

**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: 387/2015

Бојан В. Николић

**Компјутерско моделирање
коронарних артерија**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Ненад Филиповић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

Објаснити сврху биоинжењеринга у медицини и његову саму примену тј примену у овом случају где је дато пет коронарних артерија од пет пацијената (из групе Varshava) у виду DICOM стандарда на основу којег је потребно урадити 3D моделе и симулацију истих помоћу софтверске платформе Mimics, Geomagic studio, FEMAP. Након чега је потребно приказати и објаснити саму биомеханичку анализу реалних пацијената са FFR прорачуном.

Препоручена литература:

- [1] <http://www.stetoskop.info/Lekovi-za-bolesti-srca-i-krvnih-sudova-b13-bs102-p0-book.htm>
- [2] <https://riznica.wordpress.com/2009/08/02/sta-su-arterije-vene-i-kapilari/>
- [3] <https://www.3dsystems.com/press-releases/geomagic/announces-studio-2013>

Крагујевац, 11.04.2017

Ментор: Др Ненад Филиповић

Садржај:

УВОД:	5
1. БИОИНЖЕЊЕРСТВО	6
2. КАРДИОВАСКУЛАРНИ СИСТЕМ	8
2.1 Крв	9
2.2 Крвни судови	10
2.3 Компоненте и слојеви у крвном суду	11
3. КРВНИ ПРИТИСАК	12
4. АРТЕРИЈЕ	14
5. АОРТА	14
6. КОРОНАРНЕ АРТЕРИЈЕ СРЦА	16
6.1 Болести коронарних артерија	17
7. ИЗРАДА 3D МОДЕЛА И ПРИМЕНА СОФТВЕРА	20
7.1 Mimics софтвер	20
8. ОБРАДА МОДЕЛА У GEOMAGIC STUDIO-У	27
9. ОБРАДА МОДЕЛА У И FEMAP-У И ДОБИЈЕНИ РЕЗУЛТАТИ	29
10. ПРИКАЗ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА СВИХ ПАЦИЈЕНАТА	37
11. FFR (Fractional Flow Reserve)	44
11.1 Рачунање притиска на местима где се појављује стеноза на коронарним артеријама пацијената	44
12. ЗАКЉУЧАК	52
13. ЛИТЕРАТУРА	53

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Резиме рада: У овом раду је приказана симулација пет коронарних артерија од пет реалних пацијената код којих ћемо видети где су се јавили критични напони. До саме анализе дошли смо помоћу три софтверске платформе а то су: Mimics који нам је омогућио да направимо 3Д модел, Geomagic studio преко којег сређујемо добијене моделе и FEMAP који пружа могућнос симулације саме артерије и приказ смичућих намона који се јављају на артерији. Споменути софтвери су нашли врло широку примену у пољу медицине.

Кључне речи: FEMAP, Mimics, Geomagic studio, инжењеринг, анализа, крв, срце, софтвер.

Summary: This paper presents a simulation of five coronary arteries from five real patients where we will see where the critical voltages occurred. We came to the analysis with three software platforms: Mimics, which enabled us to create a 3D model, Geomagic studio, through which we get the obtained models and FEMAP, which provides the possibility of simulating the artery itself and showing the sloping arches that arise on the artery. The mentioned software has found a wide range of applications in the field of medical.

Key words: FEMAP, Mimics, Geomagic studio, engineering, analysis, blood, heart, software.

УВОД:

Развој компјутера и програма нам омогућава да правимо све прецизније апроксимације разних физичких феномена и ситуација. Иако постоји велики број парцијалних диференцијалних једначина које су одавно познате, велики број још увек није решен, а неке се ни не могу решити, тако да њихово решавање или само доказивање да решење постоји, представља велики изазов за садашње и будуће генерације научника, а пре свега за математичаре и информатичаре. Тако да се значајан акценат ставља на развој моћних компјутерских програма који ће израчунати то решење, као и приказивање и симулирање 3D модела. Ми смо у овом раду пажњу посветили применом одређених софтвера као што су „Mimics, GeomagicStudio, Femap” који нам омогућавају да увидимо стварније проблеме пацијената. Све до недавно, нису постојали модели и компјутерски програми на основу којих можемо добити 3D моделе артерију али је претходних година остварен значај напредак и у тој области.

Наш циљ је био да представимо различите моделе од 5 пацијената који описују стварно стање тих пацијената и да представимо примену горе наведених софтвера који су нам помогли да дођемо до одређених резултата.

На почетку смо се укратко осврнули на основне појмове из механике флуида, описали смо и функционисања кардиоваскуларног система као и законитости протицања крви кроз крвне судове.

У првом делу рада смо се осврнули на то који су главни узроци и фактори ризика као и симптоми за обољенје коронарне артерије.

У другом делу рада су представљени софтвери који су коришћени и описана њихова широка примена. Као и начин како се дошло до 3D модела на основу СТ снимка.

У трећем делу рада смо представили резултате до којих смо досли. Након извршене обраде СТ снимка, чишћења 3D модела и симулације аорте у „Femap“ софтверу. Где смо досли до јасних резултата где је приказано где су се јавили највећи смицајни напони, као и притисак, након чега смо одраили ФФР прорачун.

1. БИОИНЖЕЊЕРСТВО

Развој у биолошким наукама и биоинжењерству створио је окружење у којем је неопходно активно инжењерско пројектовање и производња, како би се решили комплексни биолошки и медицински проблеми. Овакав темпо развоја је, заједно са развојем модерног инжењерског пројектовања и производње, биоматеријала, биологије и медицине, у великој мери унапредио могућности примене адитивних производних технологија – енг. Additive Manufacturing (AM) и реверзног инжењерства – енг. Reverse Engineering (RE) у области биолошког и биомедицинског инжењерства.

Последњих неколико десетина година број хируршких захвата на локомоторном систему човека приликом којих се уграђују имплантати у сталном је порасту. Предвиђања су да се овај тренд неће променити него ће се бележити још већи пораст броја пацијената са уграђеним имплантатима. Ово се може приписати факторима као што су старење популације, промене у начину живота и повећање броја гојазних особа у свету. Пошто је животни век имплантата 10-15 година ово може довести до четири ревизије током живота пацијента.

У области медицине постоји технологија која је првенствено у насем случају применљива а која се назива Медицински имицинг – под појмом имицинга сматра се визуелно представљање дела тела или целог тела ради медицинске дијагнозе путем компјутеризованих техника снимања. Резултат имицинга је медицинска слика. Главна карактеристика медицинског имицинга је неинвазивност, па је пацијент, на тај начин, остао недирнут без обзира на циљ и начин одвијања снимања. Ниједна техника није тако моћна у области неинвазивног установљивања анатомске структуре и функције људског тела, као што је то медицински имицинг.[1]

Овај вид технологије је врло значајан у примени биоинжењеринга на тај начин технологије Медицински имицинг настају CAD модели на основу којег се може извршити симулација напона која је за нас врло значајна и кључни део овог рада.[1]

У радиологији се генерише велики број разноврсних слика, које су добијене са одговарајућих модалитета, као што су: US (Ultrasound), CT (Computed Topography), MI (Magnetic Resonance Imaging) и др. Аквизиција дигиталних снимака захтева постојање медицинских уређаја са одговарајућим интерфејсом као што су CT, MR, дигитализатор филмова и др. и они морају бити у складу са DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) стандардом. DICOM представља међународни стандард за дефинисање и начин преноса медицинских информација и снимака, и он обезбеђује интероперабилност између различитих уређаја.[1]

На основу свега до сада сто знамо може се рећи да је у примени Биоинжењерству може се доћи до следећег закључка.

- У области 3D моделирања као полазна основа користе се технике аквизиције дигиталних снимака са уређаја као што су CT(слика 2) и MR, који су усклађени са DICOM стандардом.

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

- Препознавање морфолошких карактеристика костију и меких ткива је кључно за успешно моделирање и реализује се у специјализованим програмима као што су Mimics, 3D Doctor, као и у комерцијалним 3D CAD програмима, као што су и SolidWorks, Catia итд.
- У области пројектовања прилагођених имплантата тенденција је на развоју специјализованих софтвера за дизајнирање имплантата и планирање операција.
- И на крају можемо извршити саму анализу, у нашем случају коронарне артерије и уочити најкритичније тачке на самој артерији.[1]



Слика 1 – Скенер са приказом низа слика

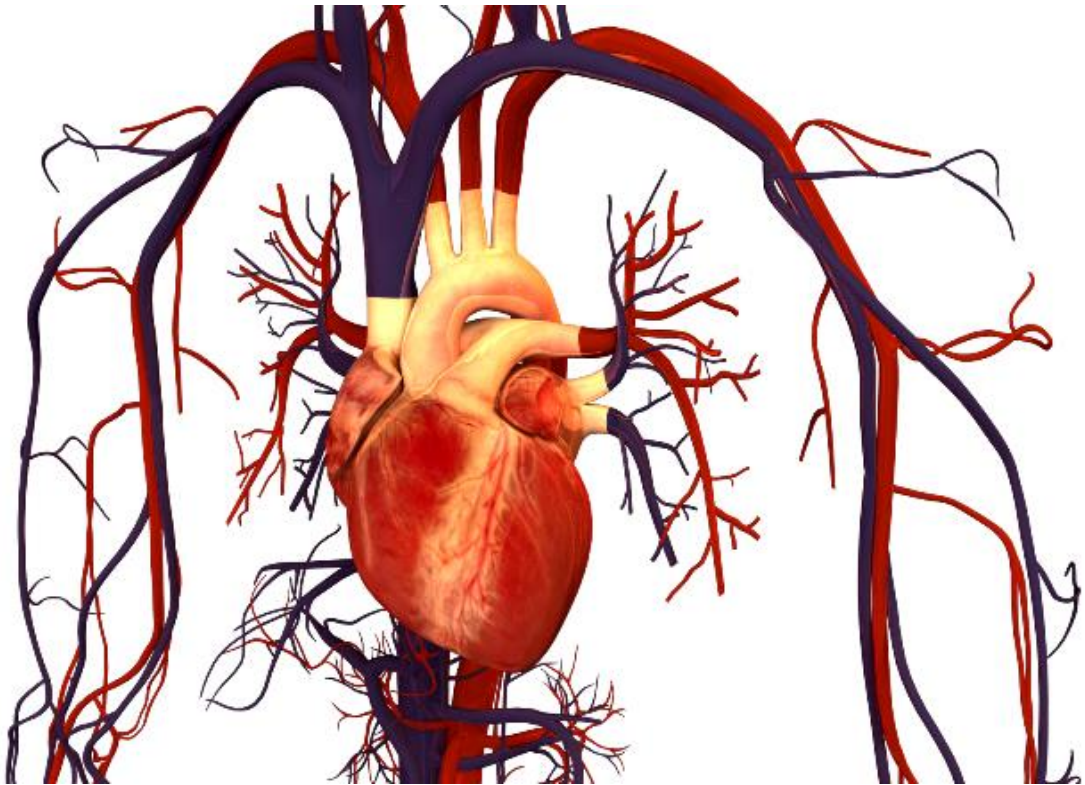


Слика 2 – Скенер са приказом низа слика

2. КАРДИОВАСКУЛАРНИ СИСТЕМ

Кардиоваскуларни (крвни васкуларни) систем представља затворен систем крвних судова кроз који протиче крв. Одговоран је за транспорт материја по целом телу и као такав повезује све ћелије тела, јер транспортује хранљиве материје, воду и кисеоник у ћелије, а узима отпад који производе ћелије (нпр. угљен-диоксид). Кардиоваскуларни систем чине срце, крвни судови (артерије, капилари, вене) и лимфни судови. Срце је шупљи мишићни орган чија је функција да пумпа крв и чија је унутрашњост једном уздужном преградом подељена на две половине, леву и десну. Обе половине се састоје из преткоморе и коморе, које медусобно комуницирају путем посебних отвора. Из срчаних комора полазе артеријски крвни судови кроз које тече крв ка периферији (Слика 3). [2]

Коморе срца нормално се контрахују координирано, пумпајући ефикасно крв путањом коју одреде залиски. Координација контракција остварује се помоћу специјализованог проводног система. Синусни ритам, који је физиолошки, карактеришу импулси који настају у синоатријалном (SA) чвору и који се редом проводе кроз преткоморе, атриовентрикуларни (AV) чвор, Хисов сноп, Пуркињеова влакна и коморе. Срчане ћелије дугују своју способност електричног побуђивања волтажним каналима ћелијске мембране, који су селективни за различите јоне, укључујући јоне натријума, калијума и калцијума.[2]



Слика 3 – Кардиоваскуларни систем

2.1 Крв

Крв је течност која непрекидно кружи кардиоваскуларним системом, а састоји се из крвних ћелија и плазме. Већину крвних ћелија производи коштана срж, сундеријасто ткиво које испуњава коштане шупљине. Постоји три врсте крвних ћелија:

- **Црвена крвна зрнца или еритроцити** који садрже хемоглобин који преноси кисеоник из плућа у друге делове тела. Проценат крви који чине црвена крвна зрнца се у медицини назива хематокрит. Нормалне вредности хематокрита се крећу око 45% за мушкарце и око 40% за жене.[3]
- **Бела крвна зрнца или леукоцити** чија улога је борба против инфекција. Леукоцити контролишу имунитет и могу уништавати вирусе и ћелије рака (Т-лимфоцити), стварају антитела (Б-лимфоцити), боре се против инфекција, уништавају бактерије и уклањају оштећено ткиво (Неутрофили), Моноцити заједно са лимфоцитима учествују у заштити организма од бактеријских микроорганизама и инфекција.[3]
- **Крвне плочице** или тромбоцити који згрушавају крв и спречавају крварење.
- Крвна плазма је течни део крви који садржи воду, беланчевине и минералне соли и још преко сто различитих материја. Она преноси материје важне за живот као и антитела која стварају отпорност према болестима, хормоне који регулишу разне функције тела и угљен-диоксид из ткива и плућа.[3]
- Крв врши много значајних функција за организам, а неке од њих су:
 - 1. **Респираторна функција.** Кисеоник из ваздуха улази крв и везује се за хемоглобин па се затим транспортује заједно са глукозом, аминокиселина и мастима до ткива. На тај начин, у нормалним условима 1 литар крви предаје ваздуху 40мл угљен-диоксида.[3]
 - 2. **Нутритивна улога.** Глукоза, аминокиселине, масти се транспортују путем крви до свих органа и ткива који их користе.
 - 3. **Регулаторна улога.** Витамини, минерали, хормони, продукти организма, ткивни продукти, хемијски активне материје се преносе путем крви и регулишу активност одређених органа и омогућавају утицај једних органа на друге као и прилагођавање активности појединих органа потребама организма.[3]
 - 4. **Екскреторна и детоксикациона улога.** Крв транспортује из челија продукте њиховог метаболизма до плућа, бубрега, јетре и сл.
 - 5. **Одбрамбена улога.** Ова улога се остварује преко белих крвних зрнаца и антитела, а подразумева заштиту од инфекција, страних агенаса и сопствених туморозних 'целија транспортом имуноглобулина и ћелија имуног система.[3]

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

- 6. *Терморегулациона улога.* Организми са сталном телесном температуром имају механизме за одржање температуре тела, без обзира на спољашњу. Као главни извор топлоте јављају се оксидациони процеси у ћелијама који се одвијају у јетри и мишићима. Када крв пролази кроз органе она прима топлоту и разноси је до оних делова тела у којима је производња топлоте мала или до коже преко које се вишак топлоте предаје спољашњој средини.[3]
- 7. *Регулација осмотског притиска, хемостаза* (спречавање крварења згрушавањем), одржавање ацидо-базне равнотеже...

