

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Информатика у инжењерству

Предмет: Биоинжењеринг и биоинформатика

Број индекса: 380/2015

Милош Р. Ристић

**Биомеханичка анализа коронарних
артерија на реалним пацијентима**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Ненад Филиповић
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да одради и објасни поступак добијања 3D модела коронарних артерија помоћу Mimics платформе и сређивање тих истих модела помоћу Geomagic studio-а развојног окружења, затим постпроцесирање и симулације за потребу добијања резултата притиска и смичућег напона помоћу FEMAP софтвера, затим прикаже добијене резултате за сваког пацијента.

Препоручена литература:

[1] Ненад Филиповић, Основи биоинжењеринга, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2012

[2] Биоматеријали / [Игор Балаћ ... et al.]; уредници Дејан Раковић, Драган Ускоковић. Београд: Институт техничких наука Српске академије наука и уметности: Друштво за истраживање материјала, 2010 (Београд: Драслар партнер).

[3] Др Александар Стајковац, Др Михајло Бајић, Др Србољуб Живановић, Др Иван Анђелковић (1984). Анатомија и физиологија са практикумом

Крагујевац, 11.04.2017.

Ментор:

Др Ненад Филиповић

САДРЖАЈ:

1. СРЦЕ.....	6
1.1 Артерије.....	7
1.3 Аорта.....	7
2. КОРОНАРНА АРТЕРИЈА.....	9
2.1 Анатомија коронарне артерије	10
2.2 Најчешће болести коронарних артерија.....	11
3. СТРУЈАЊЕ КРВИ КРОЗ АРТЕРИЈЕ.....	14
3.1 Струјање крви у срцу и главним артеријама.....	16
4. МЕХАНИКА ФЛУИДА У СТРУЈАЊУ КРВИ.....	17
5. КОМПЈУТЕРСКА СИМУЛАЦИЈА	18
6. ПРИПРЕМА МОДЕЛА У MIMICS СОФТВЕРУ	18
6.1 Добијање 3D модела преко 2D DICOM снимака.....	20
7. ОБРАДА МОДЕЛА У GEOMAGIC STUDIO-U	26
8. ПРИПРЕМА МОДЕЛА У И FEMAP-U И ПРЕДСТАВЉАЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА ЗА 5 РАЗЛИЧИТИХ ПАЦИЈЕНАТА	31
8.1 Приказ добијених резултата свих пацијената.....	37
9. ЗАКЉУЧАК.....	44
10. ЛИТЕРАТУРА.....	45

Резиме рада: У овом раду приказан је поступак добијања 3D модела коронарних артерија помоћу Mimics платформе и сређивање тих истих модела помоћу Geomagic studio-а развојног окружења, затим постпроцесирање и симулације за потребу добијања резултата притиска и смичућег напона помоћу FEMAP софтвера. Рад са овим софтверима има широку примену у медицини, то је једна од повезаности инжењеринга са областима медицине.

Кључне речи: 3D, коронарне артерије, Mimics, Geomagic studio, притисак, смичући напон, FEMAP, медицина, инжењеринг.

Summary: This paper presents the process of obtaining 3D models of coronary arteries using the Mimics platform and arranging these same models using the Geomagic studio environment of the development environment, postprocessing and simulations for the need to obtain pressure and shear stress results using FEMAP software. Working with these software has a wide application in medicine, it is one of the connections between engineering in the field of medicine.

Key words: 3D, coronary arteries, Mimics, Geomagic studio, pressure, shear stress, FEMAP, medicine, engineering.

1. УВОД

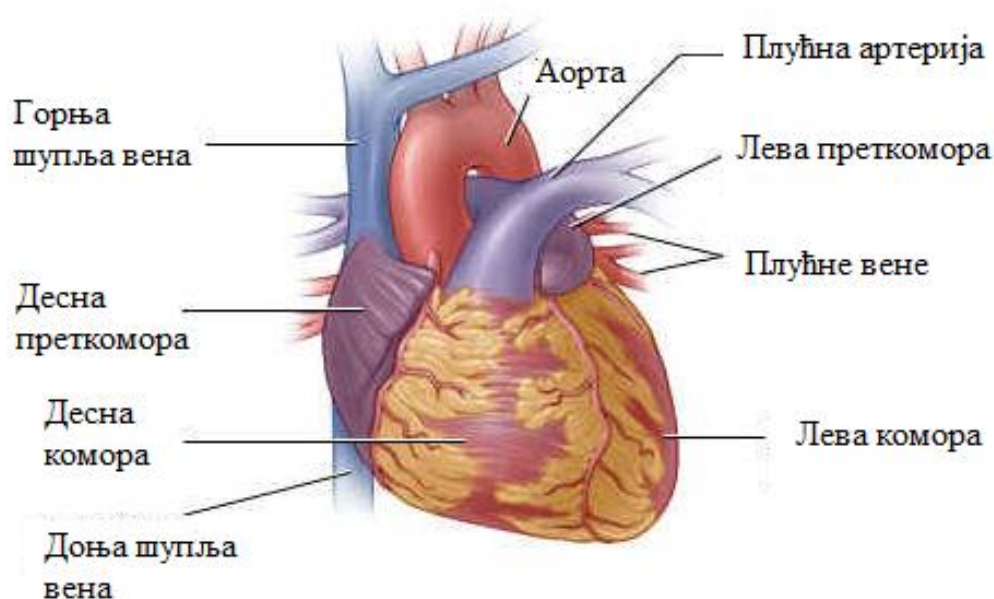
Овај рад се бави комплетним поступком добијања 3D модела на основу 2D DICOM снимака који се базирају на реалном проблем са реалног пацијента. Снимци су добијени преко СТ скенера и састоје се од низа од преко 2000 слика DICOM формата, 5 различитих пацијената.

У раду је објашњен поступак добијања 3D модела преко Mimics софтвера, затим његове обраде у Geomagic Studio софтверу и на крају постпроцесирање у Femap-у. Велика корист од овог рада јесте разумевање медицинског проблема са коронарном артеријом, затим рад са софтверима који се користе у области моделирања који своју примену налазе и у медицини, и та област која је повезана са инжењерингом се управо назива биоинжењеринг.

Биоинжењеринг, укртако, се базира на примени инжењерских принципа и методологија дизајна у области решавања медицинских проблема. Биоинжењеринг је наука која се састоји од неколико специфичних подобласти као што су биомеханика, биохемијски инжењеринг, биоелектрицитет и друго.

1. СРЦЕ

Срце је шупљи мишићни орган у телу, са основном функцијом у циркулацији течности кроз организам. Налази се на средини грудног коша. Људско срце има масу 200-425 грама. Срце је грађено од срчаног мишићног ткива. Добро је покривено што му осигурава довољно хране и кисеоника. Подељено мишићним зидом на леву и десну страну. Свака страна се дели на два дела - мањи је преткомора, а већи комора. Срчани записци регулишу пролазак крви из преткоморе у комору. Они имају улогу вентила, пропуштају крв у једном смеру, из преткоморе у комору. Ток крви који пролази из преткоморе у комору затвара срчане записке па враћање крви није могуће (слика 1). [1]



Слика 1 – Структура срца

Електрични импулси у срцу доводе до грчења (контракције) срчаног мишића (миокарда). Импулси се стварају у десној преткомори у тзв. SA чвору који се назива и „природни расемакер срца“. Електрични импулси путују преко мишићних влакана преткомора и комора и изазивају грчење (контракцију) срца. SA чвор шаље импулсе одређеном брзином (фреквенца срца). Нормална фреквенца срца у стању мировања је од 60-100/мин. Међутим, фреквенца се мења у току телесног оптерећења, спавања, стреса или хормоналних фактора. У току спавања фреквенца може пасти до 40/мин, а у току физичког оптерећења порасте на 160/мин. [2]

Срце функционише као пумпа и преко артеријских крвних судова испоручује крв богату кисеоником и хранљивим материјама до свих органа, ткива и ћелија тела. Крв преузима из срца највећа артерија у телу аорта која на свом путу даје гране за главу и врат, срце, јетру, црева, бубреге и доње екстремитете.

Венски систем прикупља крв богату угљен диоксидом и распадним продуктима метаболизма из свих делова тела и носи је преко две највеће вене у телу тзв. горње и доње шупље вене у десно срце где преко плућне артерије та крв одлази у плућа на „пречишћавање“. У плућима се крв поново обогађује кисеоником, односи у лево срце а затим поново до свих делова тела. [2]

1.1 Артерије

Артерије су крвни судови који носе крв од срца. Иако већина артерија носе крв богату кисеоником, постоје два изузетка за ово правило: плућне и умбиликалне артерије. Ефективни волумен артеријске крви (ЕАВВ) је она екстрацелуларна течност (ЕНТ) која се налази у артеријском систему.

Циркулаторни систем је виталан за одржање живота. За његово нормално функционисање је одговорно допремање кисеоника и нутријената свим ћелијама, као и отклањање угљен-диоксида и отпадних продуката, одржавање оптималне рН вредности и циркулација протеина и ћелија имуног система. У развијенијим земљама, два водећа узрока смрти су, инфаркт миокарда (срчани удар) и цереброваскуларни инсулт (мождани удар), која оба могу бити директан резултат артеријског система који је споро и прогресивно оштећен детериорацијом

Артеријски систем је део крвотока под притиском. Артеријски притисак варира између највишег притиска током контракције, званог систолни притисак, и минималног дијастолног притиска између контракција, када се срце шири и поново пуни. Варијација у притиску артерија производи пулс који се може приметити на свакој артерији, и он је одраз срчане активности. Артерије такође помажу да срце пумпа крв. Артерије носе оксигенизовану крв од срца до ткива, осим пулмонарних артерија које носе крв до плућа ради оксигенације. [4]

1.3 Аорта

Аорта је коренска и системска артерија. Она прима крв директно од леве коморе срца преко аортног вентила. Како се аорта грана, и ове артерије се гранају заузврат, оне постају приметно мање у пречнику, до артериоле. Прве артерије које се гранају до аорте су коронарне артерије, које допремају крв до самог срчаног мишића. Оне су праћене гранањем аортног свода, тј. брахиоцефаличком, левом главном каротидом и левом субклавијалном артеријом.

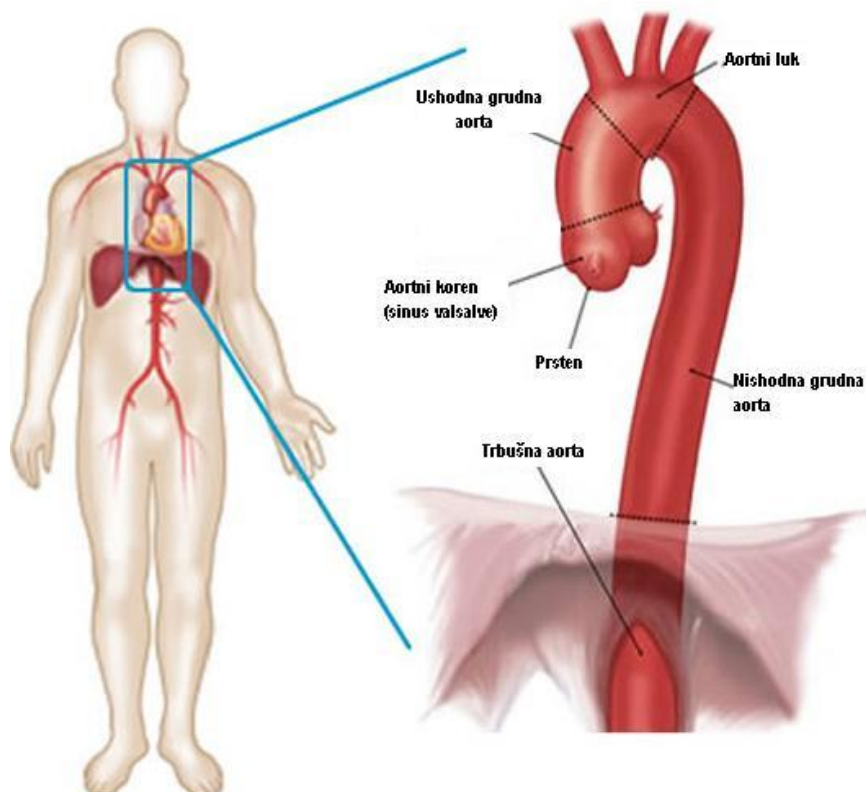
Зидови аорте се састоје од три слоја која су изграђена од различитих ткива : унутрашњи танки слој (intima), средњи дебљи слој, еластични слој (media) и танки спољни слој (adventita). Зидови аорте морају бити довољно флексибилни да прихвате сву крв која се избаци из леве коморе у току сваке контракције. Еластична влакна су нарочито густа у делу усходне аорте (асцендентна аорта), где је притисак крви навећи (слика 2). [5]

Велики проток крви кроз аорту под великим притиском, је без премца у васкуларном систему. С тога ће било које стање које нарушава интегритет аорте, попут дисекције, руптуре и трауматског оштећења, имати катастрофалне последице.

Анеуризма аорте се дефинише као трајно ограничено проширење са увећањем промера за најмање 50% у односу на нормални дијаметар на том нивоу. [6]

Анеуризме аорте, које чине мање од 10% свих анеуризми аорте, настају из више узрока:

- дегенерациона болест зида
- дисекција
- аортитис
- инфекција
- траума



Слика 2 – Структура аорте

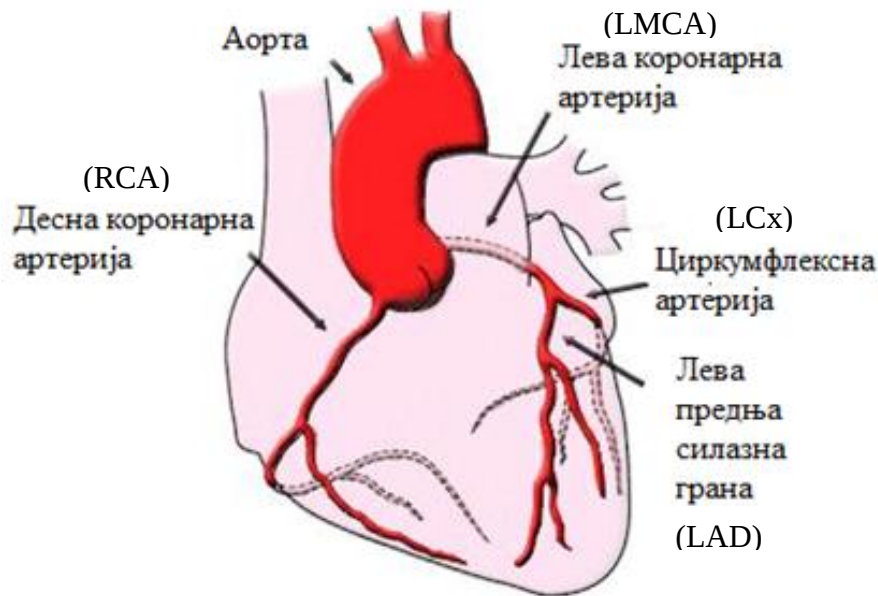
- Аортни корен – почиње од аортног записка, затим се проширује из тог дела излазне коронарне артерије које исхрањују цео срчани мишић.
- Усходна аорта – је део који повезује аортни корен и лук аорте. Она је највише изложена притиску крви која излази из срца.
- Лук аорте – место где се аорта савија према доле, даје гране које снабдевају крвљу главу и руке.
- Нисходна аорта – почиње од лука, спушта се на доле, а завршава се у нивоу дијафрагме. Од ње се одвајају гране које исхрањују ребра.

- Таракоабдоминална (грудно-трбушна) аорта – почиње у нивоу дијафрагме, даје гране за исхрану желуца, доњег дела једњака, јетре, слезине, панкреаса, црева и бубрега.
- Абдормална (трбушна) аорта – почиње испод грана бубрежних артерија и завршава се на месту где се грана на две илијачне (карличне) артерије које снабдевају крвљу карлицу и ноге. [5]

2. КОРОНАРНА АРТЕРИЈА

Коронарне артерије, називају се још и срчане артерије, су крвни судови који снабдевају крвљу срчани мишић. Постоје две коронарне артерије, лева и десна, и обе су гране усходног дела аорте. Настају из почетног, проширеног дела аорте који се назива булбус, и који са одговарајућим левим и десним полумесечастим записком аорте, у виду цепа формира одговарајући Валсалвеов аортични синус. Обе артерије су покривенем танким листом срчане марамице, и налазе се у простору испод њега, у такозваним коронарним жлебовима.

Коронарне артерије спадају у групу функционално терминалних крвних судова, односно ону групу крвних судова чије су спојнице малог калибра, тако да у случају опструкције шупљине крвног суда најчешће долази до смањене оксигенације срчаног мишића, и самим тим развоја акутног инфаркта миокарда различитог степена. [7]



Слика 3 – Приказ коронарних артерија и аорте на срцу

Почетни сегмент леве коронарне артерије се назива главно стабло, а од њега се одвајају две гране: предња силазна и циркумфлексна грана. Предња силазна грана леве коронарне артерије се спушта предњом страном срца до врха, а циркумфлекса иде дуж леве стране према задњој страни срца.

