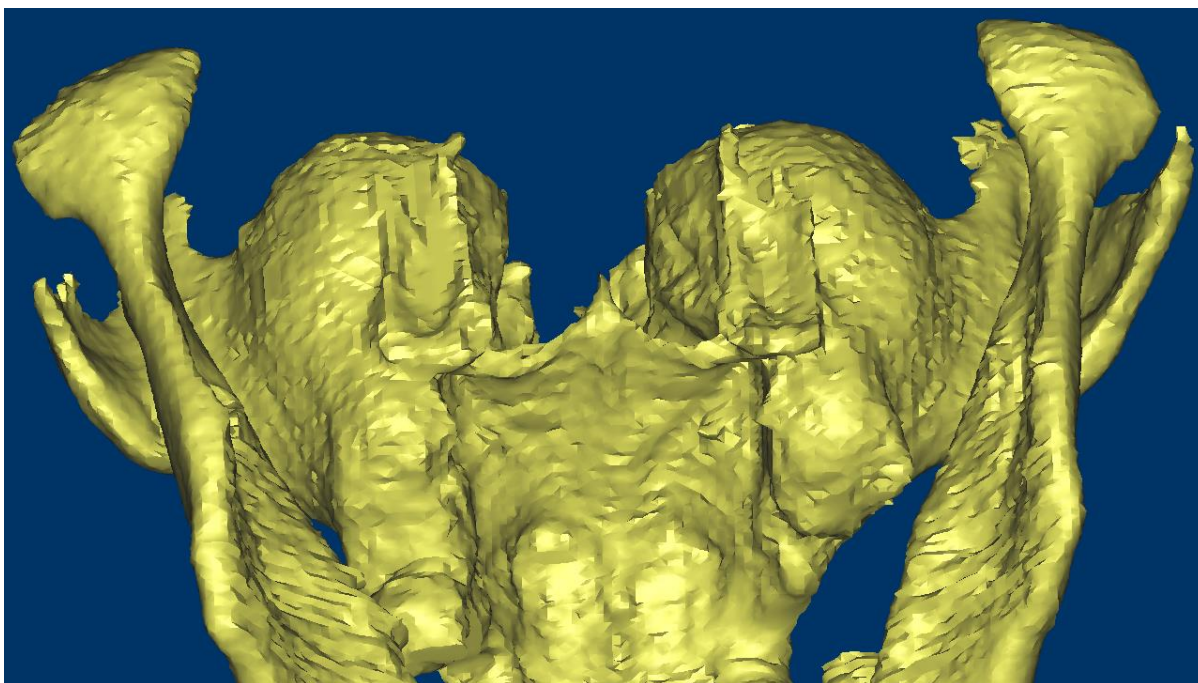


Слика 29. Недовољно обрађен модел

У суштини, модел би требало да се реконструише у сва три правца због што мањих неправилности. Ипак, на највећем делу модела довољно је извршити обраду у два правца.

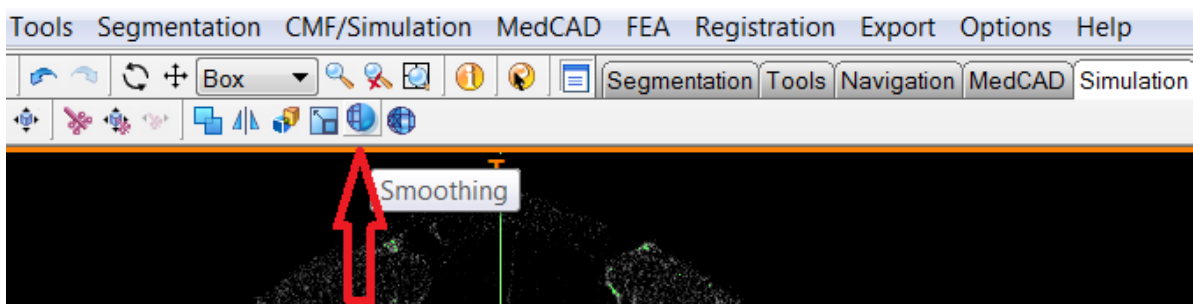


Слика 30. Реконструкција у коронарној равни



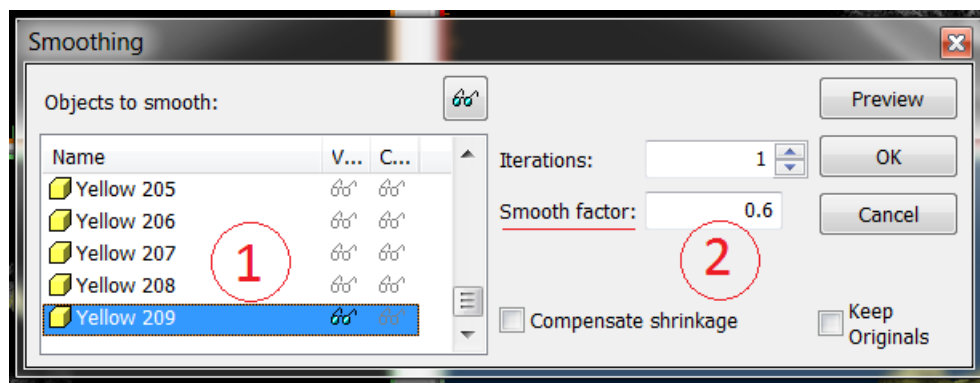
Слика 31. Изглед синусних шупљина након обраде у оба правца

Последња алатка која се користи за обраду модела у Mimics-у је алатка **Smoothing** са палете Simulation (слика 32). Ова алатка се користи да у одређеној мери аутоматски исправи неравнине на површини модела, како би она постала глаткија.



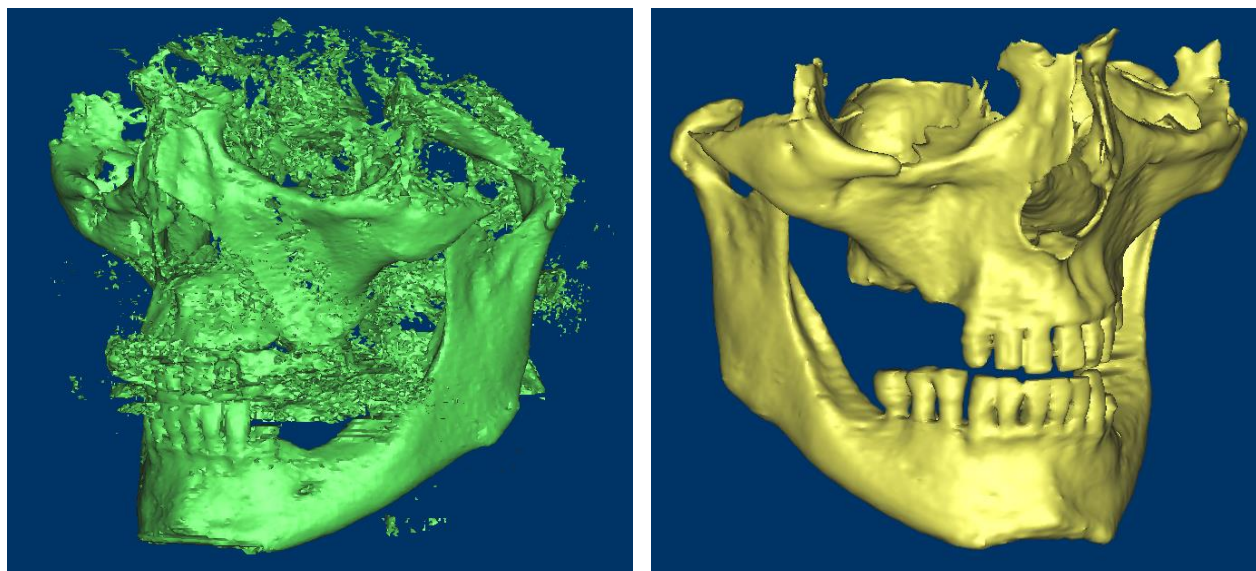
Слика 32. Алатка **Smoothing**

У менију који се отвара са избором ове алатке (слика 33) бира се модел над којим ће се извршити измене (позиција 1) као и фактор "глаткоће" који ће да се искористи при обради површине (позиција 2). У овом случају, избор је био фактор 0,6, али је поступак поновљен три пута због бољег исхода. Сређивање неравнина на површини модела посебно је битно због што лакше обраде модела у следећем програму – Geomagic-у.



Слика 33. Подешавања на за поступак аутоматског исправљања неравнина

На слици 34 може се видети како је изгледао модел након аутоматског извлачења из DICOM-а, и како изгледа модел након коначног сређивања помоћу алатки у Mimics-у.

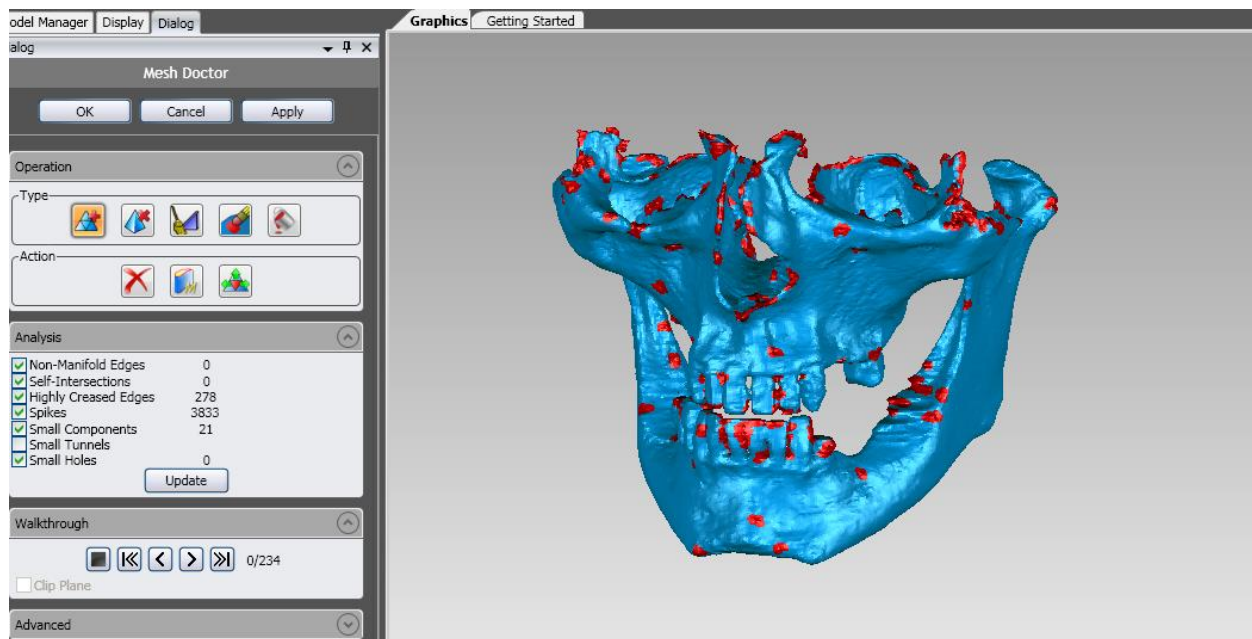


Слика 34. Коначни резултат рада у Mimics-у

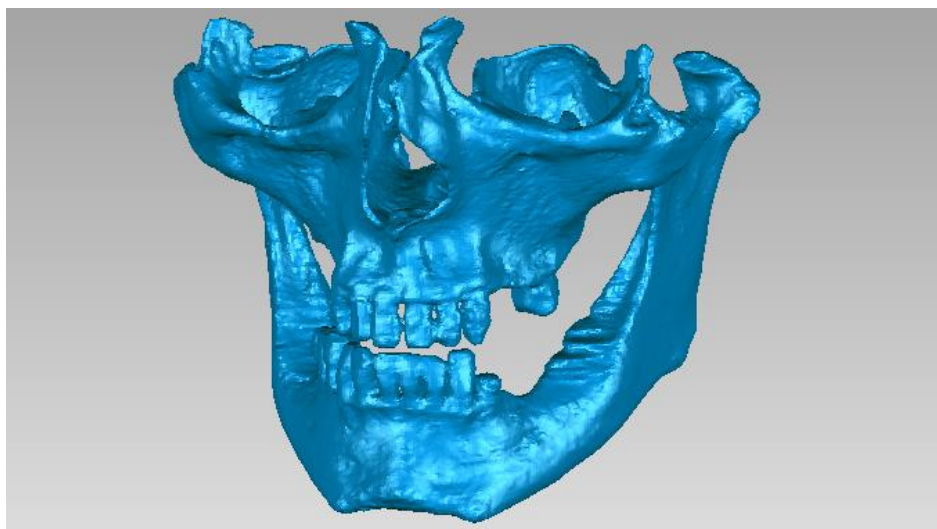
2.2 Рад у програму Geomagic

Програмски пакет Geomagic је развијен са циљем обраде 3Д снимака тако да се од њих генеришу 3Д модели који се даље могу користити и обрађивати за различите потребе. Програм је посебно оспособљен за обраду неравнина и неправилности на површини модела. Формат у коме се увози модел у овај програм је IGS.

Прво што нас програм пита када увеземо модел је у којим јединицама ће да се изражавају дужинске мере на моделу. У овом прозору бирају се милиметри. Друга опција која се такође нуди на почетку је опција **mesh doctor** која аутоматски попуњава сва места на површини модела на којима су отвори и чини компактну површину модела. Црвеном бојом (слика 35) обележена су сва места на којима је потребно аутоматско попуњавање отвора. Бирањем опције apply потврђује се коришћење mesh doctor-а и модел поприма изглед са слике 36.

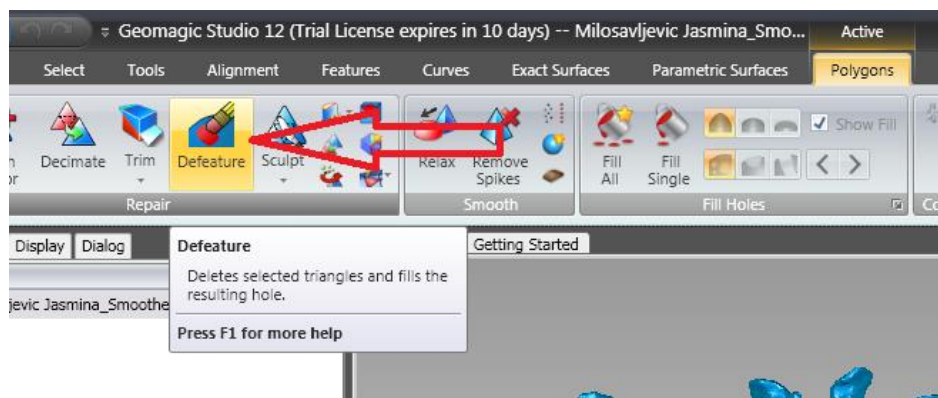


Слика 35. Алатка **Mesh doctor**



Слика 36. Модел
након уношења у
Geomagic

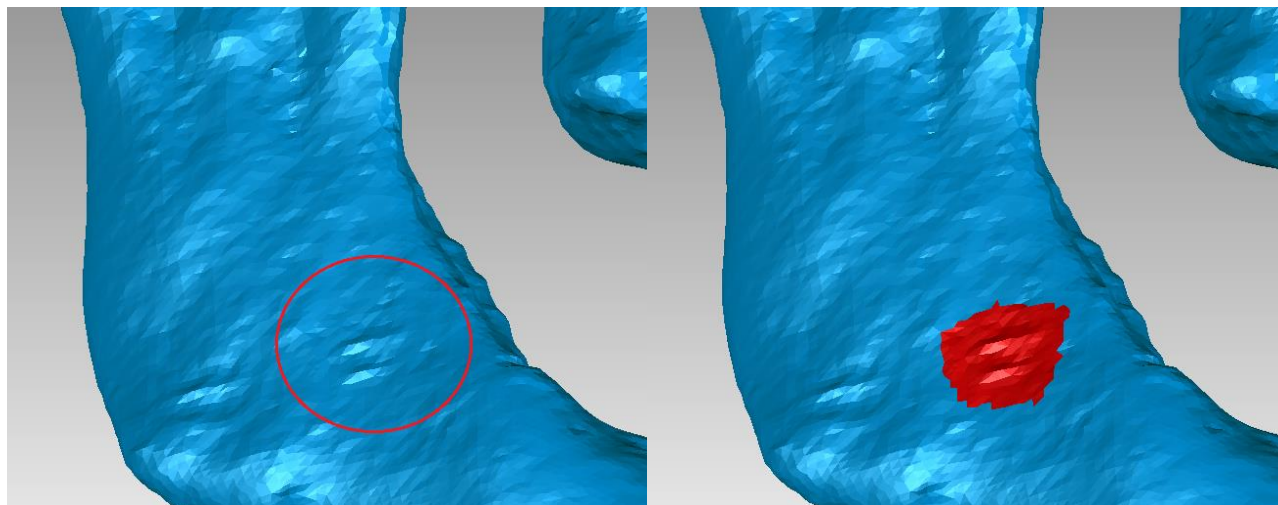
Као што се може приметити, на површини модела је и даље доста неравнина које би требало да се уклоне. Алат који се највише користи у ову сврху је алат **defeature** на палети **polygons** (слика 37). Овом опцијом на обележеним областима долази до прегруписавања троуглова полигоналне површине модела тако да се у што већој мери изгубе неравнине, а површина добије правилнији облик – ако је скоро равна, онда се тежи равној површини, а ако је испупчена, коришћењем ове опције тежи се равномерној сферној површини. Алат подразумева усклађивање површина тако што се број троуглова умножава, што донекле представља проблем, јер се тиме компликује даље управљање моделом.



Слика 37. Алат **defeature** на палети **polygons**

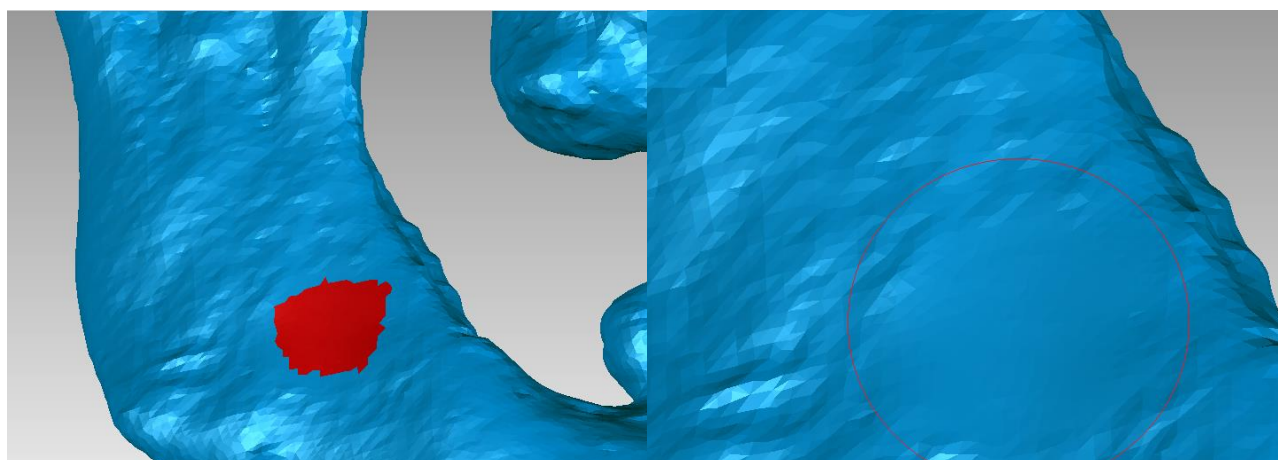
Како не би дошло до забуне и мишљења како се при обради овог модела претерује у погледу постизања глаткоће површина и самим тим, одступања од основног циља то јест веродостојности модела, напомиње се да су пред само моделирање, у сарадњи са асистентима и професорима медицинског факултета изучаване кости лобање (између осталог и кадаверски примерци) па се на основу тога "сређивао" и овај модел.

Коришћењу алатке defeature претходи обележавање жељеног подручја. То се врши једноставним задржавањем левог тастера и превлачењем преко жељене области. Област која је обележена постаје црвена. На слици 38 види се једна мања област коју би било пожељно изравнати, и почетак тог поступка.



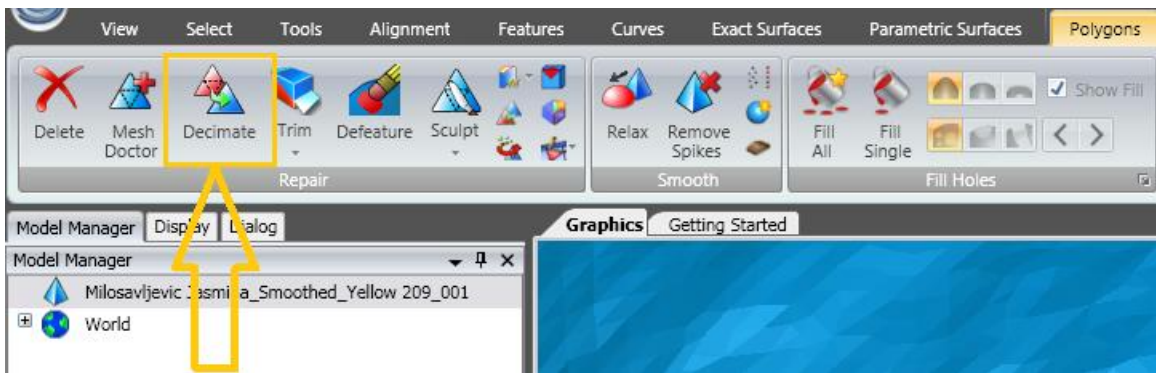
Слика 38. Обележавање области коју се обрађује

Командом defeature долази до прерасподеле троуглова на обележеној површини и она постаје знатно глаткија (слика 39).