2.2 Крвни судови

Крвни судови се, према различитим критеријумима, могу поделити у више врста, а два основна критеријума за поделу су града крвног суда и његове функције. На основу структурних карактеристика, крвни судови се могу класификовати у три основне категорије: артерије, вене и капилари. Крвни судови се понашају као еластична тела која под различитим околностима мењају волумен, односно димензије. У зиду крвних судова постоје еластични елементи, еластин и колаген, који обезбеђују еластичност.[4]

Под утицајем силе, односно притиска који крв врши на зидове крвног суда, његови еластични елементи се истезу. За то истезање се не троши биохемијска енергија, већ се један тип енергија претвара у други. Медутим, у крвним судовима се одвија активан процес, контракција мишића, током којег се троши биохемијска енергија. За контракцију мишића су заслужни глатки мишићи чијом активношћу се мења радијус крвног суда. Глатки мишићи се налазе у свим крвним судовима, изузев венула и капилара .[4]

Артерије су крвни судови кроз које се крв са хранљивим материјама и кисеоником одводи из срца према ткивима. Оне се идући према ткивима (периферији), гранају на све мање и мање гране. Најмање гране називамо артериоле које затим прелазе у капиларе, најмање крвне судове. Од венског дела капилара полазе најситније вене које називамо венуле и које постају све веће да би настали велики венски судови који се уливају у срчане преткоморе и кроз које крв долази у срце. [4]

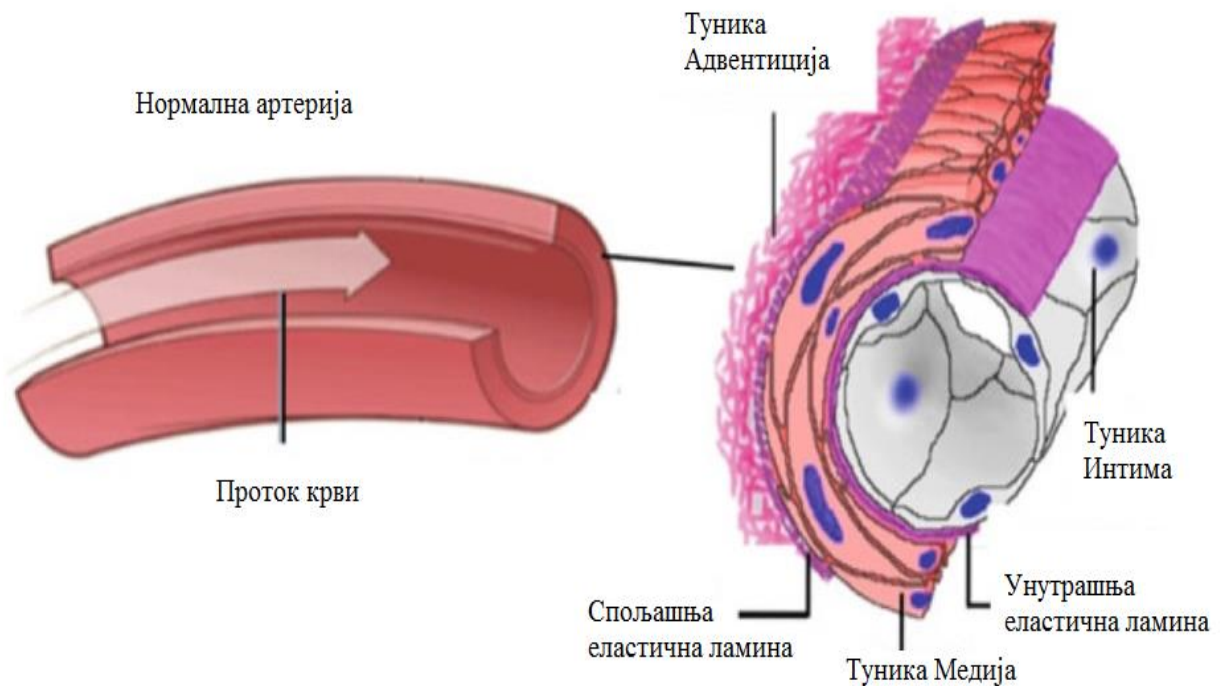
Претходно описан систем крвних судова представља крвоток. Артерије имају изражен, дебљи мишићни слој од зидова вена па су зидови артерије дебљи и еластичнији. Капилари су мали али функционално веома важни крвни судови, који се налазе између артеријског и венског система и спајају најмање артеријске и венске судове. Кроз зидове капилара се врши размена материја између крви и ткива. Зависно од функције коју обавља, крвоток делимо на:

- Мали (плућни) крвоток који омогућава оксигенацију која се одвија у плућима.
- Велики (системски) крвоток који спроводи размену материја која се одвија у ткивима.[4]

Па тако, у људском телу разликујемо два типа артерија. То су системске артерије које носе крв богату кисеоником од срца до других делова организма, а враћају крв богату угљен-диоксидом назад у срце. За разлику од системских, плућне артерије носе крв богату угљен-диоксидом од срца до плућа и враћају крв богату кисеоником назад у срце.[4]

2.3 Компоненте и слојеви у крвном суду

Васкуларни зид се састоји из ендотела, мишићног ткива и везивног ткива. Количина и распоред ових ткива су под утицајем механичких фактора, а сва ткива су присутна у различитим пропорцијама у васкуларном зиду и имају различите улоге (Слика 4).[4]



Слика 4 – Структура васкуларног зида

Иако сви крвни судови одређеног полупречника имају бројне заједничке карактеристике, исти тип крвног суда може имати значајне структурне варијације. Такође, разлика између различитих типова крвних судова често није потпуно јасна, јер је прелаз из једног типа крвног суда у други постепен. Крвни судови се обично састоје из три типа слојева или туника:

1. *Туника Intima*. Интима се састоји од једног слоја ендотелних ћелија испод кога се налази субендотелни слој растреситог везивног ткива које садржи ретке глатке мишићне ћелије. У артеријама је интима одвојена од медије унутрашњом еластичном ламином која је спољашња компонента интима. [4]

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Унутрашња еластична ламина је састављена од еластина и има отворе који омогућавају размену супстанци које хране васкуларни зид (Слика 4). Код здравих особа је интима веома танка па је њен допринос механичким својствима артерије безначајан.

Међутим, са годинама интима постаје дебља и чвршћа па се њена својства морају узети у обзир. Промене у компонентама интима се најчешће повезују са болешћу познатом као атеросклероза.[4]

2. *Туника Media*. Медија је средишњи слој који се састоји из концентричних слојева спирално распоредених глатких мишићних ћелија. Између ових ћелија се налазе одређене количине еластичних влакана, ламела, колагена типа III, протеогликана и гликопротеина. У већим артеријама медија поседује тању спољашњу еластичну ламину која је одваја од адвентиције. Медија је најзначајни слој код здравих артерија, бар када је реч о механичким својствима.[4]

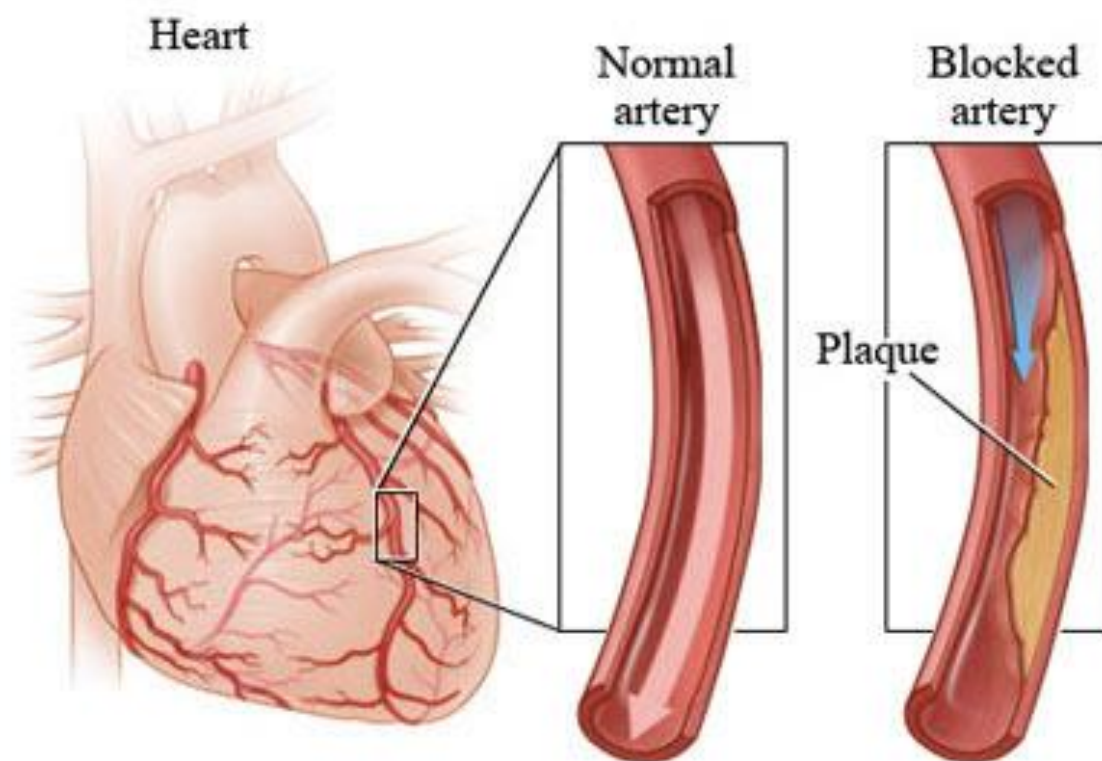
3. *Туника Adventita*. Адвентиција је спољашњи слој који се састоји из ћелија које производе еластин и колаген. Адвентицијални слој се постепено стапа са везивним ткивом органа кроз који суд протиче. У условима високог притиска влакна колагена се истегну што проузрокује да адвентиција очврсне, што спречава пуцање артерије.

Велики судови поседују судове судова (васа васорум), артериоле, капиларе и венуле који се гранају у адвентицији и спољашњем делу медије.[4]

3. КРВНИ ПРИТИСАК

Захваљујући еластичности зида аорте, омогућен је не само континуални проток крви, већ и одржавање крвног притиска у аорти на релативно високом нивоу. Крвни притисак је притисак који крв врши на зидове крвних судова кроз које протиче. Како крв струји кроз крвне судове који се разликују по структури, тј. имају више или мање еластичних и мишићних елемената и функцији, крвни притисак се може категорисати на основу тога кроз који од крвних судова протиче. Тако разликујемо артеријски крвни притисак, капиларни крвни притисак и венски крвни притисак. Од посебног значаја су артеријски систолни и дијастолни крвни притисак.[5]

- Систолни артеријски крвни притисак је највиши притисак измерен у аорти и артеријама већег радијуса за време систоле комора. Код младих и здравих особа нормална вредност систолног артеријског крвног притиска износи око 16 kPa
- Дијастолни артеријски крвни притисак је најнижи притисак измерен у аорти и артеријама већег радијуса за време дијастоле комора. Код младих и здравих особа нормална вредност систолног артеријског крвног притиска износи око 11 kPa.[5]



Слика 5 – Таложење масних наслага на плаку

Како су болести срца један од главних узрока болести, истраживање протока крви кроз људски кардиоваскуларни систем је веома значајно. Болест коронарних артерија је обично изазвана атеросклерозом, која настаје као последица таложења масних супстанци, холестерола, па чак и калцијума на унутрашњој површини зида артерија што доводи до стварања плака Слика 5 (наслага). Коронарне артерије су артерије које срце снабдевају крвљу. Таложење супстанци доводи до сужавања артерија, што називамо стенозом, која потом доводи до смањења снабдевања срчаног мишића крвљу и кисеоником. [5]

Недостатак крви и кисеоника је потенцијално озбиљан проблем, а посебно може да се испоји приликом физичког напора. У случају када се коронарна артерија потпуно затвори долази до инфаркта срца. Генерално, постоје два типа плака, тврд и мек. Тврд плак је стабилан и узрокује очвршћавање и задебљање зида артерије. Док је мек плак веома нестабилан и узрокује пуцање зидова и стварање угрушака што доводи до затварања протока крви кроз артерије. [5]

Цео комплексан процес који доводи до срчаних болести још увек није у потпуности објашњен и још увек се не зна директан узрок тих болести. Међтим, последњих година је учињен велики напредак у клиничким испитивањима и у математичком моделовању кардиоваскуларног система. [5]

4. 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 (ЕНФ) која се налази у артеријском систему. [6]

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.[6]

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.[6]

Једно од ретких обољења артерије је и дисекција коронарне артерије представља ретко ургентно стање које настаје приликом стварања расцепа у неком од крвних судова срца. Код спонтаних дисекција коронарне артерије, или SCAD, слојеви ткива артеријског зида се раздвајају и крв протиче кроз тај дефект. Крв постаје заробљена, изазивајући стварање избочења у зиду који блокира артеријски проток крви. Услед тога, крвни проток ка срцу је опструисан те се инцидент срчаног напада, поремећаји патолошког срчаног ритма или изненадне смрти повећавају.[6]

Спонтанна дисекција коронарних артерија (SCAD) може настати у било ком животном периоду особе, иако показује тенденцију настанка код особа старости између 30 и 50 година живота. У случајевима када особа поседује знаке и симптоме срчаног напада, неодложна медицинска помоћ је од виталног значаја. У случају да се не лечи, спонтанна дисекција коронарних артерија (SCAD) може водити настанку изненадне смрти.[6]

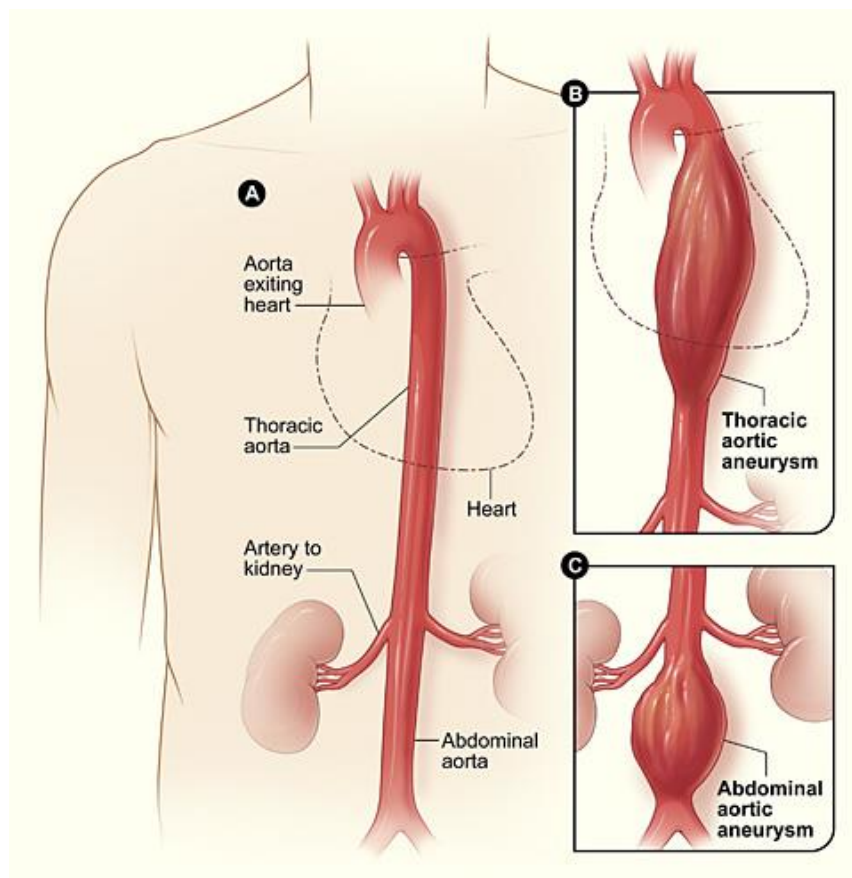
5. АОРТА

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 Слика 5.[7]

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.[7]

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Еластична влакна су нарочито густа у делу усходне аорте (ascendentna aorta), где је притисак крви на већи.