Десна коронарна артерија се спушта уз задњи зид срца (задња силазна артерија). Постоје тзв. анатомске варијације тј. код неких људи (15%) задња силазна артерија настаје из леве коронарне артерије (циркумфлексе). Све ове срчане артерије дају мање гране које прекривају цело срце, а неке улазе дубље у сам срчани мишић. Коронарне вене прикупљају крв сиромашну кисеоником из ћелија срца и односе је у десну преткомору (слика 3). [8]

Када се холестерол наталожи у зиду коронарне артерије створи се плак који сужава лумен артерије и спречава нормалан доток крви до одређеног дела срца. Посебно је опасно сужење главног стабла леве коронарне артерије јер оно даје две гране које исхрањују велики део срца. Када се повећа потреба срца за кисеоником нпр. за време већег физичког напора, сужена коронарна артерија не може да допреми довољно крви једном делу срца. У ћелијама срца у току метаболизма без кисеоника (анаеробни метаболизам) ствара се већа количина млећне киселине (лактат) која надражује нерве у срцу и настаје бол у грудима тзв. ангинозни бол. [8]

2.1 Анатомија коронарне артерије

Постоје три типа крвних судова: артерије, вене и капилари. Они се међусобно разликују по својој структури и функцији. [15]

Артерије су крвни судови кроз које крв тече по изласку из срца. Оне имају релативно дебеле и јаке зидове који се састоје из три слоја: спољашњег, средњег и унутрашњег омотача. Спољашњи омотач (*tunica adventitia*) састоји се углавном из везивног ткива. Средњи омотач (*tunica media*) изграђен је од глатких мишићних влакана и садржи еластична везивна влакна. Контракције овог омотача смањују промер крвног суда. Унутрашњи омотач (*tunica intima*) изграђује везивно ткиво превучено слојем плочастих ћелија (*endothelium*). Идући ка органима, артерије се гранају до најситнијих гранчица које се називају артериоле. Артериоле се даље гранају у сплет капилара. [15]

Вене су крвни судови који доводе крв ка срцу. Њихов зид је изграђен из три слоја, али садржи знатно мање еластичних влакана и мишићних ћелија, па према томе зид им није тако чврст и еластичан. Заразliku од артерија, на унутрашњем зиду вена су залисци који се отварају у правцу протицања крви и не дозвољавају проток у супротном правцу. Ови залисци помажу проток крви ка срцу. Најмање вене се називају венуле а постају сједињавањем капилара. [2]

Капилари су најситнији крвни судови постављени између артерија и вена. Када је орган у стању мировања (одмора), у капиларима се обично не налази велика количина крви. Они се тада контракују. У стању активности количина крви у капиларима тога органа се више струко повећава. Зид капилара је изграђен од једног слоја ендотелних ћелија. Размена материја између крви и ткива одвија се кроз зид капилара. При томе процесу ендотелијум капилара делује као активни чинилац.

Приликом протока кроз капиларе артеријска крв, која долази из артериола, мења се полако у венску крв која даље отиче у венуле. [15]

2.2 Најчешће болести коронарних артерија

Болести коронарних артерија углавном настају услед смањеног протока крви у самим артеријама, и то најчешће због атерома. Са медицинског аспекта, клинички, се очитује као ангина пекторис, акутни коронарни синдром и изненадна срчана смрт. Са дијагнозом се полази од симптома, EKG записа, теста оптерећења а понекада и коронарографијом. Најчешће се лечи са фармакотерапијом и захватима који смањују исхемију и побољшавају проток крви кроз коронарне артерије.

Сужавање лумена артеријских крвних судова срца представља срж проблема коронарне болести. Најчешћи симптом који се јавља у овој патологији јесте бол у грудима, односно ангина пекторис. Бол може да се јави приликом физичког напора или пак у миру када је болест већ унапредовала. Такође, болест може да се манифестује у виду:

- Тихе исхемијске болести срца која не даје симптоме,
- Инфаркта миокарда,
- Поремећаја срчаног ритма (срчане аритмије),
- Срчане слабости (срчане инсуфицијенције),
- Напрасне срчане смрти. [9]

Фактори ризика за настанак коронарне болести су:

- Старост,
- Пушење,
- Хипертензија,
- Дијабетес тип I и тип II,
- Повишене вредности LDL холестерола и триглицерида у крви,
- Ниске вредности HDL холестерола,
- Гојазност и седентарни стил живота,
- Наследност,
- Стрес итд. [9]

Коронарна болест срца или исхемијска болест срца у 95% случајева настаје услед атеросклерозе крвних судова. Атеросклероза је природни процес који почиње још у детињству, а карактерише га стварање наслага масти у крвним судовима.

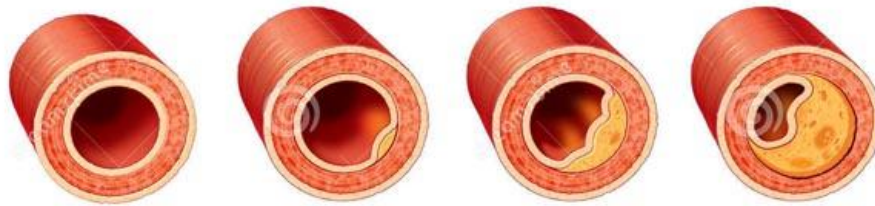
Нагомилавањем масти у зидовима срчаних артерија, временом, узрокује њихово сужење и смањење протока крви кроз њих. Срчани мишић (срце) не добија довољно кисеоника и хранљивих материја, те настају симптоми тзв. исхемијске болести срца.

Значајним сужењем сматра се ако је лумен коронарних артерија смањен за 50-70%, док се преко 70% сматра тешким обликом сужења. У почетку се симптоми јављају у напору јер су тада потребе срчног мишића (миокарда) за кисеоником веће, а понуда мала. Даљим нагомилавањем масти, артерија се све више сужава и симптоми се јављају и у мировању. Поред масти, плак садржи и фиброзно (ожиљно) ткиво које је по конзистенцији чвршће од масног ткива. Према количини масног и фиброзног ткива атеросклеротски плак може бити стабилан и нестабилан. [9]

Стабилан плак има више фиброзног ткива, па такав плак ређе пуца. Често се у плак уграђују и соли калцијума. Нестабилан плак има више масног ткива, па је опаснији, често пуца и на том месту се ствара тромб (угрушак) који затвара коронарну артерију (слика 4). Тако настаје инфаркт срца. У 5% случајева узроци коронарне болести су неатеросклеротског порекла.

Релативно чест узрок су коронарне аномалије или “muscular bridge” (главне срчане артерије су нормално смештене на површини срца, док код ове аномалије део срчане артерије улази дубље у срчани мишић и у току контракције (грчења) срца се сужава.

Други ређи узроци су: коронарна дисекција: цепање срчане артерије спонтано или услед трауме, васкулитис коронарних артерија-запаљење зида коронарне артерије, хиперплазија интима: задебљање унутрашњег слоја зида коронарне артерије: након зрачења, трансплантације срца, метастазе у миокарду- компресија коронарних артерија или инфилтрација малигним ткивом итд. [9]



Слика 4 – Насlage холестерола које затварају коронарне артерије

Фактори ризика за коронарну болест су: године живота, повишене вредности масти, пушење, крвни притисак, физичка неактивност, шећерна болест, инфекције, употреба оралних контрацептивних средстава, бубрежна инсуфицијенција, алкохол и итд. Коронарна болест манифестује се као: ангина пекторис, инфаркт срца, поремећај срчаног ритма и провођења, асимптоматска коронарна болест, срчана слабост и напрасна срчана смрт. Ангина пекторис је најчешћа манифестација артеријске коронарне болести. То је синдром који се састоји од напада болова иза грудне кости обично са ширењем у леву руку или врат и гушења са осећајем страха од смрти.

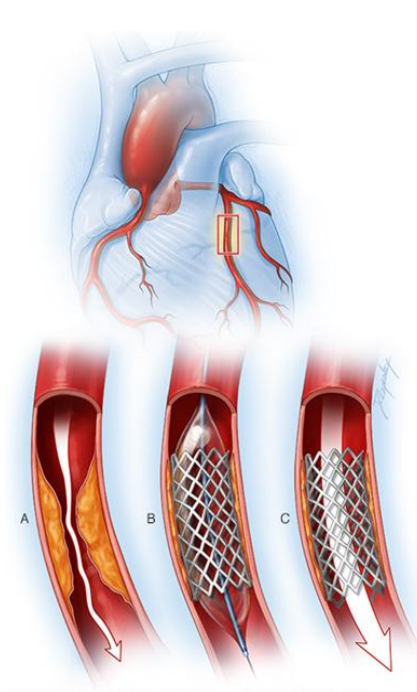
Терапија коронарне болести може се поделити на: неинвазивну (медикаментозну- лекови) и инвазивну. Лекови који је користе у терапији коронарне болести срца: антиагрегациони лекови, бета блокатори, нитрати, калцијумски антагонисти, статини, АСЕ инхибитори, АТ инхибитори. [9]

У инвазивну терапију спада: RTSA, уградња стента и хирушка реваскуларизација. Перкутана транслуминална коронарна ангиопластика (RTSA) се изводи ради отварања запушених коронарних артерија и обезбеђивања протока крви у њима. Два сата пре процедуре пацијент узима Аспирин или клопидогрел .

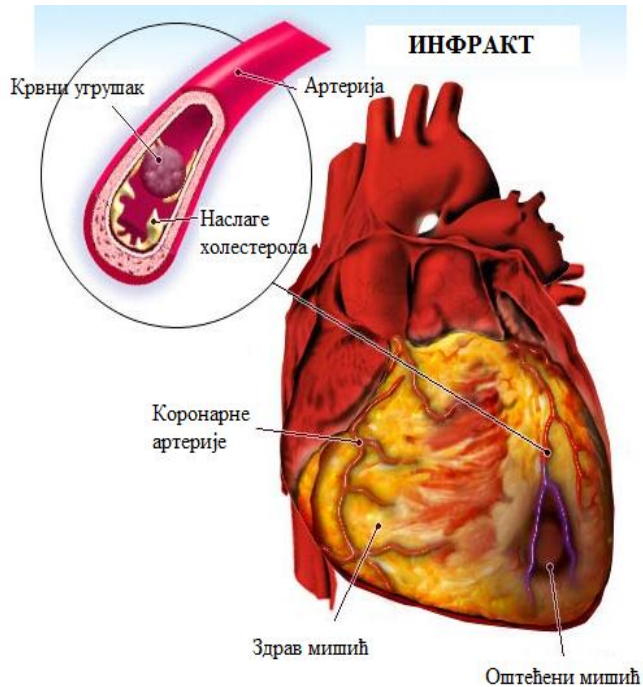
Пацијент за време процедуре остаје будан што му омогућава да прати упутства лекара (да дише дубоко или задржи дах итд). Специјални катетер се пласира преко препонске или артерије на руци до срчаних крвних судова.

Уз помоћ ренгена лекар може видети где је место сужења коронарне артерије. Затим се пласира жица водич и преко ње балон до места сужења коронарне артерије,

надува се у трајању од 1-2 минута и на тај начин притискајући околно масно ткиво шири коронарну артерију и побољшава проток крви кроз њу. Након потпуног испражњења балон се враћа преко катетера водича, а жица остаје (слика 5). [9]



Слика 5 – Уградња катетера



Слика 6 – Стварање иగుрушка и довођење до инфаркта

Стенозирана регија се ангиографски поново сними и докаже да ли се повећала проходност крвног суда, а тиме и успех процедуре. Компликације у току и непосредно након процедуре: смртност је 0,25%, ретко може бити потребна хитна бајпас операција срца, рана оклузија (зачепљење коронарних артерија), инфаркт срца, компликације на крвним судовима (слика 6). [10]

У случају тежих сужења срчаног крвног суда лекар може да се одлучи за постављање (имплантацију) стента. Стент је метална цевчица која се уведе до суженог или запушеног дела крвног суда у току хемодинамске обраде, а затим се рашири надувавањем балона, те остаје утиснут у унутрашњу страну зида крвног суда. Једном пласирани стент заувек остаје у артерији. Временом он ураста у зид крвног суда подупирући га.

Хирушка реваскуларизација или аортокоронарна бајпас срца је операција којом се врши премощавање сужених срчаних артерија помоћу венских графтова тј. делића венских крвних судова који се узимају из ноге, руке или се користи унутрашња грудна артерија.

Морталитет (стопа смртности) је у већим центрима мали (<1%) у болесника код којих срце није јако оштећено, а функција плућа, бубрега, јетре и других органа је уредна. Пошто се отвара грудни кош, опоравак траје нешто дуже.

У циљу превенције коронарне болести првенствено требамо деловати на факторе ризика. Регулисање повишеног крвног притиска, редукцију телесне тежине, престанак пушења, престанак конзумирања алкохола, редовна терапија и контрола шећерне и других болести. У мере превенције спадају и редовне poste лекару, почевши већ од 20 године живота (ЕКГ, липидни статус и сл).

Преко 98% пацијената преживи првих месец дана од операције, 97% преживи једну годину, 92% 5 година, 81% 10 година, а 66% преживи 15 или више година након операције. Десет година од операције 60% пацијената неће имати ангинозне болове. [10]

Ризик од компликација коронарне хирургије је већи:

- Уколико је пацијент оперисан као хитан случај у односу на елективне пацијенте, односно пацијенте који су имали одговарајућу преоперативну припрему.
- Код особа старијих од 70 година.
- Код жене.
- Код особа које су већ имале операцију на срцу.
- Уколико постоји удруженост других болести као што су дијабетес, хронична опструктивна болест плућа, бубрежна слабост, периферна васкуларна болест итд.

Преко 95% пацијената нема никакве компликације, а оне које могу да се јаве су:

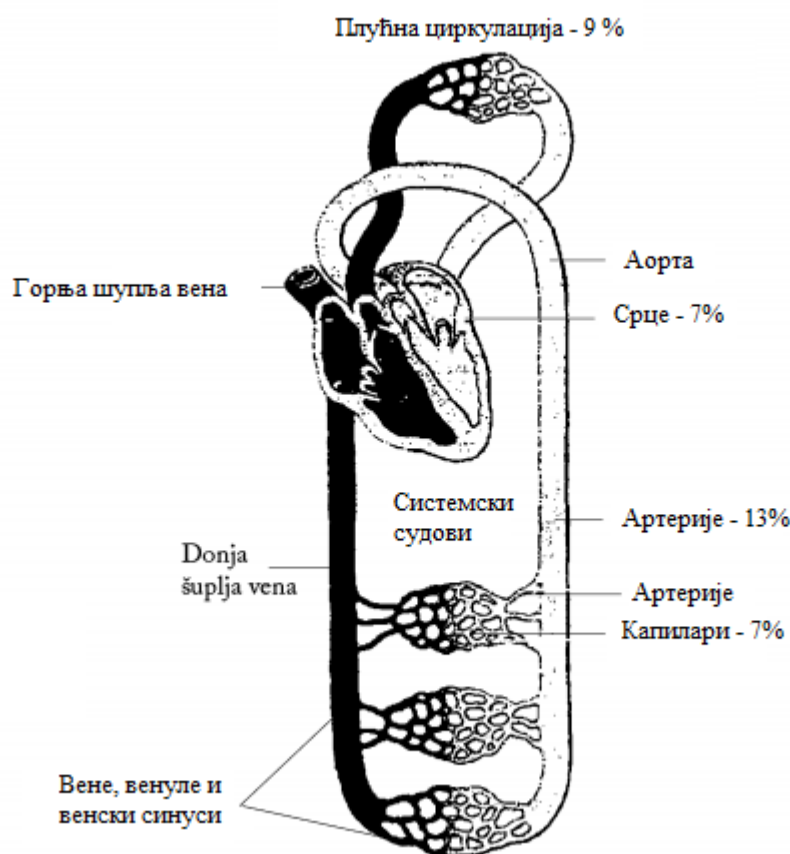
- Крварење,
- Срчане аритмије,
- Инфаркт миокарда,
- Мождани удар,
- Пролазна дезоријентација у времену и простору,
- Бубрежна инсуфицијенција,
- Дубока венска тромбоза,
- Плућна емболија,
- Инфекција места реза, инфекција грудне кости, инфекција средогруђа итд.

Смртни исход се јавља у 1-2% случајева. [10]

3. СТРУЈАЊЕ КРВИ КРОЗ АРТЕРИЈЕ

Моделирање струјања флуида примењује се на проблеме струјања крви кроз велике артерије. Улога циркулације крви код човека је да транспортује хранљиве супstrate у ткива, уклања отпадне производе, преноси хормоне и, уопште, да одржава адекватну биолошку средину у свим ткивним течностима за оптималне функције ћелија.

Циркулација је подељена на системску и плућну циркулацију као што је приказано на Слици 7. Системска циркулација се назива још и велики крвоток или периферна циркулација, пошто снабдева крвљу сва ткива изузев плућа. Уобичајена подела циркулаторног система је на: артерије, артериоле, капиларе, вене и венуле. [16]



Слика 7 – Расподела крвотока у различитим деловима циркулаторног система

Артерије преносе крв под високим притиском у ткива. Због тога артерије имају јак васкуларни зид а струјање крви у њима је са великим брзинама.

Артериоле су последње мале гране артеријског система које имају улогу контролних валвула преко којих крв долази у капиларе.

Артериоле имају дебео мишићни зид који је у стању да потпуно затвори артериоле или да их потпуно дилатира, у зависности од потреба тих ткива.

Капилари имају улогу у размени течности, хранљивих супстрата, електролита, хормона и других супстанци. Због тога је капиларни зид веома танак и пропустљив (пермеабилан) за мале молекуле. [16]

Вене имају улогу да транспортују крви из ткива у срце, али, што је веома важно, и да при томе служе као велики резервоар крви.

Притисак у венском систему је веома низак, тако да су венски зидови танки, а струјање споро. Венуле прикупљају крв из капилара и уливају се у веће вене. Највећи део крви у системској циркулацији смештен је у системске вене.