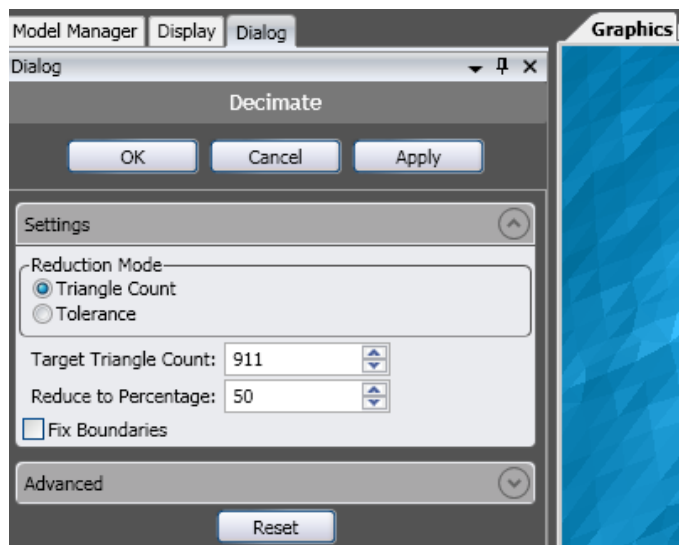
Слика 39. Површина након коришћења опције defeature (на слици десно обележена црвеном кружницом)

Као што је напоменуто, када се повећава број троуглова на површини, модел је компликованији за обраду (више ће времена требати за поступке које програм врши аутоматски, већа је величина коју модел заузима). Због тога након коришћења претходног алата користи се нова опција **decimate** са палете polygons (слика 40).



Слика 40. Алат decimate са палете polygons

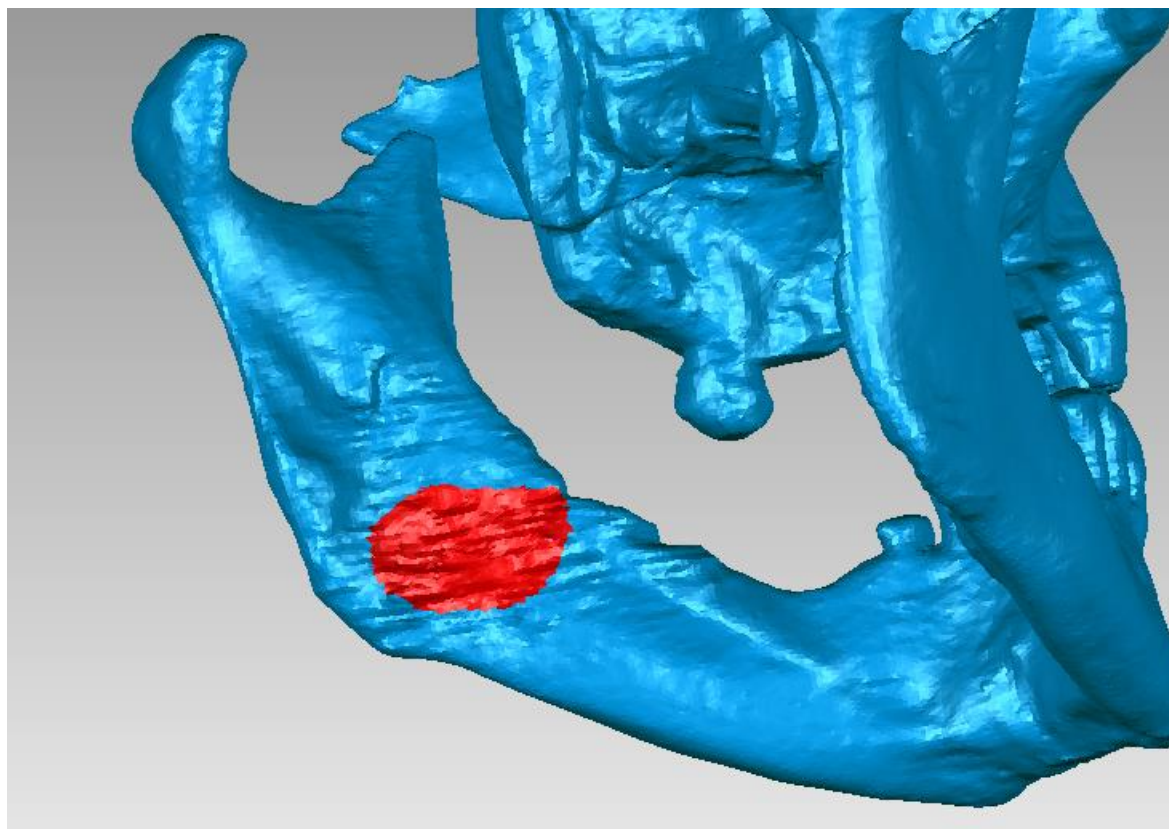
Опцијом decimate (као што иконица илуструје) се врши редукција броја троуглова, тамо где то неће нарушити општи облик површине. Обележавањем жељене површине и одабиром ове функције отвара се нови мени у коме се корисник пита за колико процената жели да смањи број обележених троуглова (слика 41). Овим менијем програм такође обавештава корисника и колико троуглова је обележено и који ће бити њихов коначан број после извршења опције.



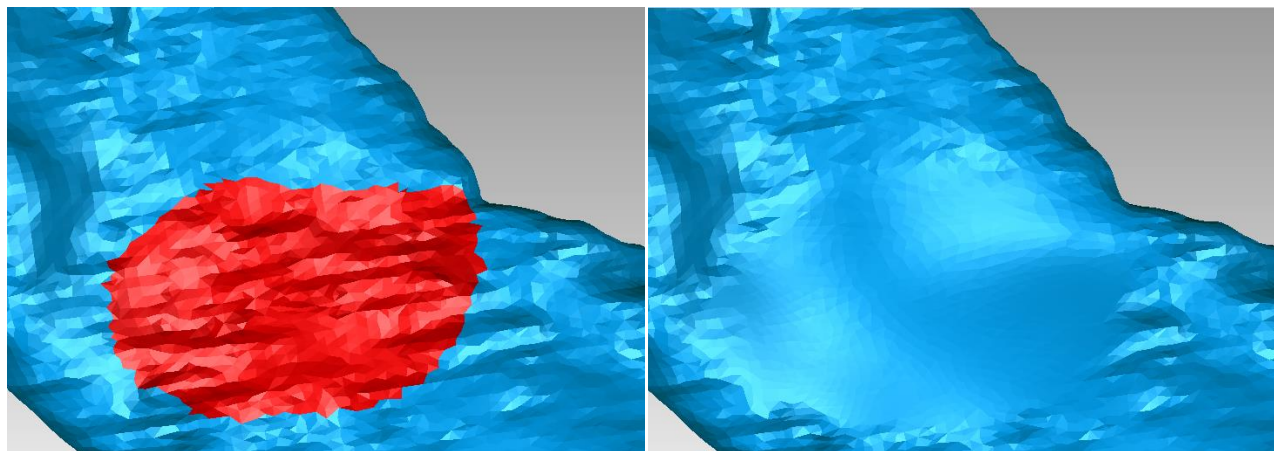
Слика 41. Подешавања параметара за опцију decimate

У суштини, целокупна обрада у програму Geomagic своди се на понављање ова два поступка на целој површини све док површина не буде довољно глатка да можемо да извршимо трансформацију у surface model. Најбољи начин за обраду модела је да се поступак понавља на појединачним мањим областима, јер се тиме не нарушава веродостојност модела.

На следећем примеру (слика 42) може се видети обрађивање дела површине на области мандибуле. Овај део модела је у Mimics-у посебно лоше извучен из DICOM-а.

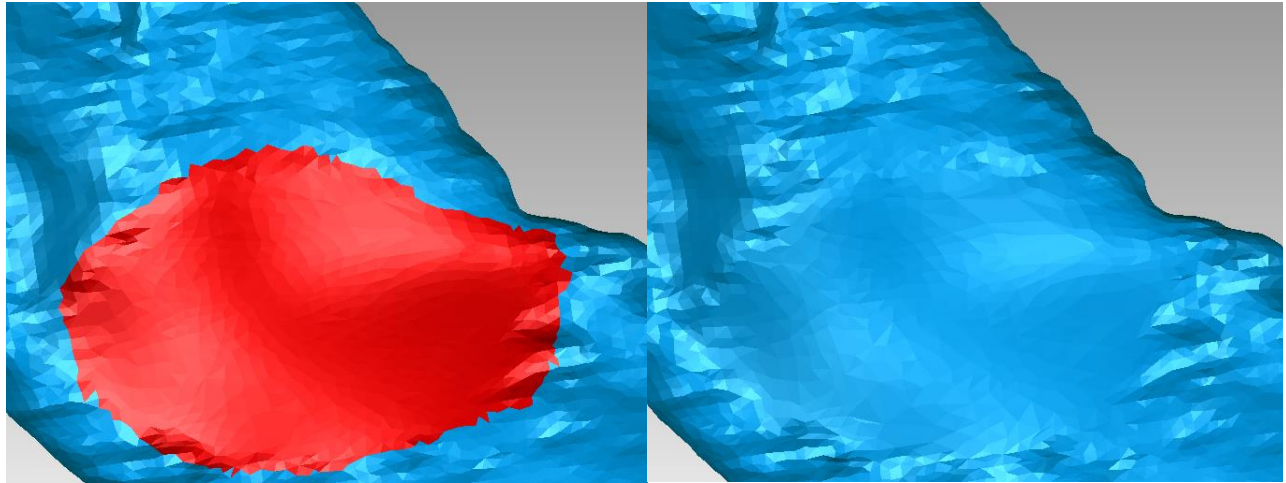


Слика 42. Неправилности површине модела на доњој вилици



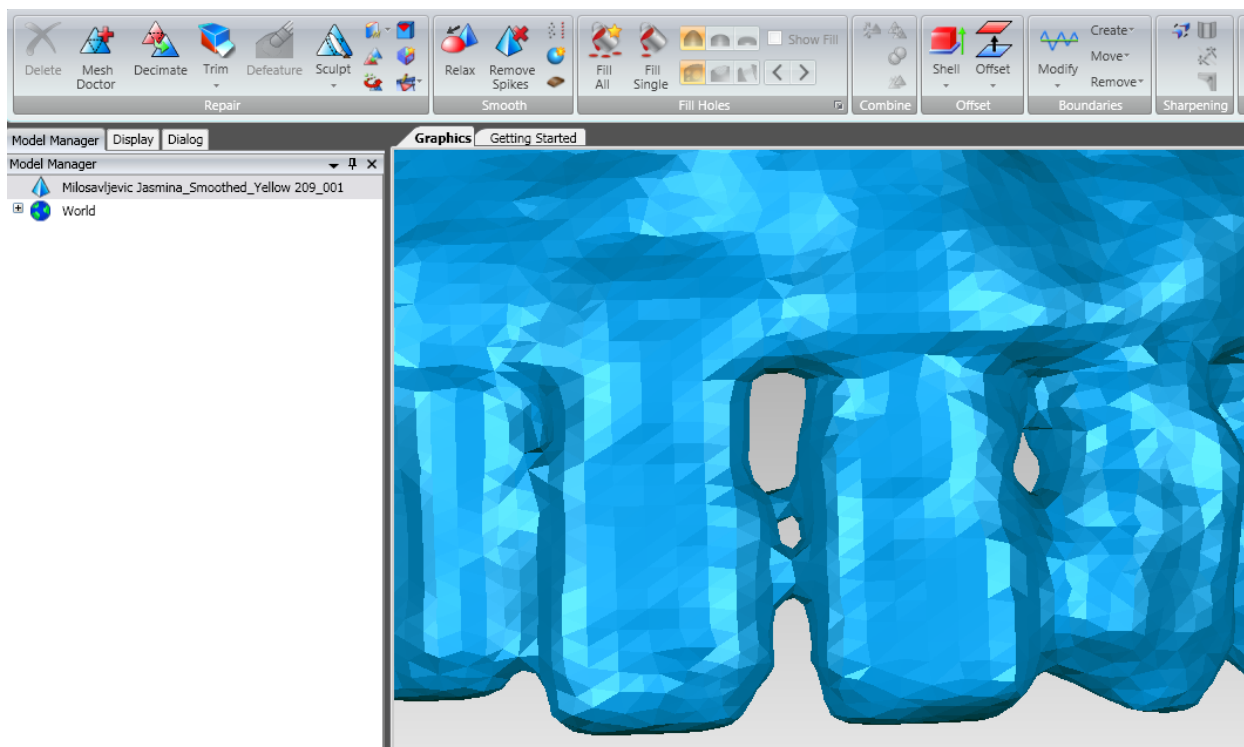
*Слика 43. а) Обележавање области за опцију defeature
Слика 43. б) Област након извршене опције defeature*

Као што се може видети са слике 43 б), обрађена површина се приметно разликује од околних области. Због тога, користиће се накнадно опција decimate (слика 44).



Слика 44. а) обележавање површине за опцију decimate
Слика 44. б) Област након коришћења алата decimate

Посебно битна и област за обраду (због своје сложености) је област зуба. Због великог одсјаја од пломби, овај део модела ја одрађен са мањом прецизношћу. Geomagic пружа боље могућности за обраду ових области од Mimics-а и могуће је уверити се у то на следећим сликама. На слици 45 могу се видети неправилности модела на површини зуба. Сређивање овог дела модела нема велики утицај на квалитет симулације покрета мандибуле, али нарушава естетику модела.



Слика 45. Неправилности при извлачењу површине зуба

Највећи проблем при обради површина на зубима је што се оне додирују. Поступак превазилажења овог проблема је описан на слици 46:



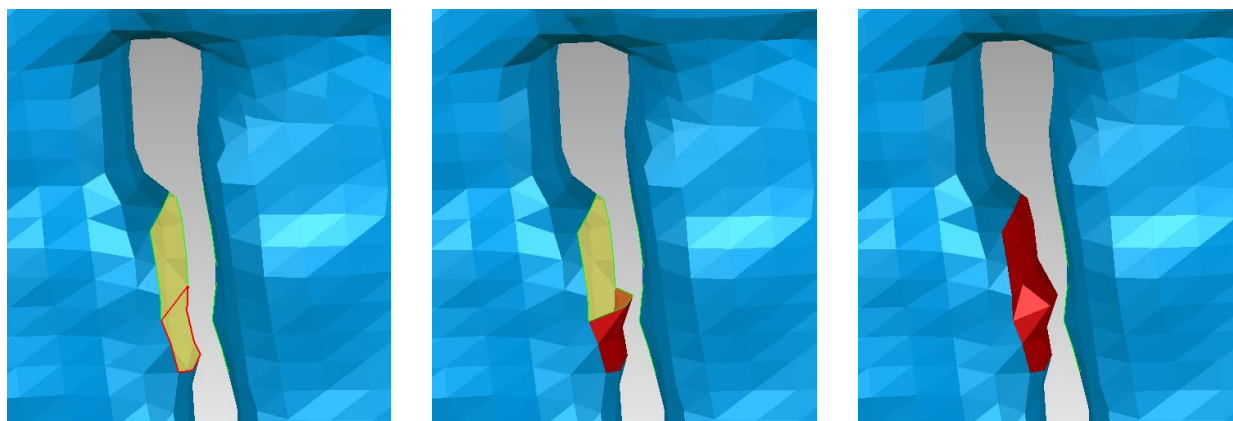
Слика 46. а) Обележаваће спајајућих области

Слика 46. б) Брисање обележених троуглова

Следећи поступак је ручно попуњавање празнина насталих брисањем троуглова са површине зуба. То се врши алатком **fill single** са палете **polygons** (слика 47). На слици 48 је приказано ручно попуњавање отвора који је направљен.

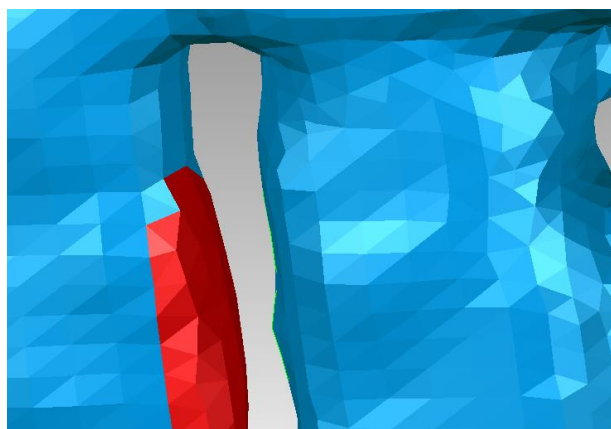


Слика 47. Алатка *fill single*; позицијом 1 означена је опција комплетног аутоматског попуњавања рупе; позицијом 2 делимично попуњавање рупе; а позицијом 3 грађење "мостића".

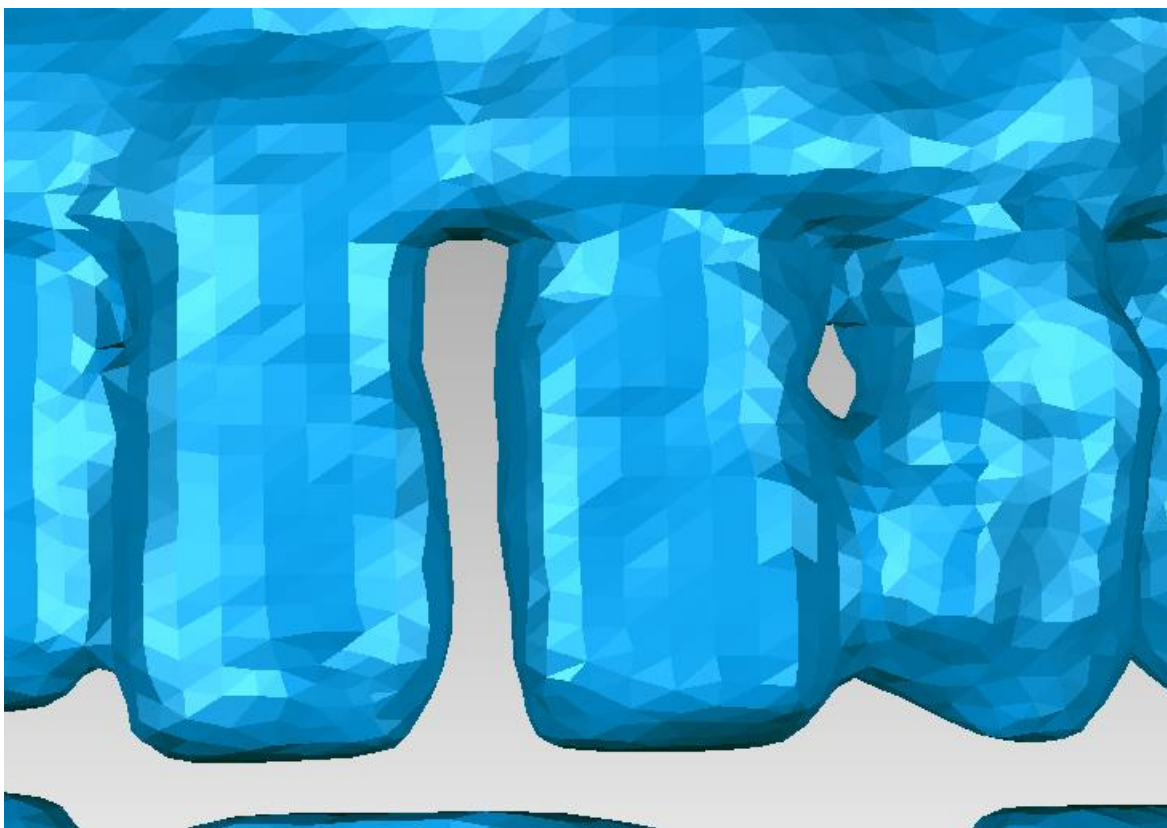


Слика 48. Попуњавање отвора на површини зуба

Како се може видети са слике 44, неопходно је да се део површине који је обновљен и преправљен и "испегла". То ће се извршити опцијом *defeature* (слика 49). Исти поступак ће се спровести и на суседном зубу. Резултат је приказан на слици 47.