Слика 5 – Структура аорте

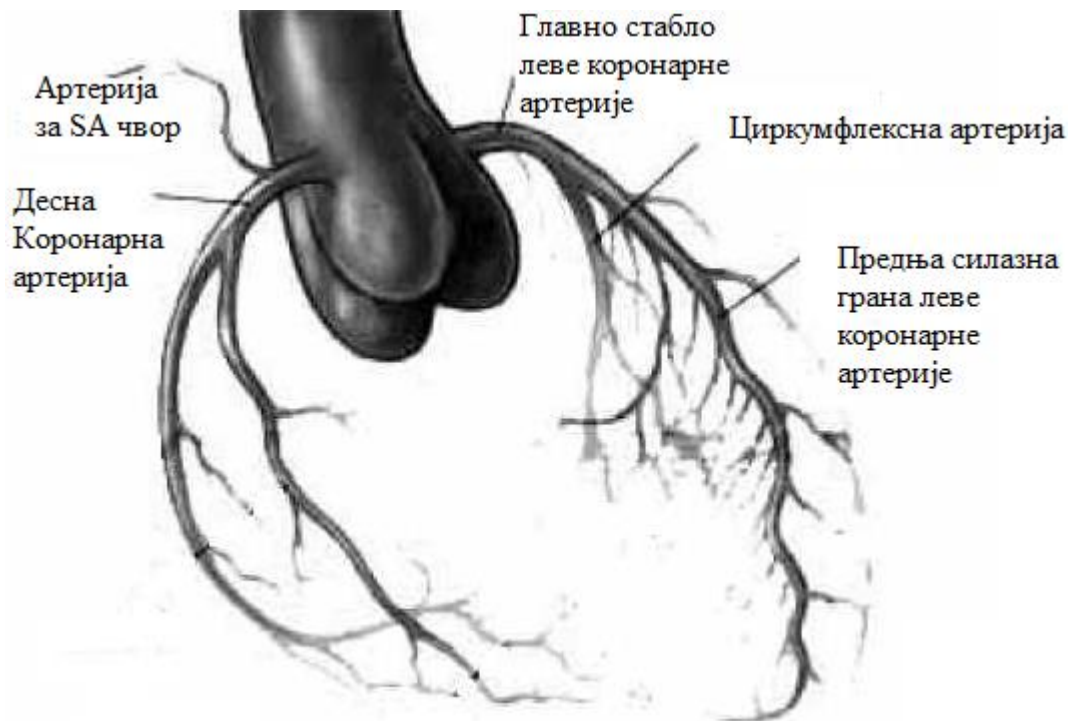
Дисекција аорте за разлику од анеуризме је ургентно стање у хирургији. Нерегулисан крвни притисак и слабост зида аорте су главни фактори ризика. Може настати на бази анеуризматски проширене аорте али и потпуно независно. Настаје када дође до прскања унутрашњег слоја аорте, када крв продире у зид аорте и раслојава га. Након овога могућност потпуног пуцања зида аорте драматично расте тако да акутно насталу дисекцију треба под хитно оперисати.[7]

Анеуризма аорте је болест коју карактерише проширење аорте. Последица је слабости зида аорте различитог порекла. Када се пречник аорте повећава, расте и сила притиска крви на зид аорте што може довести до прскања аорте или њеног раслојавања (дисекције аорте). Узлазна (асцедентна) аорта је најосетљивији део аорте, и када њен пречник пређе 5 - 5,5 cm треба је оперисати. Иако сама анеуризма аорте није ургентно стање, већ стање које треба на време лечити, већа проширења аорте ипак треба лечити у што скоријем року. Поједине урођене болести везивног ткива као на пример Марфанов синдром погодују настанку анеуризме аорте.[7]

6. КОРОНАРНЕ АРТЕРИЈЕ СРЦА

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 Слика 6. [8]

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.[8]



Слика 6 – Коронарне артерије

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.[8]

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

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]

6.1 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 читује 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 узнапредовала. Такође, болест може да се манифестује у виду: [9]

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

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.

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. [9]

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. [9]

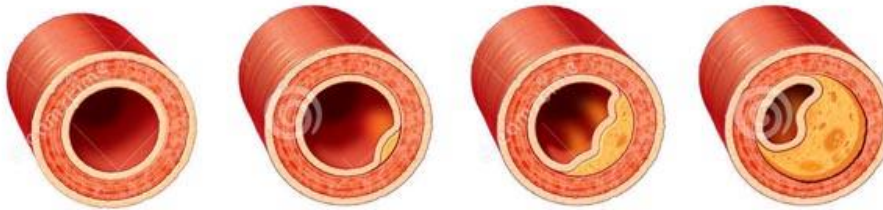
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

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 слика 7. 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. Тако настаје инфаркт срца. У 5% случајева узроци коронарне болести су неатеросклеротског порекла. [9]

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. [9]

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 7 – Нагомилавање масти у артеији

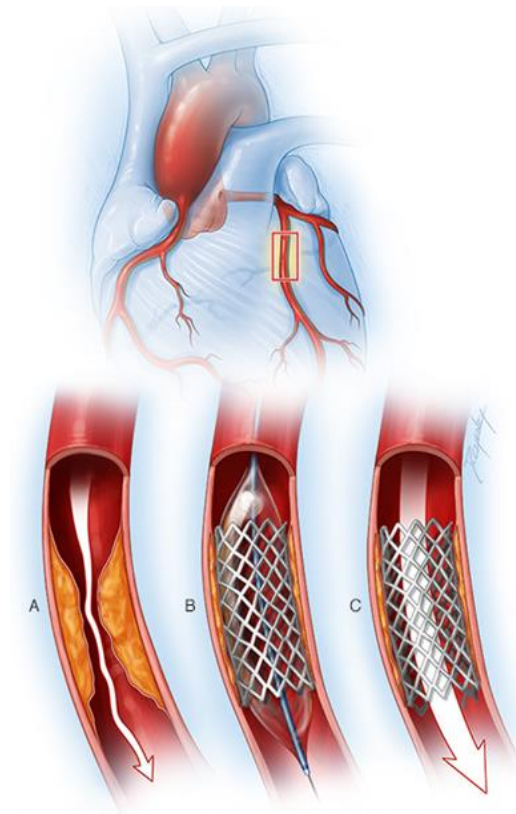
Фактори ризика за коронарну болест су: године живота, повишене вредности масти, пушење, крвни притисак, физичка неактивност, шећерна болест, инфекције, употреба оралних контрацептивних средстава, бубрежна инсуфицијенција, алкохол и итд. Коронарна болест манифестује се као: ангина пекторис, инфаркт срца, поремећај срчаног ритма и проводјенја, 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. [9]

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]

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

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 цлопидогрел (Плавих). [9]

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 рентгена 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 8. [9]



Слика 8 – Перкутана транслуминална коронарна ангиопластика

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 бупасс операција срца, рана оклузија (зачепљење), инфаркт срца, компликације на крвним судовима.

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. [9]

7. ИЗРАДА 3D МОДЕЛА И ПРИМЕНА СОФТВЕРА

Полазна основа за добијање 3D модела користи се технике аквизиције дигиталних снимака са уређаја CT, MR који су усклађени са DICOM стандардом. DICOM представља међународни стандард за дефинисање и начин преноса медицинских информација и снимака, и он обезбеђује интероперабилност између. У процесу 3D реконструкције у насем случају артерије, радимо на одређивању граница у 2D моделу а затим повезивање тих граница у 3D објекте. Овде можемо увести значај „Медицински имиџинг“. Где се читавањем од низа слика у одређеним софтверима може доћи до реалног 3D модела. За читавање DICOM стандарда и реализацију 3D модела користили смо софтвер Mimics.

7.1 Mimics софтвер

Mimics (Materialize Interactive Medical Image Control System) је софтвер за материјализацију за обраду медицинске слике и креирање 3D модела. Mimics користи 2D пресек медицинске слике као што су компјутеризовану томографију (CT) и магнетну резонанцу (MRI) за израду 3D модела, што може затим бити директно повезани са брзим прототипом, CAD, хируршком симулацијом и напредном инжењерском анализом, слика 9. За обраду података у Mimics -у, први пут је увезен фајл сложених 2D попречних пресека. Ове 2D слике, обично у DICOM формату, долазе из медицинске опреме за скенирање. Једном када су слике постављене увози, могу их прегледати и уређивати помоћу различитих алата доступних у Mimics. Квалитет 3D слике које Mimics може створити директно корелира с дебелином резина и величином пиксела 2D слике.

Екран Mimics. је подељен на четири главна приказа, коронални, аксијални, сагитални и 3D. Инжењери могу да размишљају короналног као предњег погледа, аксијално као поглед са врха према доле, и сагитално као прави поглед. Долази аксијални поглед из увезене слике. Да би добили коронални и сагитални поглед, Mimics транспонује аксијални слике на њихове позиције. 3D окно је где су 3D модели визуализирани. Кликнути на слика са левим тастером миша аутоматски ажурира вашу локацију у свим приказима.[10]

Сваки од 2D прегледа садржи број сегмента у доњем десном углу. Аксијални поглед такође има столположај у доњем левом углу који описује локацију крака у односу на порекло табела скенера. Главна трака са алаткама садржи падајуће меније за већину алата доступних у Mimics. Испод главног тоолбар је листа икона често коришћених алата.

Пошто модели прецизно одговарају подацима о пацијенту, модели су корисни у комуникацији и хирургији припрема за клинички рад. Медицински брзи прототипи су високо искоришћени дизајном медицинских уређаја произвођача и инжењера. RP модели омогућавају инжењерима да тестирају облик, уклапају, функционишу и валидирају пројектује податке о стварним пацијентима пре него што их тестира на стварним пацијентима. Брза прототипа такође дозвољава кориснике да тестирају и валидирају дизајн са физичким моделима.

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

- У области 3D моделирања као полазна основа користе се технике аквизиције дигиталних снимака са уређаја као што су CT и MR, који су усклађени са DICOM стандардом
- Препознавање морфолошких карактеристика костију и меких ткива је кључно за успешно моделирање прилагођених ортопедских имплантата и реализује се у специјализованим програмима као што су Mimics, 3D Doctor, као и у комерцијалним 3D CAD програмима, као што су у SolidWorks, Catia итд.
- У области пројектовања прилагођених имплантата тенденција је на развоју специјализованих софтвера за дизајнирање имплантата и планирање операција.
- У случајевима где је потребно израдити прилагођени ортопедски имплантат доминанта је директна израда AM технологијама, тзв. Rapid Manufacturing(RM), првенствено EBM и DMLS процесима.[10]

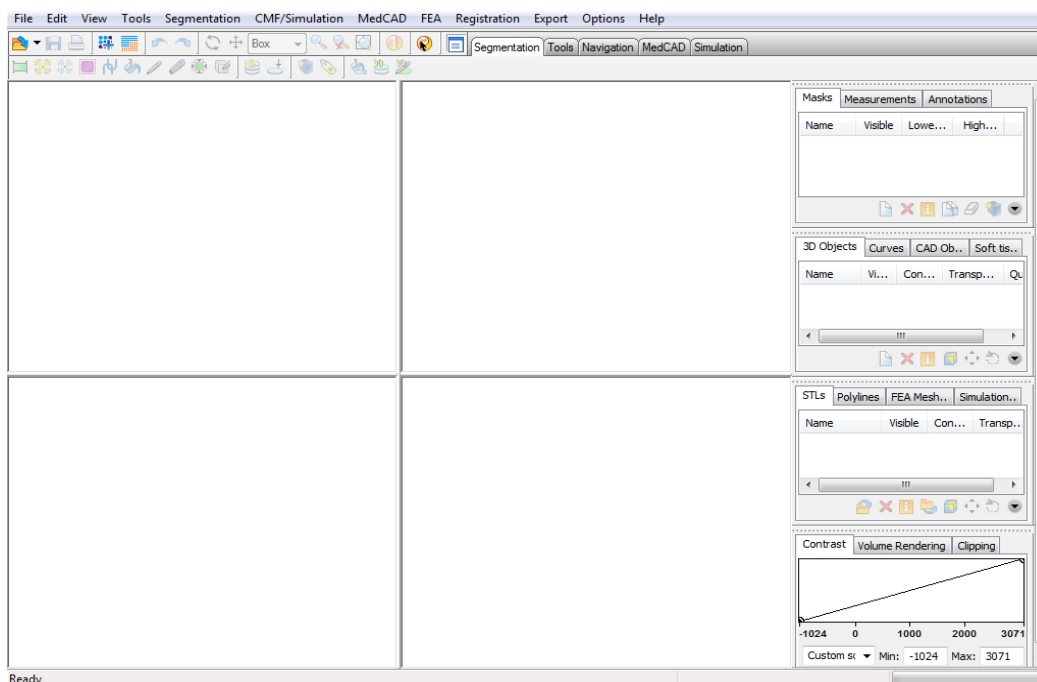
У првом делу формирања 3D модела можемо увести значај „Медицински имицинг“. Где се од низа слика у одређеним софтверима мож доћи до реалног 3D модела.

У процесу 3D реконструкције крвног суда, радимо на одређивању граница у 2D моделу а затим повезивање тих граница у 3D објекте. Процес 3D реконструкције крвног суда почиње од примене једног оваквог алгоритма на серији IVUS снимака којим се добијају границе крвног суда. На основу тога формира се модел крвног суда у облику мреже коначних елемената и такав модел је спреман за примену у различитим симулацијама у биомедицини. У циљу добијања што вернијег модела (модела који највише одговара реланом стању) крвног суда, даљи развој овог алгоритма ићи ће у правцу побољшања тако да се добије највећи могући степен глаткости контуре. Овима би се избегли „пикови“ на контури што у 3D репрезентацији може резултирати изрисаним зидовима крвног суда.

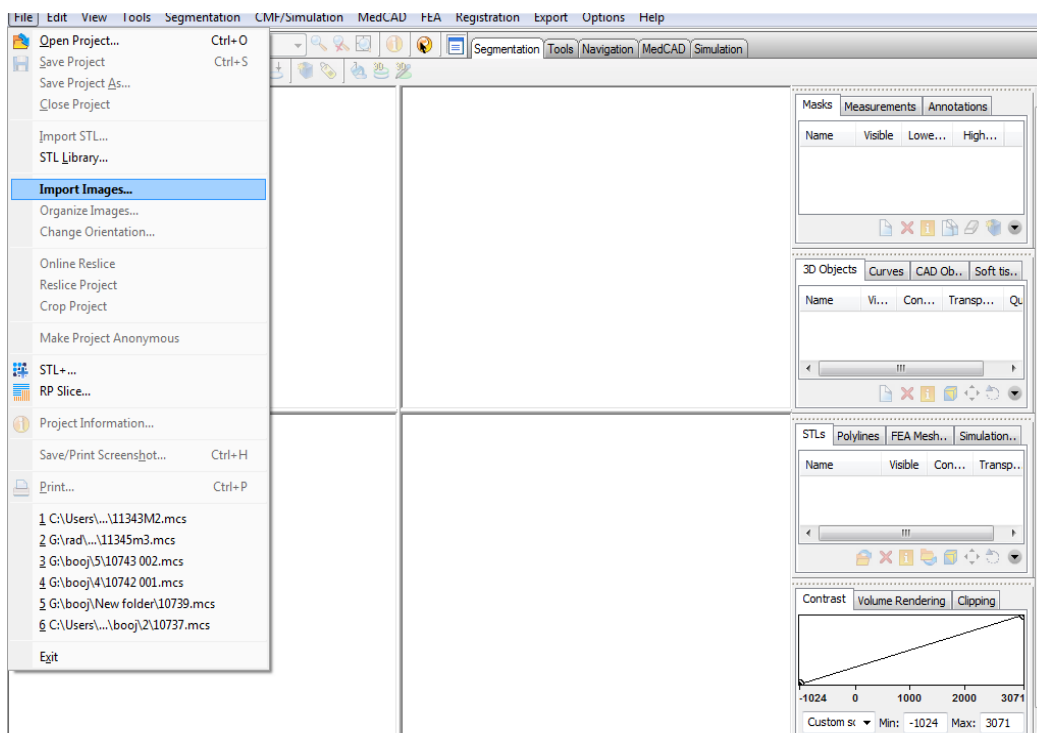
У области медицине постоји технологија која је првенствено у насем случају применљива а која се назива Медицински имицинг – под појмом имицинга сматра се визуелно представљање дела тела или целог тела ради медицинске дијагнозе путем компјутеризованих техника снимања. Резултат имицинга је медицинска слика. Главна карактеристика медицинског имицинга је неинвазивност, па је пацијент, на тај начин, остао недирнут без обзира на циљ и начин одвијања снимања. Ниједна техника није тако моћна у области неинвазивног установљивања анатомске структуре и функције људског тела, као што је то медицински имицинг.