Са Слике 7 може се видети да је око 84% читаве запремине крви у системској циркулацији и то: 64% у венама, 13% у артеријама и 7% у системским артериолама и капиларима. У срцу се налази око 7% укупне запремине крви, а у плућима 9%. Како иста

запремина крви протиче кроз свесегменте циркулације континуално, брзина крви је обрнуто пропорционална површини пресека.

У стању мировања брзина протока кроз аорту износи 33 cm/s, а у капиларима само један хиљадити део ове брзине, или 0,31 mm/s. Срце пумпа континуално крв у аорту при средњем притиску од 100 mmHg (13,3 kPa). То пумпање је пулзаторно па тако артеријски притисак осцилује између систолног нивоа од 120 mmHg до дијастолног од 80 mmHg. Крв протиче кроз системску циркулацију и притисак постепено опада да би био приближно 0 mmHg у тренутку када досегне до краја вена, на уласку у десну преткомору срца. [16]

Просечни проток крви у циркулацији одраслог човека износи 5 L/min. Он се зове минутни волумен срца, јер је то количина крви коју срце испумпа за један минут. Срчани циклус састоји се из периода релаксације названог дијастола за време кога се срце пуни крвљу, после кога следи период контракције, који се зове систола.

Крв која улази у артерије изазива истезање њихових зидова и пораст притиска у њима. Када на крају систоле лева комора престане да истискује крв и валвуле се затворе, висок притисак у артеријама за време дијастоле одржава се захваљујући еластичним својствима артерија.

Постоје два облика срчаног рада. Први, највећи део срчаног рада, троши се на то да се крв пребаци из подручја ниског венског у подручје високог артеријског притиска. То је рад потребан за одржавање односа запремина-притисак, или спољашњи рад. Други, много мањи део рада, троши се за убрзавање крви до оне брзине којом се она истискује кроз валвулу аорте и валвулу пулмоналне артерије. То је кинетичка енергија срца. [16]

3.1 Струјање крви у срцу и главним артеријама.

У хемодинамици (динамици крви) најчешће се проучавају четири дела артеријског стабла као прототипови, и то: срце и проксимална аорта, абдоминална аорта, каротидна бифуркација, и лева коронарна артерија. Ови крвни судови су од посебног значаја, пре свега зато што најчешће подлежу болести, а са друге стране репрезентују струјање у артеријском стаблу.

При струјању крви у срцу и великим крвним судовима доминантне су инерцијалне у односу на вискозне силе. Рејнолдсови бројеви, као карактеристике брзине струјања на максимуму систоле, реда су величине $Re=4000$. Струјања у аорти и у плућном делу слична су струјањима улазних проила брзина. Може се сматрати да је област средишног струјања невискозни регион окружен развијеним граничним слојевима ка зиду. Притисци и брзине у комплексном струјању у коморама срца одређују се искључиво анализом 3D струјања која укључују кретања граница. [16]

Иначе постоје ин витро модели ових струјања развијени у лабораторијама, док се ин vivo мерења на човеку врше разним техникама, као што су: катетери, Доплеров ултразвук, магнетна резонанца, итд.

Све технике мерења и прорачуна показују присутност секундарног струјања (у равни нормалној на главни ток струјања) у левој срчаној комори, које настаје због струјања

из атријума кроз митралну валвулу. Када се притисак у левој комори повећа изнад 80 mmHg а притисак десне буде нешто изнад 8 mmHg, притисак у коморама отвара семилунарне залиске, па крв одмах почне да излази из комора. Од укупно истиснуте количине крви удео комора је око 70% у првој трећини периода избацивања, а преосталих 30% се догађа у наредне две трећине тог периода. [16]

Аорта је крвни суд који полази из леве срчане коморе и има следеће сегменте: – булбус – проширење почетног дела непосредно иза аортних залистака из кога полазе две коронарне артерије,

- усходни део који даје побочне гране,

- лук који наставља усходни део и прави кривину ка левој страни где наставља као нисходна грудна аорта, а са свог конвексног дела даје три велике гране за главу, врат и горње екстремитете,

- нисходну грудну аорту која се наставља од леве поткључне артерије последње гране лука до дијафрагме, где прелази у трбушну аорту правећи благу кривину конвексну улево,

- абдоминалну или трбушну аорту која је наставак грудне, испод дијафрагме до бифуркације на леву и десну заједничку бедрену артерију за ноге. У почетном делу трбушна аорта даје побочне гране (за јетру, црева и бубреге), целијачно стабло, горњу мезентеричну артерију, и леву и десну бубрежну артерију, а у средњем делу даје доњу мезентеричну артерију. У свом току прави кривину благо конвексну удесно и према напред. [16]

4. МЕХАНИКА ФЛУИДА У СТРУЈАЊУ КРВИ

Кардиоваскуларни систем се посматра као систем код кога се струјање одвија са доминацијом вискозних сила или инерцијалних сила. Тај однос дефинише Рејнолдсов број. Димензијска анализа нестационарних Навије – Стоксових једначина доводи до бездимензијског броја који се уобичајно назива Вомерслов параметар.

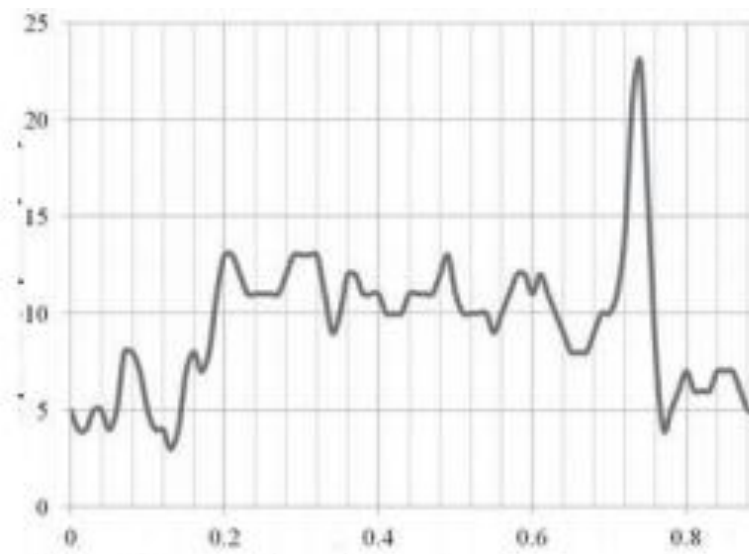
Када је Вомерслов параметар мали, доминантне су вискозне силе и профили брзина су по облику параболични. Ако је Вомерслов параметар већи од 10, инерцијалне силе постају доминантне и струјање је слично кретању клипа са равним профилем брзина. [17]

Струјање у левој коронарној артерији је прилично сложено из неколико разлога. Прво, лева коронарна артерија је прилично кратка што проузрокује тип струјања са врло малим Вомерсловим параметром, који износи око 2. Друго, струјање у левој коронарној артерији је повратно у поређењу са већином артеријама, односно проток је већи за време фазе дијастоле. Струјање може бити повратно и за време систоле.

Високи притисци у миокардијуму за време фазе систолне контракције чине да је струјање крви повратно у коронарним артеријама. Треће, бифуркација не лежи у равни већ је савијена око срца. [17] Ове три карактеристике представљају тешкоћу да се предвиди профил брзина, јер су присутни бројни одлучујући фактори који се могу анализирати издвојено али у њиховој комбинацији врло тешко.

5. КОМПЈУТЕРСКА СИМУЛАЦИЈА

Крв се апроксимира као нестишљив њутновски флуид са густином од 1050 kg/m^3 и динамичком вискозности од $0,003675 \text{ Pas}$. Зидови крвних судова су моделирани као линеарно еластичан материјал са Поасоновим односом од 0,49 и густином зида од 1100 kg/m^3 , а дебљина зида је уједначена и износи $0,8 \text{ mm}$. Један срчани циклус ($0,89 \text{ s}$) је симулирано у 20 корака са временом корака од $44,49 \text{ ms}$. Максимална брзина протока за време дијастоле на улазу је 23 cm/s . Профил брзине који је коришћен за симулацију пулзаторног протока приказан је на слици 1. За интеракцију флуида и солида, претпостављају се мала померања крвног суда, док је мрежа лумена фиксна. [18]

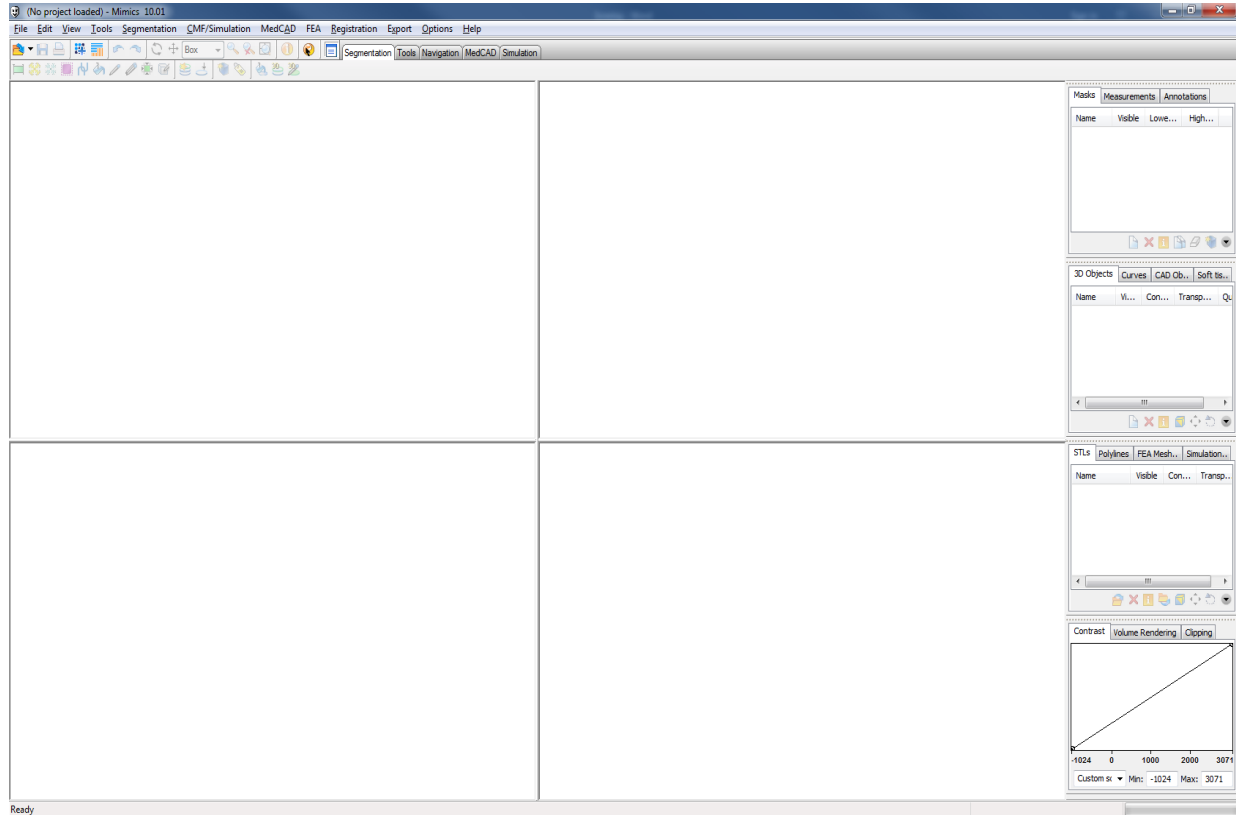


Слика 8 - Профил максималне брзине у улазном пресеку током једног срчаног циклуса код човека

Када се гледа у попречном пресеку, брзина расте постепено. Профил брзине је параболичан: вредност брзине близу артеријског зида је једнак нули, а вредност у центру крвног суда има максималну вредност. Добијено мерење протока ултразвуком представља количину крви која протекне кроз попречни пресек суда у јединици времена. Максимална вредност брзине се одређује на основу једнакости запреминског протока који протиче кроз попрелни пресек суда и обрачунава се засновано на максималној и средњој брзини. [18]

6. ПРИПРЕМА МОДЕЛА У MIMICS СОФТВЕРУ

Прва фаза добијања 3D модела се одвија у Mimics софтверу (Слика 9). Mimics је софтвер специјално развијен од стране Materialise за обраду медицинских слика. Mimics се користи за сегментацију 3D медицинских слика које су добијене из CT, MRI, micro-CT, 3D ултразвука и Конфокалне микроскопије. Резултат коришћења ће бити веома прецизни 3D модели анатомије пацијента. [11]

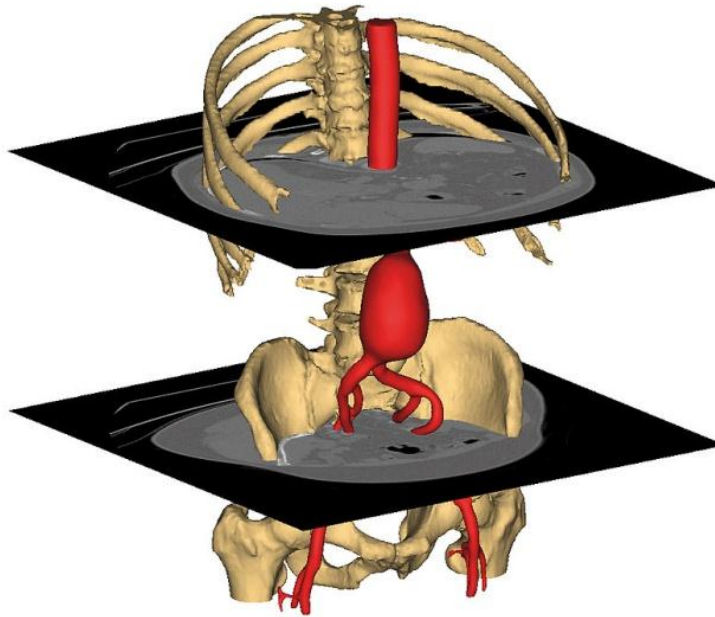


Слика 9 – Mimics софтвер

Велика предност коришћења Mimics-а јесте то што коначни модели могу бити коришћени у разним инжењерским апликацијама попут CAD, FEA пакети и слично. Помоћу овог софтвер се дакле лако и брзо креирају прецизни 3D модели из податка за снимање, прецизно мерење у 2D и 3D, извод 3D модела у .stl формат, и извод 3D модела за оптимизацију мреже за FEA или CFD (Слика 10). [11]

Material Mimics израчунава површинске 3D моделе из података сложених слика као што су компјутерска томографија (CT), микро CT, магнетна резонанца (MRI), конфокална микроскопија, рендген и ултразвук, кроз сегментацију слике. ROI, одабран у процесу сегментације, претвара се у 3D површински модел помоћу прилагођеног алгорита марширања коцки који узима у обзир делимичан ефекат запремине, што доводи до врло прецизних 3D модела. [11]

Формати излазних датотека се разликују, у зависности од следеће апликације: уобичајени 3D излазни формати укључују STL, BRML, PLI и DKSF. 3D датотеке такође могу бити оптимизоване за FEA или CFD и стога се могу извозити у Abakus у INP формату, на Ansis у INP, CDP и MSX формату, на Nastran у OUT, NAS и BDF формату, као и на Comsol у MPXTKST формату. Да бисте наставили са дизајнирањем помоћу рачунара, датотеке се могу извозити у IGES формату или као cloud cloud. [11]



Слика 10 - 3D површински модели креирани у Mims-и од CT-a

6.1 Добијање 3D модела преко 2D DICOM снимака

DICOM формат представља дигиталну фотографију и комуникацију у медицини. То је стандард за руковање, складиштење, штампање и преношење информација у медицини. Дакле, осим што је дигитална фотографија, може се сматрати и као мрежни протокол за комуникацију. DICOM датотеке се могу размењивати између два ентитета који су у стању да примају слике и податке о пацијентима у DICOM формат. Уређаји за слике, укључујући рендгенске снимке, ултразвук, микроскопију, MRI и CT користе овај стандард. Стандард (оригинално назван ACR / NEMA 300) је први пут створен још 1985. године када су медицински практичари желели да декодирају слике како би планирали дозу радиотерапије. [12]

Стандард није био савршен од почетка. Требало је неколико великих ревизија пре него што је 1993. постало широко прихваћена пракса (која је и година када је стандард преименован у DICOM). Током година постојала су неколико различитих граница DICOM стандарда који су имплементирани у другим областима, нпр. DICOM (дигитална слика и комуникација у безбедности) који се користи за дељење слика у сигурности аеродрома (Слика 11). [12]



Слика 11 – Пример DICOM снимка

Први корак добијања 3D модела подразумева учитавање сета DICOM слика у софтвер, након чега креће обрада датих слика. Сlike су најчешће смештене у једном фолдеру као на слици 10.