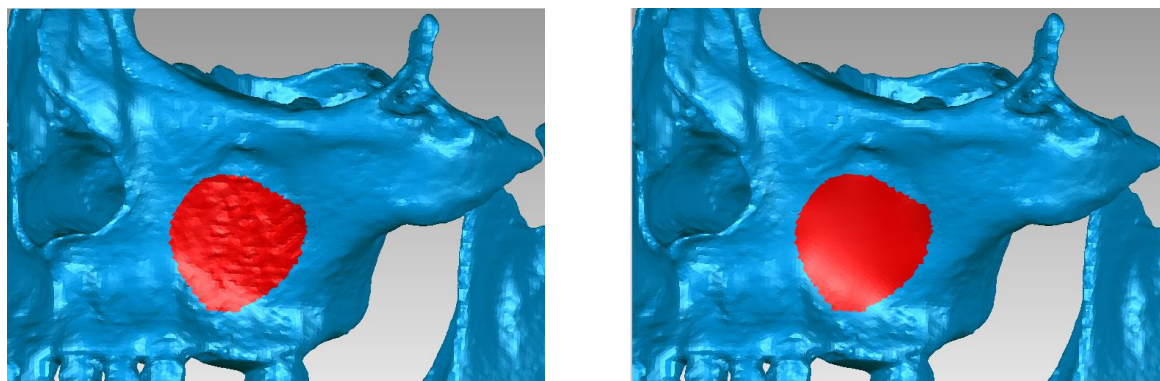


Слика 49. Исправљање добијене површине

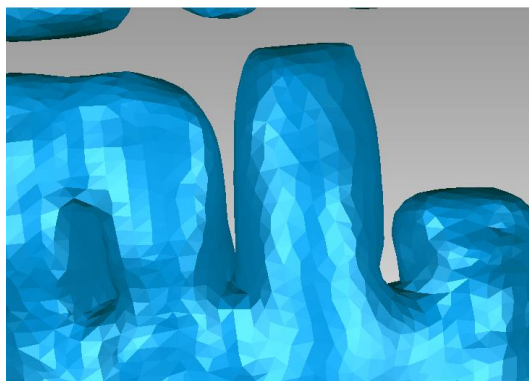
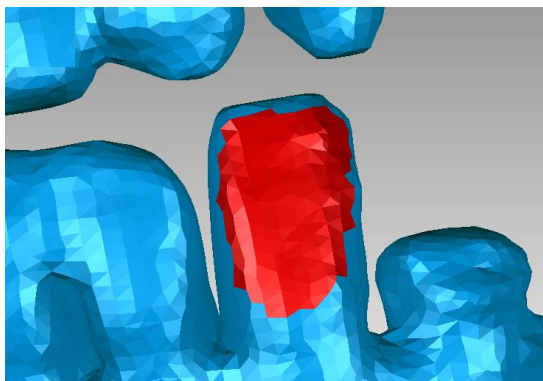


Слика 47. Крајњи резултат обрађивања површина између прва два зуба

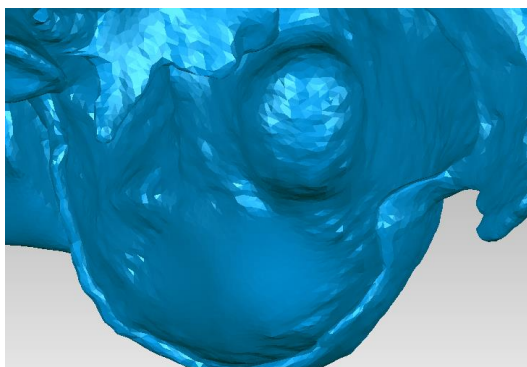
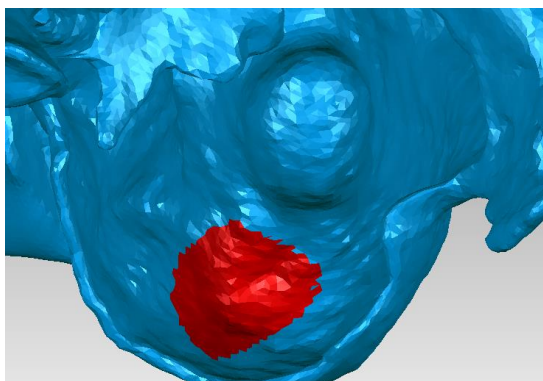
На следећим примерима (слика 48) могу се видети још неки примери исправљања неправилности на појединим областима модела. Исправљање неравнина и неправилности на површини модела посебно је битно због каснијег преображаја објекта у surface model који ће бити спреман за рад у Cati-ји.



Слика 48. а) Спољашња област синуса

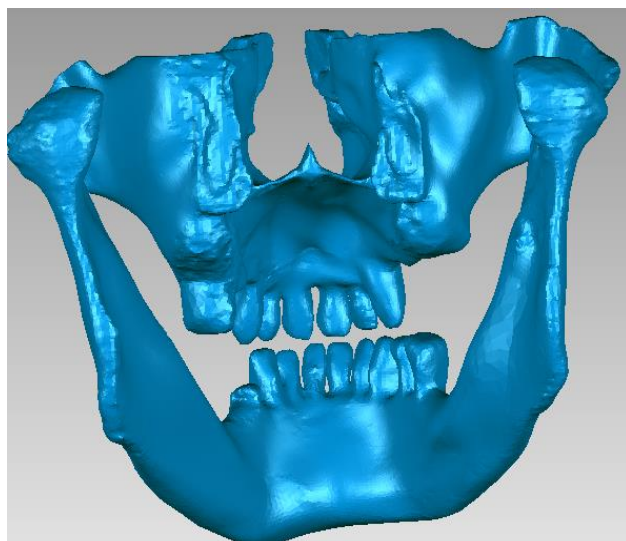
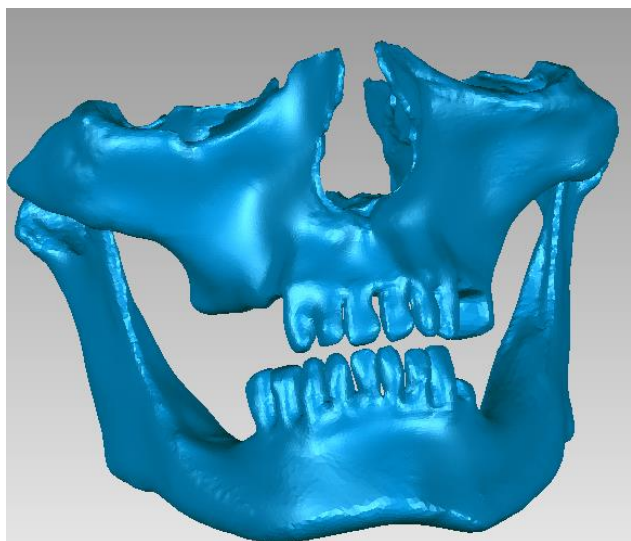


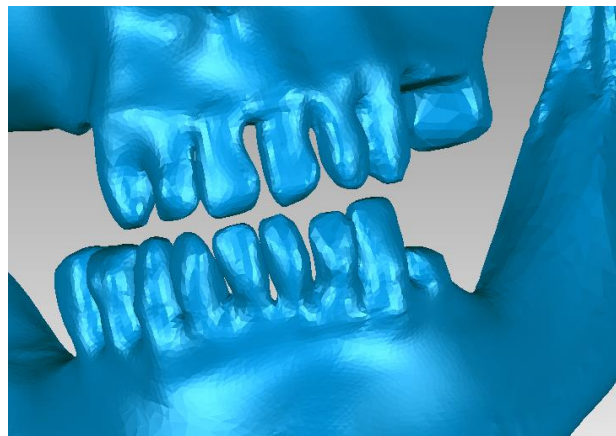
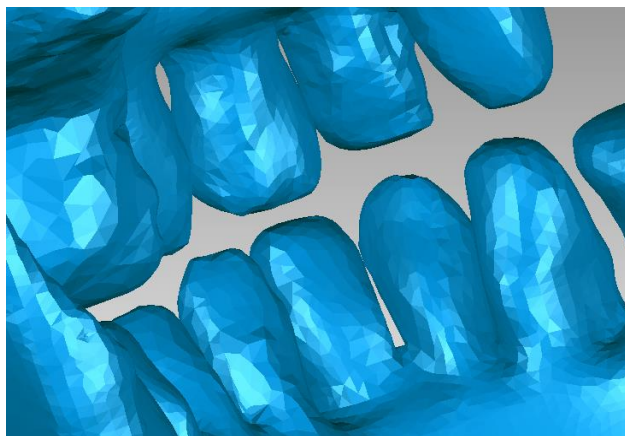
Слика 48. б) Један од зуба



Слика 48. в) Реконструкција површина у унутрашњости синуса

После свих потребних исправки, модел је пресвучен релативно глатком површином и добија задовољавајући изглед (слика 49). У оваквом стању, модел је спреман за следећу фазу, тј. трансформацију у површински модел.





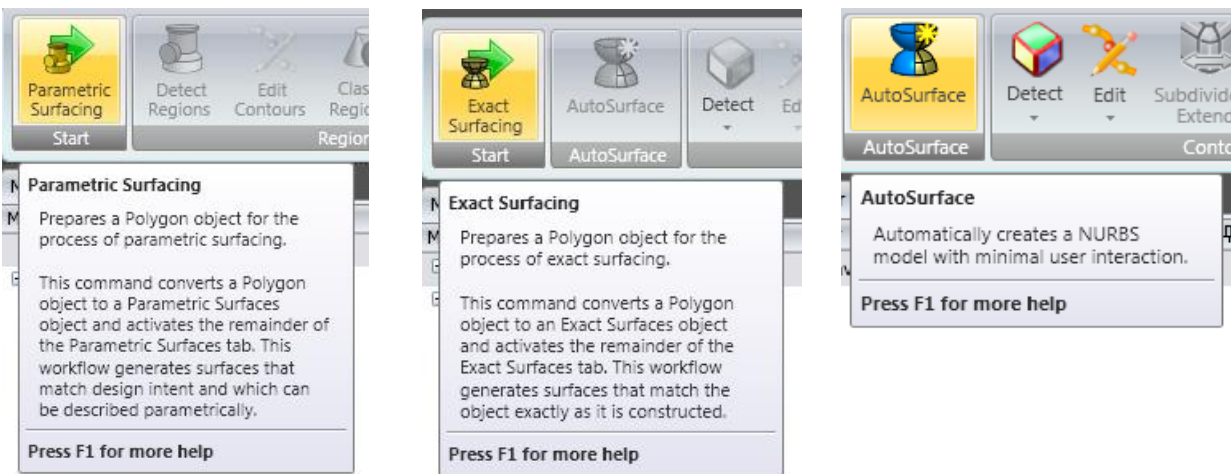
Слика 49. Изглед модела по завршетку обрађивања у Geomagic-у

Следећа фаза је стварање површинског модела. Пре него што се покрене ова опција, потребно је активирати алатку **make manifold** (слика 50).



Слика 50. Алатком **make manifold** програм аутоматски прегледа целу површину у потрази за троугловима који нису у потпуности (са све три ивице) повезани у целину са остатком модела и затим их повезује или брише

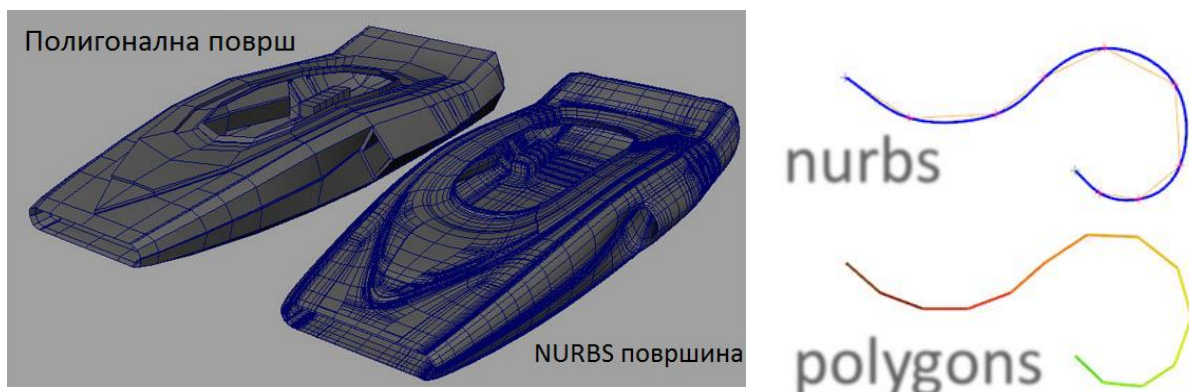
Опцијом **Parametric surfacing** са палете parametric surfaces (слика 51 а) припрема се модел који је и даље у форми polygonal object (која је била погодна за обаду) за прелазак у **parametric surfaces object**, и у том формату, реконструкција модела ће практично бити готова. Следећи корак је употреба опције **Exact surfacing** са палете Exact surfaces (слика 51 б). Трећи корак је опција **Auto surface** са исте палете алатки (слика 51 в) којом се активира стварање траженог **NURBS** модела.



Слика 51.

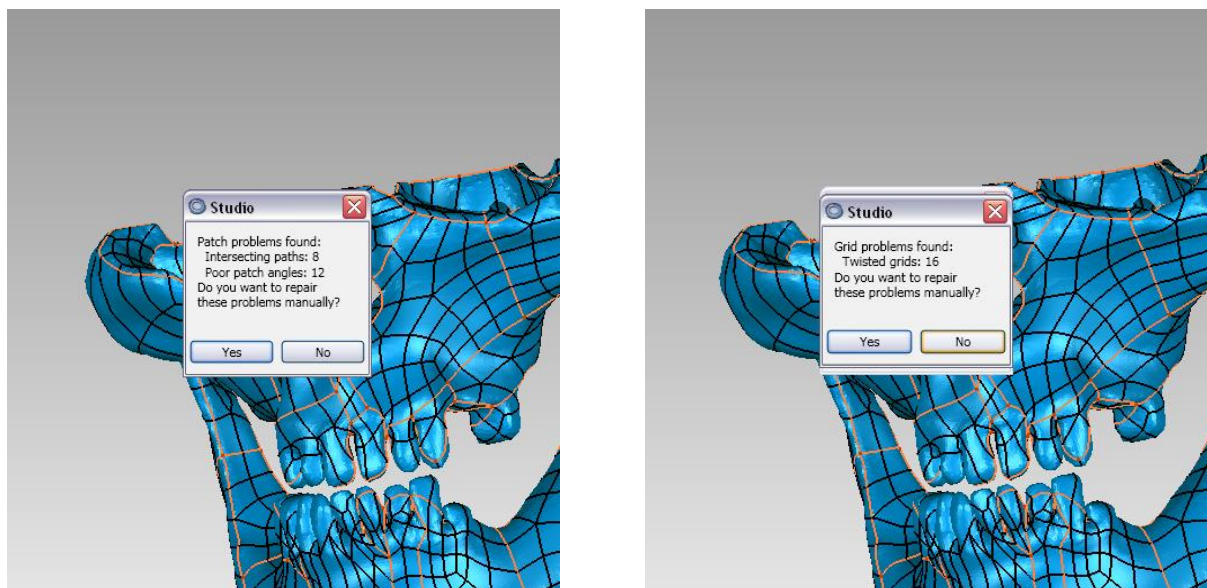
а) Parametric surfacing б) Exact surfacing в) AutoSurface

NURBS је скраћено од **Non-Uniform Rational B Spline**. NURBS surface је тип површине која се користи за представљање тродимензионалних објеката у компјутерској графичи. Основна разлика овакве површи од полигонално представљене површи (каквом је до сада био представљен модел) је то што су чворови на површини повезани кривим линијама, а не правим линијама као код полигона. Ове криве програм конструише на основу положаја чворова, по сличном принципу на који су настале Безијеове криве (Пјер Безијер, фран. Pierre Étienne Bézier, 1910 – 1999, сматра се једним од оснивача и утемељивача рачунарске графике).



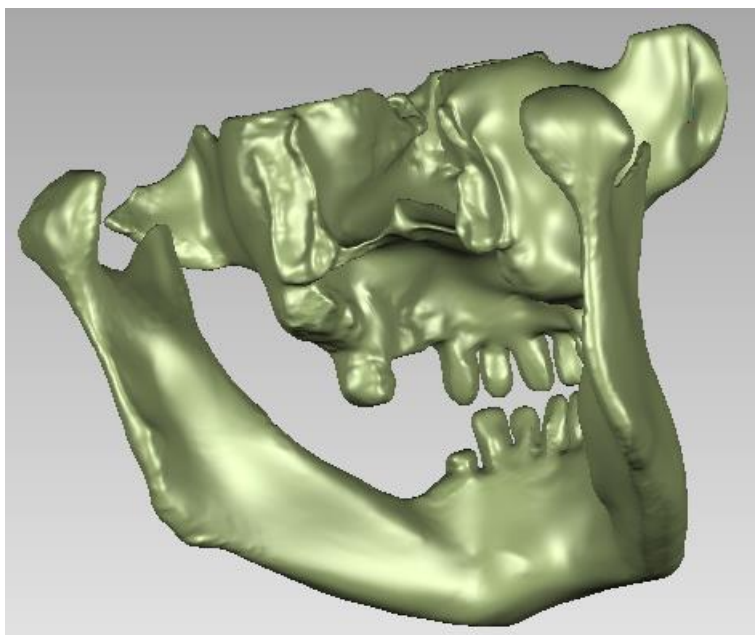
Слика 52. Принципске разлике између полигоналне површи и NURBS површи

Након активирања опција описаних на слици 51, долази до аутоматске обраде целог модела. Овај поступак има осам фаза, и може да потраје неколико минута. У току обраде, у случају да програм наиђе на потешкоће приказују се прозори са опцијама за њихово ручно или аутоматско решавање (слика 53).



Слика 53. Одабиром опције по програм аутоматски решава проблеме

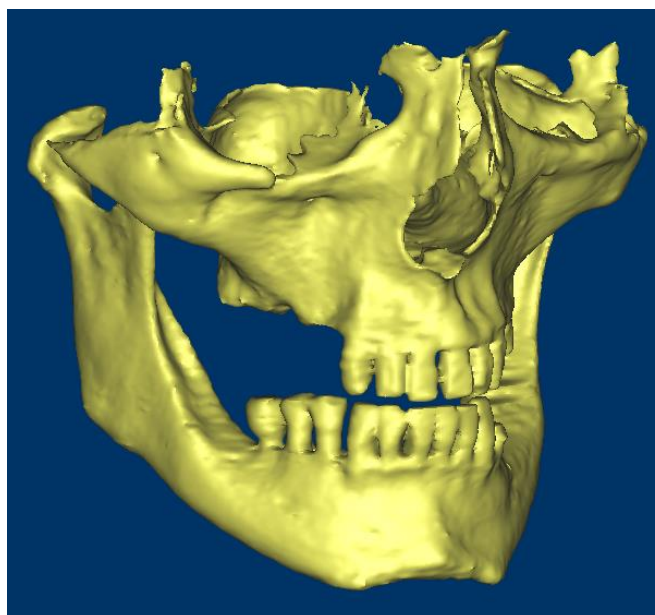
Преласком у NURBS surface модел, посао у GEOMAGIC-у је завршен, и модел је спреман за симулацију кретања у програмском пакету CATIA. На слици 54 види се да је површина костију задовољавајуће глатка и правилна.



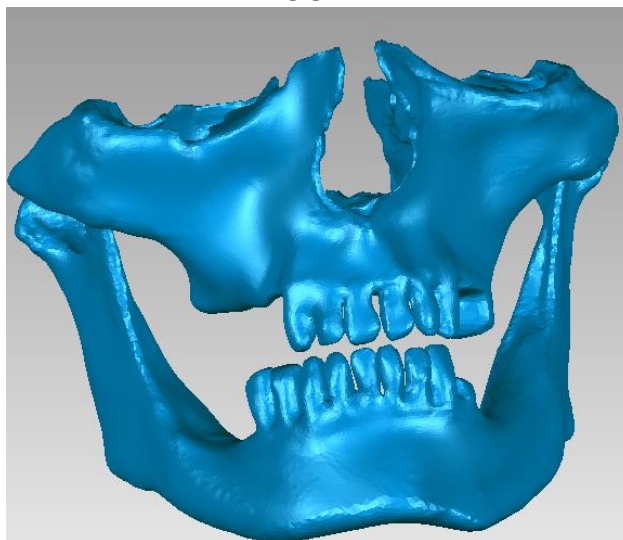
Слика 54. Модел након комплетне обраде у Geomagic-у



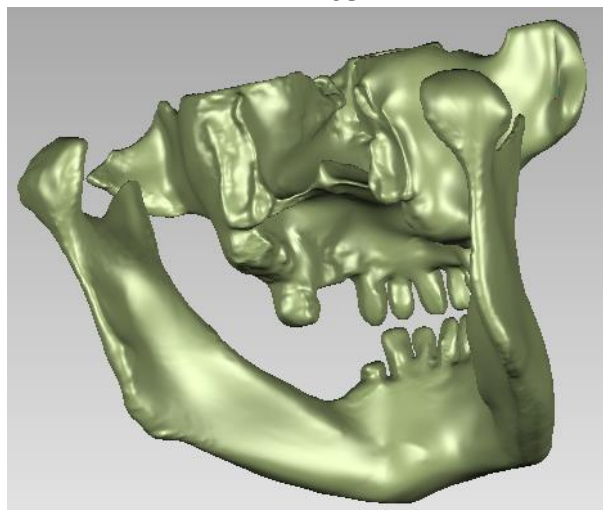
DICOM



Mimics



Geomagic –polygonal object



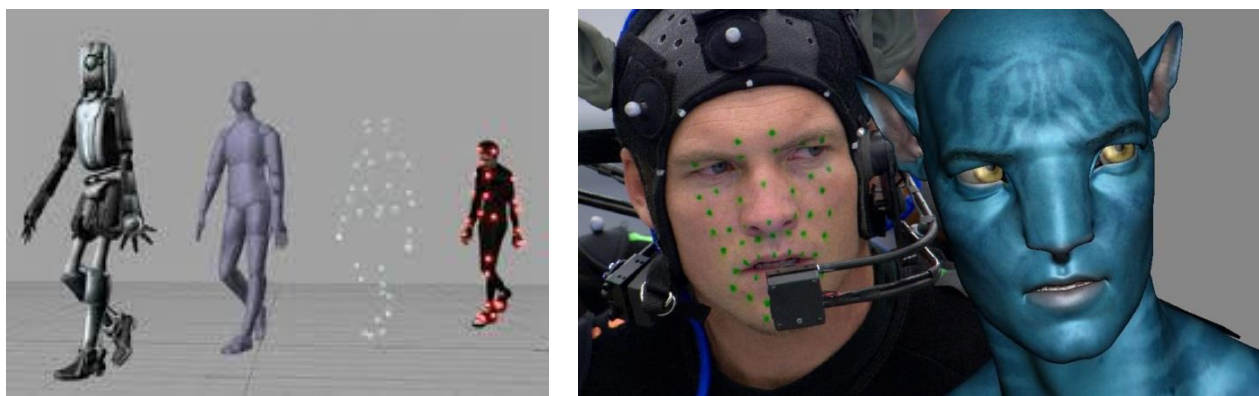
Geomagic-NURBS surface

Слика 55. Модел у различитим фазама обраде

3. Снимање покрета

Следећа фаза овог рада односи се на снимање покрета вилице. За овај посао коришћен је доста савремен систем за снимање и аквизицију података – OptiTrack. Ова фирма је највећи светски произвођач хардверских и софтверских компоненти за бележење покрета (motion capture) и обраду добијених података. У свету се највише користи за филмску индустрију и анимације, као и за стварање видео игара. Због својих могућности, пре свега доста прецизног и прилагодљивог поступка снимања покрета, систем се показао идеалним за ову фазу пројекта.