У радиологији се генерише велики број разноврсних слика, које су добијене са одговарајућих модалитета, као што су: US (Ultrasound), CT (Computed Topography), MRI (Magnetic Resonance Imaging) и др. Аквизиција дигиталних снимака захтева постојање медицинских уређаја са одговарајућим интерфејсом као што су CT, MR, дигитализатор филмова и др. и они морају бити у складу са DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) стандардом. DICOM представља међународни стандард за дефинисање и начин преноса медицинских информација и снимака. [10]

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



Слика 9 – Почетна страна Mimcs-и софтвера



Слика 10 - 3D Учитавање слика у Mimcs-и софтвер

У првом кораку врши се учитавање DICOM слика у софтвер, затим обрада датих слика Слика 11.

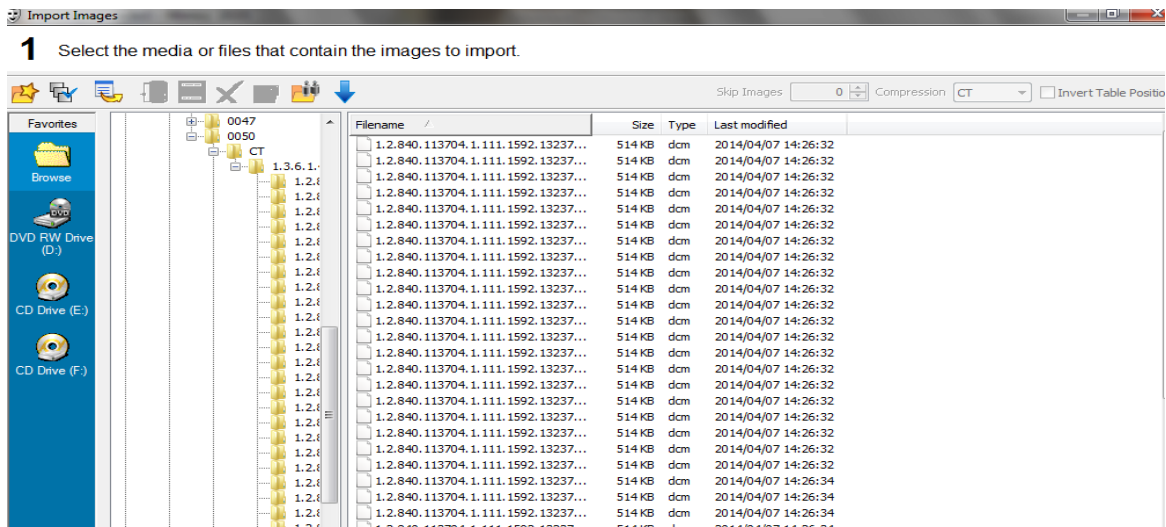
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



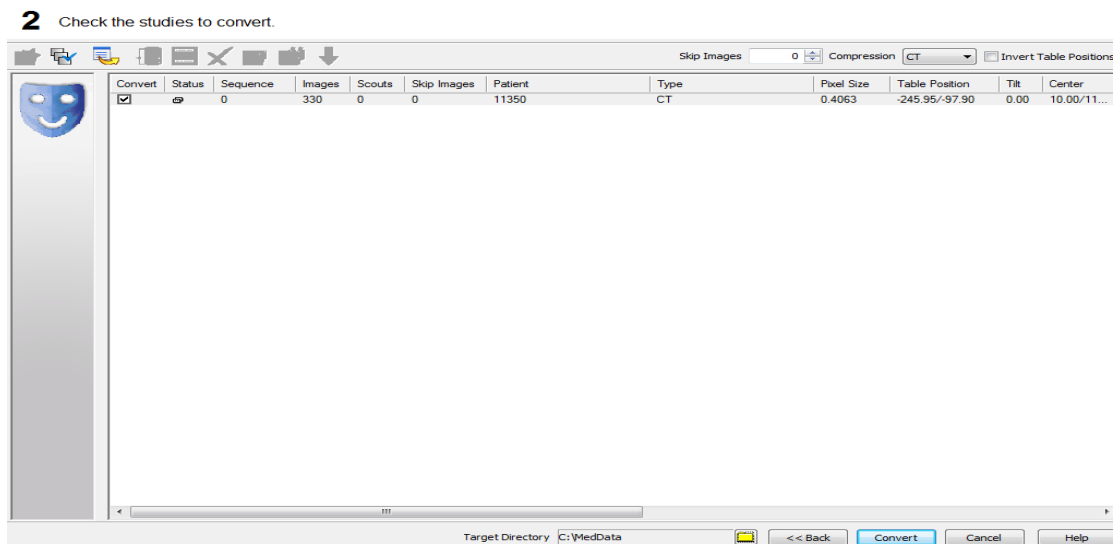
<DIR> 07/28/2016 09:09	
jpg	129,350 03/19/2013 15:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,192 03/19/2013 16:36
dcm	528,186 03/19/2013 16:36

Слика 11 - DICOM слике за учитавање

Кликом на *File -> Import Images*, врши се учитавање слика, након чега се отвара нови дијалог где је потребно селекувати фолдер где се налазе дате слике, (слика 10 и слика 12).

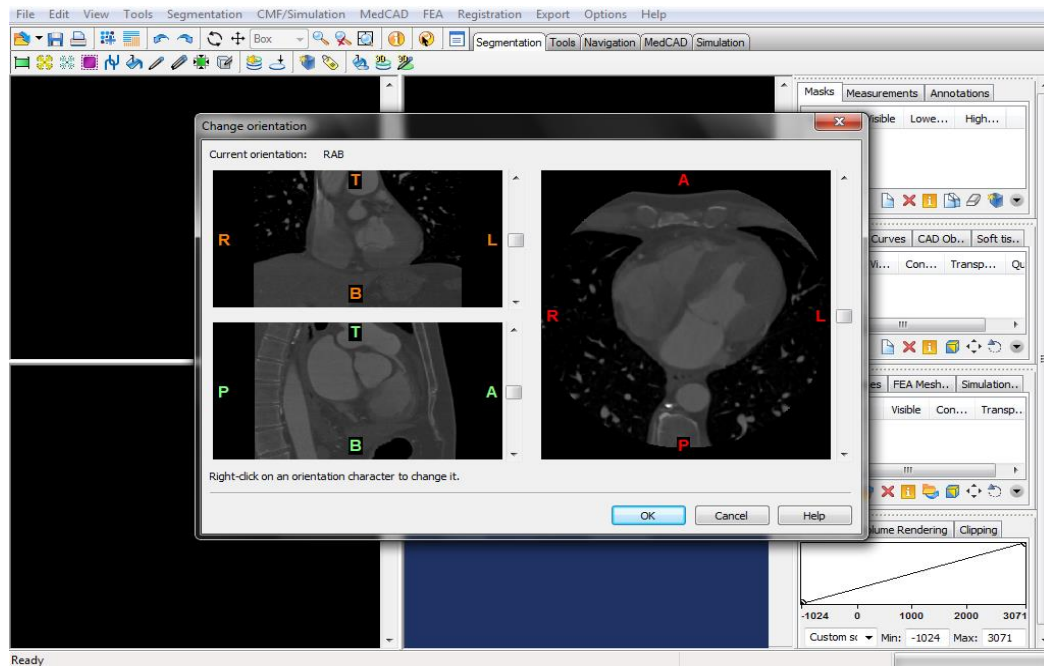


Слика 12 – Учитавање DICOM слика

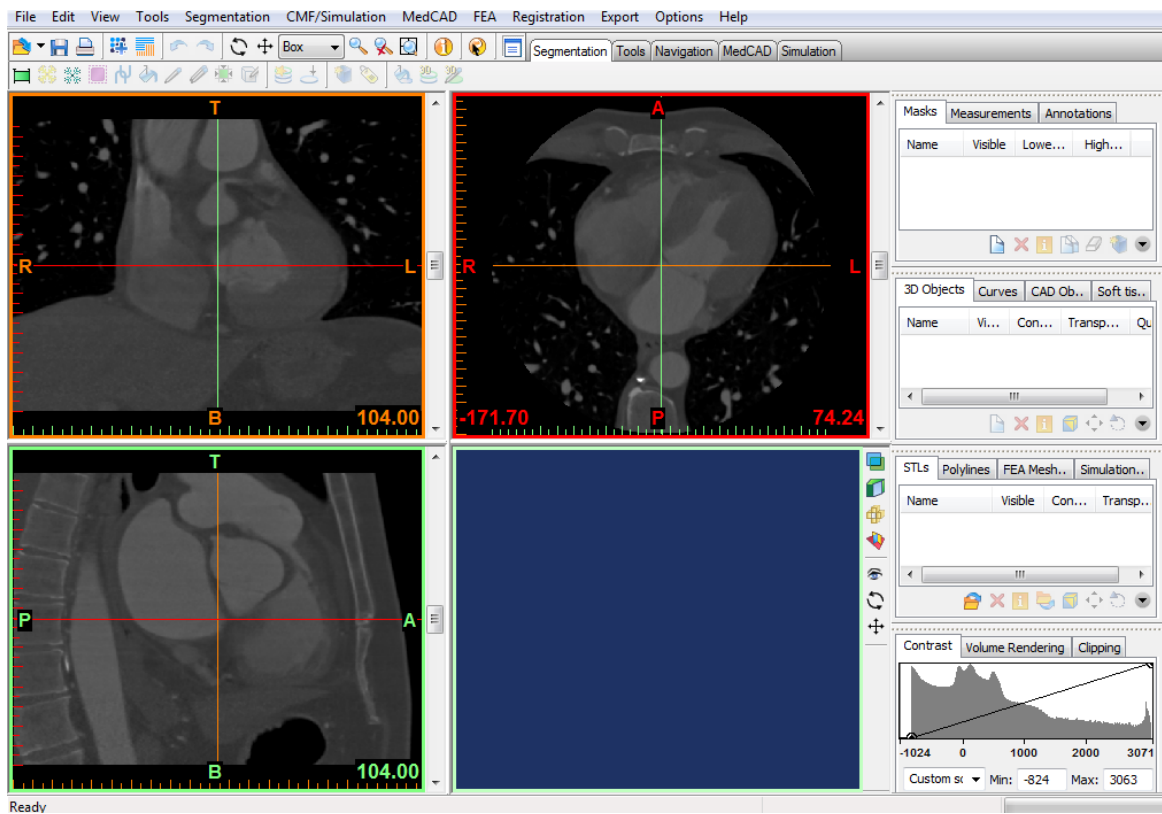


Слика 13 - 3D површински модели креирани у *Mimcs*-и од CT-а

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



Слика 14 - 3D површински модели креирани у Mimics-у од CT-а



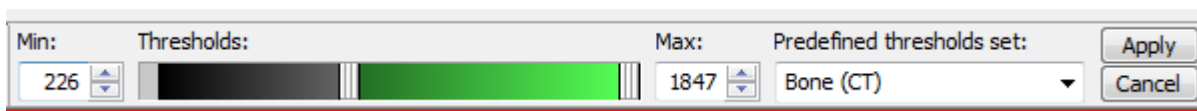
Слика 15 – Учитана група DICOM слика

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

На слици 15 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.

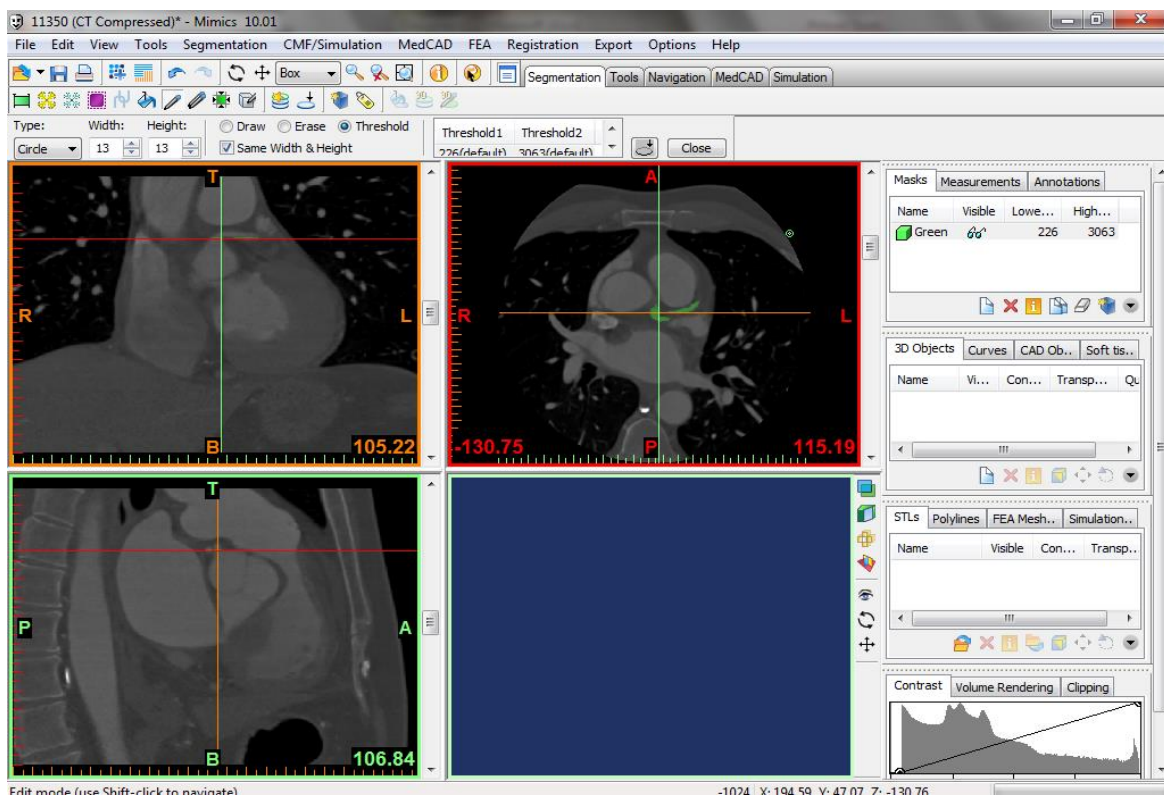
Threshold представља једну од алата за сегментацију слике, и превод на спрски представља сегментацију прагом. Ова техника представља групу метода заснованих на поређењу осветљености пиксела са једним или више прагова. У овом конкретном примеру се ради са осветљености једног прага, и то је уједно најједноставнији 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 16.



Слика 16 – Подешавање Threshold-a у Mimics-у

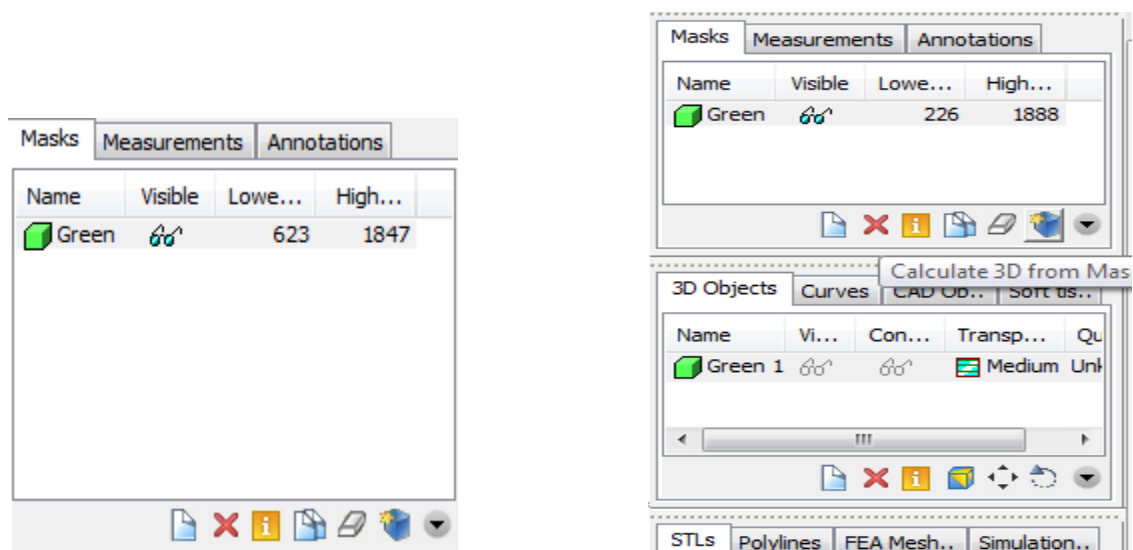
Светлост пиксела изнад 226 се узима као вредност 0, сви остали пиксели чија је вредност мања од 226 узима вредност 1, и то се маркира зеленом бојом (зелена боја је по *default* вредности у *mimics-u*) (Слика 17).