[.]		<DIR>	07/28/2016 09:09-
3D MIP_38AA		jpg	129,350 03/19/2013 15:36-
IM-0002-1225794608-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1225805392-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1225833136-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1225897568-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1225904480-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1226033920-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1226050752-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1226166688-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1226183056-0001		dcm	528,192 03/19/2013 16:36-
IM-0002-1226242144-0001		dcm	528,186 03/19/2013 16:36-

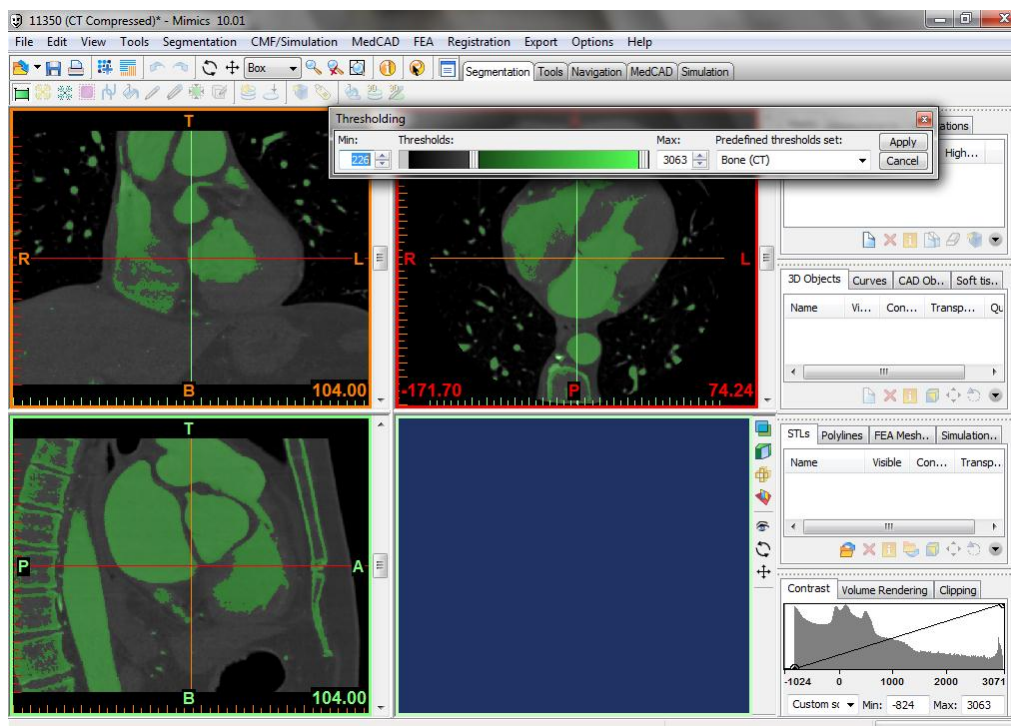
Слика 12 - DICOM слике за учитавање

Учитавање се врши кликом на File -> Import Images, након чега се отвара нови дијалог где је потребно селектовати фолдер где се налазе дате слике, у овом случају првог пацијента (слика 12).

На слици 14 се може закључити да се ради о црно белој слици која је представљена различитим нијансама. Управо те нијансе представљају кључ добијања 3D модела, и од тих врста подешавања зависи сам квалитет добијеног модела, и то се постиже преко threshold алгоритма.

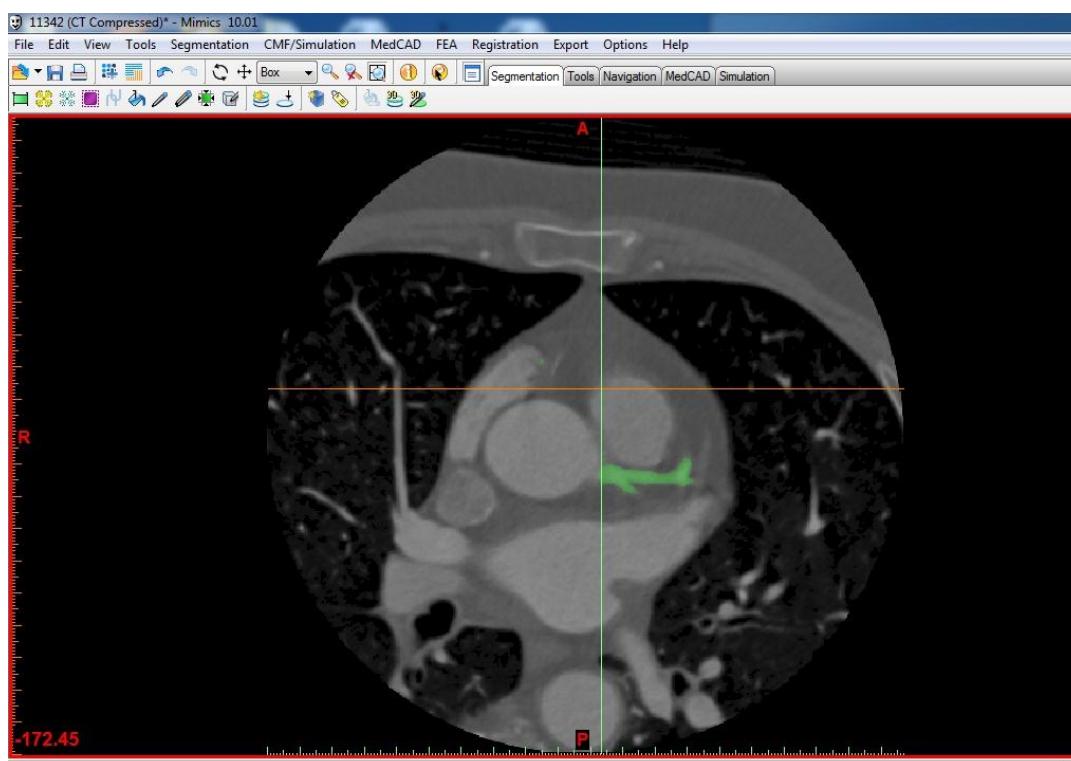
Threshold представља једну од алата за сегментацију слике, и превод на српски представља сегментацију прагом. Ова техника представља групу метода заснованих на поређењу осветљености пиксела са једним или више прагова. У овом конкретном примеру се ради са осветљености једног прага, и то је уједно најједноставнији вид одвајања објекта од позадине.

У mimics софтверу је потребно кликнути на segmentation па затим на thresholding, након чега се аутоматски чекира предефинисано подешавање thresholding-a на bone добијен са CT (слика 15).



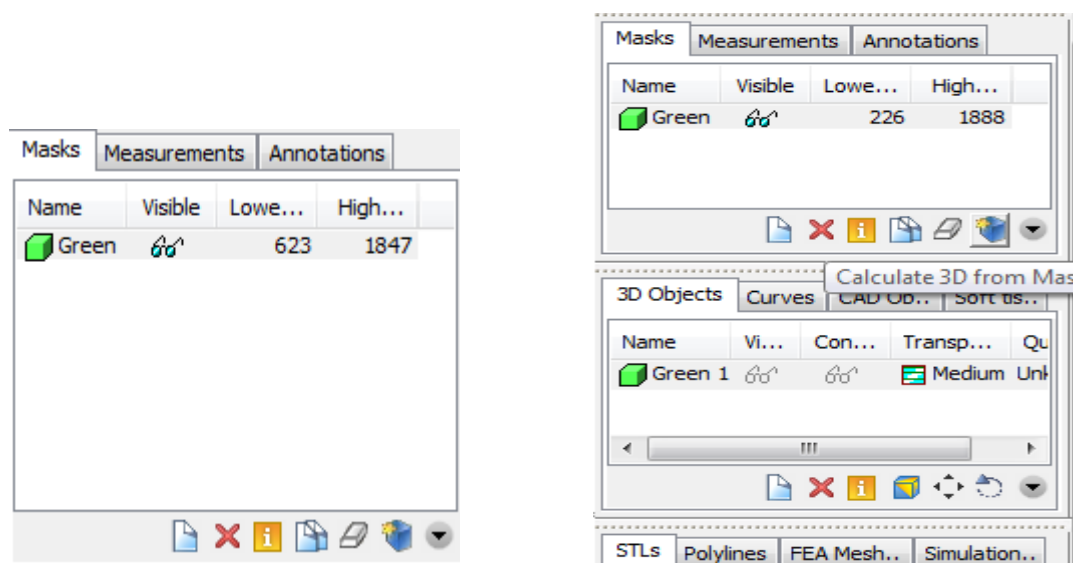
Слика 15– Подешавање Threshold-a у Mimics-u

Оно што је овде могуће закључити и што је у ствари битно за подешавање, јесте вредност која је смештена у пољу “min:”, и ту је нека вредност по default-у 226. Повлачењем клизача на десно вредност се повећава, а самим тим и опсег боје која се узима као нулта. Када се каже као “нулта” то се може замислити на следећи начин. Светлост пиксела изнад 226 се узима као вредност 0, сви остали пиксели чија је вредност мања од 226 узима вредност 1, и то се марkira зеленом бојом (зелена боја је по default вредности у mimics-u) (Слика 16).

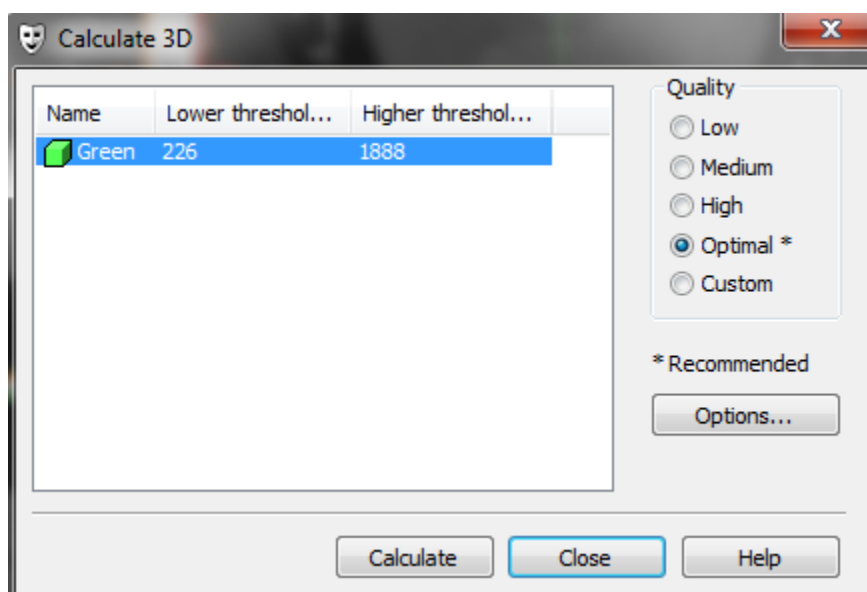


Слика 16 – Пример означавања threshold-a

Након експерименталног утврђивања коначне вредности threshold-a, потребно је “калкулисати” 3D модел, и то кликом на calculate 3D from mask, у оквиру дела са слике 17.

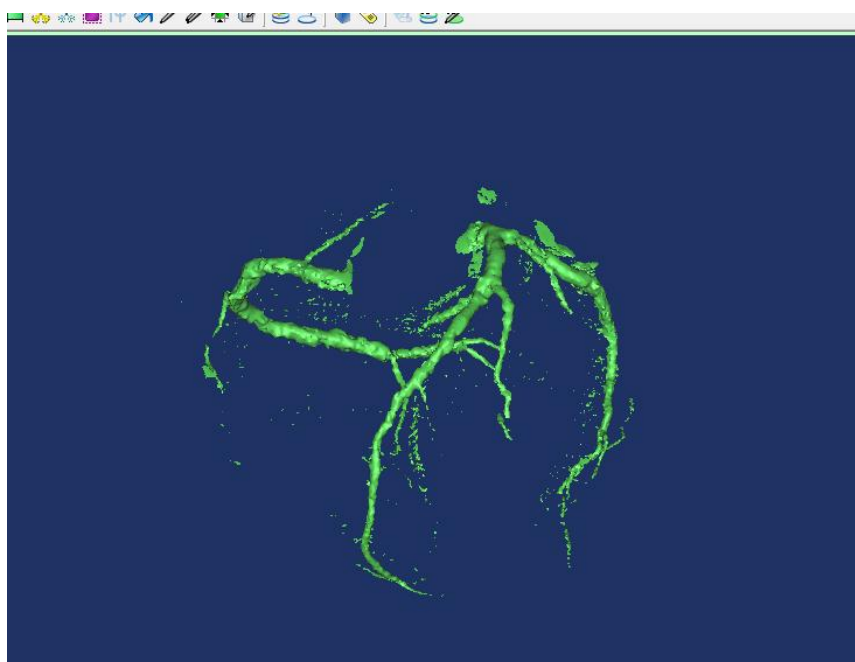


Слика 17 – Део за рад са маскама



Слика 18 – Калкулација модела

Након калкулације модела (слика 18), добија се модел као на слици 19, који је потребно извести у .stl фајл, кликом на Export – ASCII STL



Слика 19 – Добијен 3D модел на основу 2D снимака

7. ОБРАДА МОДЕЛА У GEOMAGIC STUDIO-U

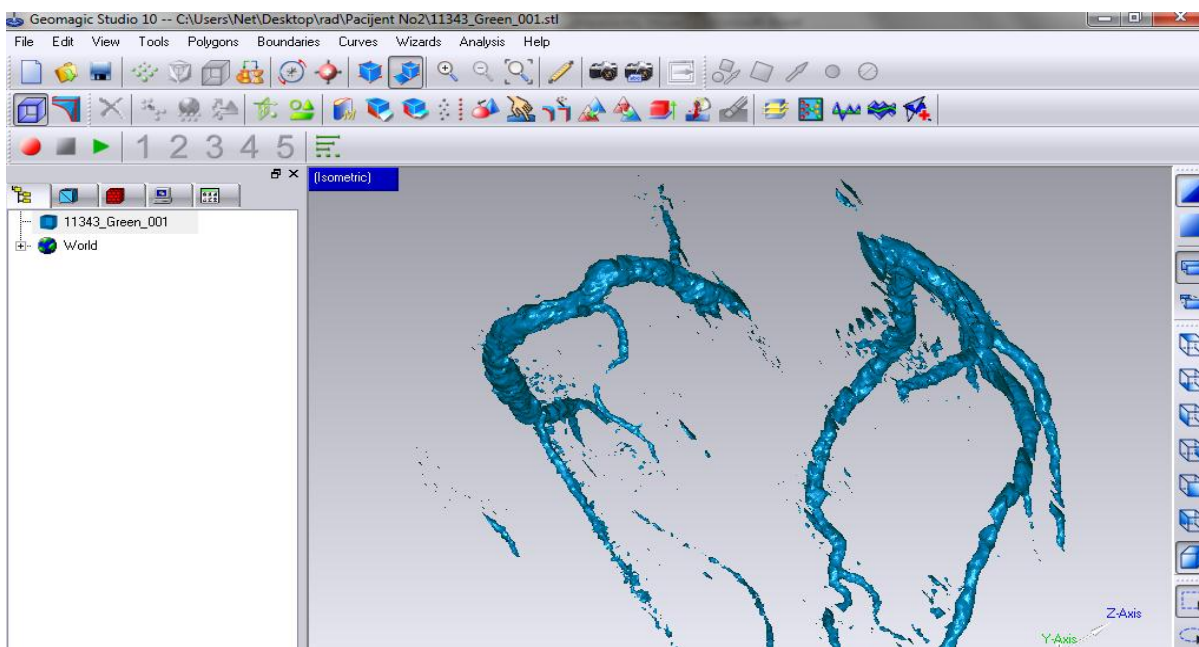
Након извршене сегментације и након извоза добијеног модела са слике 19, потребно је извршити даљу обраду модела у Geomagic studio софтверу.

Geomagic је професионални инжењерски софтвер компаније 3D Systems. Бренд је почео када је компанија 3D Systems у фебруару 2013. године купила компанију Geomagic Inc., софтверску компанију са седиштем у Морсвилу, Северна Каролина, а заједно са осталим софтверским фирмама тог предузећа (наиме, Rapidform и Alibre).

Geomagic је специјализован за рад са 3D моделима, обраду, поправку добијених површина, одстрањивање троуглова, додавање, и много других операција.

Геомагични брендирани софтверски производи су фокусирани на рачунарски дизајн, са нагласком на 3Д скенирање и друге нетрадиционалне методологије дизајна, као што је voxel based modeling са haptic inputom. 3D системи такође тржиште 3D софтвера за контролу квалитета као и 3Дскенера под Geomagic брендом. [13]

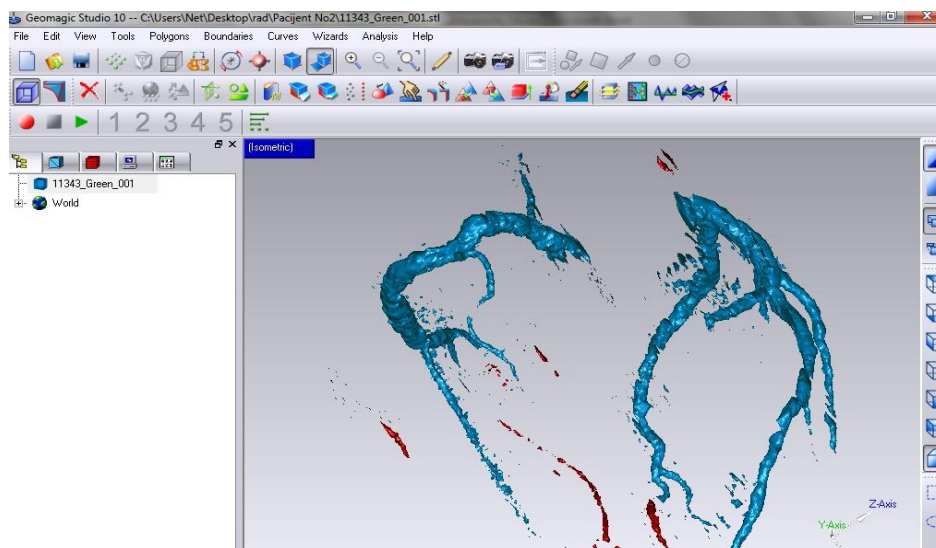
Модел се учитава кликом на картицу File па на Import, где је потребно селектовати издвојен модел који је добијен у Mimics-u. Модел као што је на слици 20 садржи мноштво непотребних елемената. Модел са слике 20 садржи велики број троуглова и остале елементе који нису потребни.