Основни принцип рада овог система је постављање одређеног броја маркера (зависно од врсте кретања које желимо да забележимо) на испитаника. Потом камере снимају и бележе положај маркера више десетина пута у секунди. На основу референтног система, и промене положаја маркера, софтвер може пренети то кретање на нови, увезени модел (слика 56).



Слика 56. Принципи Motion capture-a

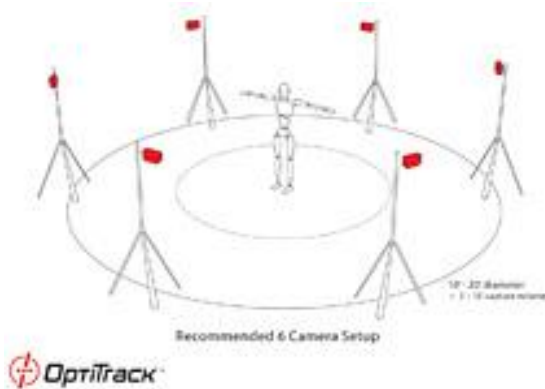
Маркери се углавном стављају на местима зглобова, и могу се израђивати на више начина – магнетни, ЛЕД маркери, рефлектујући маркери и сл. У нашем случају, користили смо инфрацрвене камере и рефлектујуће маркере. Ради што веће прецизности, снимања су понављања, а крајњи подаци добијани поређењем забележених путања.

Снимање је извршено у сарадњи са Медицинским факултетом у Крагујевцу, на одељењу за ортопедију и физиотерапију Клиничког центра Крагујевац (слика 57). За аквизицију података коришћен је софтвер Arena.



Слика 57. Лабораторија за снимање покрета

Први корак у поступку снимања било је постављање опреме на одговарајући начин. Препорука компаније OptiTrack је постављање шест камера као на слици 58. Међутим, за потребе овог снимања било је довољно и коришћење три камере под углом од око 90 степени.

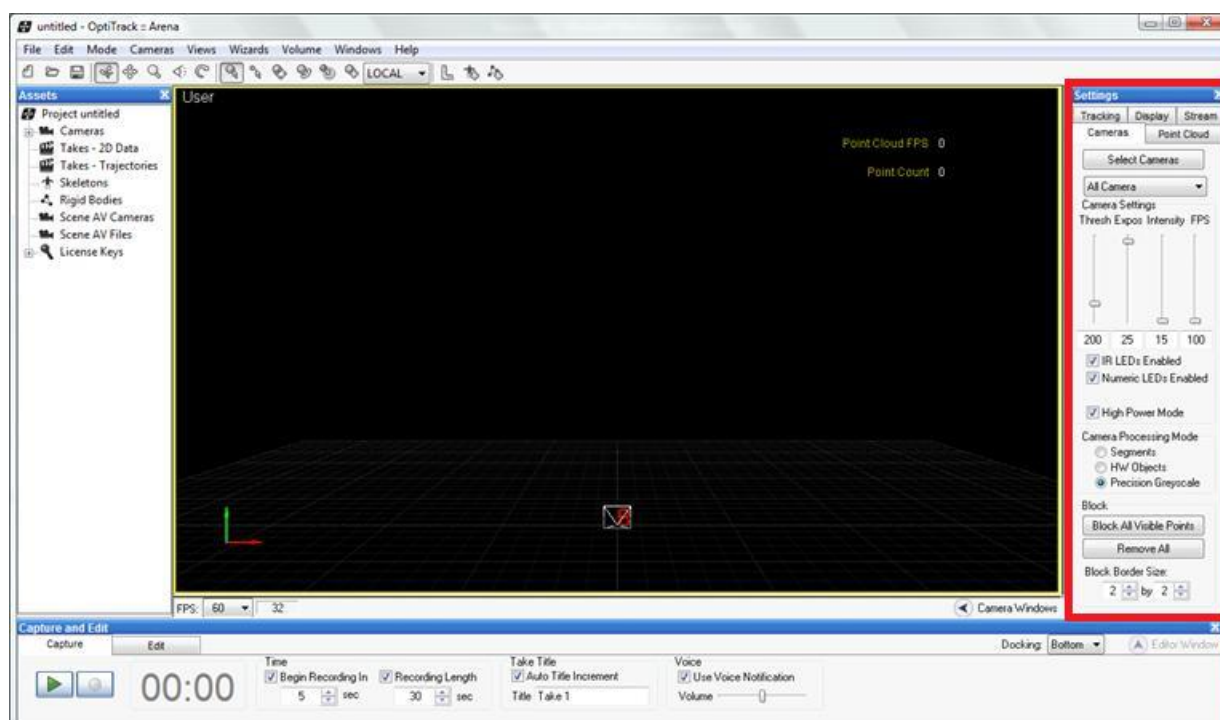


Слика 58. Препорука за постављање камера при снимању

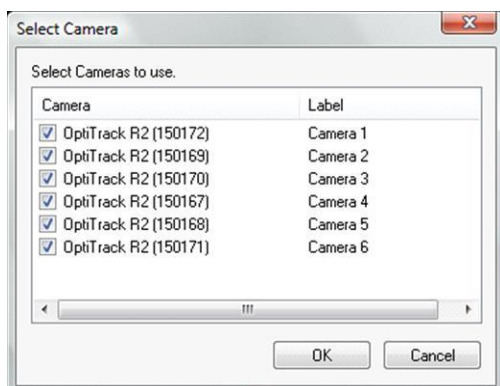
Камере се повезују са рачунаром, а активирање софтвера се врши помоћу USB flash drive-а (хардверски кључ).



Радни простор програма Arena приказан је на слици 59. Са десне стране, у прозору Settings бирамо картицу Cameras и на њој опцију Select cameras. Након тога отвара се прозор Select camera (слика 60) у коме се бира које ће се камере користити за снимање. У случају да се у овом прозору не виде све камере које су прикључене, најчешћи је случај да каблови нису најбоље повезани.



Слика 59. Радни простор програма Arena



Слика 60. Обележавање камера којима ће се вршити снимање

Када је систем укључен, најпре се врши калибрација. Као провера исправног рада система, користи се посебан калибрирајући штап са три маркера и посматра се његово кретање на екранима (слика 61). Избор и дефинисање референтне равни врши се помоћу посебног троугла са три маркера. Задржавањем троугла у хоризонталном положају, или пак његовим спуштањем на под, дефинише се положај референтне фиксне равни. Кретања свих маркера, програм бележи у односу на ова почетна три маркера.



Слика 61. Калибрација и провера рада система

Након почетних подешавања, испитаник се поставља у област снимања, и на доњу вилицу се постављају рефлектујући маркери. Постављено је пет маркера, по један на темпоромандибуларне зглобове, по један на избочину мандибуле, и један на врх браде (слика 62). Посебно је важно да се маркери поставе тако да нема великих одступања од реалног кретања услед померања коже. У случају да је то неизбежно (нпр. прва два маркера), треба се узети у обзир њихово померање у току снимања.



Слика 62. Постављање маркера на испитаника

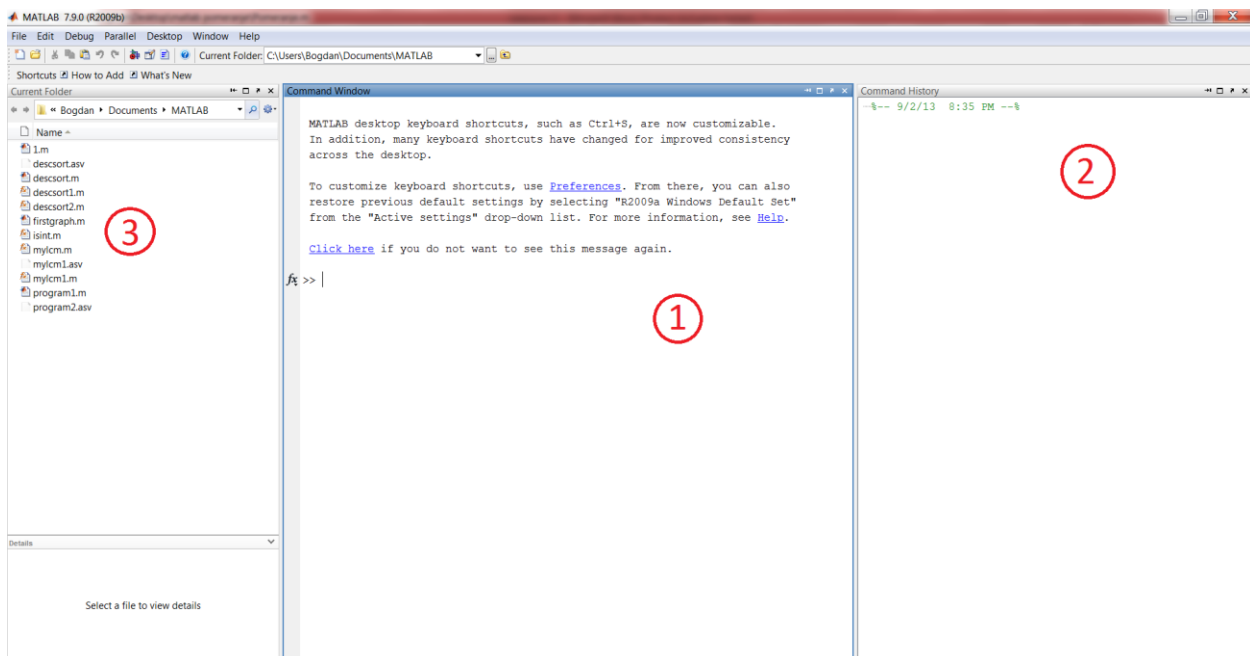
Након почетних подешавања, почиње снимање. Снимано је више типова кретања вилице – жвакање, мљацање, зевање, транслаторно померање; у периодима од по тридесет секунди, са понављањима (слика 63).



Слика 63. Снимање покрета

4. Обрада сигнала

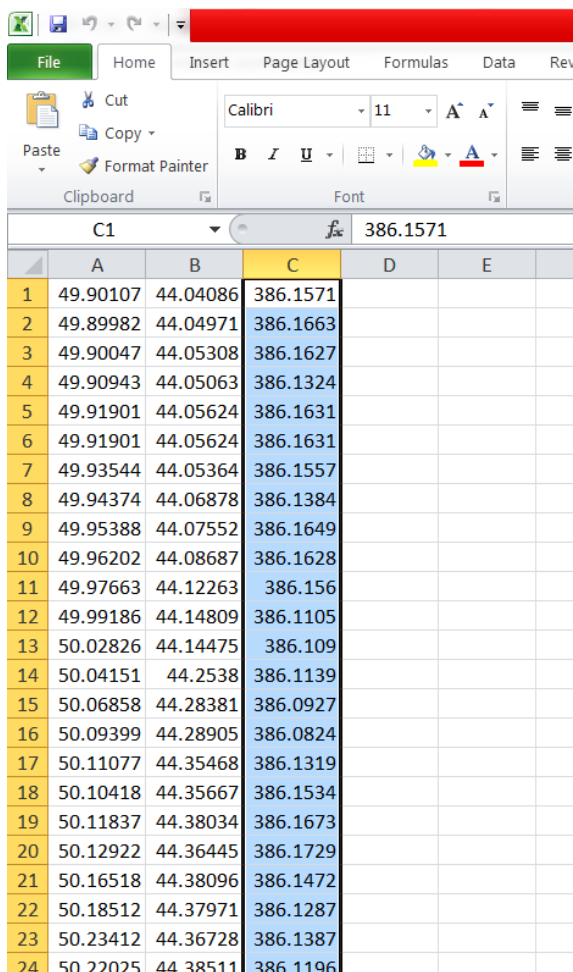
Обрада сигнала биће извршена у програму Matlab. Овај софтвер је направила фирма MathWorks, а посебне предности програма су рад са матрицама, приказивање и рад са функцијама, примена алгоритама и сл. Matlab је софтвер који пружа велики број опција, а део који је уско повезан са тематиком овог рада јесте креирање криве на основу координата задатих тачака као и апроксимација криве коју те тачке сачињавају, у циљу обраде добијеног сигнала.



Слика 64. Интерфејс **Matlab**-а. Позиција 1) показује командни прозор у коме се уносе функције, позиција 2) је део радног простора у коме се види историја рада у програму, позиција 3) служи за преглед фолдера у којима се ради

Сигнал који је добијен снимањем и аквизицијом у Areni забележен је у облику матрице са више стотина (тачније 818) меморисаних положаја постављених маркера. Дакле, целокупни покрет мандибуле је забележен помоћу 3 x 818 координата за сваки маркер (слика).

Први корак у Matlab-у је уношење података о кретању у програм. То се врши помоћу учитавања матрица у програм командом – ***xlsread***. Нпр. ***a = xlsread('Име фајла.xls')***; за први маркер. На овај начин могу се унети подаци о кретањима свих маркера. Дефинисање појединачних координата, нпр. X координата за сваки маркер врши се избором колоне у којој се налазе X координате тог маркера (нпр. ***x1 = a(:,1)***; за први маркер и X координате).

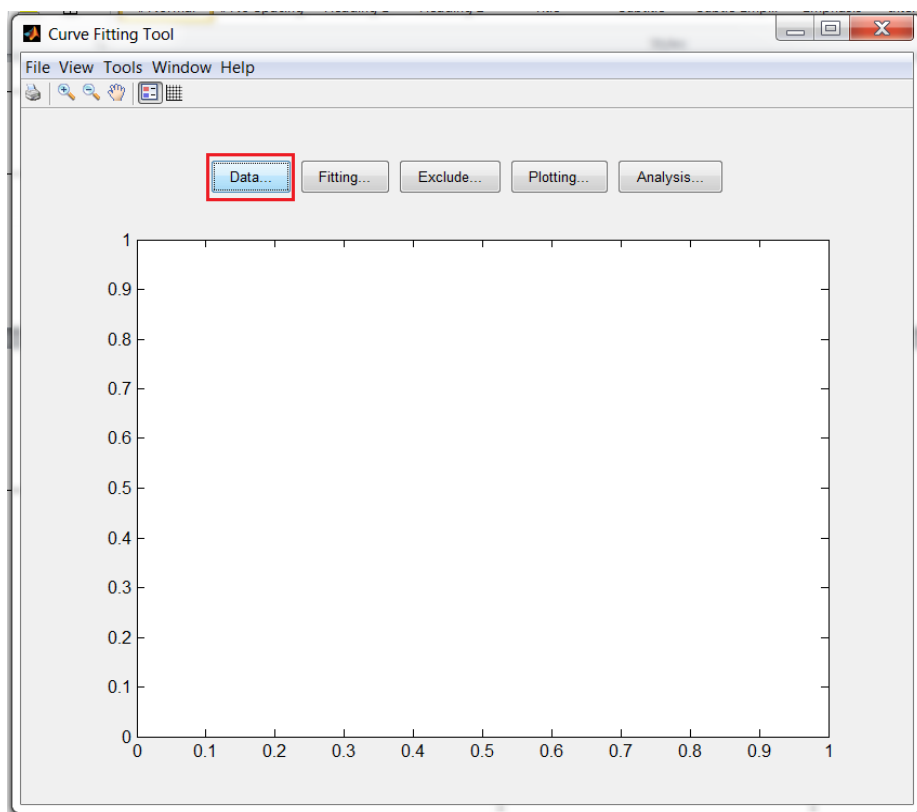


	A	B	C	D	E
1	49.90107	44.04086	386.1571		
2	49.89982	44.04971	386.1663		
3	49.90047	44.05308	386.1627		
4	49.90943	44.05063	386.1324		
5	49.91901	44.05624	386.1631		
6	49.91901	44.05624	386.1631		
7	49.93544	44.05364	386.1557		
8	49.94374	44.06878	386.1384		
9	49.95388	44.07552	386.1649		
10	49.96202	44.08687	386.1628		
11	49.97663	44.12263	386.156		
12	49.99186	44.14809	386.1105		
13	50.02826	44.14475	386.109		
14	50.04151	44.2538	386.1139		
15	50.06858	44.28381	386.0927		
16	50.09399	44.28905	386.0824		
17	50.11077	44.35468	386.1319		
18	50.10418	44.35667	386.1534		
19	50.11837	44.38034	386.1673		
20	50.12922	44.36445	386.1729		
21	50.16518	44.38096	386.1472		
22	50.18512	44.37971	386.1287		
23	50.23412	44.36728	386.1387		
24	50.22025	44.38511	386.1196		

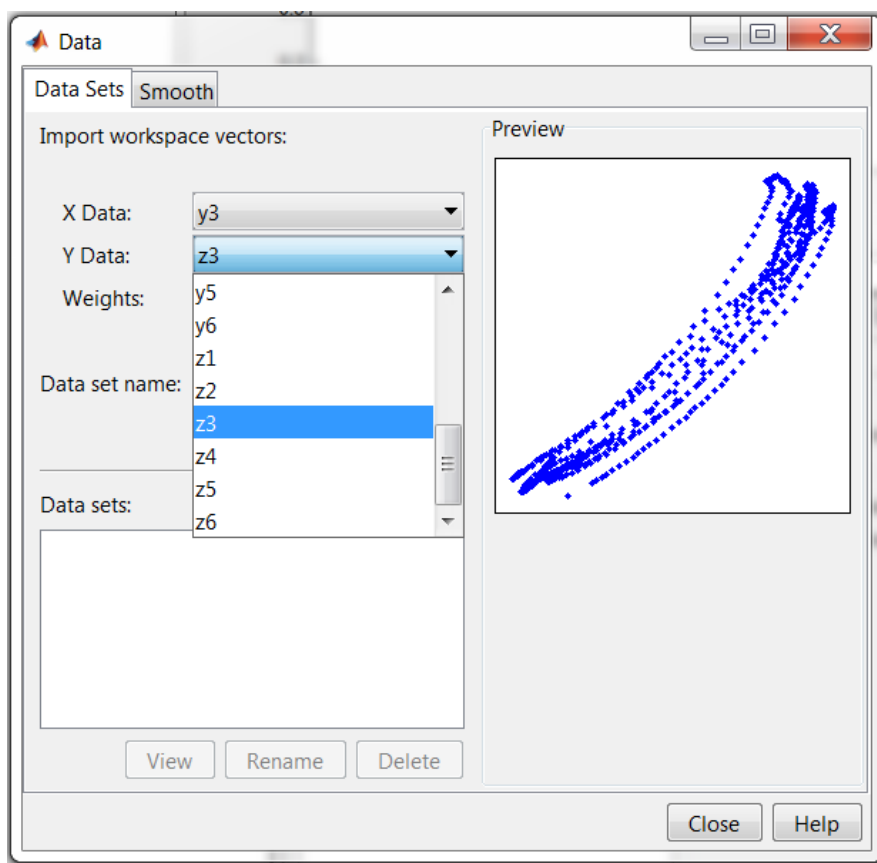
Слика 65. Координате положаја једног од маркера добијене претходним снимањем покрета (*Motion Capture*)

Након што су уčitани подаци о положају маркера у току покрета вилице, следећа фаза је креирање дијаграма на основу ових тачака, тј. апроксимативне криве кретања. Опција која се за ову потребу користи је **cftool**. Овом командом се може креирати крива у ху координатном систему, или површина у хуз систему, након што се унесу X и Y координате, односно X Y Z координате у другом случају. Како је при мерењу оса Z била вертикална а оса Y нормална на чеону површину лица, координате маркера у ова два правца ће се користити за дефинисање потребне криве.

Командом cftool отвара се прозор Curve Fitting Tool (слика 66). У овом прозору приказан је дијаграм на коме ће се исписати функција сачињена од унетих података са мерења. Избором опције data, отвара се нови прозор у коме дефинишемо домен и кодомен функције (слика 67). У истом прозору, након подешавања ових параметара (са десне стране може се прегледати изглед функције) бира се опција **Create data set**.