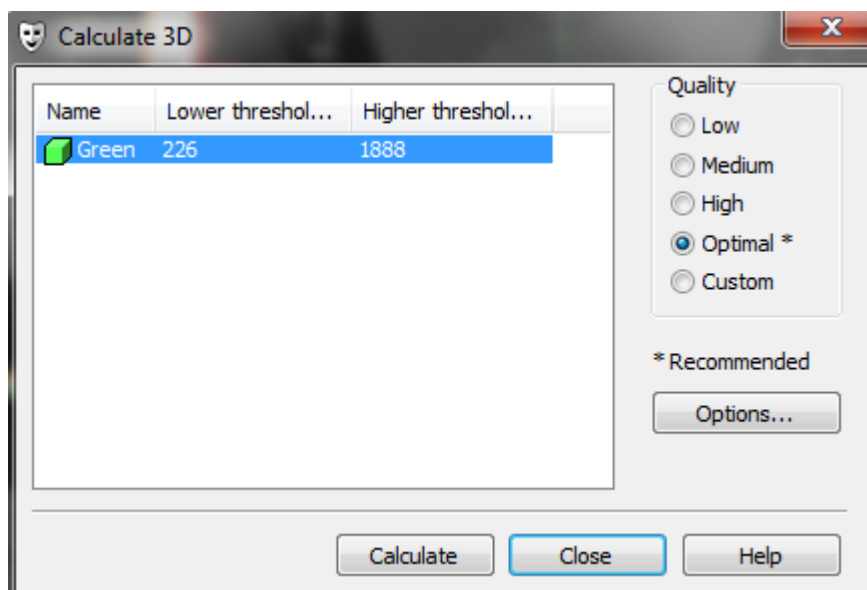
Слика 17 – Пример означавања threshold-a

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

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 18.

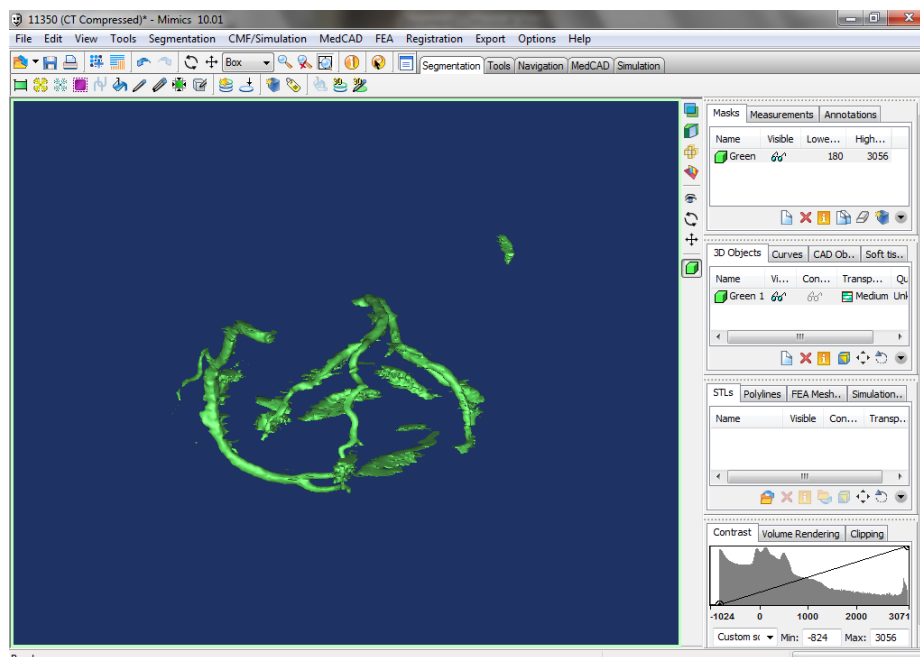


Слика 18 – Део за рад са маскама



Слика 19 – Калкулација модела

Након калкулације модела (слика 19), добија се модел као на слици 20, који је потребно извести у .stl фајл, кликом на *Export – ASCII STL*



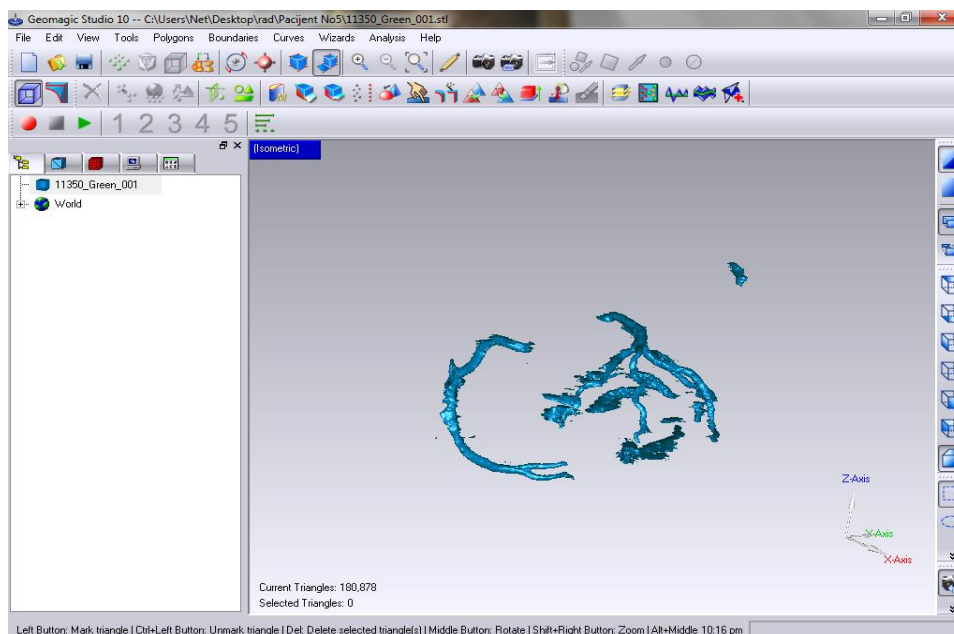
Слика 20 – Добијен 3D модел на основу 2D снимака

8. ОБРАДА МОДЕЛА У GEOMAGIC STUDIO-U

Geomagic је глобална компанија посвећена унапређењу и примени 3D технологије у корист човечанства. Geomagic решења за скенирање и дизајн користе се за снимање и моделирање 3D садржаја из физичких предмета, органски скулптовање комплексних облика и припрема производа за производњу. Поред тога, компанија производи моћни 3D метролошки и контролни софтвер који верификује димензионални квалитет у поређивањем произведених производа за мастер дизајн. Geomagic Sensable уређаји симулирају осећај додир у дигиталном окружењу. Geomagic софтвер и хардвер користе клијенти свјетске класе уразним индустријама, укључујући ваздухопловство, аутомобилску индустрију, медицинске производе, производе за потрошаче, играчке, колекционаре, дизајн новчића, накит, ликовну умјетност, рестаурацију наслеђа, истраживање, образовање, стварање плесни, забаву, обуку и хируршку симулацију. Уствари, неке од водећих свјетских компанија и истраживачких организација користе Geomagic софтвер, укључујући Форд, BMW, Boeing, Harley Davidson, Tumberland, Mattel / Ficher Price, Lego, Pratt & Whitney, NASA, Schneider Electronic, 3M. Geomagic се налази у Истраживачком триангле парку, N.C., SAD, са канцеларијом у Бостону, подружницама у Европи и Азији и партнерима широм света. [11]

Учитавање се врши кликом на File па на Import, где је потребно селектовати издвојен модел који је добијен у Mimics-у. Модел као што је на слици 21 садржи мноштво непотребних елемената.

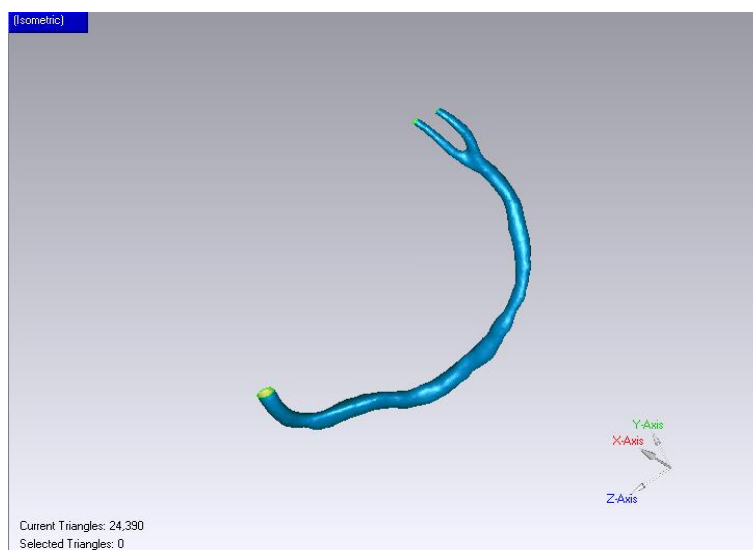
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



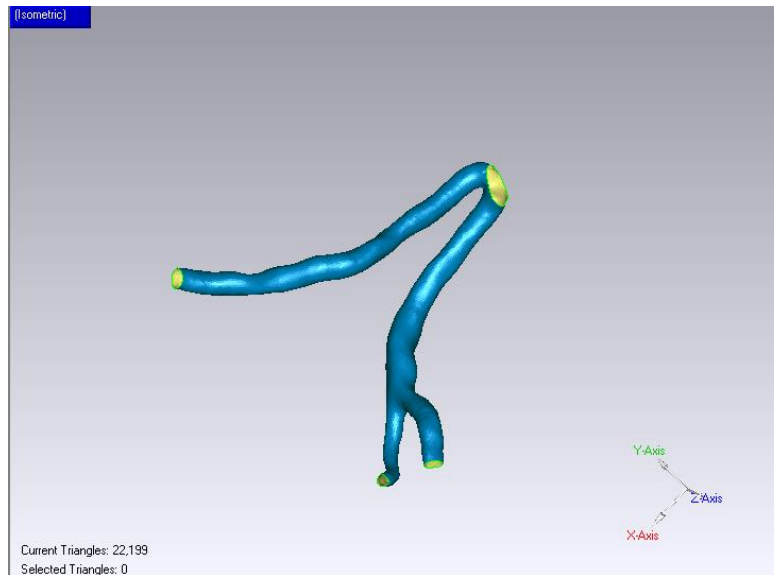
Слика 21 – Учитан модел у Geomagic studi-u

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

Комбинацијом опција и операција које се користе приликом сређивања модела, добијају се модели као на сликама 22 и 23. Добијене моделе је потребно експортирати у STL фајл.



Слика 22 – Десна коронарна артерија



Слика 23 – Лева коронарна артерија

9. ОБРАДА МОДЕЛА У И FEMAP-U И ДОБИЈЕНИ РЕЗУЛТАТИ

FEMAP је напредни софтвер за инжењеринг симулацију који креира коначне моделе анализе елемената комплексних инжењерских производа и система и приказује резултате рјешења. FEMAP може виртуелно моделирати компоненте, склопове или системе и одредити одзив у понашању за одређено радно окружење.[12]

Коришћењем Фемап-ових дигиталних симулационих могућности можете:

- Предвидите и побољшајте перформансе и поузданост производа
- Смањите трошкове и скупе физичке прототипове и тестирање
- Процијените различите дизајне и материјале
- Оптимизујте свој дизајн и смањите употребу материјала

- CAD-Независност

FEMAP је независна од CAD-а и може приступити геометријским подацима из свих већих CAD система, укључујући CATIA, Pro/Engineer, NX, Solid Edge, SolidWorks и AutoCAD. Након увоза, можете припремити модел за анализу користећи локатор геометрије како бисте идентификовали и приказали потенцијално проблеме са проблемима, као што су траке и или их уклоните у потпуности помоћу алата за чишћење геометрије или их потисните. FEMAP такође нуди богато креирање и модификацију геометрије тако да можете направити потребне промене модела у припреми за креирање коначних елемената модела.[12]

- Моделирање крајњих елемената

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

FEMAP је потпуно изложен модел потпуног елемента са основним подацима који вам омогућавају да директно прегледате, креирате или модификујете ентитете. FEMAP алат за груписање, слојање и визуелизацију вам помаже да управљате приказом модела приликом креирања и подешавања модела коначних елемената. [12]

FEMAP укључује специјализоване могућности за помоћ у моделирању задатака, укључујући:

- Средње равномјерно уклањање структура танких зида како би се помогло стварању ефикаснијих и прецизних модела шкољки
- Моделирање заваривања које повезује дискретне чврсте заварене делове заједно у суседни модел
- Површине података које вам омогућавају да креирате сложене услове учитавања на основу претходне анализе излаза за апликације са више физичких апликација

- Коначни *Element Meshing*

Фемапова 3D чврста и површинска мрежа су подешена како би се произвели висококвалитетне мреже, пружајући добро обликоване елементе како би се обезбедили тачни резултати. FEMAP вам даје потпуну контролу над свим мрежним параметрима, укључујући величину мрежних очију, повезивање малих карактеристика, факторе раста, сузбијање кратких ивица итд. [12]

Са сложеном геометријом, често се захтева модификација мрежице у подручјима гдје је пожељна већа прецизност. За ову ситуацију, FEMAP Meshing Toolbok вам омогућава да интерактивно модификујете параметре величине мрежа на основној геометрији, а аутоматски видите ажурирање мреже. Такође можете прегледати повратне информације о квалитету елемената приликом модификације мреже, како бисте осигурали креирање висококвалитетног модела коначних елемената.

- Склопни *Modeling*

FEMAP са NKS Nastran подржава моделирање модела, укључујући аутоматско детекцију контакта који одређује компоненте које су у почетку у контакту. Контактни региони се могу поставити тако да буду једноставно у контакту (са или без трења) или залепљени заједно.

Контактне калкулације које је извршио НКС Настрани су итеративне и ажуриране током решења, узимајући у обзир промене деформације које представљају право контактано стање у коначним резултатима. Остале врсте технике за моделирање склопова компоненти које се такође подржавају укључују спот-заваривање, елементе за причвршћивање и причвршћене зглобове са опционалним пред-утоваром. [12]

- *Snop Modeling*

Поред модела чврстих и елемената љуске, FEMAP такође подржава моделирање снопова и повезивање. Ова техника дозвољава моделима који садрже дуге, витке компоненте (за које би приступ са чврстим везивањем могао створити велики, густ модел) који ће бити представљени једнодимензионалним елементима с повезаним својствима.

Визуализација модела је кључна за моделирање снопа, а са FEMAP можете видети ове елементе као чврсте компоненте и укључити офсетове. FEMAP садржи уређај власништва делова који укључује библиотеку стандардних облика попречног пресека. Такође можете да дефинишете своје одељке, а уграђени калкулатор имовине аутоматски одређује потребне особине. На располагању су и визуелизација пуне зрака и опције приказивања резултата, укључујући дијаграме чишћења и савијања.[12]

-Композитно моделирање

Употреба композитних материјала у дизајну се значајно повећала у последњих неколико година, а FEMAP вам може помоћи у моделирању и постпроцесу на композитним структурама. Са FEMAP -овим уређивачем ламината и гледаоцем, интерактивно можете ажурирати особине ламината док креирате и модификујете слојеве у ламинату.

Можете такође постпроцесирати композитне ламинатне резултате користећи Фемапову глобалну композитну пластику, која вам омогућава да прегледате резултате на непрекидним слојевима кроз структурни модел.[12]

- Solver Netural

Фемап је неутралан и пружа дубинску подршку за пре и постпроцесирање свих главних комерцијалних решења на тржишту, укључујући NX Nastran, Ansys, LS-DYNA, Abaqus и ТМГ. У потпуности можете искористити напредне могућности анализе ових решења користећи FEMAP-ову свеобухватну подршку за моделирање и анализу, посебно за динамичку, геометријску и материјалну нелинеарну, преносу топлоте и анализу тока флуида.[12]

- Пост обрада

Велико могућности визуализације помажу вам да прегледате и интерпретирате резултате како бисте брзо схватили понашање модела. Наћи ћете све што вам је потребно за приказ и интерпретацију излазних података, укључујући:[12]

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

- Контур и критеријуми
- Деформиране анимације облика
- Динамичко равно резање и изо-површина
- Пуни избор излаза
- KSI парцеле
- Слободне дијаграме тела и излазни баланс силе мреже
- Анимације временских и фреквентних домена

Комплетан приступ резултатима података се пружа преко окна Дата Табле, коју можете користити за сакупљање, сортирање и контролу количине и врсте података који су видљиви, како би се саставио извештај анализе.