Слика 20 – Учитан модел у Geomagic studi-u

У наредним корацима је потребно издвојити коронарне артерије (леву и десну), и припремити их за проверу и постпроцесирање у Femari-u. Ти кораци подразумевају уклањање вишка елемената, кориговање броја троуглова, попуњавање евентуалних отвора насталих обрадом модела, уклањање лоших троуглова и уопштено жаргонски речено “пеглање” модела.

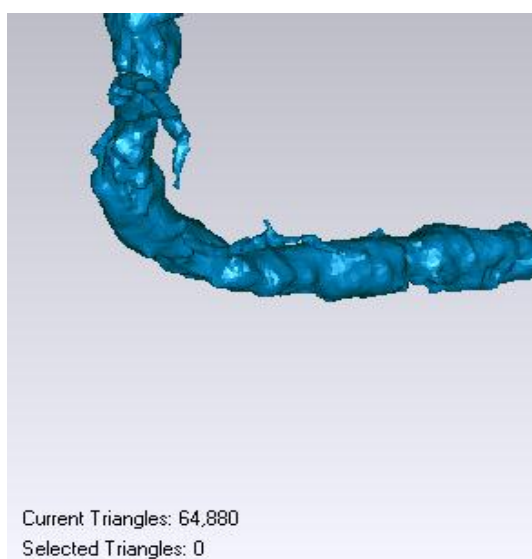
На слици 19 је дат пример маркирања жељеног дела модела. Након маркирања се отвара мноштво могућности за рад са селектованим делом. У фази на слици 21, после маркирања, врши процес брисања модела, и грубо отклањање делова око коронарних артерија.



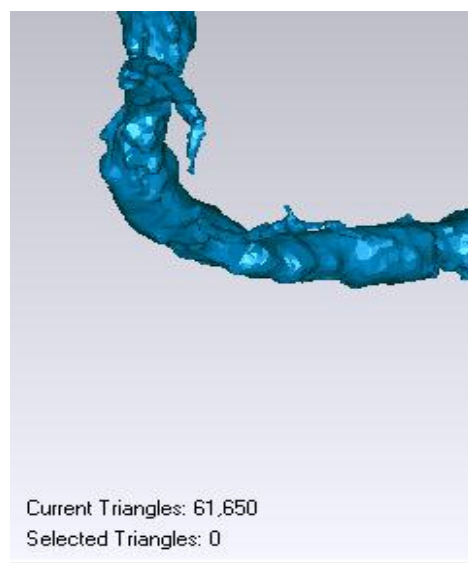
Слика 21 – Означавање непотребних делова око коронарних артерија

Од значајнијих операција које нуди Geomagic могу се навести следеће:

1. Remesh – обично се користи за уклањање лоших оштрих троуглова на моделу, и кориговање броја троуглића, чиме се постиже квалитетнија површина модела (Слика 22, Слика 23).

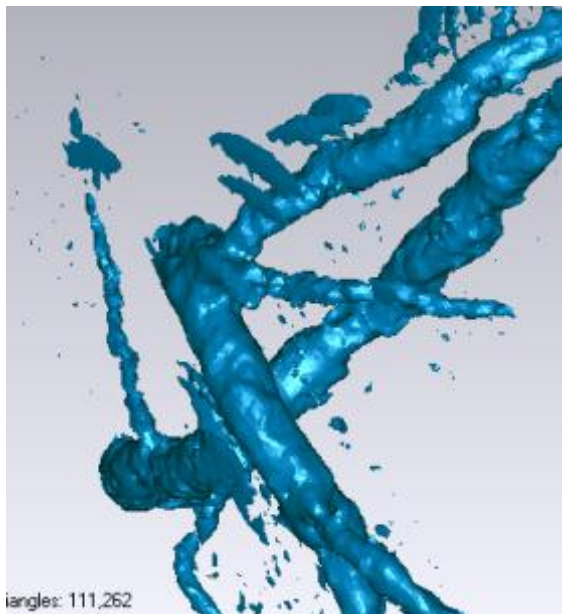


Слика 22 – Пре опције remesh

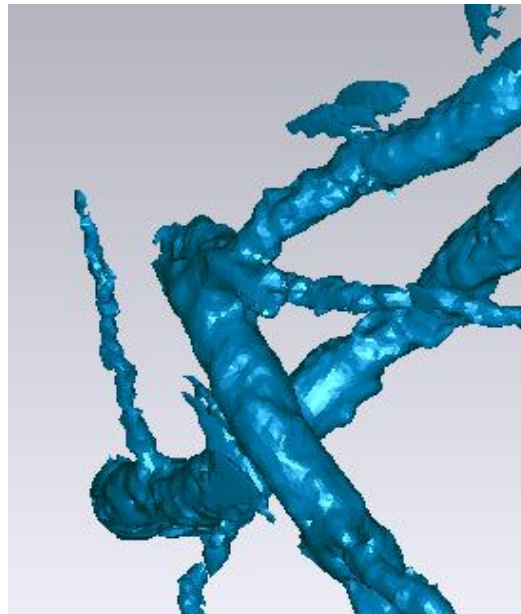


Слика 23 – После коришћења опције remesh

2. Relax – гланцање модела поступком уклањања оштрих углова (Слика 24, слика 25).

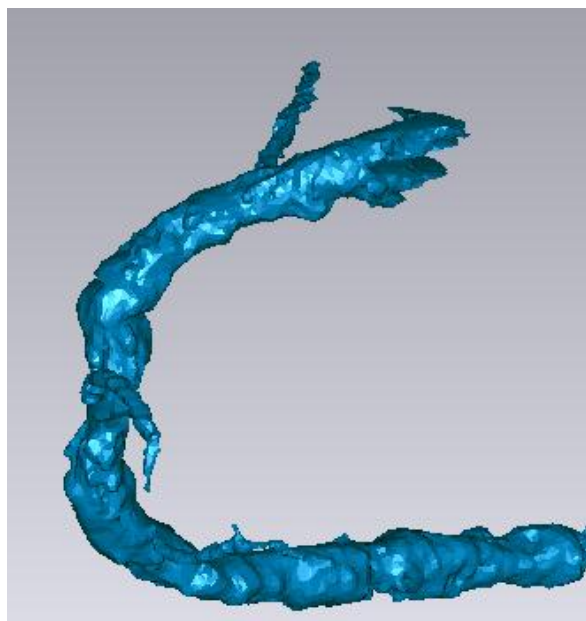


Слика 24 – Пре коришћења опције relax

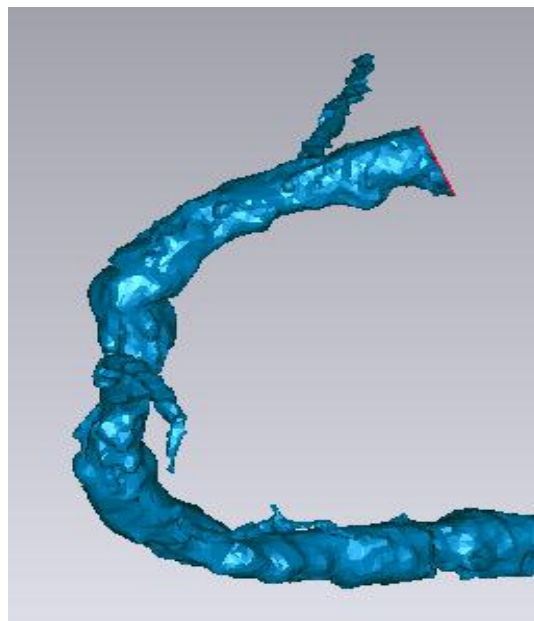


Слика 25 – После коришћења опције relax

3. Trim – засецање модела различитим методама (помоћу линије, равни и слично, слика 26, слика 27).

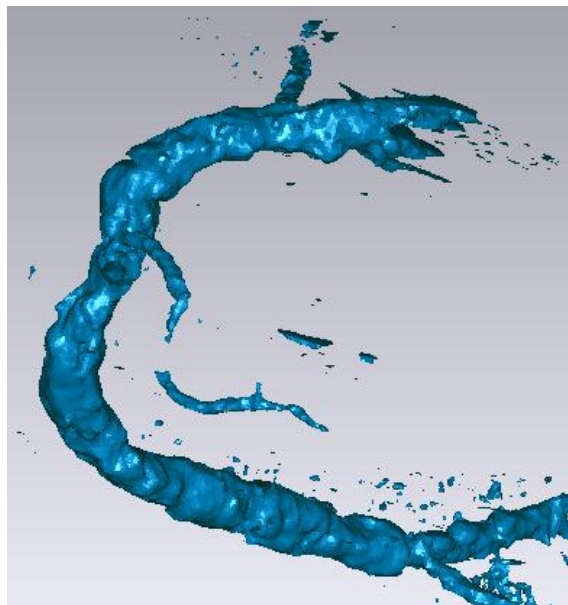


Слика 26 – Део артерије који није засечен

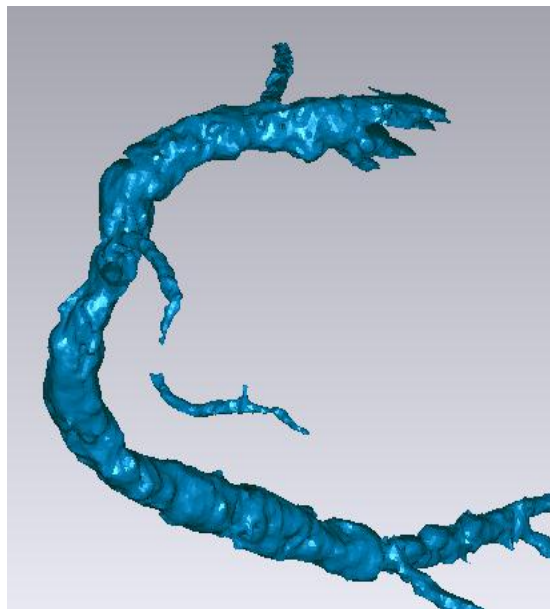


Слика 27 – Артерија после засецања

4. Manifold – уклањање слободних површина (површина које лебде у ваздуху и нису повезане са већинским моделом, слика 28 и слика 29).

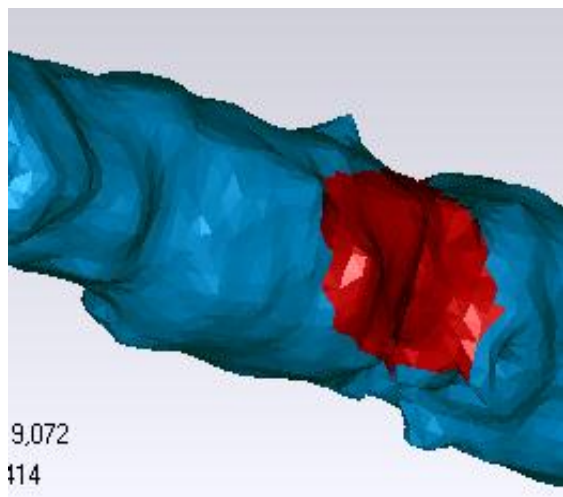


Слика 28 – Модел са слободним површинама

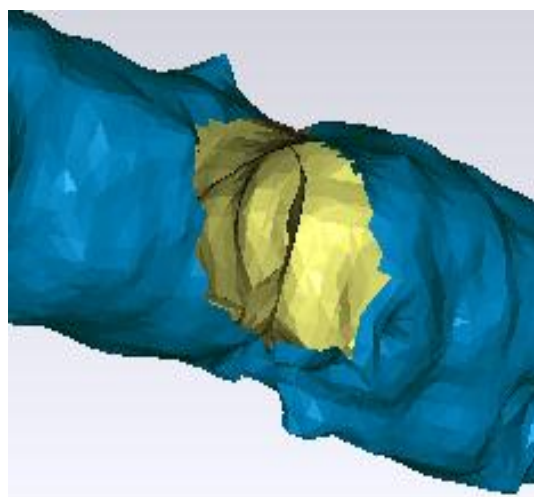


Слика 29 – Модел после коришћења опције manifold

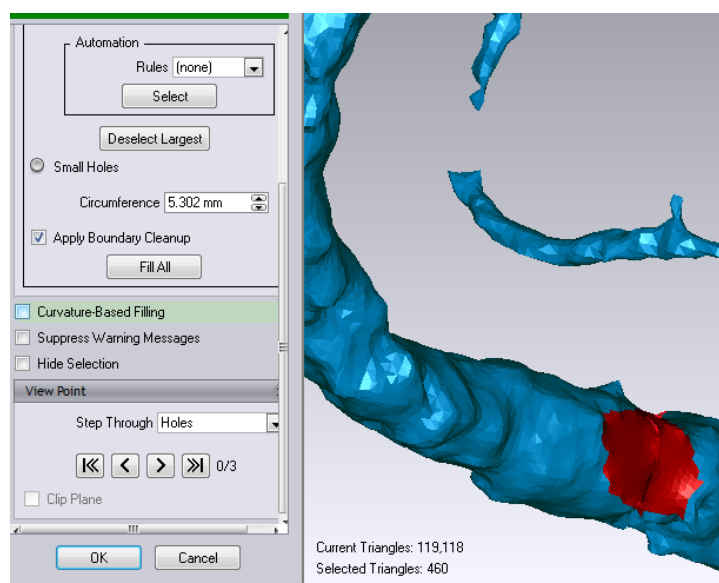
5. Fill all / Fill single – попуњавање отвора на моделу (попуњавање рупа, слика 30, слика 31 и слика 32).



Слика 30 – Означавање модела где ће бити отвор



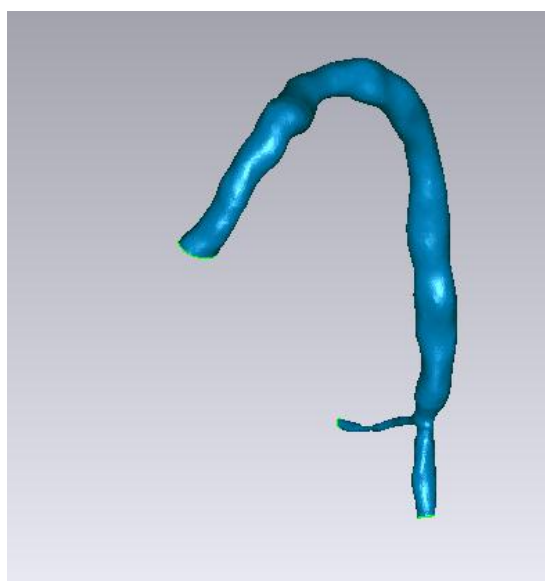
Слика 31 – Отвор на моделу



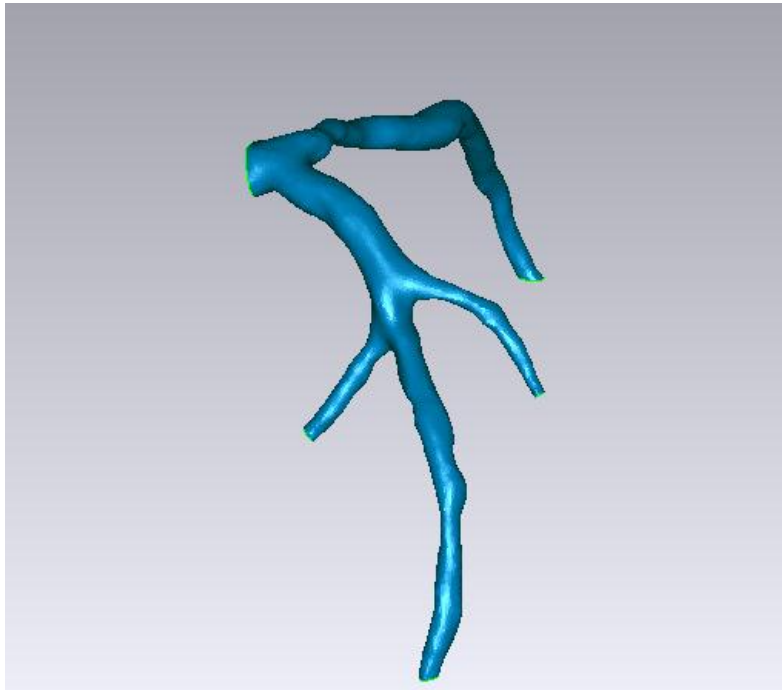
Слика 32 – Попуњен отвор на моделу

Оно што је такође још нагласити јесте да је битан поступак одабира жељених површина, односно селекција. Селекција се може вршити на различите начине класичним алатима као и у другим CAD софтверима. Једна предност код Geomagic јесте што је могуће селектовати само видљиве површине, односно дубинске површине кроз цео модел.

Комбинацијом горе наведених операција које се користе приликом сређивања модела, добијају се модели као на сликама 33 и 34. Добијене моделе је потребно експортирати у STL фајл.