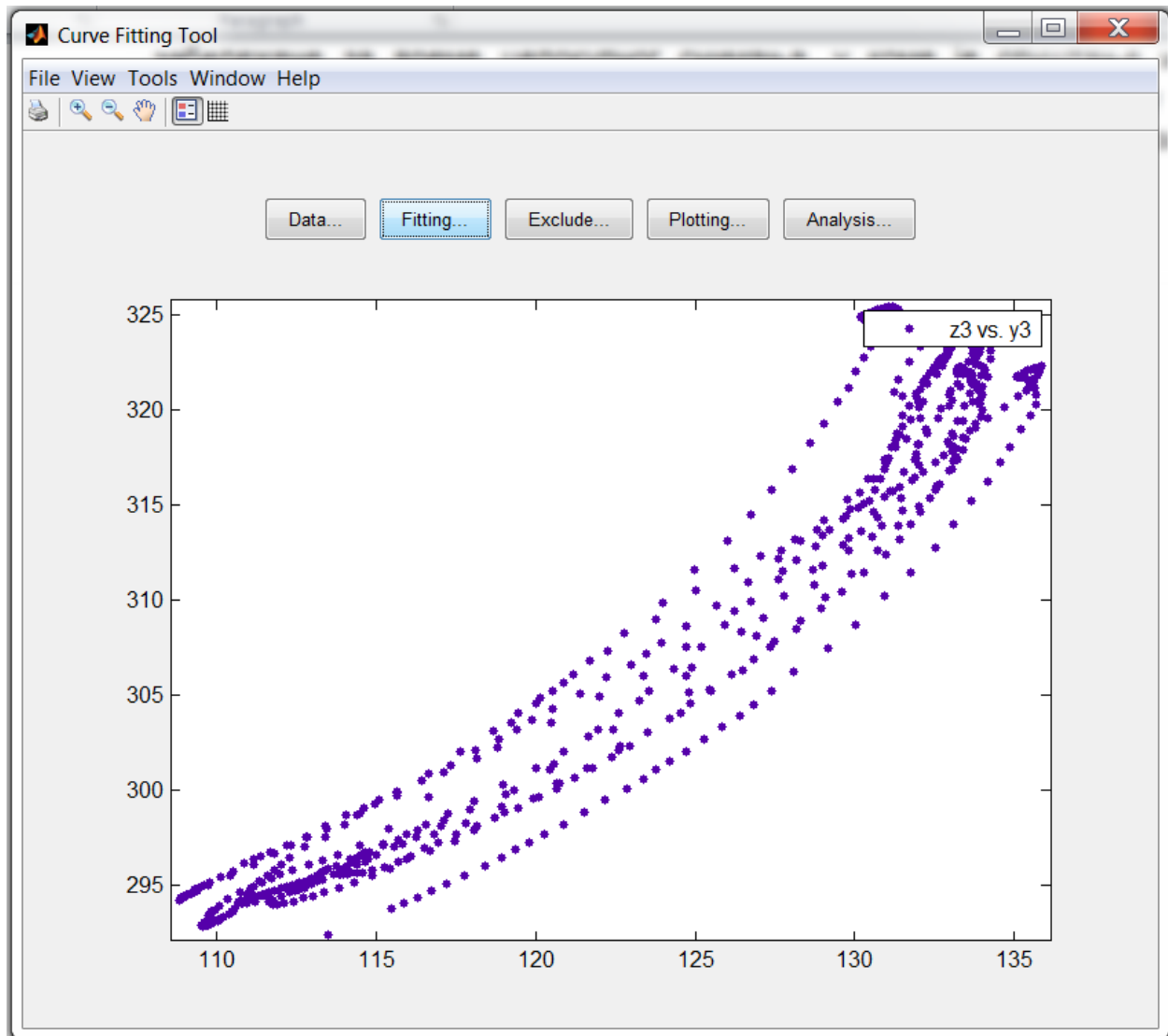


Слика 66. **Curve Fitting Tool** прозор, са дијаграмом у средишњем делу



Слика 67. Прозор за уношење података на основу којих програм конструише криву

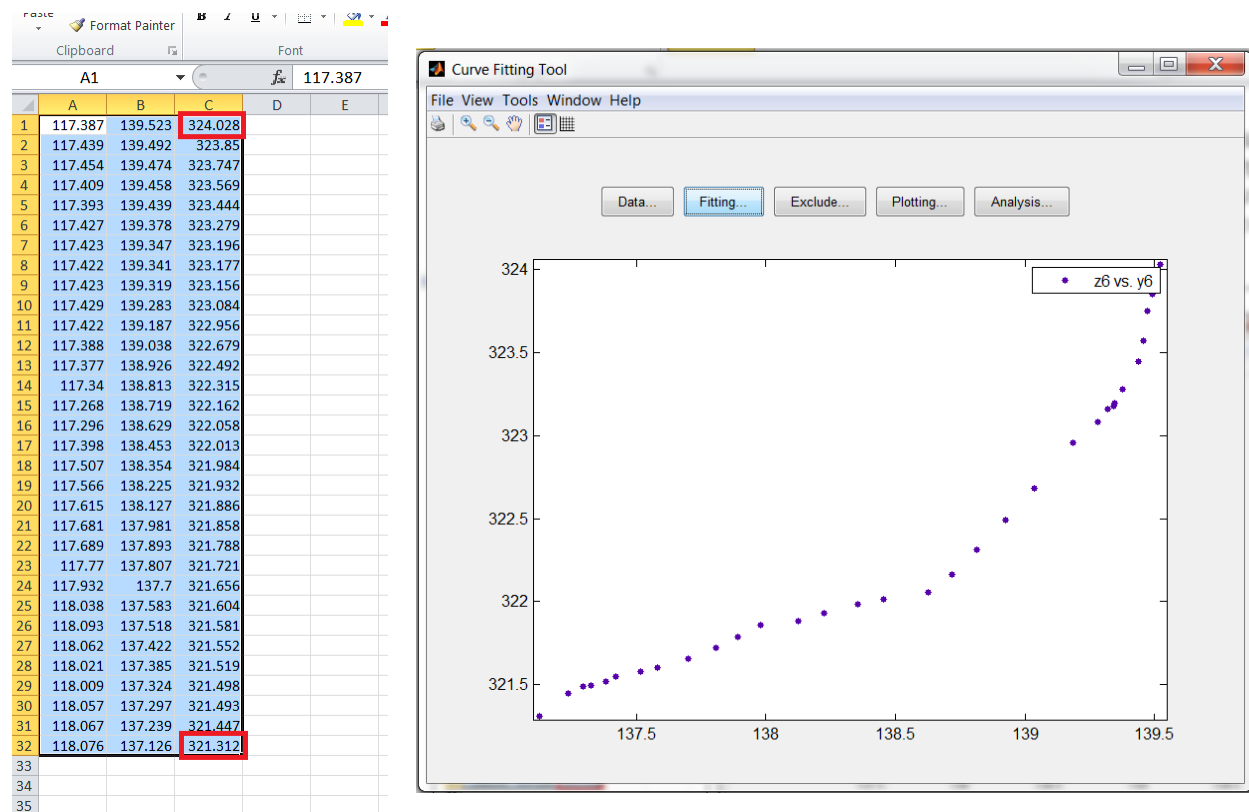
Као што се може видети са слике 68, дијаграм је попуњен тачкама које су забележене за време целокупног снимања, у коме је спуштање и подизање вилице понављано више пута. Због тога је потребно издвојити у матрици са подацима о кретању један покрет, и потом те податке искористити за креирање криве у Matlab-у.



Слика 68. Крива генерисана на основу свих забележених положаја трећег маркера

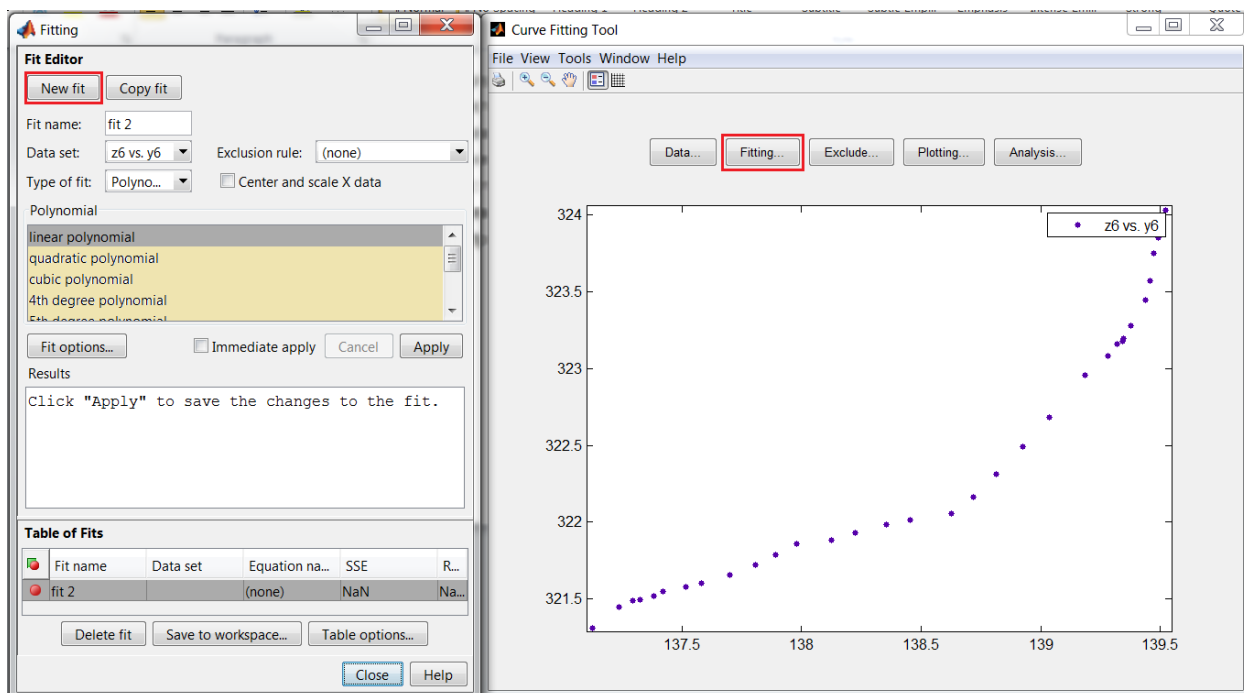
Издвајање појединачног циклуса може се извршити прегледањем података у матрици. Оног тренутка када координата Z престане да се смањује и почне да се повећава, тада је мандибула у крајњем доњем положају. Аналогно томе, када координата Z престане да се повећава и почне да се смањује, мандибула је у крајњем горњем положају. Подаци између ова два положаја чине један циклус.

Када се прегледањем података у матрици једног маркера одреди део редова који се односи на један покрет, ти подаци се копирају у засебну табелу – матрицу (слика 68). Поступак уношења бројева из ове, нове табеле у Matlab је исти као што је до сада описано. Коришћењем опције `cftool`, креира се нови дијаграм на основу положаја маркера у једном покрету мандибуле (слика 69).

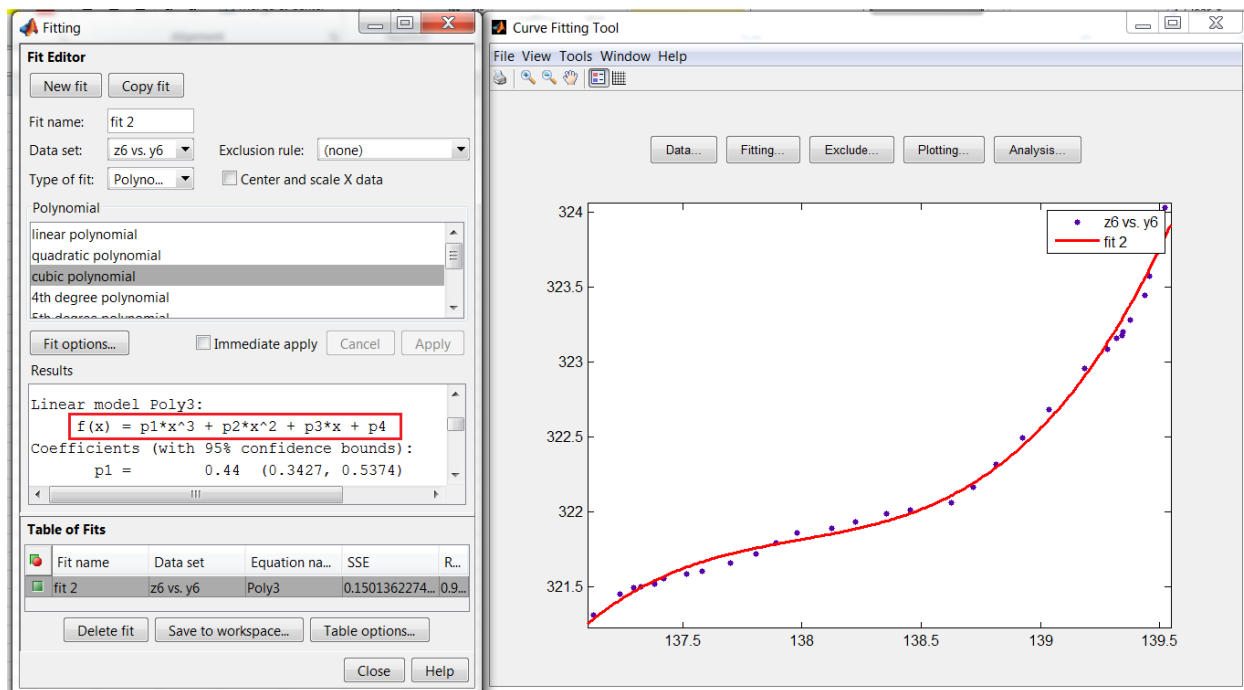


Слика 69: табела издвојена на основу података о једном циклусу; б) дијаграм конструисан на основу координата из те табеле

Једна од корисних операција коју нуди Matlab јесте опција **Fitting**. Уопштено посматрано, **data fitting** јесте прилагођавање неког модела постојећим подацима тј. површинама, кривама, облицима из постојеће базе података. Matlab не само да врши апроксимацију модела неком правилном облику већ пружа и могућност анализирања тог облика. За потребе овог рада, опција Fitting ће послужити као алат за креирање апроксимативне криве коју сачињавају положаји маркера на дијаграму. Опцијом Fitting из прозора Curve Fitting Tool покреће се „фитовање“ криве (слика 70).

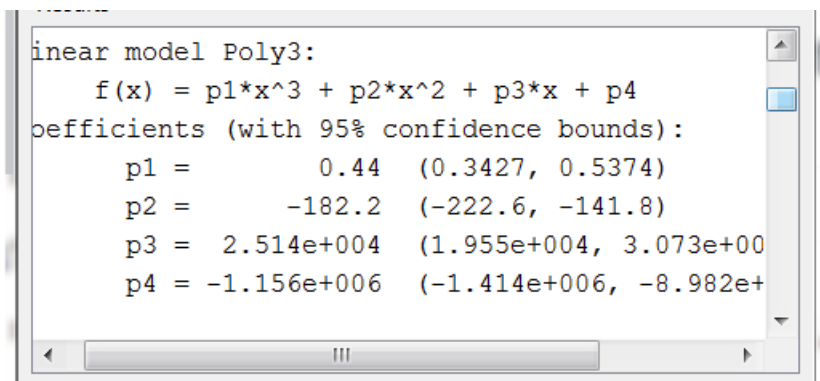


Слика 70. прозор **Fitting**, жутом бојом обележен је део који се односи на избор сложености линије која ће бити креирана на основу координата са дијаграма



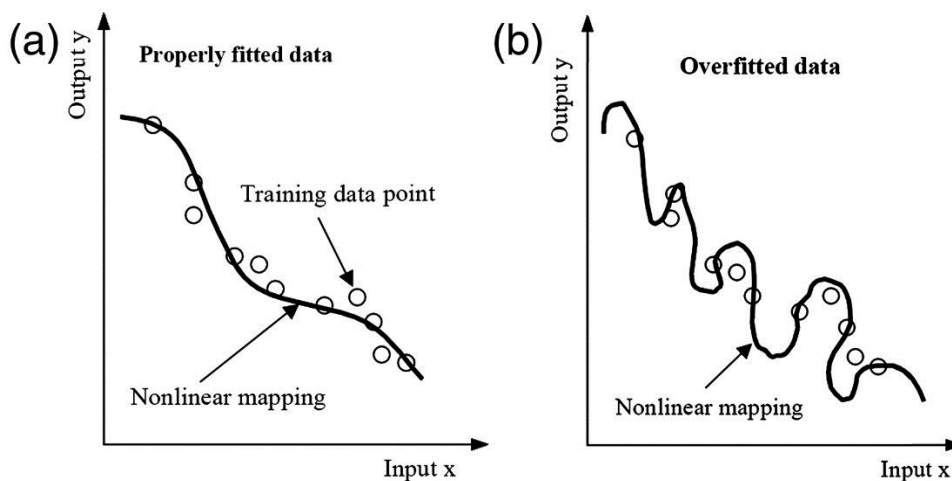
Слика 71. Избором опције **Cubic polynomial**, програм креира приближну криву на основу положаја тачака на дијаграму, чија је једначина полином трећег степена (на слици уоквирен црвеном бојом)

У прозору са леве стране, може се видети једначина криве трећег реда коју је програм аутоматски екстраховао на основу тачака дијаграма. У овом прозору (слика) је дата једначина, коефицијенти променљиве као и одступања тих коефицијената од идеалне криве која би пролазила кроз тачке.



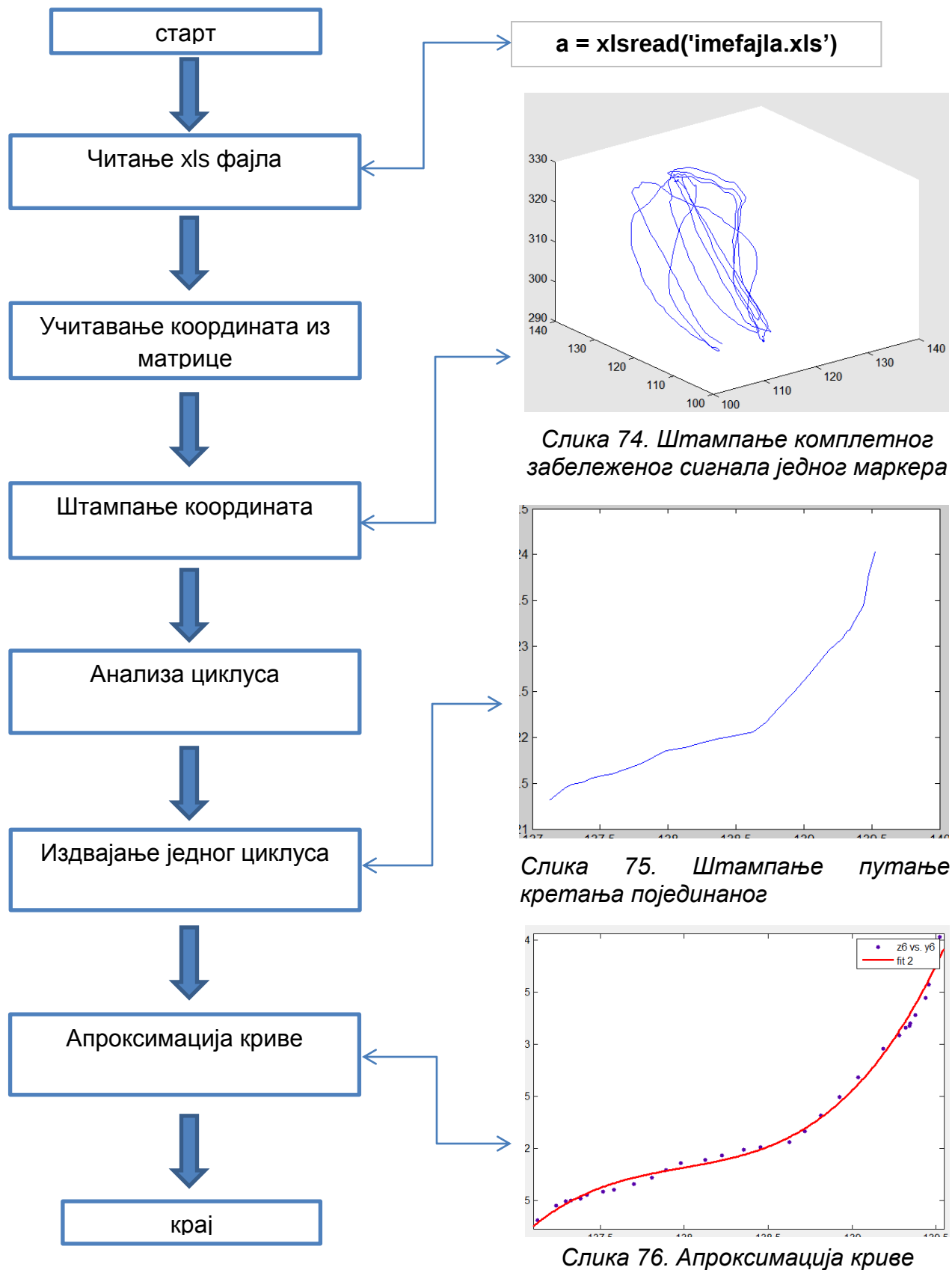
Слика 72. Коефицијенти једначине апроксимативне криве

Један од потенцијалних проблема у овој фази јесте појава под именом *Overfitting*. Ова појава настаје када програм у тежњи да што веродостојније апроксимира криву изврши супротно од онога што се тражи, тј. креира криву која превише одступа од било ког облика правилности. Ако се програму као критеријум зада превелика сложеност криве односно полином великог степена, програм ће превише деформисати криву, тежећи да крива прође што ближе свакој од тачака (слика).