- Скалабилна решења за симулацију

Производи серије Velociti CAE нуде скалабилна решења за инжењере дизајна у облику CAD-уграђеног програма Solid Edge Simulation и FEMAP са NKS Nastran за CAE аналитичаре. FEMAP са производном линијом НКС Настрани нуди сложеност решења, од општих симулационих могућности доступних у базном модулу до напредних апликација, укључујући динамику, оптимизацију, напредну нелинеарну, динамику ротора, пренос топлоте и проток флуида у додатним модулима.[12]

- Прилагођавање

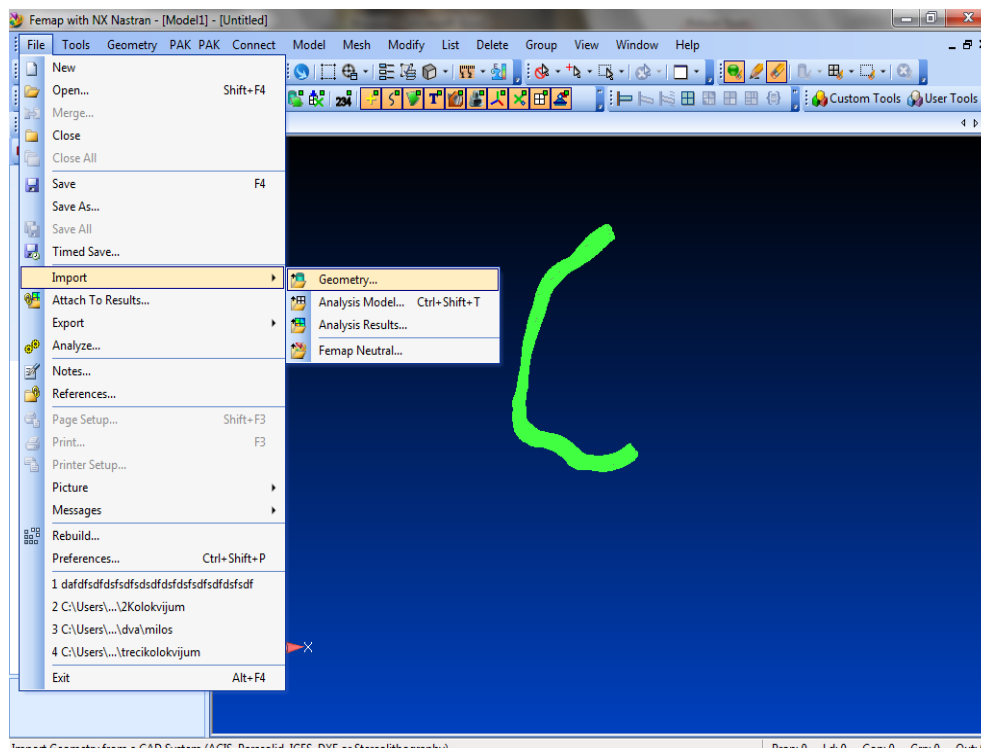
FEMAP-ова отворена могућност прилагођавања омогућава потпуни приступ свим FEMAP функцијама путем OLE / COM објектно-оријентисаног интерфејса за програмирање апликација (API), који користи стандардне, непрофитне програмске језике. Приступ API-у је кроз развојно окружење унутар корисничког интерфејса гдје можете креирати прилагођене програме који аутоматизују токове и процесе рада, а који могу интеракцију и размјену података с програмима независних произвођача као што су Microsoft Word и Excel.[12]

- Употребљивост

Фемап је интуитивна windows апликација. FEMAP-ова подршка вишеструких графичких прозора и специјалних панела, као што су Модел Info Tree и data table, омогућавају потпуни приступ моделу коначних елемената и резултата резултата и помажу у промовисању ефикасних радних токова. Изглед интерфејса можете изменити тако да одговара вашим захтевима, укључујући размаке репозиционирања, мењање нивоа изложености функционалности и комплетирање алатне траке и прилагођавања иконама.[12]

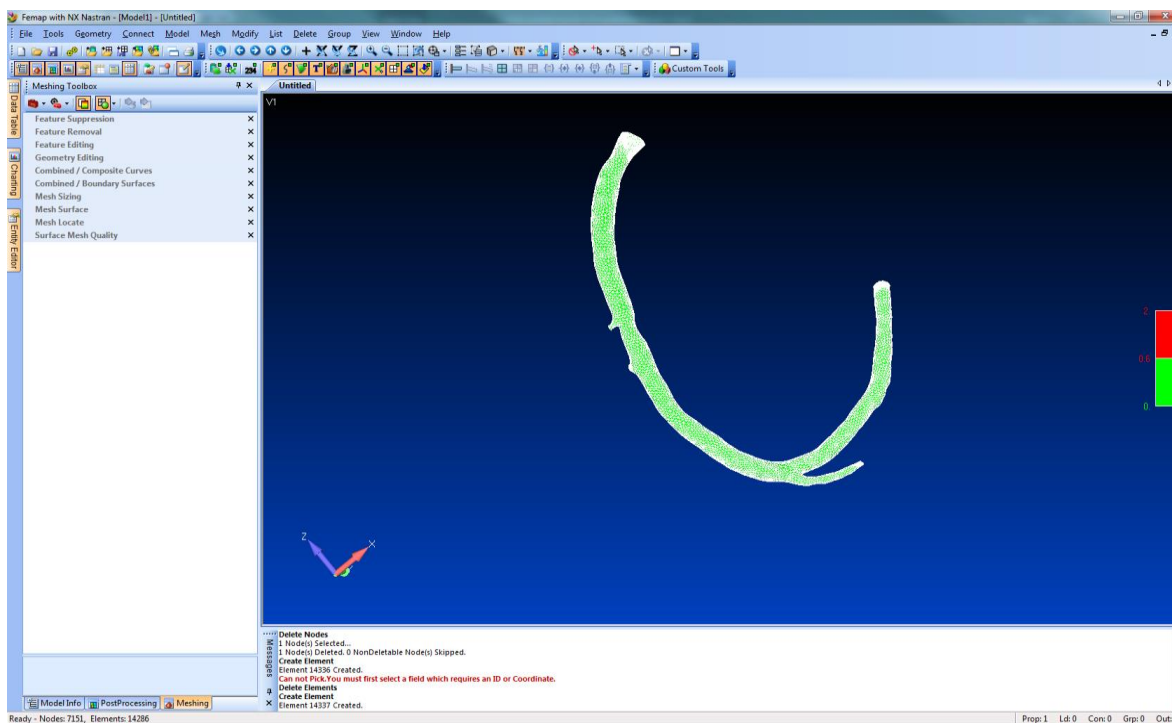
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Учитавање се врши кликом на *File – Import Geometry* (слика 24), где се селекује жељени STL фајл који је претходно експортован из Geomagicstudio софтвера. Након учитавања, потребно је кликнути у оквиру *Meshing Toolbox-a* на *Meshing Quality*, након чега модел добија изглед као на слици 25.



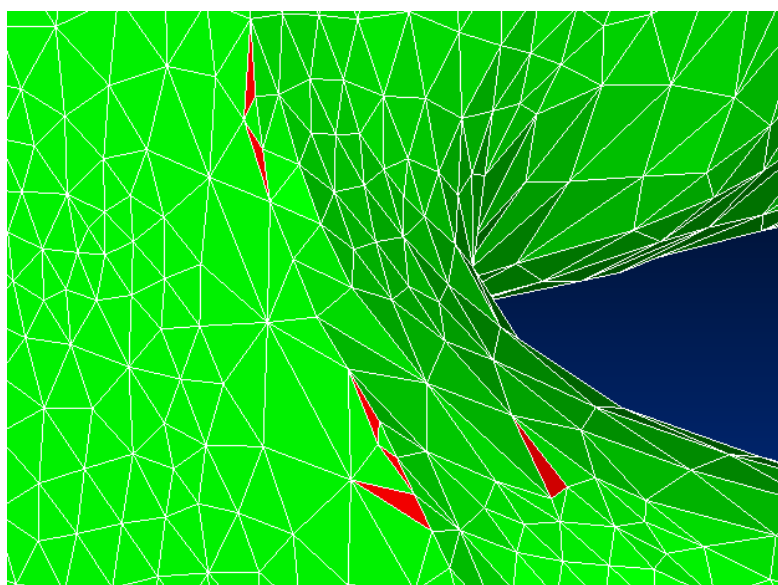
Слика 24 – Импортовање геометрије у фемп-и

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



Слика 25 - 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 26.

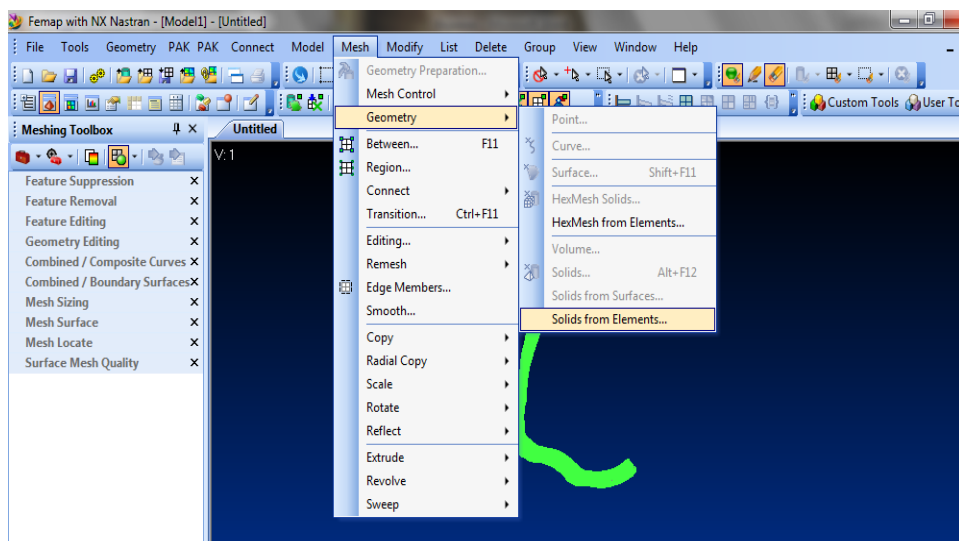


Слика 26 – Пример лоших троуглова на моделу

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

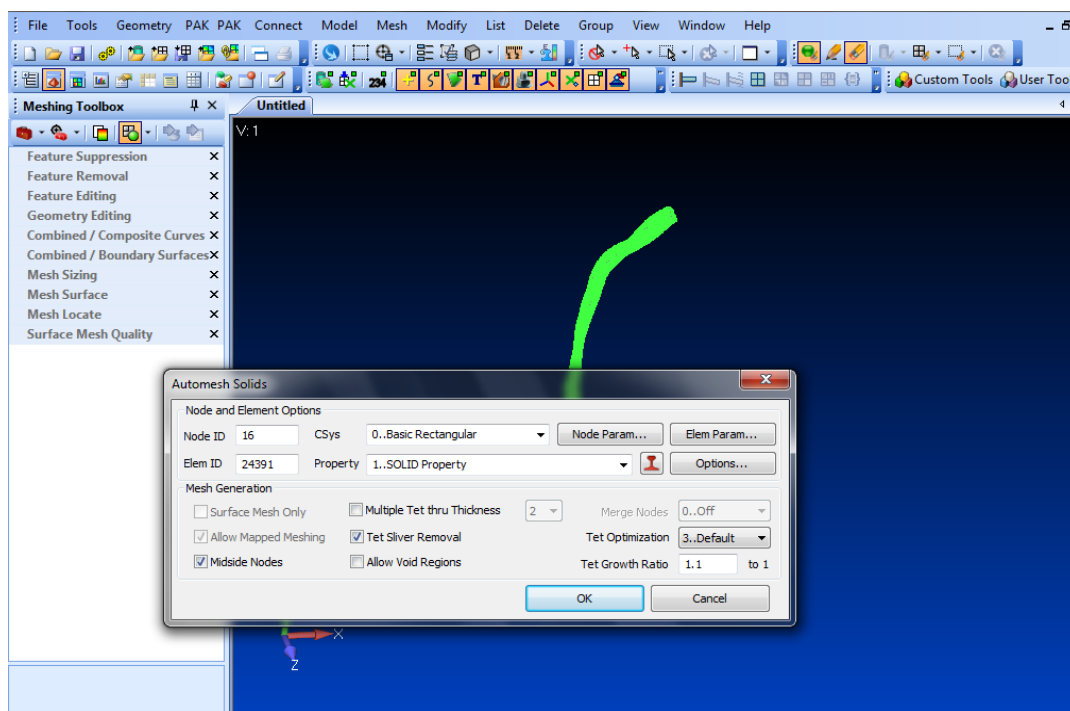
Затим је потребно урадити следеће:

1. Mesh – Geometry – Solids from Elements (слика 27)



Слика 27 – Први корак

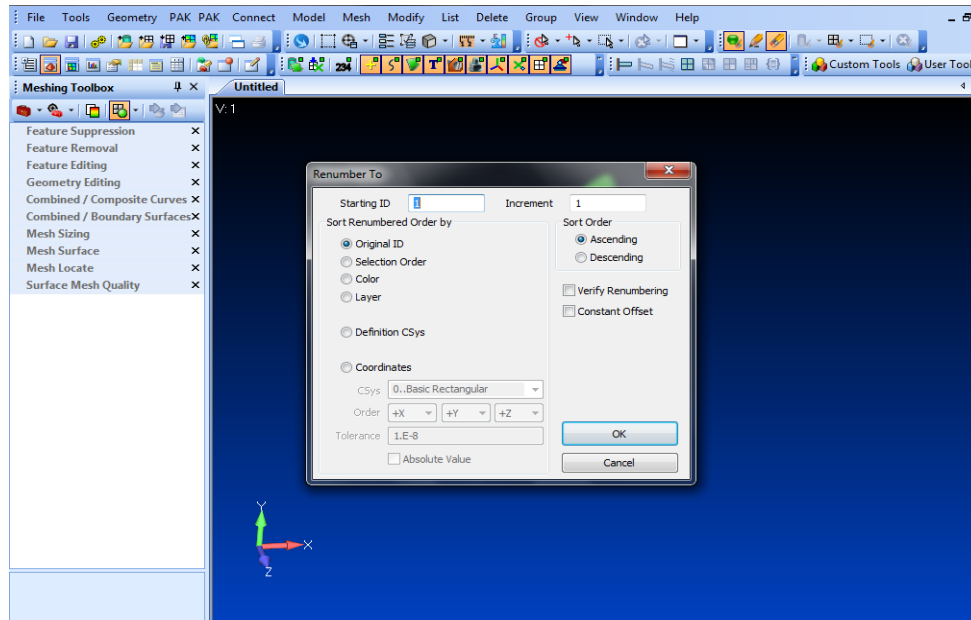
2. У картици Automesh Solid Искључити Midside nodes, И подесити Tet Growth Ratio: 1.5, Initial Size Ratio: 1 (Слика 28)



Слика 28 – Други корак

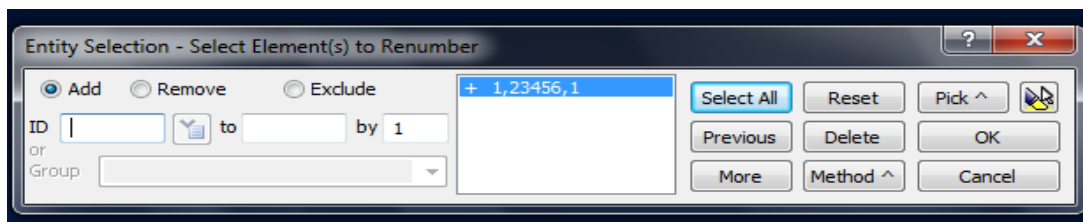
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

3. *Modify – Renumber – Node* –,select all и ок,да крене од 1 (Слика 29)