Слика 33 – Десна коронарна артерија



Слика 34 – Лева коронарна артерија

8. ПРИПРЕМА МОДЕЛА У И FEMAP-U И ПРЕДСТАВЉАЊЕ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА ЗА 5 РАЗЛИЧИТИХ ПАЦИЈЕНАТА

FEMAP (Моделирање и постпроцесирање крајњих елемената) је програм инжењерске анализе који је израдио Simens PLM Software који се користи за израду модела коначних елемената сложених инжењерских проблема и приказ резултата решења, постпроцесирање. Ради на Microsoft Windows-u и обезбеђује CAD алате и алате за креирање модела коначних елемената, као и постпроцесинг функционалности која омогућава машинским инжењерима да интерпретирају резултате анализе. Метода коначних елемената омогућава инжењерима да виртуелно моделирају компоненте, склопове или системе за одређивање понашања под датим скупом граничних услова и обично се користе у процесу пројектовања како би смањили скупе прототипове и тестирање, процијенили различите дизајне и материјале и за структурне оптимизација за смањење тежине. [14]

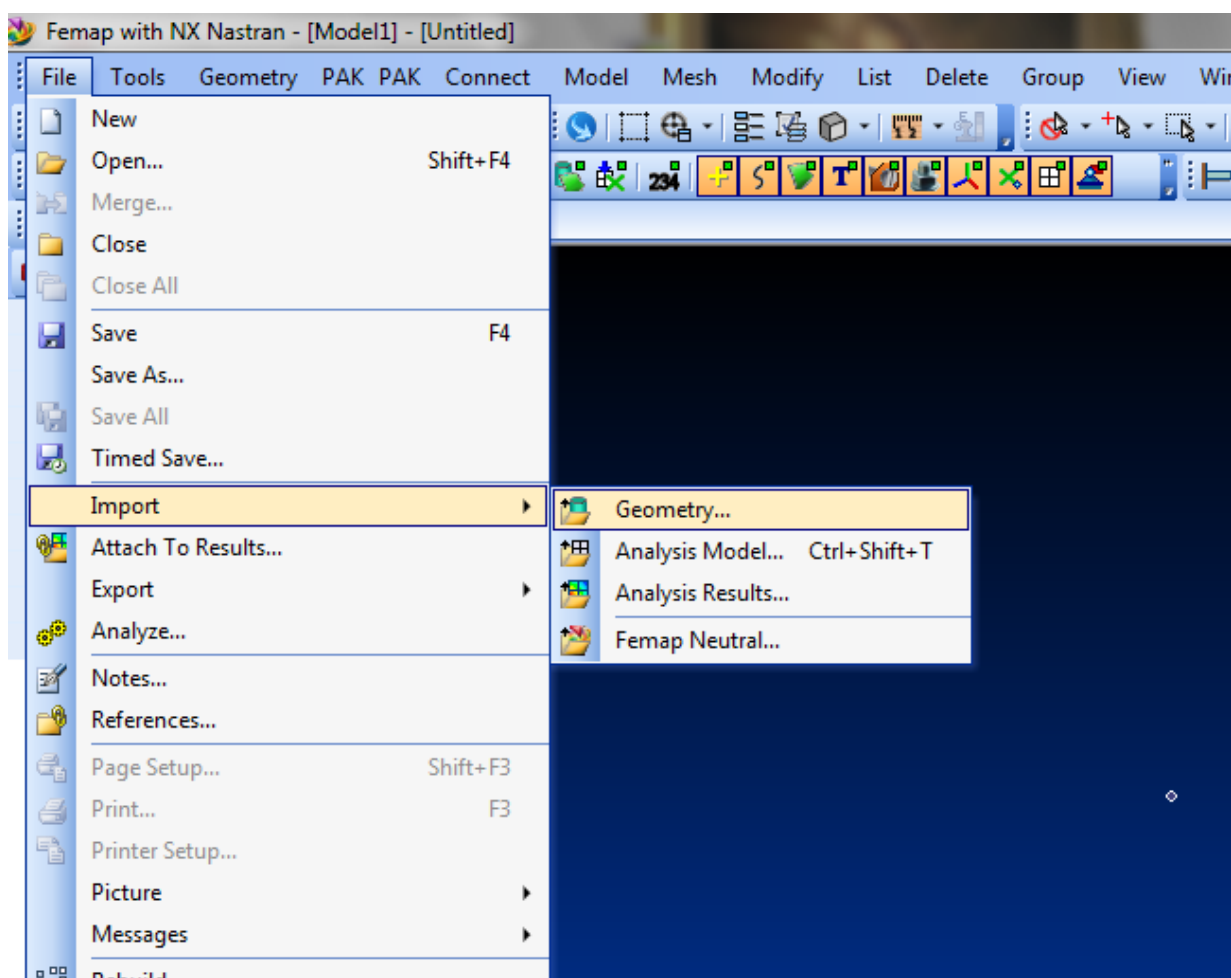
Апликације за симулацију производа укључују базичну анализу јачине, фреквенцију и транзијентну динамичку симулацију, процену перформанси на нивоу система и напредни одзив, ток течности и мулти-физичку инжењерску анализу за симулацију функционалних перформанси.

FEMAP користи инжењерске организације и консултанتي за моделовање сложених производа, система и процеса укључујући сателите, авион, одбрамбену електронику, тешка грађевинска опрема, дизалице, бродове и процесну опрему. [14]

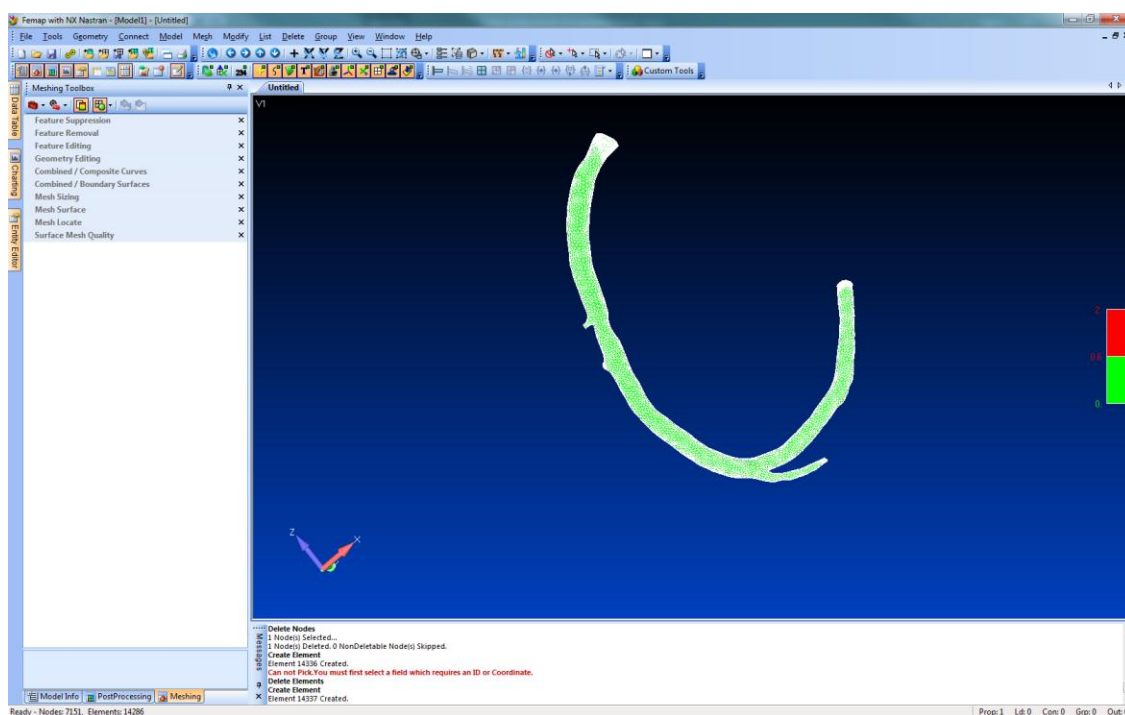
Као главни циљ овог рада је добити прорачуне за пет различитих пацијената. Завршна фаза обраде модела подразумева коришћење Femap софтвера, који ће се користити из два разлога:

1. Проналажење лоших троуглова који ће бити означени као црвени
2. Постпроцесирање и пуштање симулације

Модел се учитава кликом на File – Import Geometry (слика 35), где се селекује жељени STL фајл који је претходно експортиран из Geomagic studio софтвера. Након учитавања, потребно је кликнути у оквиру Meshing Toolbox-а на Meshing Quality, након чега модел добија изглед као на слици 36.

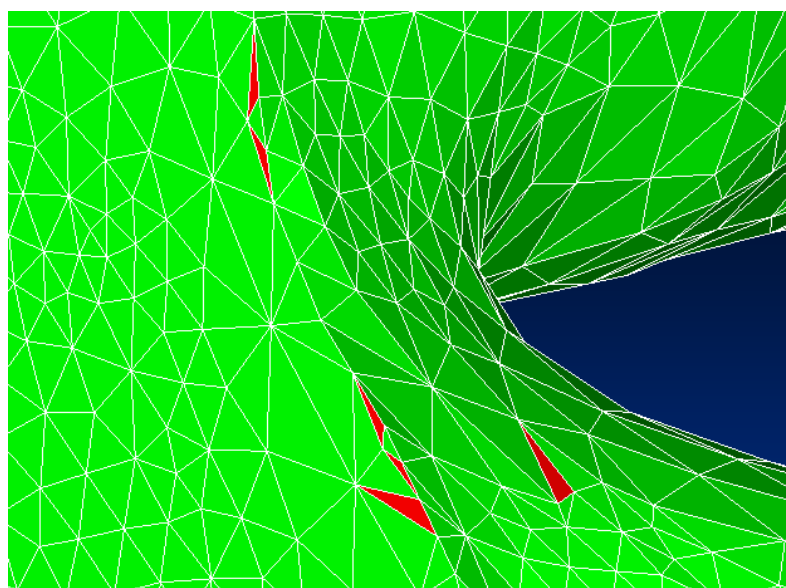


Слика 35 – Импортовање геометрије у femap-и



Слика 36 - Учитан модел и Femap

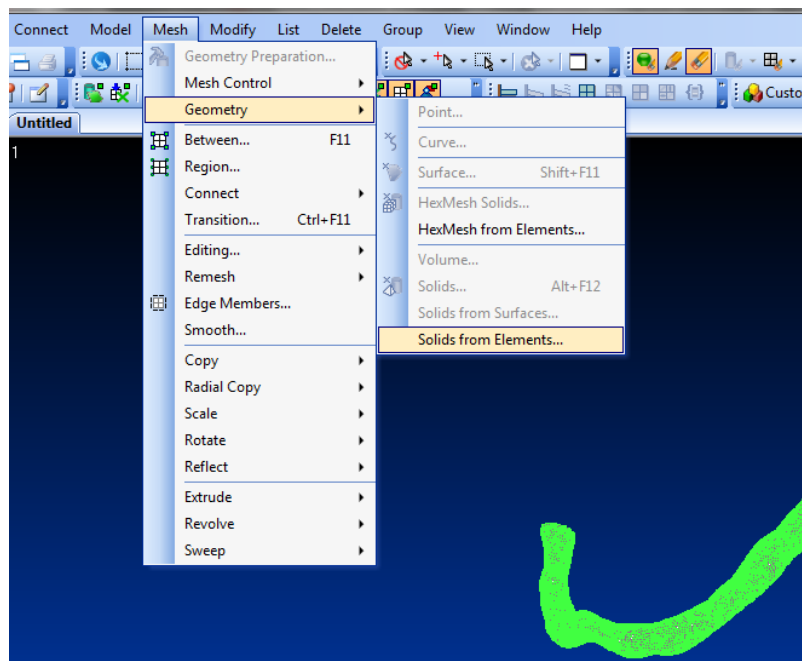
У наредном кораку, потребно је идентификовати све неправилности на моделу и мрежи, и они су представљени црвеним троугловима. Сваки црвени троугао је потребно избрисати и створити нове у Geomagic studi-u а затим поново импортовати у Femap , који неће имати оштар угао као што је то случај на слици 37.



Слика 37 – Пример лоших троуглова на моделу

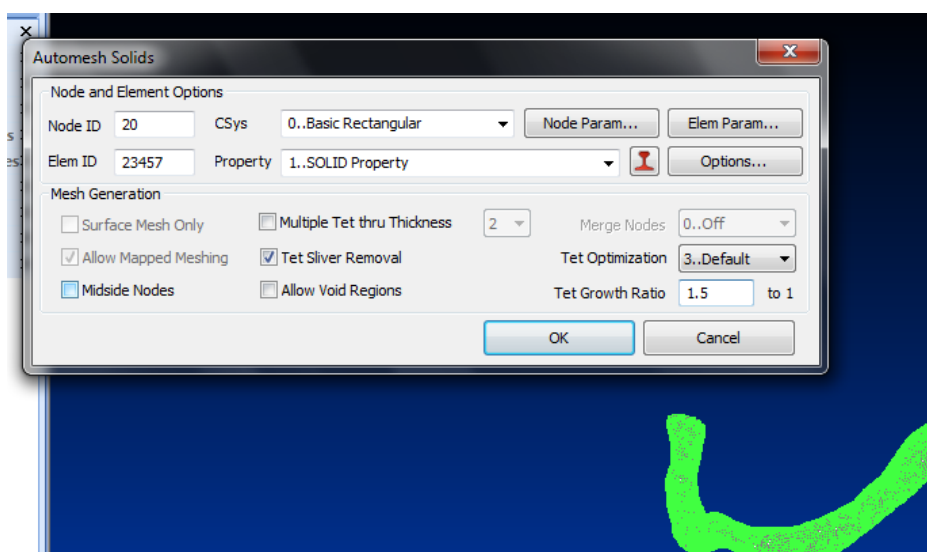
Након извршених преправки, потребно је одрадити следеће кораке:

1. Mesh – Geometry – Solids from Elements (слика 38)



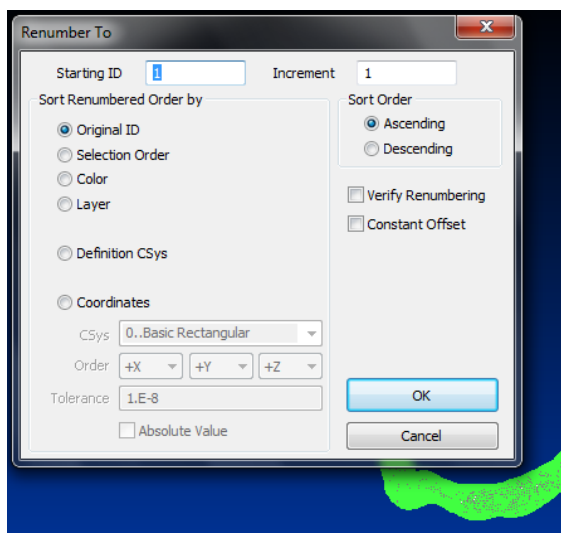
Слика 38 – Први корак

2. У картици Automesh Solid Искључити Midside nodes, И подесити Tet Growth Ratio: 1.5, Initial Size Ratio: 1 (Слика 39)