Слика 73. Пример *Overfitting*-а

Треба још напоменути да постоји и могућност **Underfitting**-а, који се дешава када је крива којом апроксимирамо положај тачака на дијаграму превише простог облика, па је апроксимација недовољна.



5. Симулација покрета

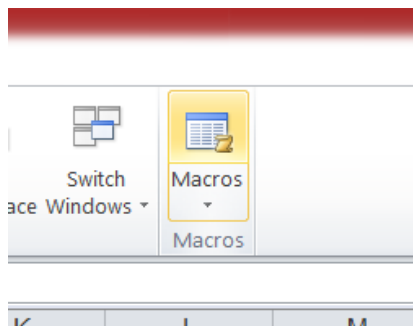
Кључни аспект овог рада јесте симулирање покрета доње вилице у оквиру система мандибула/максила. До сада је из DICOM-а екстрахован и реконструисан тродимензионални модел, а затим је снимљен покрет мандибуле на испитанику и обрађен сигнал. Сједињавањем ова два елемента, уз помоћ знања из CATIA-је, циљ је да се креира механизам који ће прецизно опонашати стварно кретање код испитаника.

Први корак у стварању механизма у CATIA-ји је дефинисање делова који ће сачињавати механизам. У овом случају то су модели горње и доње вилице, крива кретања добијена на основу маркера и помоћне призме. Крива кретања се учитава у CATI-ју помоћу команде *macros*. Подаци о положају маркера издвојени из једног покрета (описано у претходном поглављу) допуњују се у табели у Excel-у одговарајућим протоколом (слика 77).

	A	B	C	D
1	StartMulti-SectionsSurface			
2	StartCurve			
3	117.387	139.5232	324.0275	
4	117.4385	139.4915	323.8501	
5	117.454	139.474	323.7467	
6	117.4085	139.4584	323.5691	
7	117.3926	139.4394	323.4435	
8	117.4265	139.378	323.2787	
9	117.4231	139.3465	323.1961	
10	117.4224	139.3408	323.1766	
11	117.4234	139.3188	323.1563	
12	117.429	139.283	323.0835	
13	117.4217	139.1873	322.956	
14	117.3878	139.0381	322.6791	
15	117.3769	138.9263	322.4917	
16	117.3395	138.813	322.3148	
17	117.2675	138.7189	322.162	
18	117.2959	138.6286	322.0584	
19	117.6148	138.1267	321.886	
20	117.6809	137.9808	321.8576	
21	117.6888	137.8933	321.7882	
22	117.7695	137.8072	321.7208	
23	117.9324	137.6995	321.6558	
24	118.0382	137.5827	321.6041	
25	118.0928	137.5175	321.5808	
26	118.0617	137.4222	321.5522	
27	118.0206	137.385	321.5193	
28	118.0086	137.3243	321.4983	
29	118.0565	137.2969	321.4926	
30	118.067	137.239	321.4471	
31	118.0756	137.1259	321.3124	
32	EndCurve			
33	EndMulti-SectionSurface			
34	End			

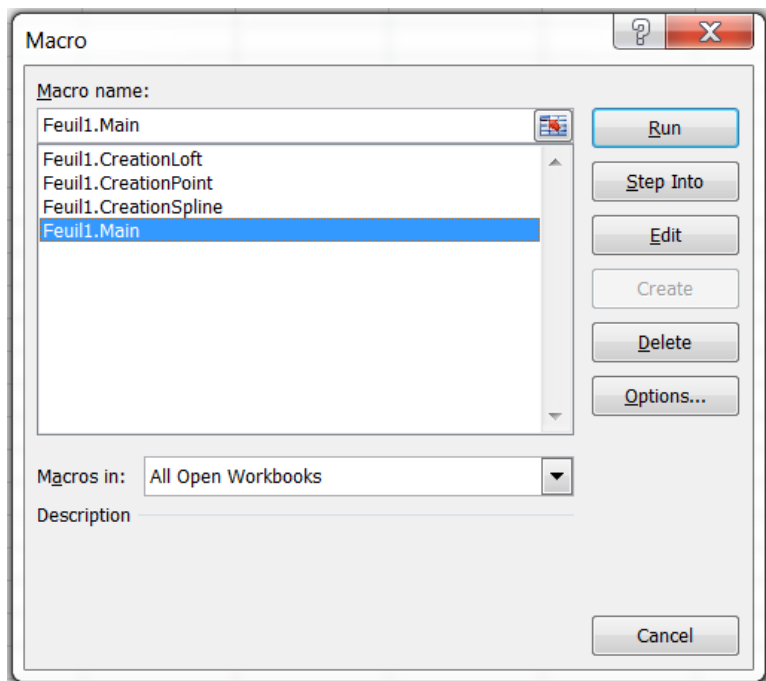
Слика 77. Протокол за креирање низа тачака на основу њихових координата

Командом Macros (слика 78) активира се креирање низа тачака у САТ-ји на основу координата из табеле.

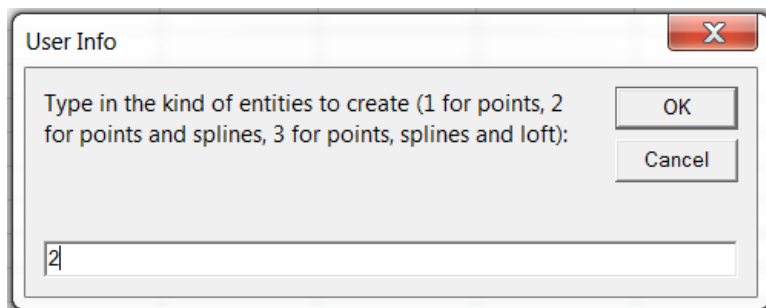


Слика 78. Команда Macros

У менију који се отвара, активира се опција Feuil1.Main (слика 79) а како је задатак креирање криве на основу задатих тачака, у следећем менију који се аутоматски отвара - User Info (слика 80), укуцава се број 2 за другу опцију.

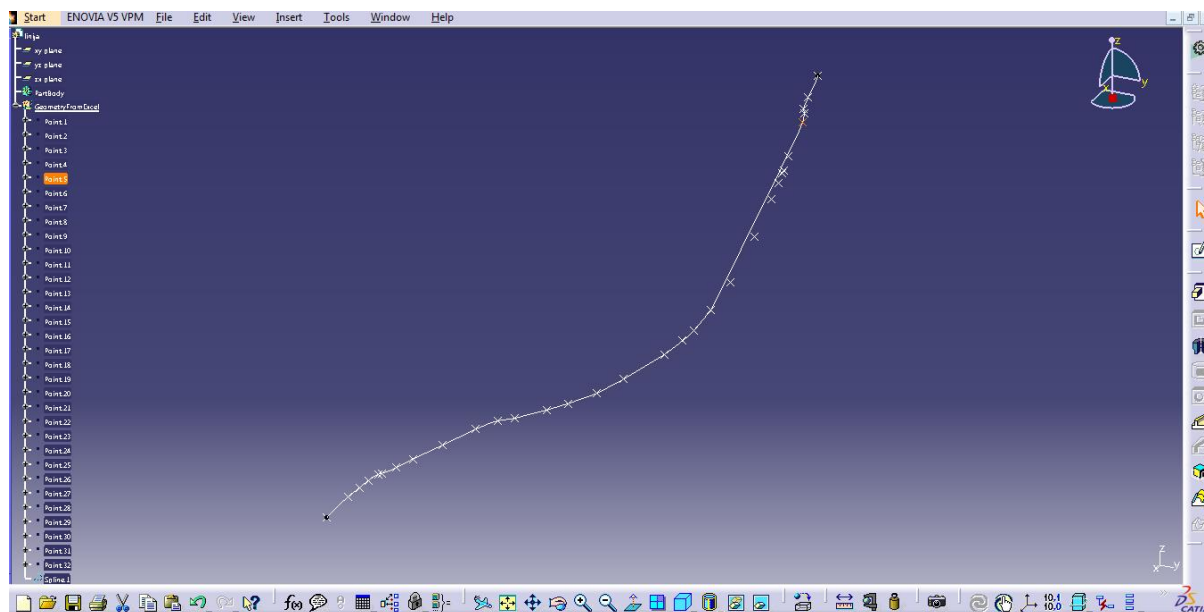


Слика 79. Мени Macro-а



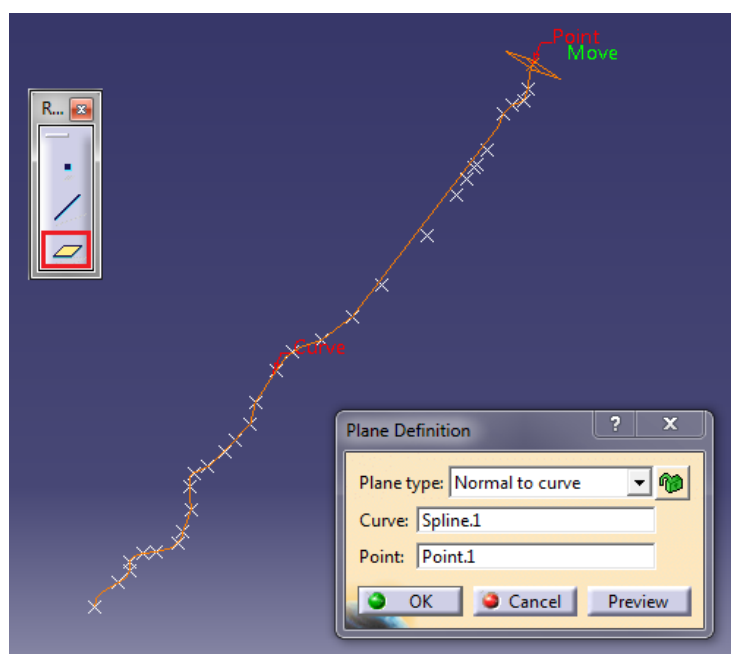
Слика 80. Опција 2 за креирање криве на основу „уезених“ тачака

Конечан резултат ове процедуре је генерисање криве у CATIA-ји, која представља апроксимацију забележеног кретања маркера (слика 81).

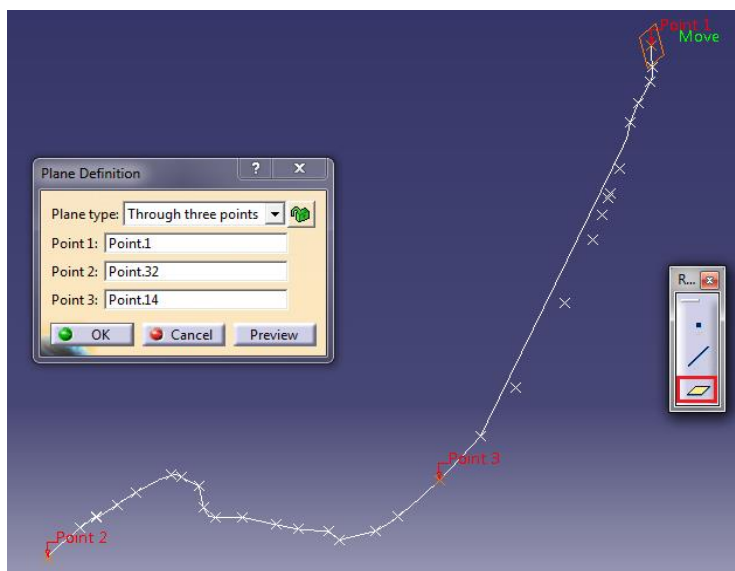


Слика 81. Крива креирана на основу кретања маркера

Услед потребног дефинисања узајамног положаја елемената у даљем креирању симулације, додају се и две помоћне равни и једна помоћна линија управна средишњу раван криве. На сликама 82 и 83 приказано је дефинисање помоћних равни а на слици 84 додавање помоћне линије.

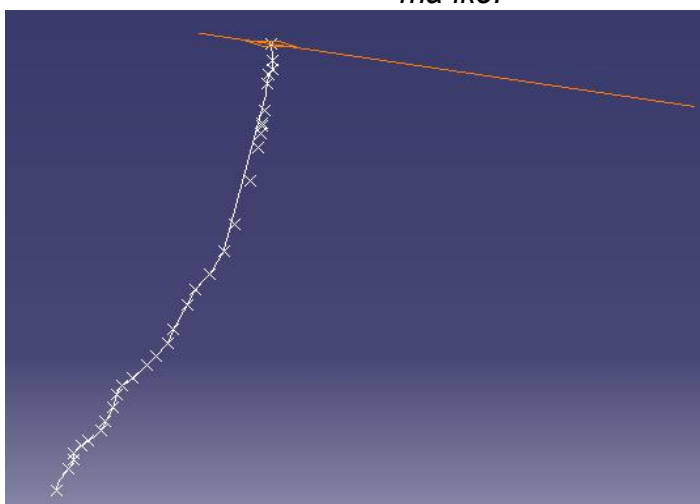


Слика 82. Креирање равни нормалне на криву кретања у почетној тачки. Користи се команда **Plane, normal to curve**

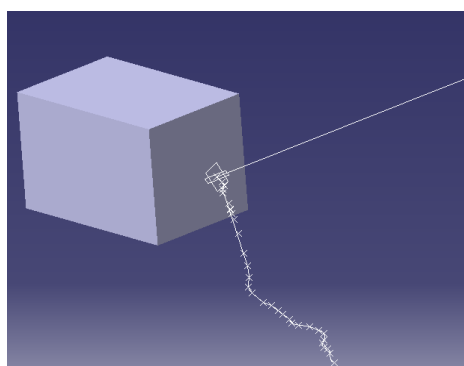
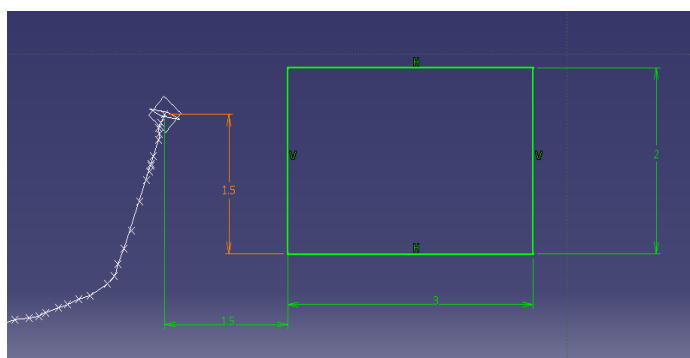


Слика 83. Дефинисање средишње равни, кроз три тачке.

Слика 84. Скицирање праве нормалне на средишњу раван криве кретања. Критеријум који се задаје при креирању праве је **Normal to surface**.

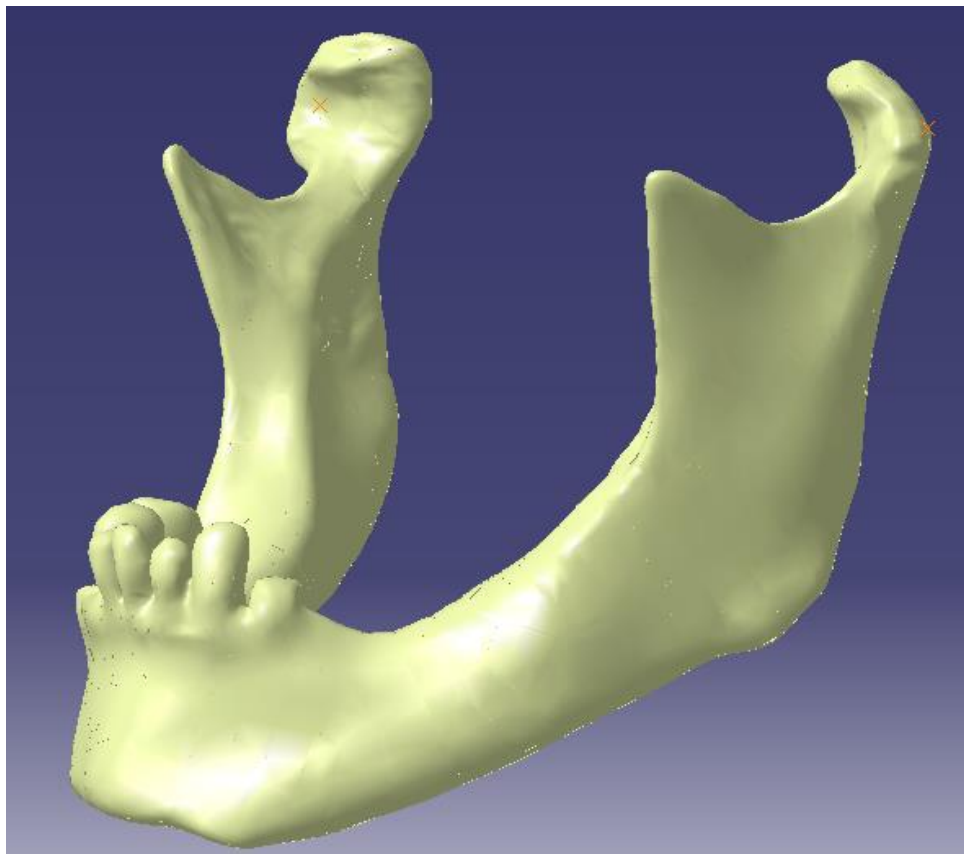


При дефинисању првог елемента, потребно је такође и додати једну призму произвољних димензија због даљег рада на симулацији. Призма (слика 85) се креира скицирањем правоугаоника у нормалној равни и његовим извлачењем у призму (командом **Pad**).

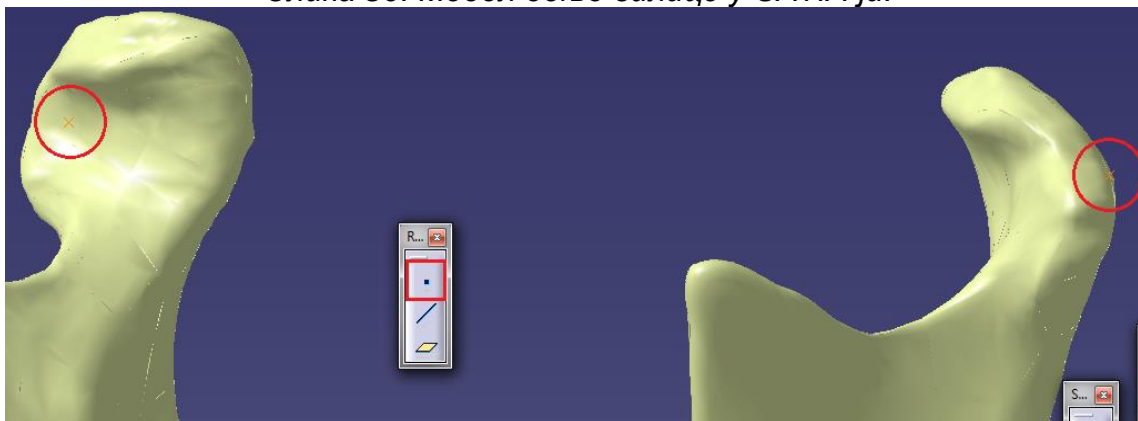


Слика 85. Креирање прве помоћне призме

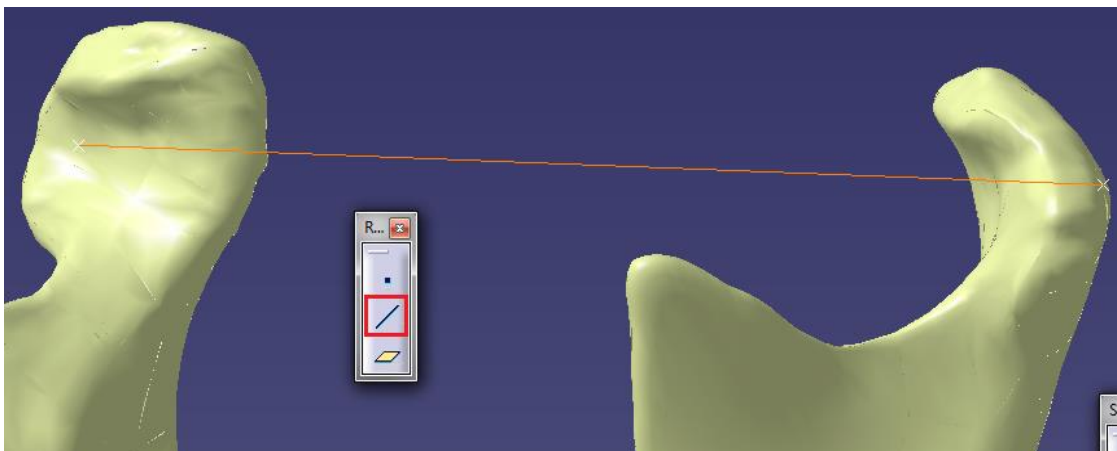
Други корак је импортовање реконструисаног модела у CATIA-ју (слика 86). Модел је пре тога раздвојен у Геомагис-у на горњу и доњу вилицу, а сачуван је као површински модел у IGS формату. На моделу доње вилице, као и код криве кретања, неопходно је додати помоћне елементе. Кроз зглоб максиле треба провући осу ротације, па се стога на површини модела додају две тачке и повлачи линија која их спаја (слика 87).