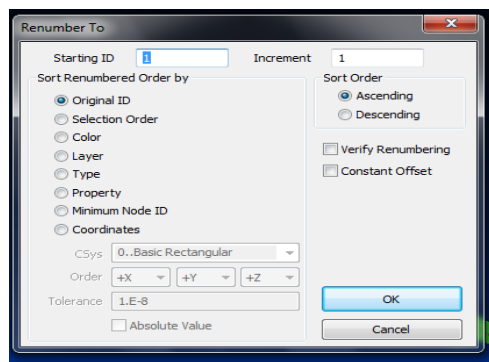


Слика 29 – Трећи корак

4. *Modify – Renumber – Element* –,select all и ок, да такође крене од 1 (Слика 30 и слика 31)



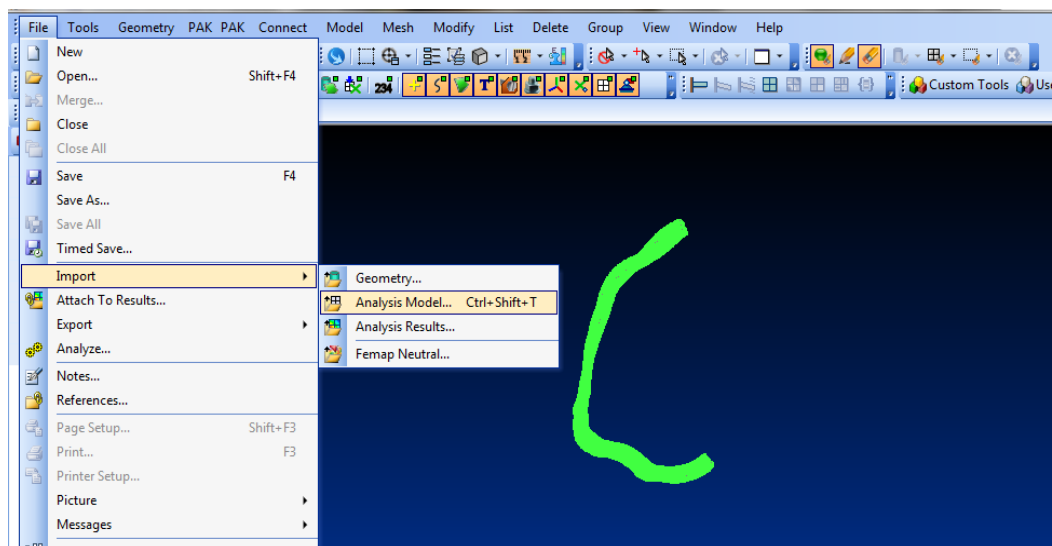
Слика 30 – Четврти корак



Слика 31 – Четврти корак

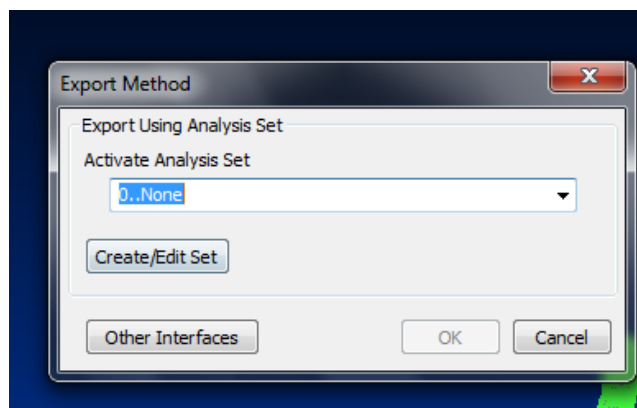
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

5. File – Export Analysis Model (Слика 32)



Слика 32 –Пети корак

6. Create/Edit Set (Слика 33)



Слика 33 – шести корак

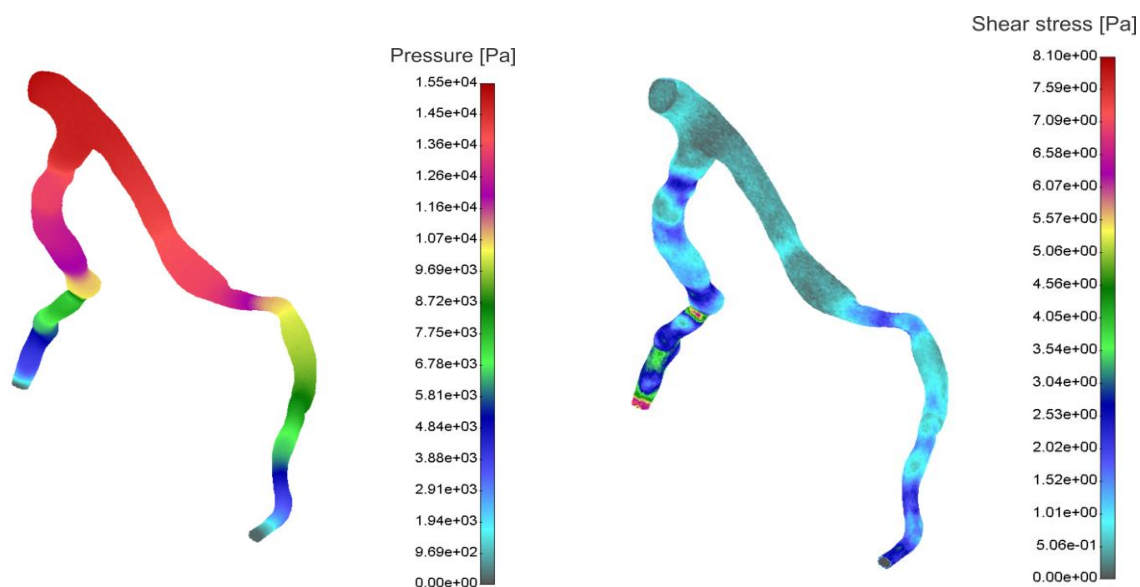
7. Ово се понавља за сваку геометрију, коронарну артерију пацијената, и екпортује се у .dat екстензију.

10. ПРИКАЗ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА СВИХ ПАЦИЈЕНАТА

У следећем кораку је симулиран један срчани циклус, пуштен је модел кроз симулацију и резултати су дати у трнутку максималног оптерећења односно када је брзина струјања у крви највећа.

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

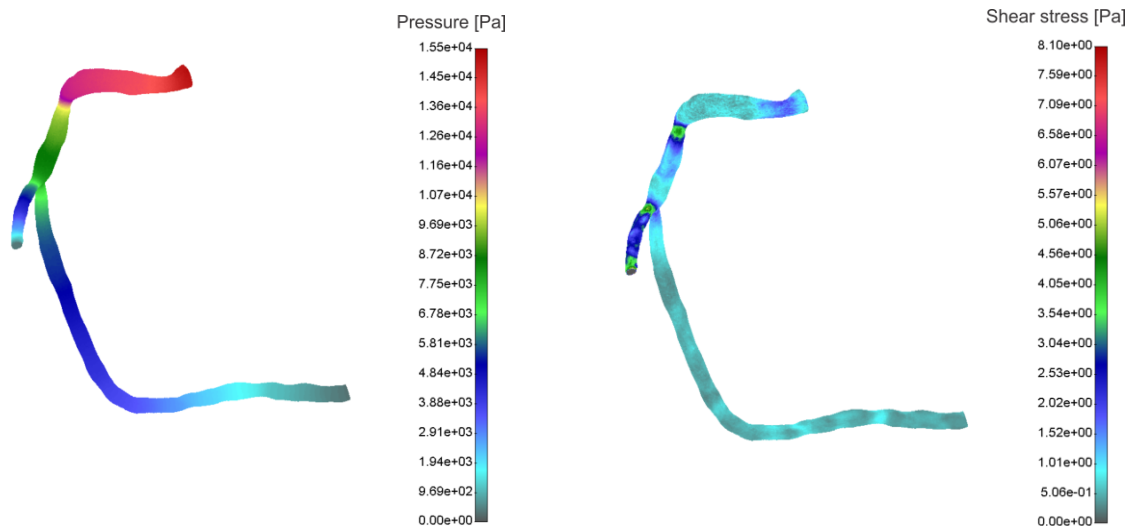
Резултати првог пацијента:



Слика 34 - Притисак леве коронарне артерије

Слика 35 - 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 1.45×10^4 Pa, на крајевима артерије је минималан од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 34. Док смичући напон је максималан при крају LCx артерије до 6.58×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 5.06×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 35.



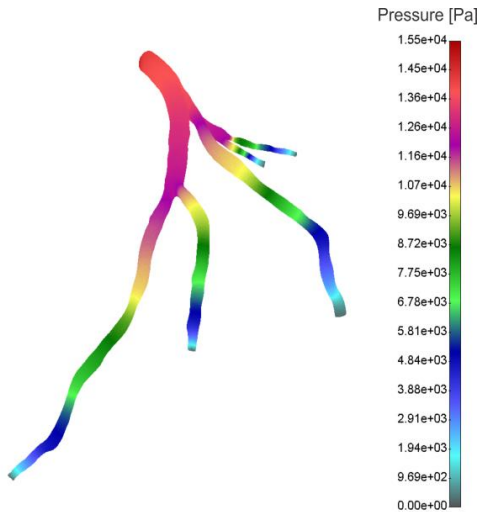
Слика 36 - Притисак десне коронарне артерије

Слика 37 - Смичући напон десне коронарне артерије

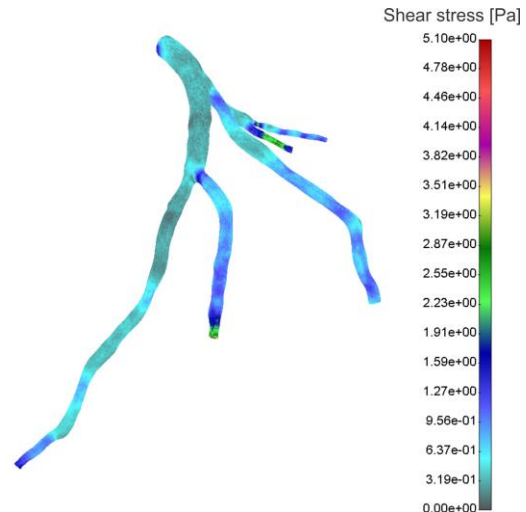
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Притисак је максималан на улазу RCA до $1.55\text{e}+04$ Pa, притисак опада и минималан је на крајевима артерије од $9.69\text{e}+02$ Pa до 0 Pa, слика 36. Максимални смичући напон је до $6.07\text{e}+00$ Pa, а минимални смичући напон је од $5.06\text{e}-01$ Pa до 0 Pa, слика 37.

Резултати другог пацијента:



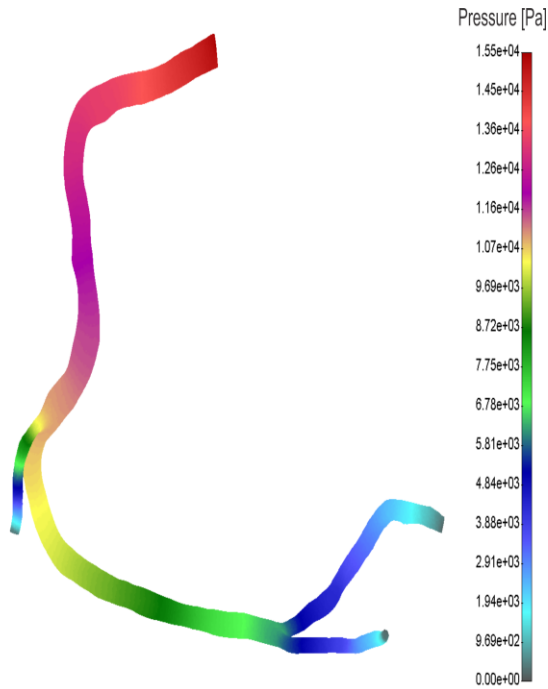
Слика 38 - Притисак леве коронарне артерије



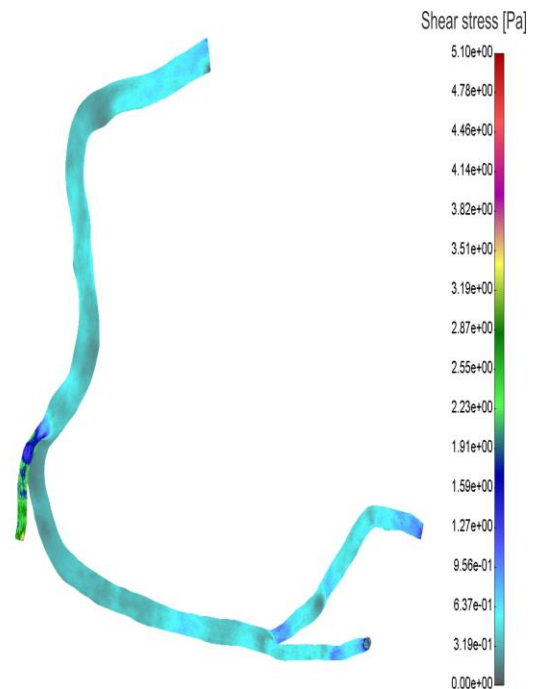
Слика 39 - Смичући напон леве коронарне артерије

Притисак је максималан на улазу LMCA артерије до $1.55\text{e}+04$ Pa, на почетку грана LAD и LCx је до $1.26\text{e}+04$ Pa, на крајевима артерије је минималан од $9.69\text{e}+02$ Pa до 0 Pa, слика 38. Док смичући напон је максималан при крају LCx артерије до $2.87\text{e}+00$ Pa и крајевима LAD артерије до $2.87\text{e}+00$ Pa, а минимални смичући напон је од $3.19\text{e}-01$ Pa до 0 Pa, слика 39.

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



Слика 40 - Притисак десне коронарне артерије

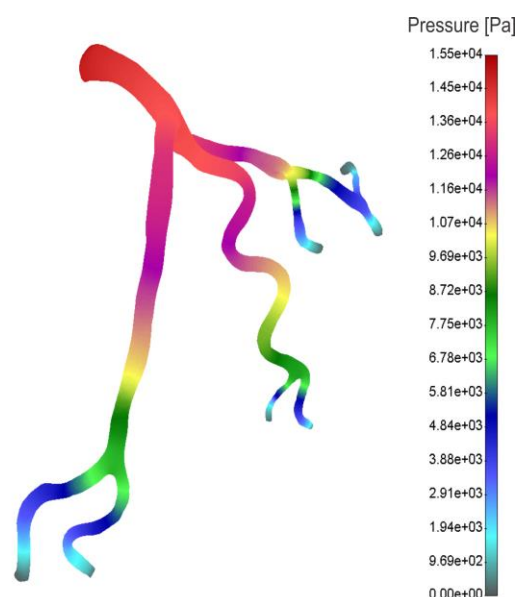


Слика 41 - Смичући напон десне коронарне артерије

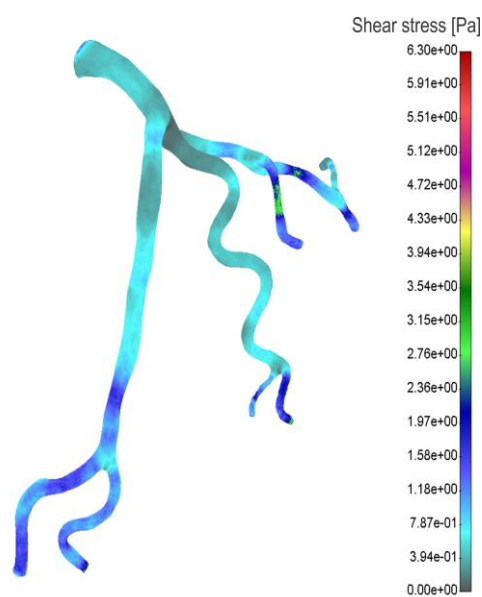
Са слике 40 се види да је највећи притисак на улазу RCA артерије до 1.55×10^4 Pa, Притисак опада како се крв одаљава. Док смичући напон је максималан при крају RCA артерије до 3.51×10^0 Pa. А минималан у осталим деловима артерије од 3.19×10^{-1} Pa до 0 Pa. Слика 41.