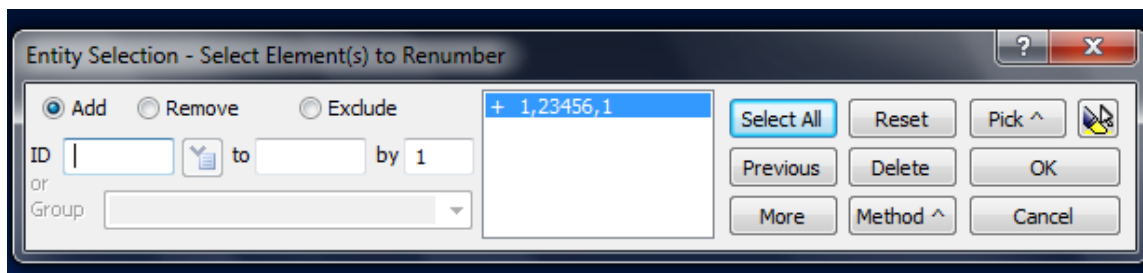
Слика 39 – Други корак

3. Modify – Renumber – Node – ,select all и ок,да крене од 1 (Слика 40)

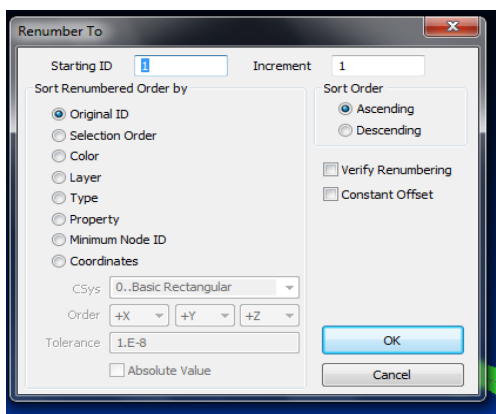


Слика 40 – Трећи корак

4. Modify – Renumber – Element – ,select all и ок, да такође крене од 1 (Слика 41 и слика 42)

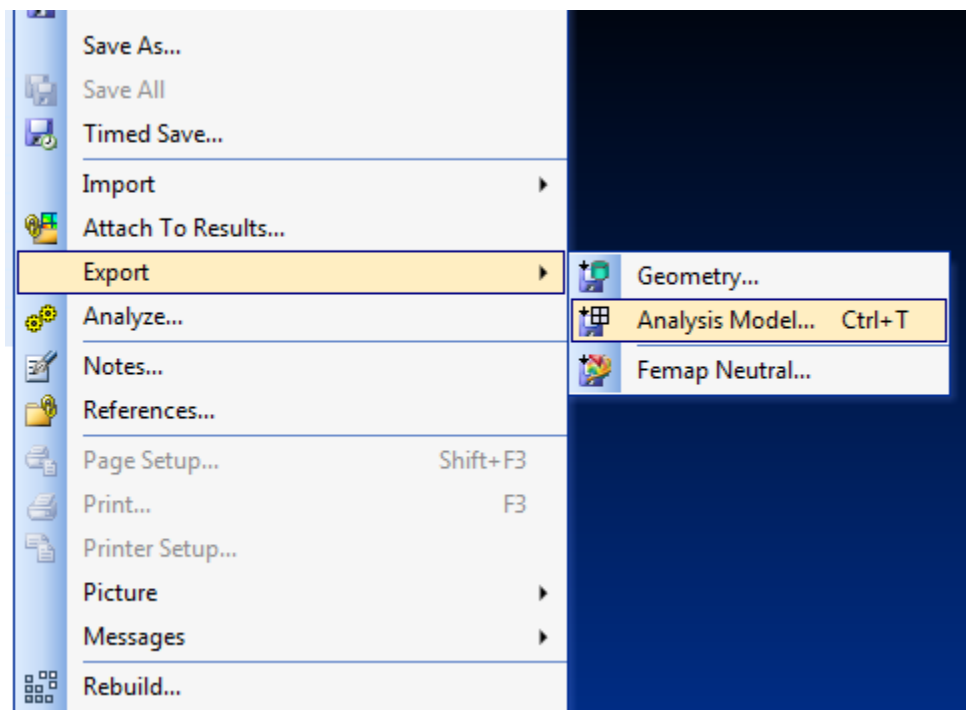


Слика 41 – Четврти корак



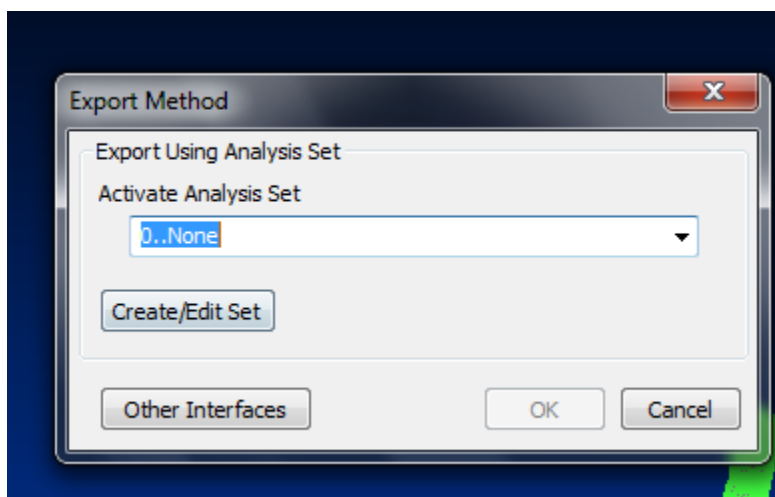
Слика 42 – Четврти корак

5. File – Export Analysis Model (Слика 43)



Слика 43 – Пети корак, експортовање модела

6. Create/Edit Set (Слика 44)



Слика 44 – Последњи корак, креирање анализе при експортовању

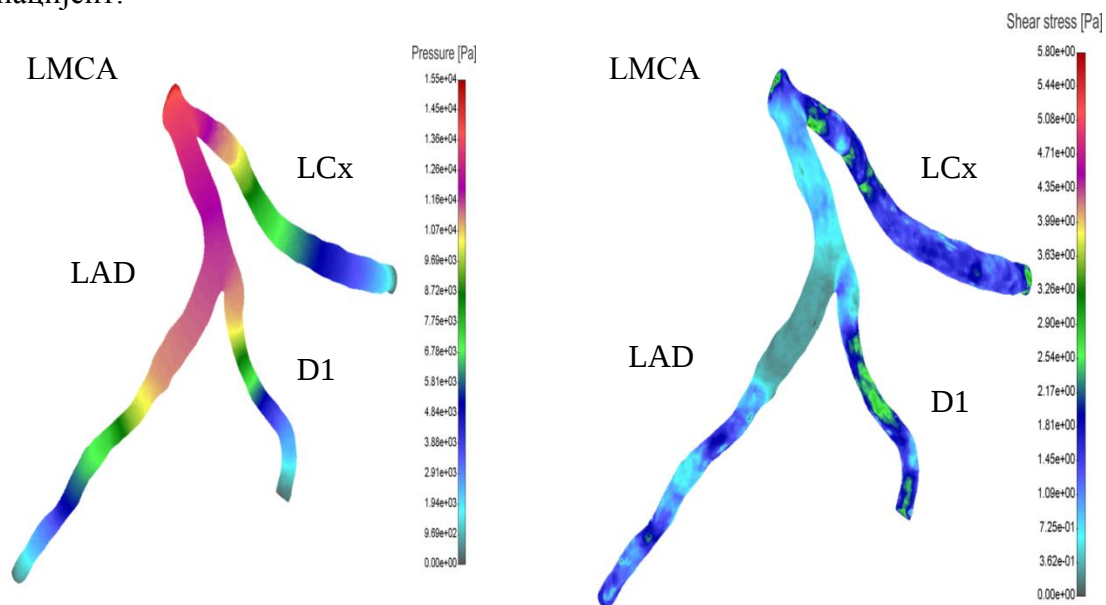
7. Ово се понавља за сваку геометрију, коронарну артерију пацијената, и екпортује се у .dat екстензију.

8.1 Приказ добијених резултата свих пацијената

Завршна фаза овог рада подразумева пуштање модела кроз симулацију и приказ резултата, где је симулиран један срчани циклус, при чему су резултати дати за тренутак када је максимално оптерећење, односно брзина струјања крви је највећа.

Смицајни напони имају кључну улогу у формирању атеросклерозе. Могућност профилисања смицајног напона даје нам могућност да предвидимо напредак и ризик од коронарне болести. Обзиром да се на месту сужења очекује пад притиска, повећава се брзина струјања флуида, а самим тим повећавају се смицајни напони.

Први пацијент:

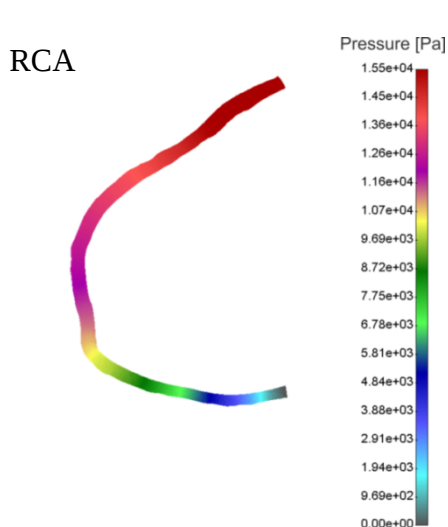


Слика 45 - Притисак леве коронарне артерије

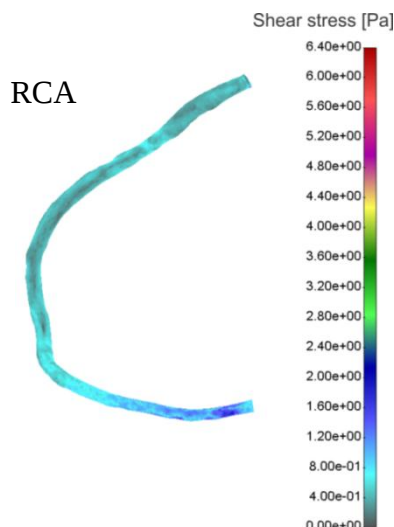
Слика 46 - Смичући напон леве коронарне артерије

Са слике 45 се види да је највећи притисак на улазу у LMCA артерију, $1.55e+04$ Pa, и на почетку гранања артерије у LAD и LCx, од $1.36e+04$ Pa до $1.16e+04$ Pa. Притисак опада како се крв одаљава од срца због вискозног губитка енергије. На месту сужења крвних судова такође се јавља пад притиска. На том месту повећава се брзина струјања и повећавају се смицајни напони. Поред смицајног напона и притисак игра битну улогу у формирању плака. Примећујем да на местима високог крвног притиска не долази до појаве опструкције крвног суда. Висок крвни притисак помаже у спречавању појаве коронарне болести, али константан висок крвни притисак слаби квалитет крвних судова.

Са слике 46 се види да се смицајни напон повећава како се смањује пречник крвног суда. Смањењем пречника крвног суда долази до пада притиска и до повећања смицајних напона услед повећања тангенцијалне брзине. Код ове артерије највећи смицајни напон је на LAD (D1) $3.26e+00$ Pa, а најмањи се јавља на LAD. На местима највећег смицајног напона налази се и најмањи пречник као последица нагомилавања масноћа.



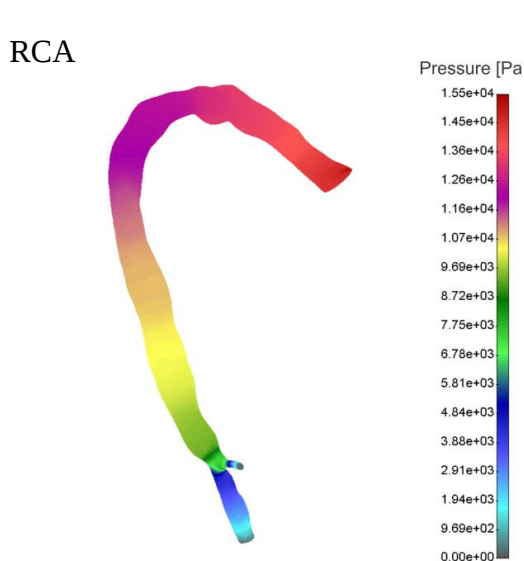
Слика 47 - Притисак десне коронарне артерије



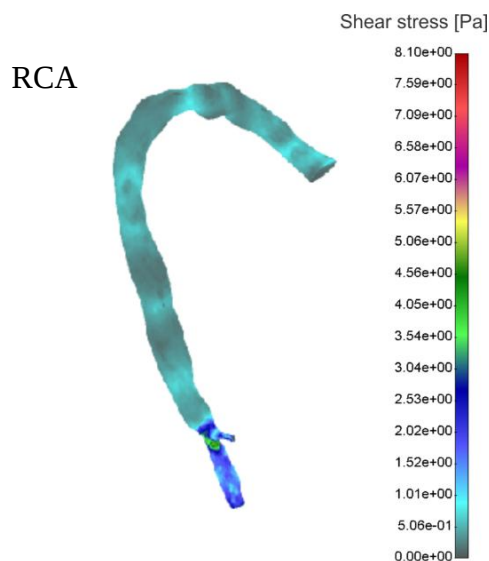
Слика 48 - Смичући напон десне коронарне артерије

На слици 47 највећи притисак је на улазу RCA артерије до 1.55×10^4 Pa, Притисак опада како се крв одаљава због вискозног губитка енергије. Док смичући напон је максималан при крају RCA артерије до 2.00×10^0 Pa. А минималан већим делом RCA артерије од 4.00×10^{-1} Pa до 0, слика 48.

Други пацијент:



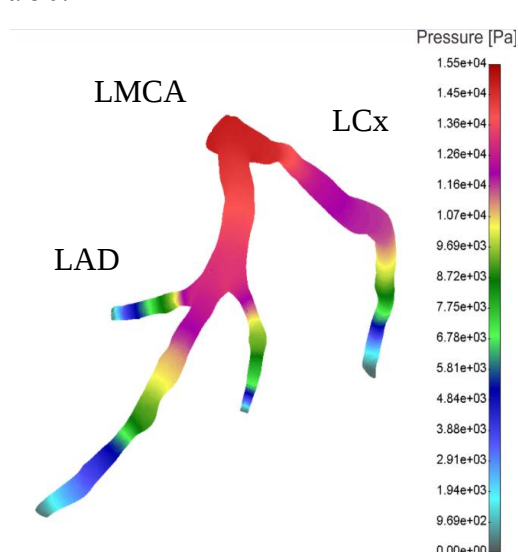
Слика 49 - Притисак десне коронарне артерије



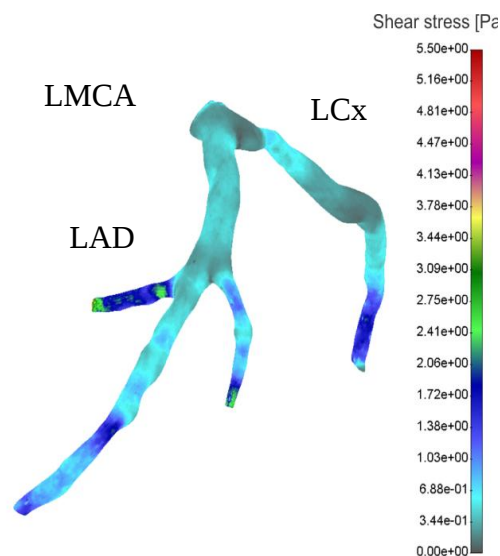
Слика 50 - Смичући напон десне коронарне артерије

Са слике 49 се види да је највећи притисак је на улазу RCA артерије до 1.55×10^4 Pa, Притисак опада како се крв одаљава. Док смичући напон је максималан на при крају RCA

артерије до 5.06×10^0 Pa. А минималан у осталим деловима артерије од 5.06×10^{-1} Pa до 0 Pa. Слика 50.



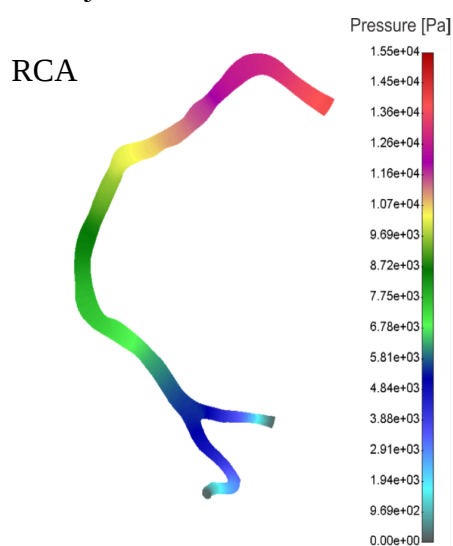
Слика 51 - Притисак леве коронарне артерије



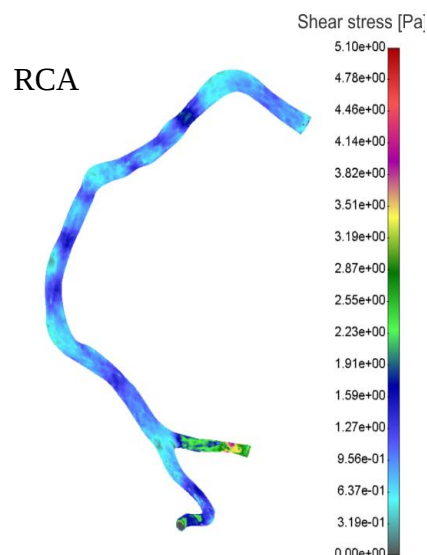
Слика 52 - Смичући напон леве коронарне артерије

Притисак је максималан на улазу LMCA артерије до 1.55×10^4 Pa, на почетку грана LAD и LCx је до 1.36×10^4 Pa, на крајевима артерије је минималан од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 51. Док смичући напон је максималан при крају LCx артерије до 2.06×10^0 Pa и крајевима LAD артерије до 3.44×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.44×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 52.

Трећи пацијент:

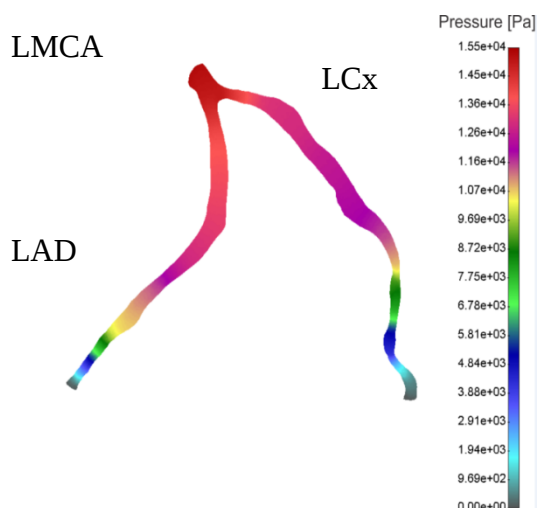


Слика 53 - Притисак десне коронарне артерије

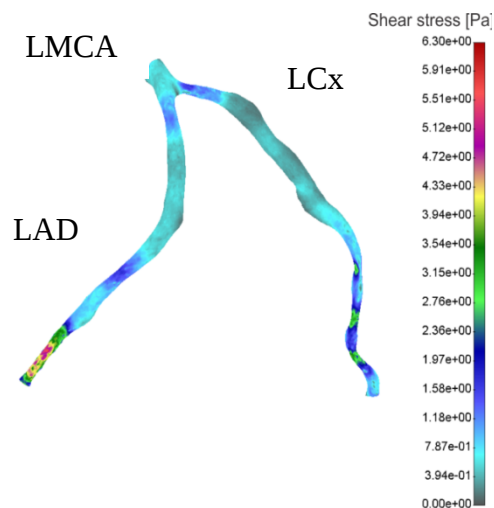


Слика 54 - Смичући напон десне коронарне артерије

Притисак је максималан на улазу RCA до 1.45×10^4 Pa, притисак опада и минималан је на крајевима артерије од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 53. Смичући напон је максималан на крају артерије до 5.10×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.19×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 54.