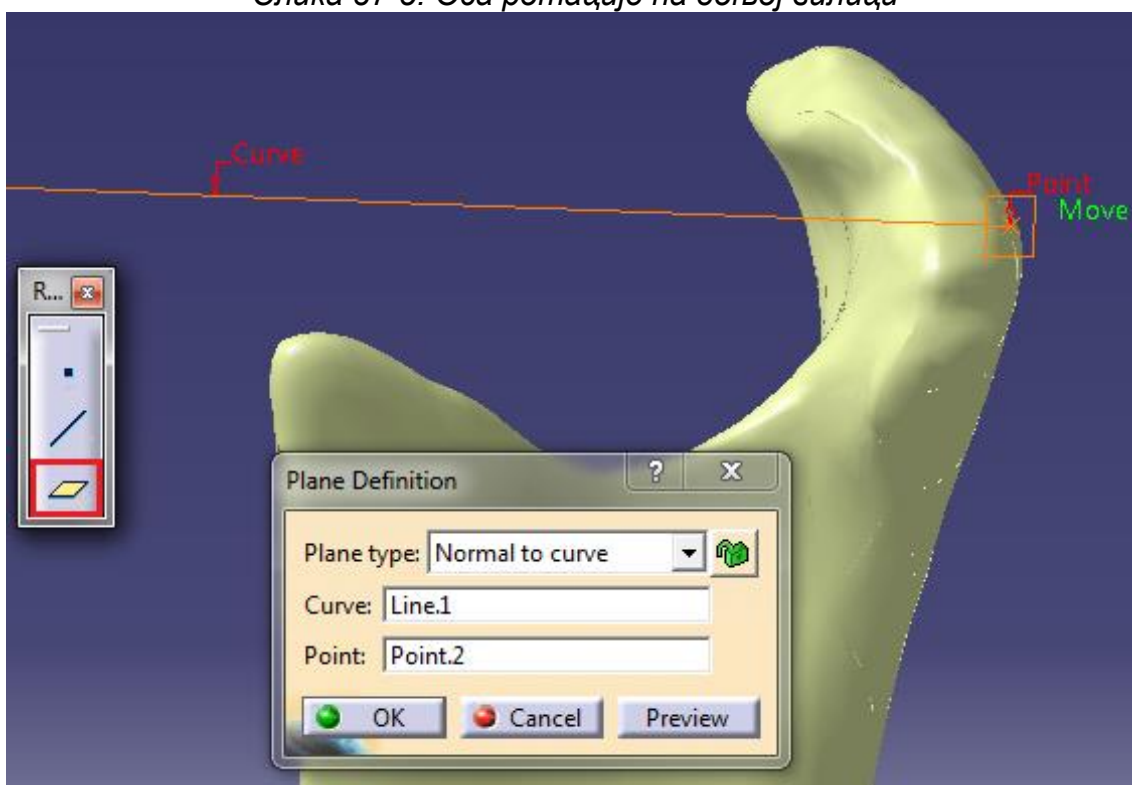
Слика 86. Модел доње вилице у CATIA-ју.



Слика 87-а. Позиционирање тачака за осу ротације



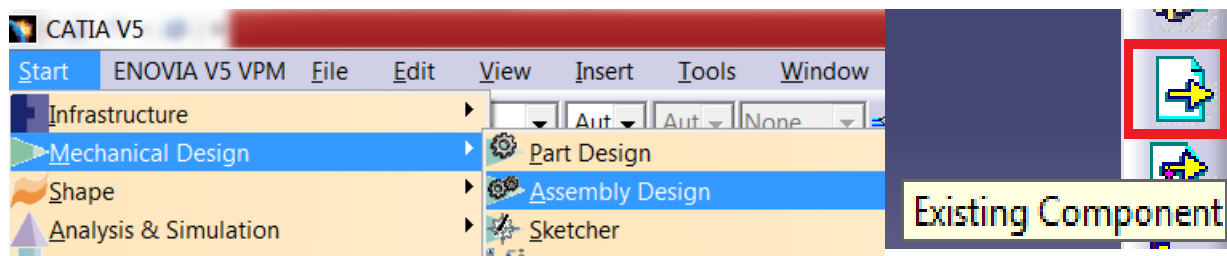
Слика 87-б. Оса ротације на доњој вилици



Слика 88. Раван нормална на осу ротације

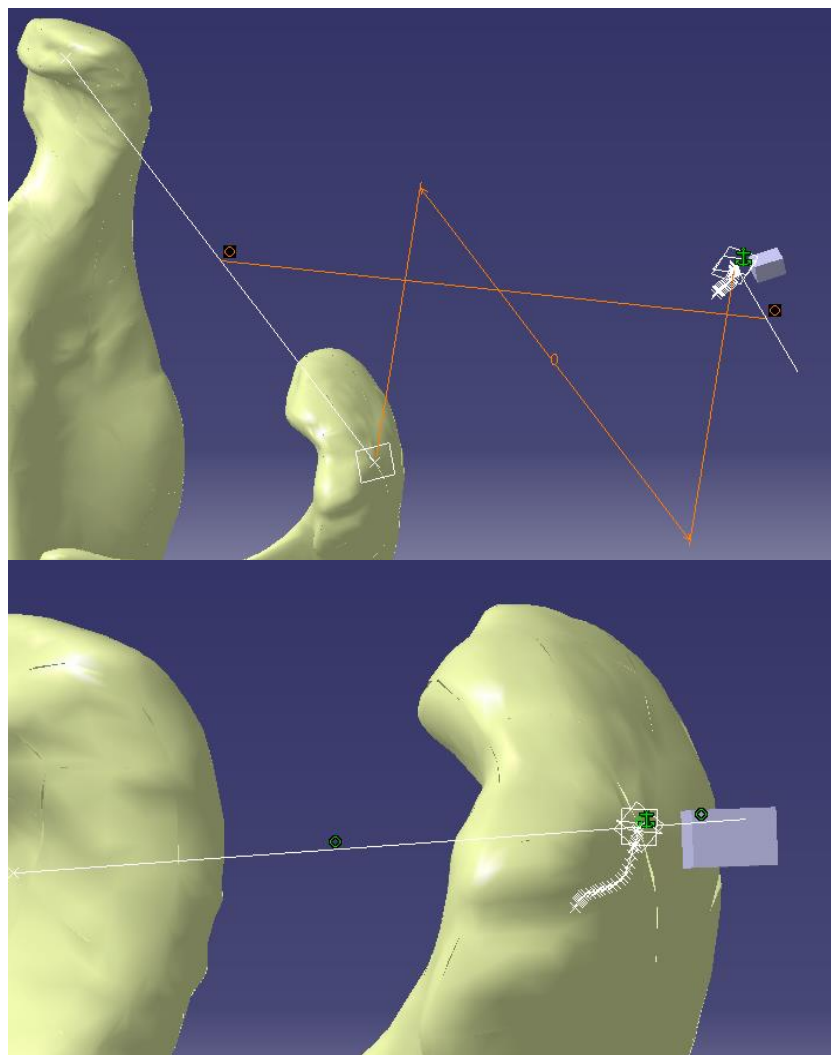
Након дефинисања помоћне геометрије трећи други елемент је спреман за рад. Трећи елемент је горња вилица и ту није потребно додавање помоћних линија и равни. Четврти елемент, потребан за симулацију покрета је призма, произвољних димензија.

Пре дефинисања параметара симулације елементи се повезују у склоп, у модулу mechanical design / assembly design (слика 89-а). У овом модулу, елементи су убацују у склоп командом **Existing Component** (слика 89-б).



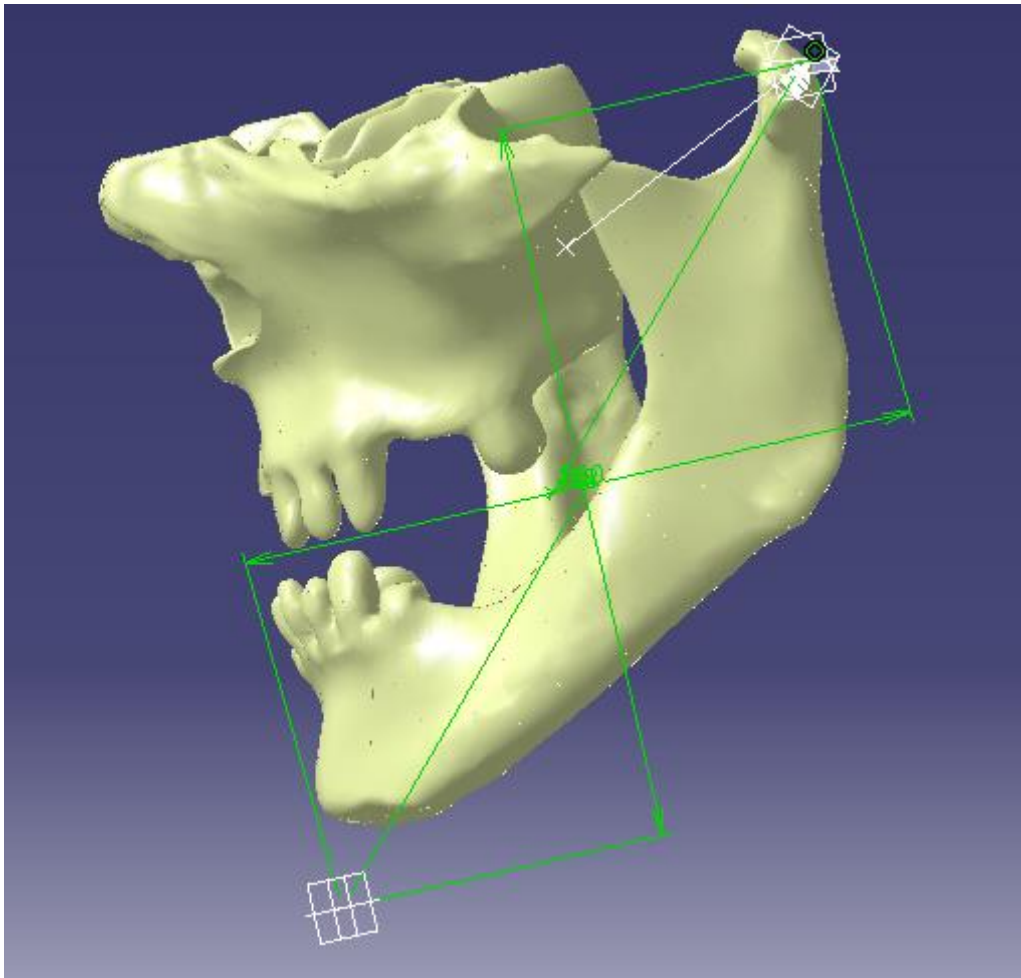
Слика 89, а) *Assembly design*, б) *Existing component*

У склоп се најпре убацује крива кретања са помоћном призмом и фиксира командом **Fix Component**. Потом се додаје доња вилица и повезује тако да се почетна тачка криве поклапа са местом на вилици где је био први маркер. Такође, уводи се и поклапање оса ротације на првом и другом елементу командом **Coincidence Constraint** (слика 90).



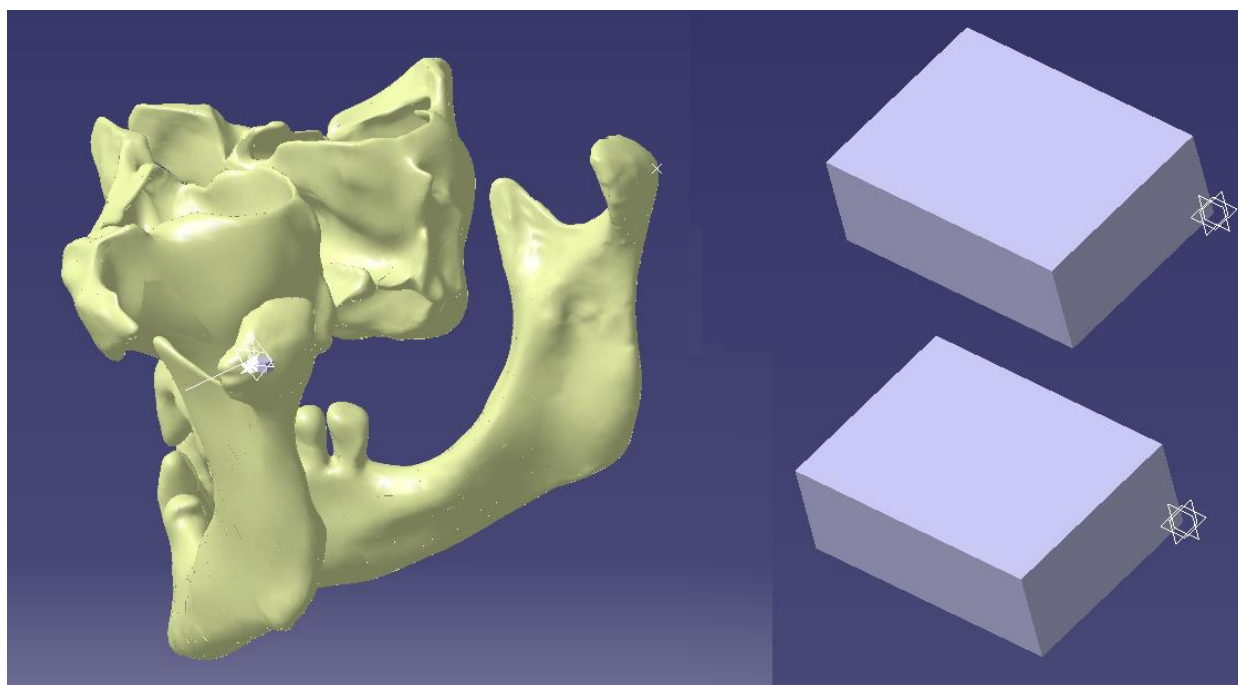
Слика 90. Повезивање максиле и криве кретања

Следећи корак је уношење горње вилице у склоп командом **Existing Component**, уз задавање узајамних растојања и односа према прва два елемента. За дефинисање растојања између равни у модулу Assembly design користи се алатка **Offset Constraint**. Положај горње вилице дефинишемо преко три централне равни (слика 91).

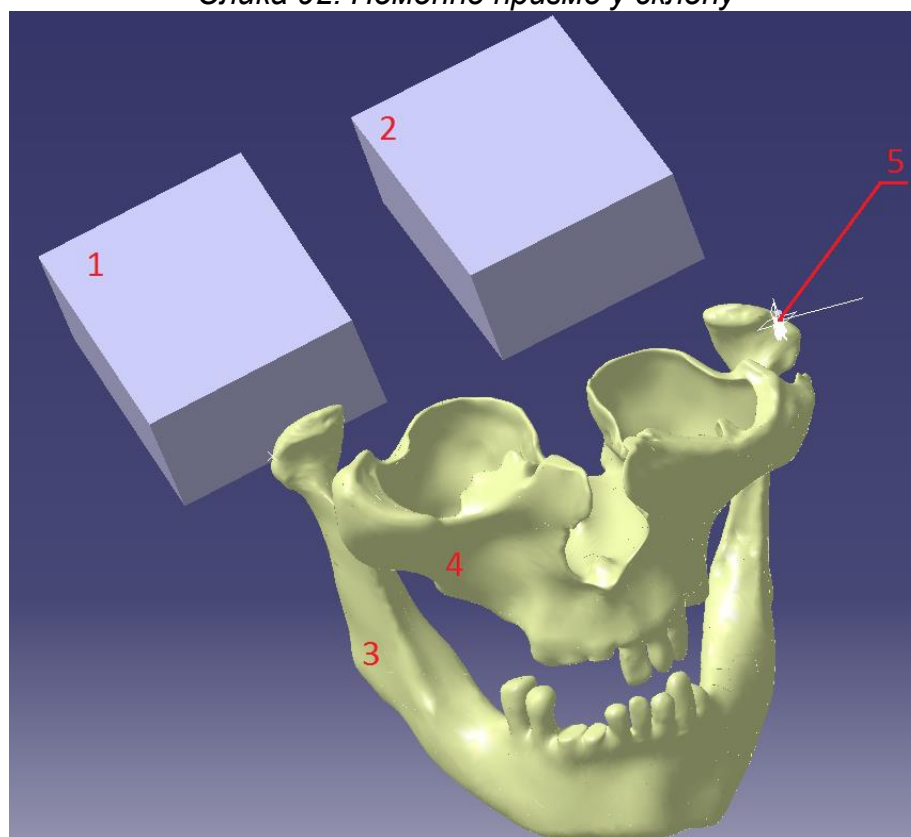


Слика 91. Горња вилица у склопу

Последњи корак пре креирања симулације је додавање две раније направљене, произвољне призме у склоп (слика 92). Ово се врши двоструким уношењем ове исте призме у склоп, а њихов положај ће се дефинисати накнадно, када се буду одређивали параметри механизма.

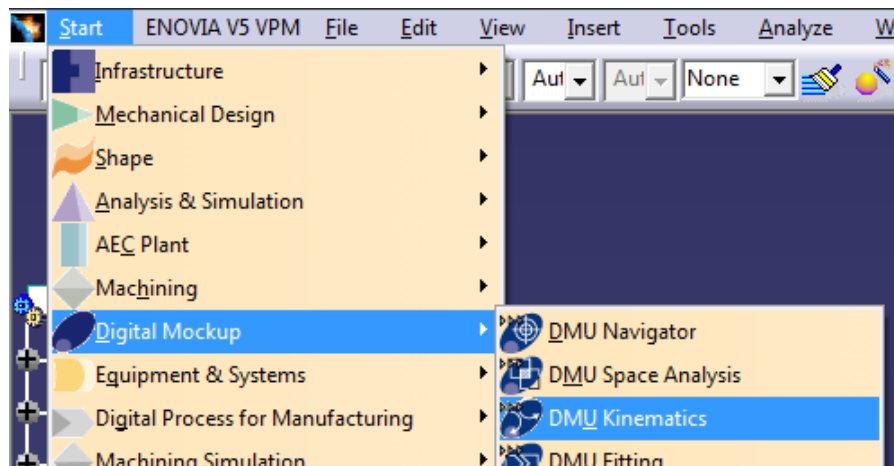


Слика 92. Помоћне призме у склопу



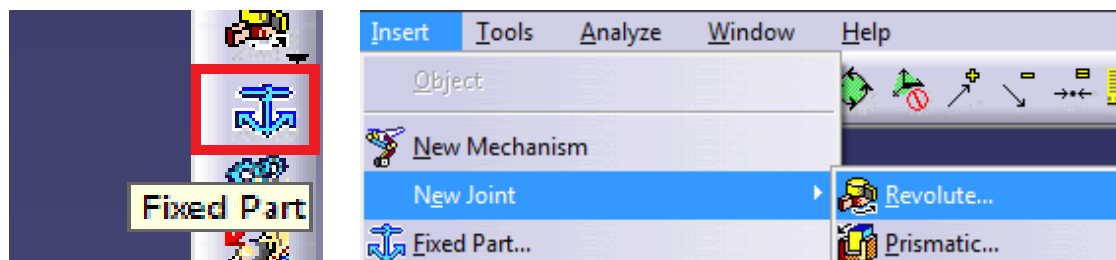
Слика 93. 1 и 2 - друга и трећа помоћна призма; 3 – доња вилица; 4 – горња вилица; 5 – линија кретања са првом помоћном призмом.

За симулацију покрета у CATIA-ји користи се опција **Digital Mockup / DMU kinematics** (слика 94).



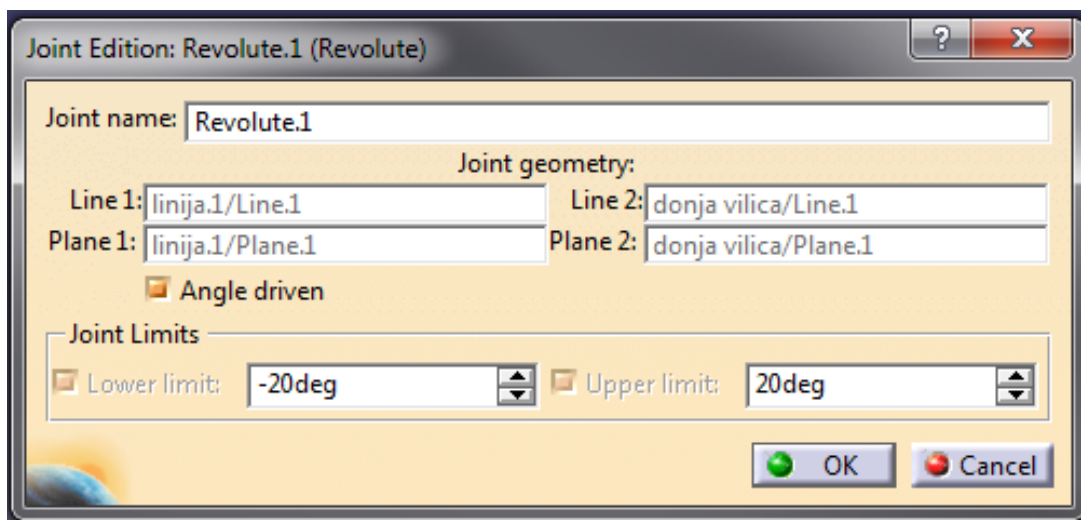
Слика 94. Digital Mockup / DMU kinematics

Како би се вилица правилно кретала, додају све два механизма кретања у симулацији. Први је ротација максиле око осе за одређену вредност угла, а друго кретање које се задаје је транслаторно кретање вилице дуж линије кретања. За потребе првог кретања неопходно је најпре фиксирати елемент који се не помера командом **Fixed Part** (слика 95-а). Тај елемент ће бити крива померања.



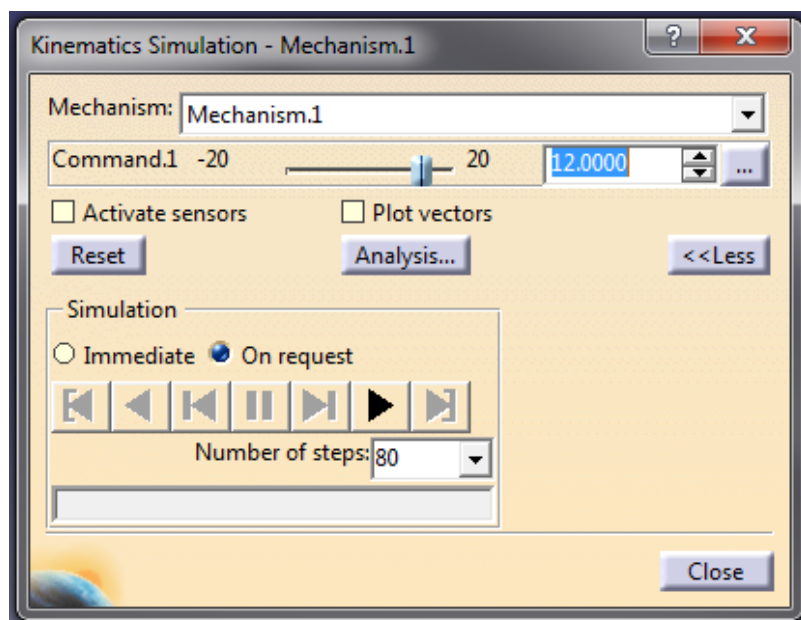
Слика 95. а) алатка **Fixed Part**, б) **Revolute Joint**

Командом **Insert Joint / Revolute Joint** (слика 95-б) отвара се прозор за дефинисање ротационог кретања доње вилице. У овом прозору (слика 96) врши се одабир осе ротације на првом и другом делу, као и равни нормалне на ту осу. Опцијом **Angle driven** омогућавамо контролисање угла под којим се помера вилица.

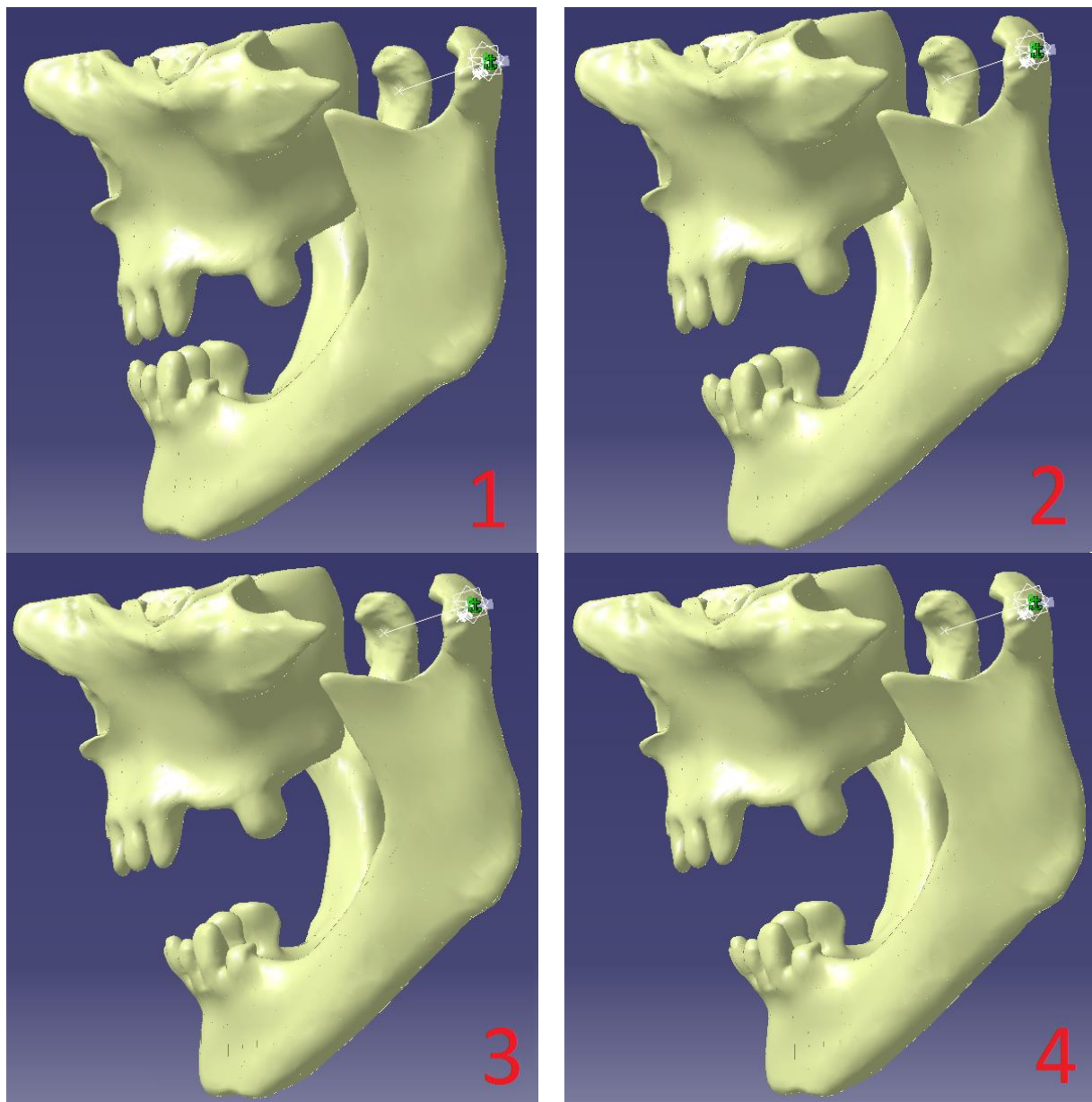


Слика 96. Подешавање параметара ротације

Конечан резултат досадашњег рада је стварање механизма ротације, који сада може бити симулиран и код кога можемо контролисати угао отварања вилице. Одабиром опције Mechanism.1 у стаблу модела отвара се мени (слика 97) у коме се управља симулацијом обртног кретања максиле. После унетих параметара, максималног и минималног угла померања, броја позиција у току кретања, брзине покрета, могућа је симулација првог кретања (слика 98).



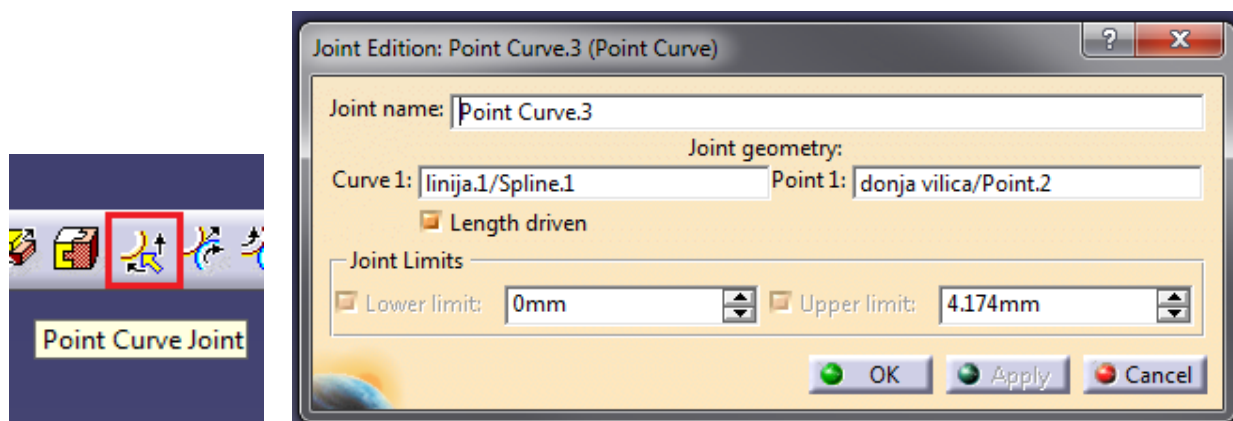
Слика 97. Мени **Kinematics Simulation** за подешавање параметара првог кретања.



Слика 98. Положаји доње вилице у току ротације

На основу експериментално добијених података и података из литературе могу се бирати углови померања вилице једноставним мењањем почетних параметара. У почетном положају, минимални угао је 0 степени.

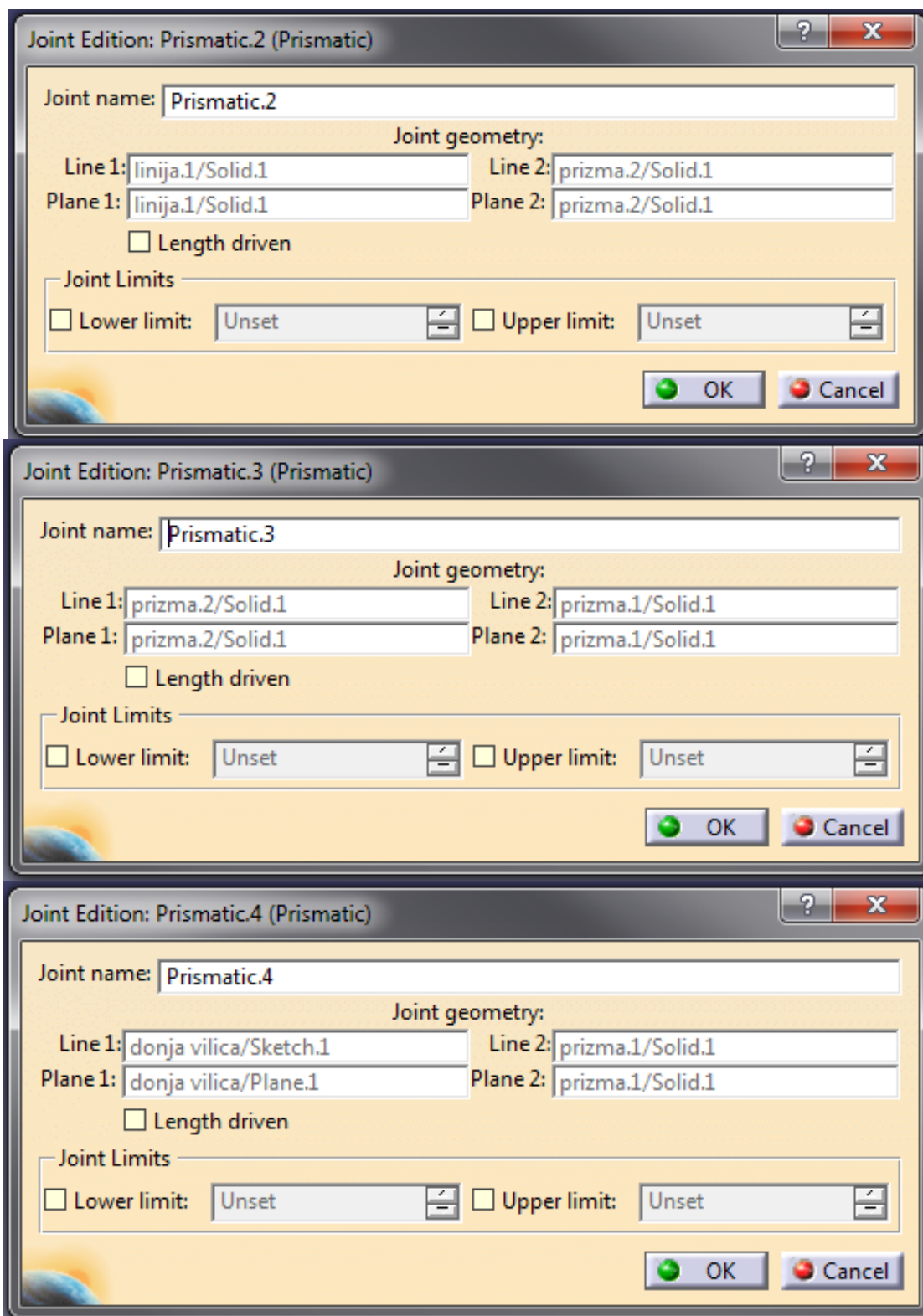
Друго кретање које се уводи у CATIA-ји је транслаторно кретање дуж линије кретања. Једно од ограничења при овом кретању је да се тачка на максимално константно креће по линији кретања забележеној маркером (јер је управо ту и био постављен маркер 1), а друга ограничења се односе на одржавање паралелности између три равни које одређују положај вилице, и страна на непомичним помоћним призмама. За прво ограничење, уводи се нова покретна веза, тј. зглоб – **Point Curve Joint** (слика 99-а). У менију који се затим отвара (слика 99-б), врши се одабир криве кретања и тачке на моделу доње вилице. Овим зглобом је у току кретања константно повезан положај маркера на вилици са линијом кретања.



Слика 99. а) Алатка **Point Curve Joint**, б) подешавање параметара

Како би се елиминисале остале могућности слободног кретања, уводе се још три зглоба врсте – **Prismatic Joint**. Овај зглоб омогућава клизно кретање између две равне површине. За потребе транслаторног кретања клизни зглобови се користе на следећи начин:

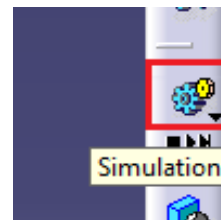
- У првом зглобу повезују раван из линије кретања (на првој помоћној призми) са равни на другој импортованој помоћној призми (слика 100-а);
- Другим зглобом повезује се раван друге помоћне призме, управна на првобитно дефинисану раван, са равни на трећој, такође увезеној помоћној призми (слика 100-б);
- Трећа клизна веза дефинише релацију између треће преостале равни на трећој помоћној призми и равни на моделу доње вилице (слика 100-в).



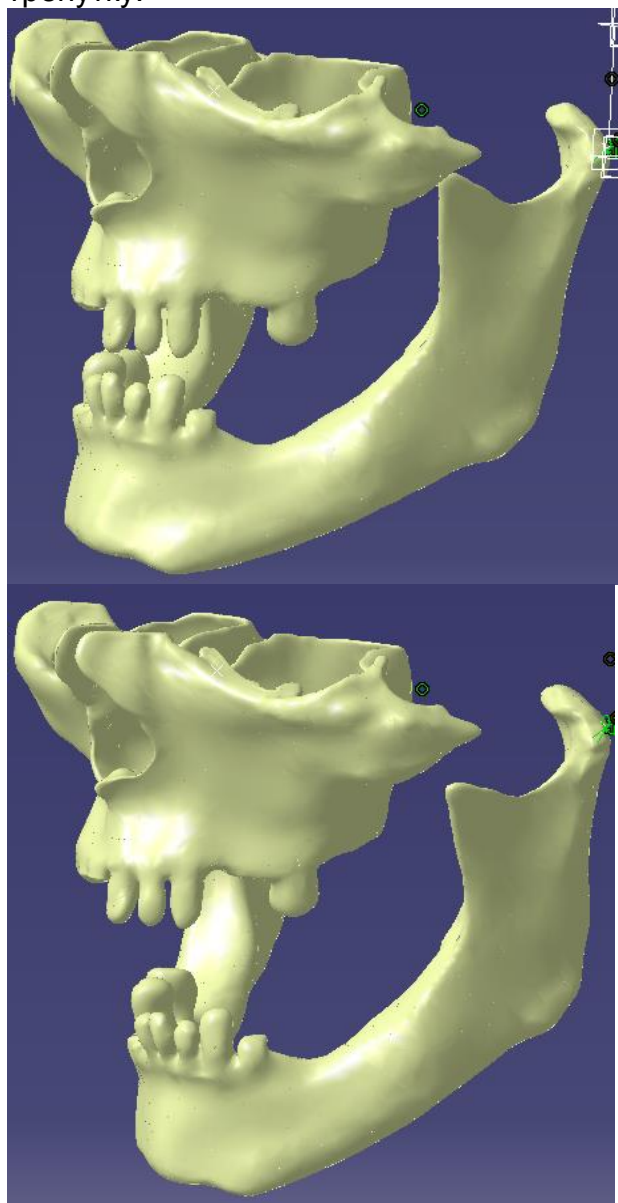
Слика 100. Подешавање геометријских параметара а) код првог зглоба; б) код другог зглоба в) код трећег зглоба

Након правилно подешених геометријских параметара за клизне зглобове, уклоњени су сви степени слободе за кретање вилице, и програм је спреман да изврши и другу симулацију. Померања у другом кретању су релативно мала, али у комбинацији са првим кретањем дају правилно померање вилице.

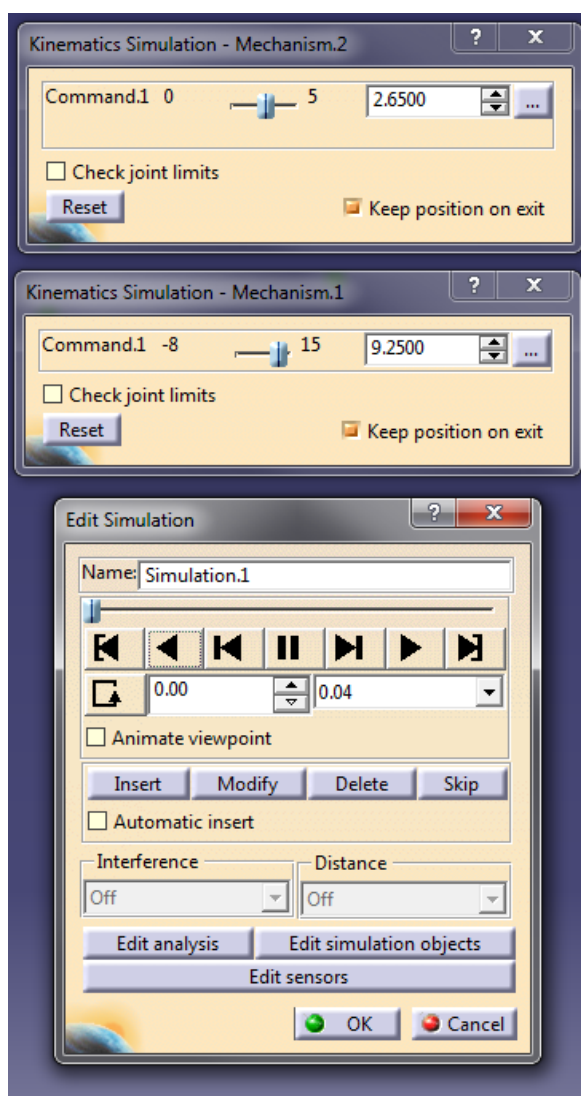
Последња корак у овој фази је активирање опције **Simulation** (слика 101). Обухватањем креираних механизма за прво и друго кретање програм добија потребне податке за симулацију. На слици 102-б виде се прозори за подешавање параметара у механизмима, а на слици 102-а положај у почетном и завршном тренутку.



Слика 101. **Simulation**



Слика 102. а) симулација кретања; б) параметри симулације



7. Закључак

Након завршеног експеримента, може се извести више закључака. Свака фаза рада носила је своје погодности и потешкоће, али је такође омогућила и увид у могућности CAD/CAM/CAE система у овој, до сада мање истраженој области.

Приказано је екстраховање и обрада модела у два програма – Mimics-у и Geomagic-у. Први софтвер омогућио је детаљан рад на DICOM-у, и првобитно креирање тродимензионалног модела из снимка. Проблеми који су у овој фази били највећи узроковани су слабијим квалитетом снимка, што даље повлачи чињеницу би бољи инструмент омогућио лакше и брже моделирање. Реконструкција модела настављена је у Geomagic-у, који се показао погодним због могућности површинске обраде модела, за разлику од првог програма, у коме се обрада вршила слој по слој. Овај софтвер је такође омогућио и прелазак полигоналног модела у NURBS површински модел, погодан за даљи рад у трећем програму - CATIA.

Друга фаза експеримента приказала је релативно једноставну методу за детаљно снимање покрета испитаника, помоћу доста савремене апаратуре. Користећи програм Matlab, извршена је обрада сигнала, фитовање криве кретања и уклањање неправилности при снимању.

Програмски пакет CATIA објединио је прве две фазе помоћу модула DMU kinematics. Извршена је веродостојна симулација кретања вилице испитаника, на основу модела реалне вилице и законитости кретања добијене снимањем испитаника. У симулацији је могуће и подешавање извесних параметара кретања, на основу података из литературе и жељених резултата експеримента. Симулација је такође отворила пут и новим начинима везивања модела за криве кретања, односно показала могућност везивања модела вилице за више линија путање маркера, додавањем ограничења угла и сл.

Поред приказа могућности примене CAD/CAM/CAE система у анализи биомеханичких система, у раду су такође објашњени поступци реконструкције модела, који се могу применити и на многе друге области у пројектовању, као и начини за снимање покрета и обраду добијеног сигнала, што може представљати једну од смерница за даљи рад у овој и сличним областима машинства и биоинжењеринга.

Литература

- [1] Девеџић Г.: *"CAD/CAM технологије"*, Машински факултет, ЦИРПИС центар, Крагујевац, 2009., 198 стр., ИСБН: 978-86-86663-40-5, 2009.
- [2] Девеџић Г., Ћуковић С., Максић Ј., Петровић С.: *"3D моделирање производа – методичка збирка задатака"*, Машински факултет у Крагујевцу, ЦИРПИС центар, Крагујевац, 2009.
- [3] Девеџић Г.: *CAD/CAM/CAE 1; предавања и вежбе*; Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2012.
- [4] <http://www.materialise.com>
- [5] <http://www.geomagic.com>
- [6] <http://medical.nema.org/>
- [7] <http://www.naturalpoint.com/optitrack/products/arena/>
- [8] http://users.ece.gatech.edu/bonnie/book/TUTORIAL/tut_1.html
- [9] <http://www.mayoclinic.com/health/tmj-disorders/DS00355>