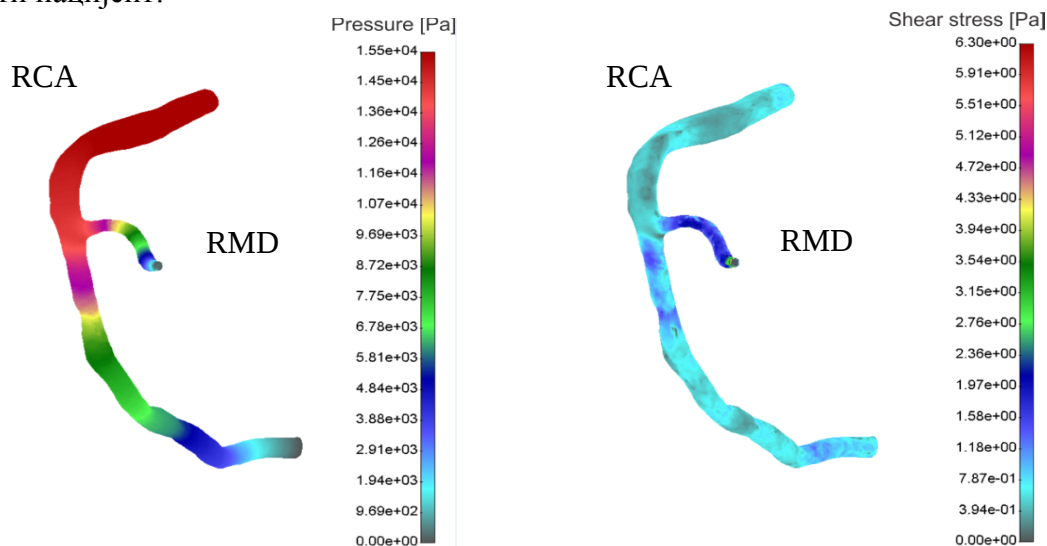
Слика 55 - Притисак леве коронарне артерије



Слика 56 - Смичући напон леве коронарне артерије

На улазу LMCA артерије највећи притисак је до 1.55×10^4 Pa, на почетку грана LAD и LCx је до 1.45×10^4 Pa, на крајевима артерије је минималан од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 55. Смичући напон је максималан при крају LAD артерије до 6.30×10^0 Pa и крајевима LCx артерије до 3.94×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.94×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 56.

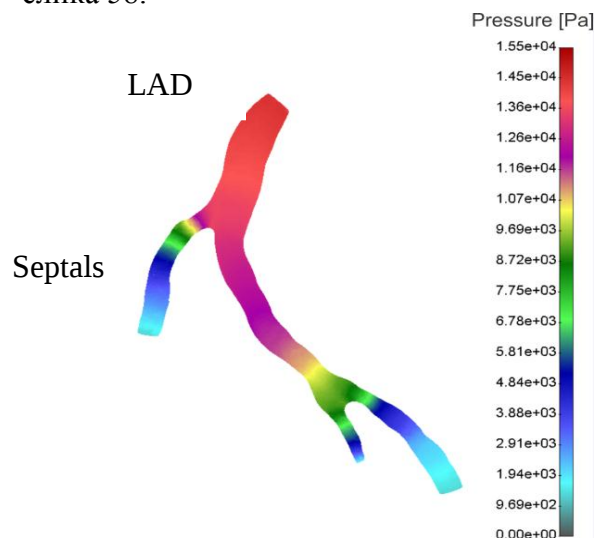
Четврти пацијент:



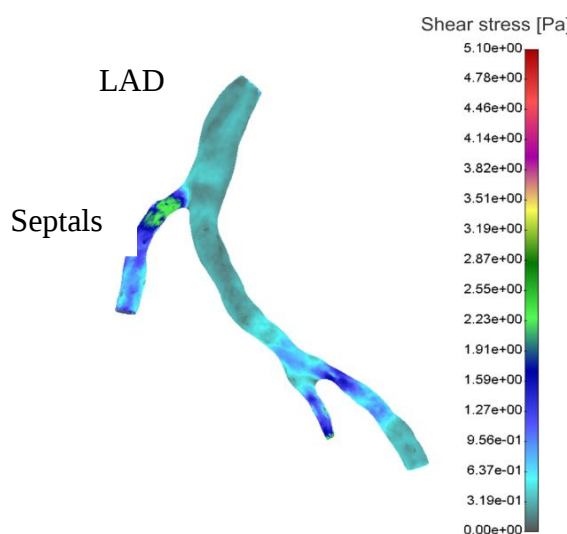
Слика 57 - Притисак десне коронарне артерије

Слика 58 - Смичући напон десне коронарне артерије

На улазу RCA максимални притисак је до 1.55×10^4 Pa, притисак опада и минималан је на крајевима артерије од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 57. Смичући напон је максималан на крају артерије RMD до 4.72×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.94×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 58.

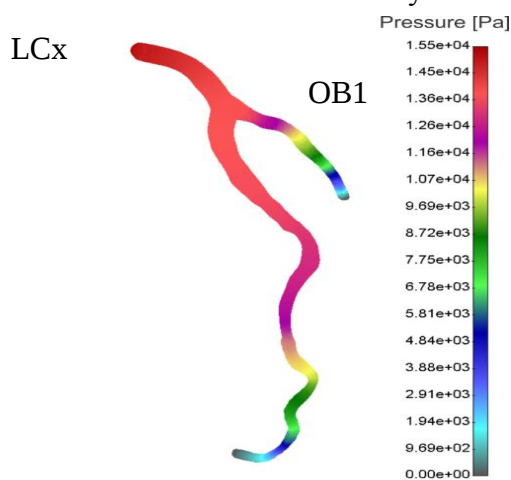


Слика 59 - Притисак леве циркумфлексне коронарне артерије

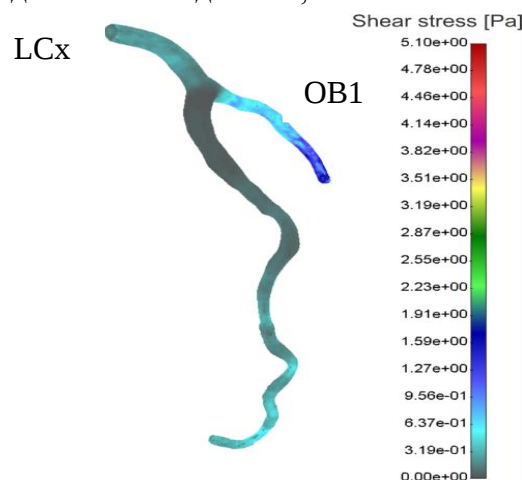


Слика 60 - Смичући напон леве циркумфлексне коронарне артерије

На улазу LAD артерије највећи притисак је до 1.55×10^4 Pa, на почетку гране LAD и Septals артерије је до 1.36×10^4 Pa, а крајевима артерије је минималан од 1.94×10^3 Pa до 9.69×10^2 Pa, слика 59. Смичући напон је максималан на почетку Septals артерије до 2.87×10^0 Pa а минимални смичући напон је од 3.19×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 60.



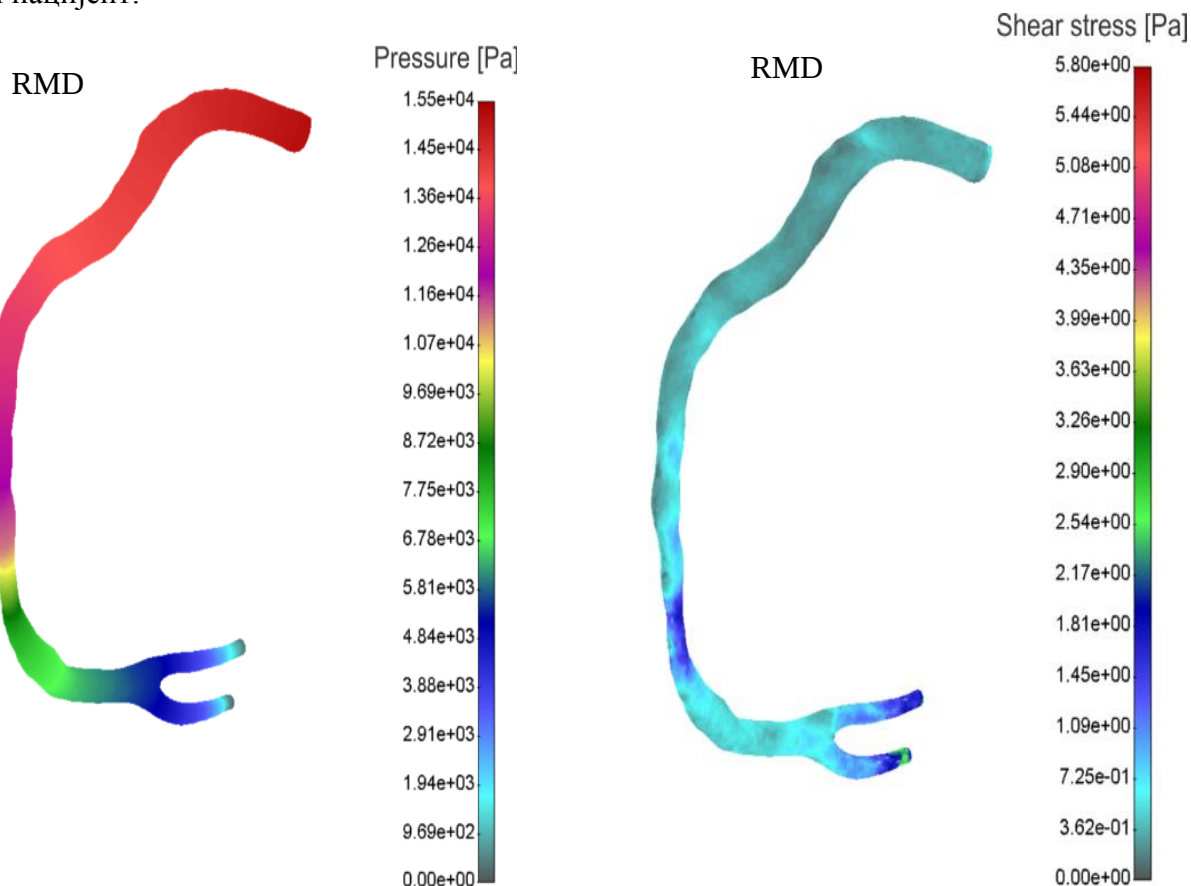
Слика 61 - Притисак предње силазне гране леве коронарне артерије



Слика 62 - Смичући напон предње силазне гране леве коронарне артерије

Код LCx артерије највећи притисак је на почетку до $1.55\text{e}+04$ Pa, а на крајевима артерије је минималан од $9.69\text{e}+02$ Pa до 0 Pa, слика 61. Смичући напон је максималан на крају ОВ1 артерије до $1.59\text{e}+00$ Pa а минимални смичући напон је од $3.19\text{e}-01$ Pa до 0 Pa, слика 62.

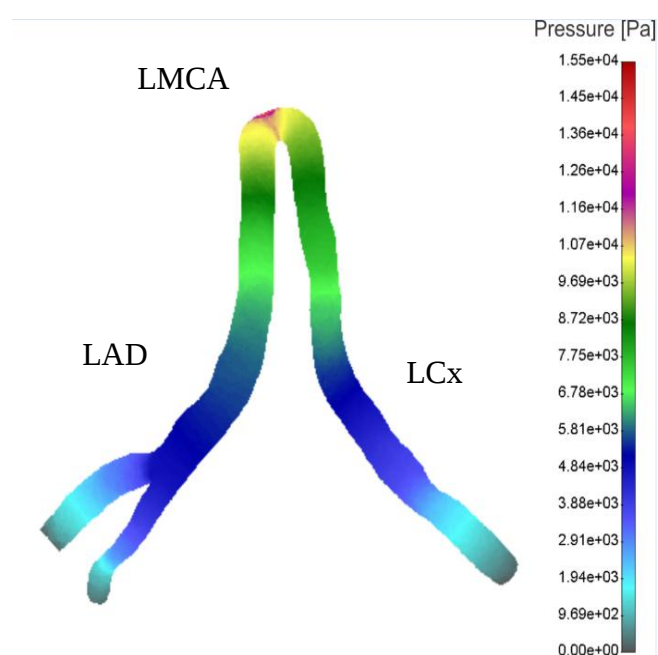
Пети пацијент:



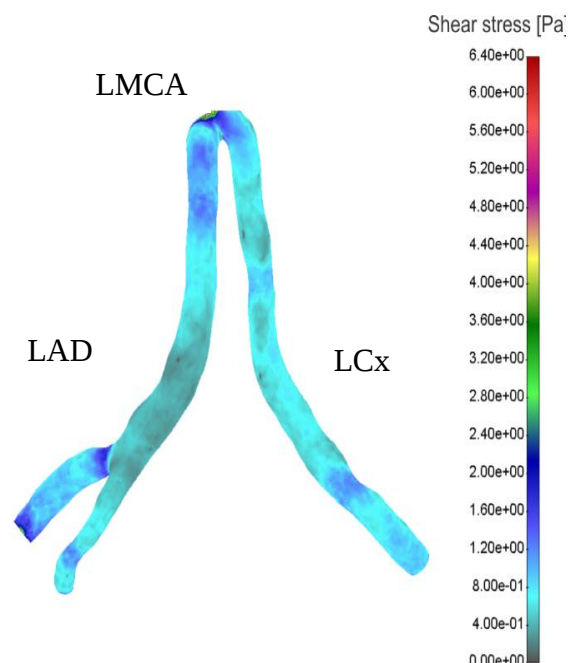
Слика 63 - Притисак десне коронарне артерије

Слика 64 - Смичући напон десне коронарне артерије

Максимални притисак који достиже до $1.55\text{e}+04$ Pa је на улазу RMD артерије, притисак опада и минималан је на крајевима артерије од $9.69\text{e}+02$ Pa до 0 Pa, слика 63. Смичући напон је максималан на крају RMD артерије до $3.26\text{e}+00$ Pa, а минимални смичући напон је од $3.62\text{e}-01$ Pa до 0 Pa, слика 64.



Слика 65 - Притисак леве коронарне артерије



Слика 66 - Смичући напон леве коронарне артерије

На улазу LMCA артерије највећи притисак је до 1.55×10^4 Pa, на почетку грана LAD артерије и LCx артерије је до 1.26×10^4 Pa, на крајевима артерије је минималан од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 65. Смичући напон је максималан на почетку LMCA артерије, 6.40×10^0 Pa, на рачвању LAD артерије и LCx и крају LCx артерије до 2.40×10^0 Pa, а минимални смичући напон LMCA артерије је од 4.00×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 66.

Анализа нам даје резултате расподеле притиска и смицајног напона. Притисак је највећи када се коронарна артерија грана из аорте. Притисак опада због вискозног губитка енергије, а и због тога што истицање крви није слободно већ наилази на отпор зато што улази у срце. Смицајни напони су мањи на проширењима и местима где је пречник артерије већи. Како се пречник смањује тако опада и вредност смицајног напона. Регион са најмањим смицајним напоном јесте регион са развијеним плаком.

9. ЗАКЉУЧАК

У овом задатку је испреплетан низ софтвера почев од Mimics-а који је коришћен за добијање модела, затим Geomagic за обраду добијеног модела и чишћење комплетне мреже, али и FEMAP-а који је коришћен за добијање резултата и приказ оптерећења коронарних артерија.

У току рада је објашњен комплетан поступак рада током добијања модела у Mimics-у, затим коришћењем различитих операција у Geomagic-а и на крају нешто од основних операција и алата које пружа FEMAP. У последњем делу су приказани резултати.

Анализа коначним елементима нам даје добар увид у то како се реалан модел артерије понаша. Добијене резултате можемо да користимо као поуздану информацију у дијагнози и предвиђањима развоја плака, али и за праћење стања пацијента. Овакав вид анализе узима све већи значај у дијагностици зато што за релативно кратко време (просечно 6 – 8 дана) пружа врло корисне информације, а да при томе пацијент не подлеже никаквој хируршкој интервенцији.

Ове технологија се широко користе у образовним институцијама и истраживачким и развојним објектима у медицинске, стоматолошке и био-механичке сврхе. Биоинжењеринг као поље науке покушава да премости јаз између инжењерства и медицине. Оно комбинује вештине дизајна и решавање проблема инжењеринга са медицинским и биолошким наукама за унапређење лечења здравствене заштите, укључујући и дијагнозу, мониторинг, и терапије.

10. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://www.zdravljenadlanu.rs/sr/za-pacijente/hirurgija/kardiohirurgija/292-o-srcu-anatomija-i-funkcija>
- [2] https://sr.wikipedia.org/sr/Људско_срце
- [3] <https://sr.wikipedia.org/sr/Arterija>
- [4] <https://sr.wikipedia.org/sr/%D0%90%D1%80%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%98%D0%B0>
- [5] <http://www.kardiologija.in.rs/Bolesti%20aorte.htm>
- [6] <http://www.stetoskop.info/Bolesti-grudne-aorte-3242-c2-content.htm>
- [7] https://sr.wikipedia.org/sr-el/Koronarne_arterije
- [8] http://www.kardiologija.in.rs/fiziologija_srca.htm
- [9] <https://www.ikvbm.ns.ac.rs/sr/za-pacijente/srce-i-bolesti-srca/537-koronarna-bolest>
- [10] <https://www.ikvbm.ns.ac.rs/sr/za-pacijente/srce-i-bolesti-srca/546-koronarna-hirurgija>
- [11] <http://www.materialise.com/en/medical/software/mimics>
- [12] <https://blog.idrsolutions.com/2016/07/dicom-explained/>
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagic>
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Femap>
- [15] Др Александар Стајковац, Др Михајло Бајић, Др Србољуб Живановић, Др Иван Анђелковић (1984). Анатомија и физиологија са практикумом
- [16] Биоматеријали / [Игор Балаћ ... et al.]; уредници Дејан Раковић, Драган Ускоковић. Београд: Институт техничких наука Српске академије наука и уметности: Друштво за истраживање материјала, 2010 (Београд: Драслар партнер).
- [17] Ненад Филиповић, Основи биоинжењеринга, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2012
- [18] Милан Благојевић, Александар Николић, Милорад Ћивковић, Мирослав Ћивковић, Горан Станковић, A Novel Framework for Fluid/Structure Interaction in Rapid SubjectSpecific Simulations of Blood Flow in Coronary Artery Bifurcations, Vojnosanitetski preglad: Military Medical and Pharmaceutical Journal of Serbia, Vol.71, No.3, pp. 285-292, ISSN 0042-8450, Doi 10.2298/VSP1403285B, 2014