Резултати трећег пацијента:

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

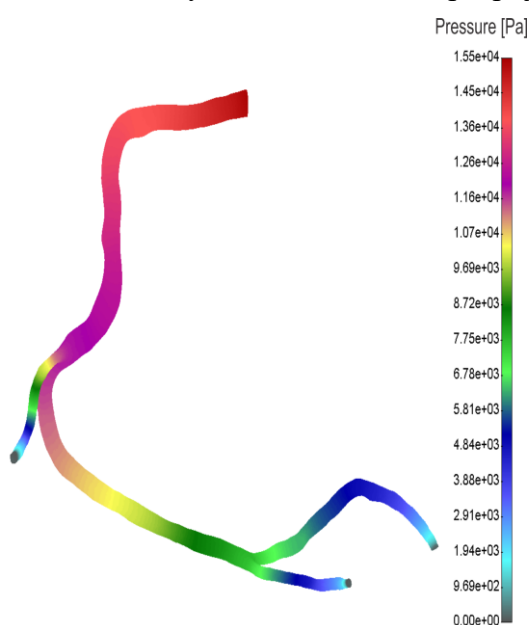


Слика 42 - Притисак леве коронарне артерије

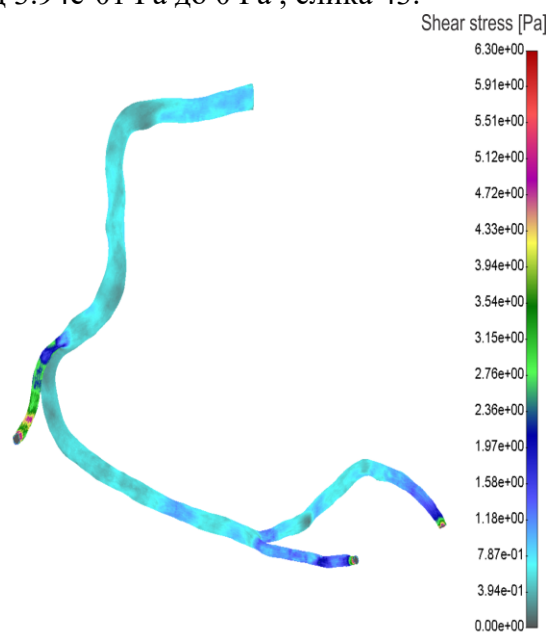


Слика 43 - Смичући напон леве коронарне артерије

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 42. Максимални смичући напон LMCA артерије је, 3.54×10^0 Pa а минимални смичући напон LMCA артерије је од 3.94×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 43.



Слика 44 - Притисак десне коронарне артерије

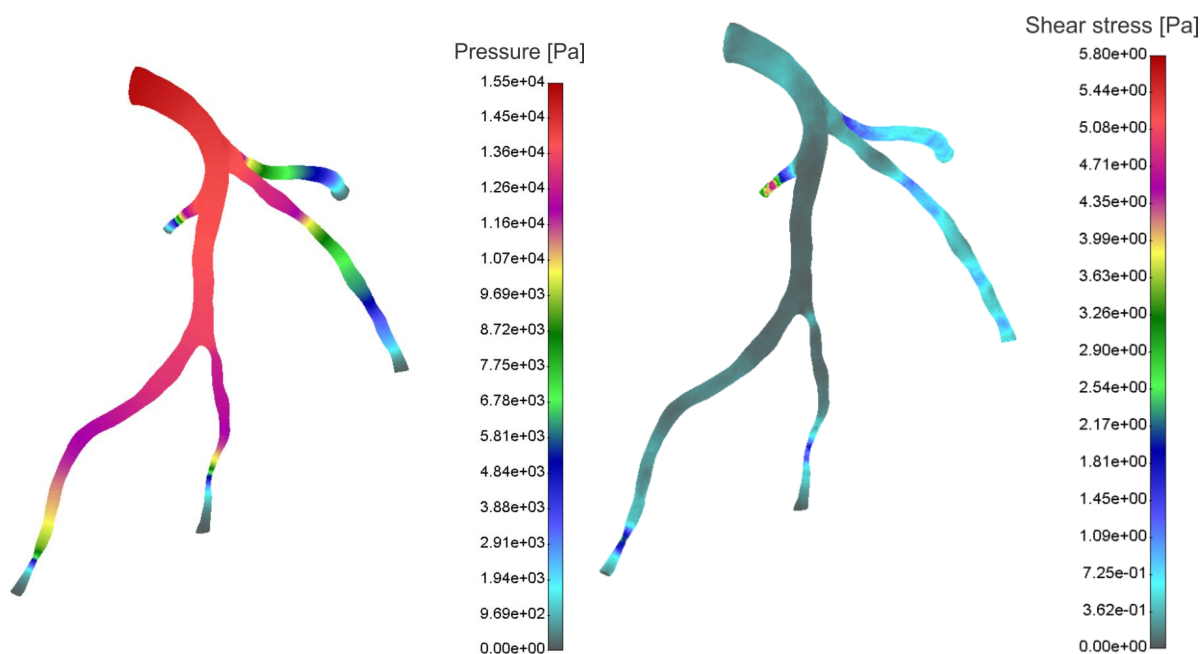


Слика 45 - Смичући напон десне коронарне артерије

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Максимални притисак који достиже до 1.55×10^4 Pa је на улазу RMD артерије, притисак опада и минималан је на крајевима артерије од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 44. Смичући напон је максималан на крајевима RMD артерије до 5.12×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.94×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 45.

Резултати четвртог пацијента:

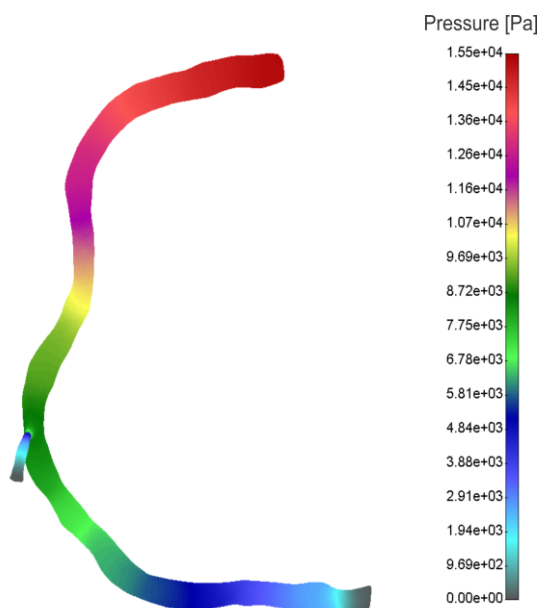


Слика 46 - Притисак леве коронарне артерије

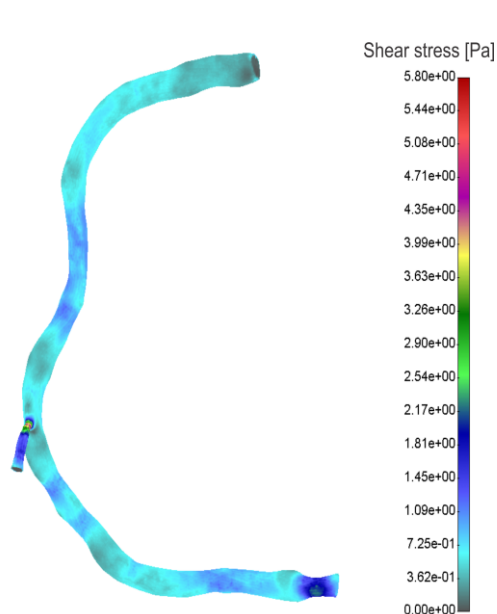
Слика 47 - Притисак леве коронарне артерије

На улазу LMCA артерије највећи притисак је до 1.55×10^4 Pa, на почетку грана LAD и LCx је до 1.36×10^4 Pa, на крајевима артерије је минималан од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 46. Смичући напон је максималан при крајевима LAD артерије до 5.44×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.62×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 47.

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



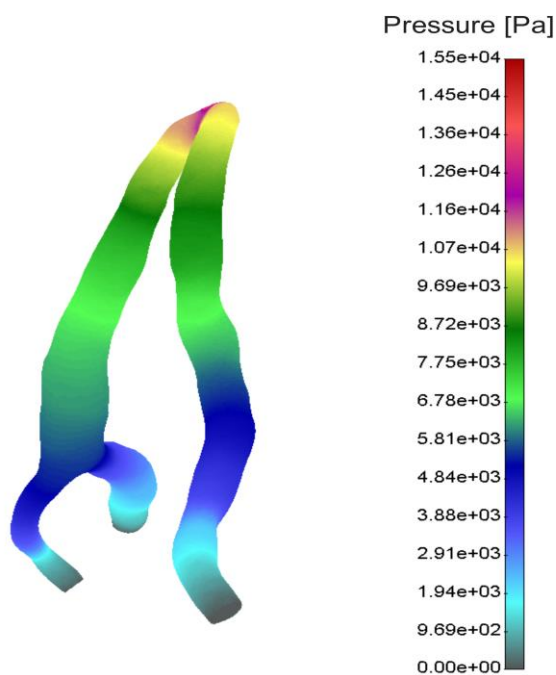
Слика 48 - Притисак десне коронарне артерије



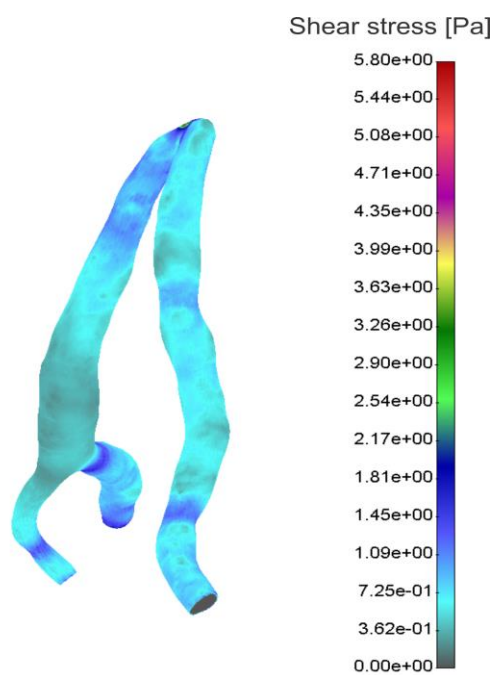
Слика 49 - Смичући напон десне коронарне артерије

Притисак је максималан на улазу RCA до 1.55×10^4 Pa, притисак опада и минималан је на крајевима артерије од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 48. Максимални смичући напон је до 5.08×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.62×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 49

Резултати петог пацијента:



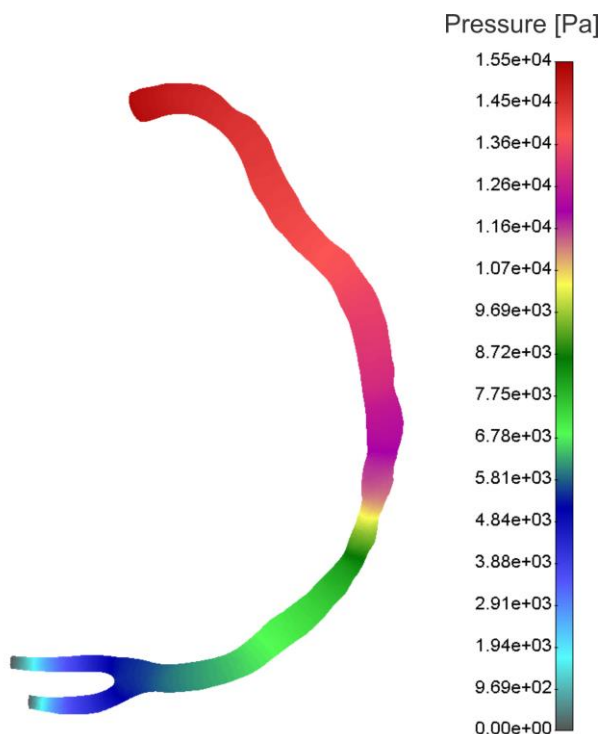
Слика 50 - Притисак леве коронарне артерије



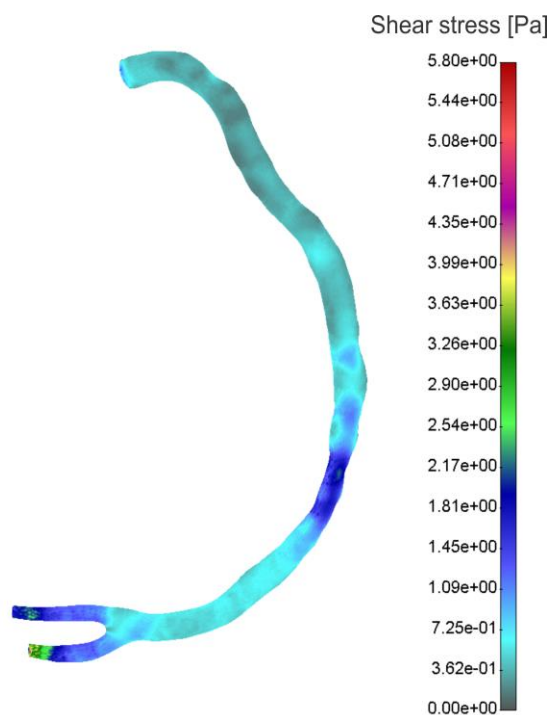
Слика 51 - Притисак леве коронарне артерије

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Притисак је максималан на улазу LMCA артерије до 1.55×10^4 Pa, на почетку грана LAD и LCx је до 1.07×10^4 Pa, на крајевима артерије је минималан од 9.69×10^2 Pa до 0 Pa, слика 50. Док смичући напон је максималан на почетку артерије до 2.90×10^0 , а минимални смичући напон је од 3.62×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 51.



Слика 52 - Притисак десне коронарне артерије



Слика 53 - 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 52. Смичући напон је максималан на крају артерије RMD до 3.99×10^0 Pa, а минимални смичући напон је од 3.62×10^{-1} Pa до 0 Pa, слика 53.

11. FFR (Fractional Flow Reserve)

FFR (Fractional Flow Reserve) је техника која се користи у коронарној катетеризацији за мерење притиска у стенозама коронарне артерије (сужавање, обично због атеросклерозе) како би се утврдила вероватноћа да стеноза отежава испоруку кисеоника срчаним мишићима (миокардна исхемија).

FFR је нови и потенцијално клинички корисни математички модел за процену атеросклерозе стенозске коронарне артерије. Резервоар фракционог тока је дефинисан као притисак након (дисталне) стенозе у односу на притисак пре стенозе. Резултат је апсолутни број; FFR од 0,80 значи да одређена стеноза узрокује пад од 20% крвног

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

притиска. Другим речима, FFR изражава максимални проток крви у присуству стенозе у поређењу са максималним протоком у хипотетичком одсуству стенозе. [13]

Током коронарне катетеризације, катетер се убацује у феморалну или радијалну артерију (зглоб) користећи плашт и жицу. FFR користи мали сензор на врху жице (обично претварач) за мерење притиска, температуре и протока да би се утврдила тачна тежина лезије. Ово се ради током максималног протока крви (хиперемија), који се може индуковати производима који убризгавају, као што су аденозин или папаверин. Изводи се повлачење жице притиска, а притисци се снимају преко пловила. [13]

FFR је однос максималног протока крви дистално до стенозске лезије до нормалног максималног протока у истом суду. Израчунава се помоћу односа притиска:

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} \quad p_d - \text{притисак после стенозе, } p_a - \text{притисак пре стенозе}$$

Одлука да се изведе перкутана коронарна интервенција (PCI) обично се темељи само на ангиографским резултатима. Ангиографија се може користити за визуелну процену унутрашњег пречника посуде. Код исхемијске болести срца, одлучивање о томе које сужавање је кривична лезија није увек јасна. Резервоар фракционог тока обезбеђује функционалну евалуацију мерењем опадања притиска узрокованог сужавањем артерије.

FFR има одређене предности у односу на друге технике за процену сужених коронарних артерија, као што су коронарна ангиографија, интраваскуларни ултразвук или СТ коронарна ангиографија. На пример, FFR узима у обзир ток колатерала, који може анатомско блокирати функционално небитно. Такође, стандардна ангиографија може подценити или преценити сужавање, јер само визуализује контраст унутар артерије. [13]

Остале технике такође могу пружити информације које FFR не може. Интраваскуларни ултразвук, на пример, може пружити информације о рањивости плака, док мере FFR одређују само дебљина плака.

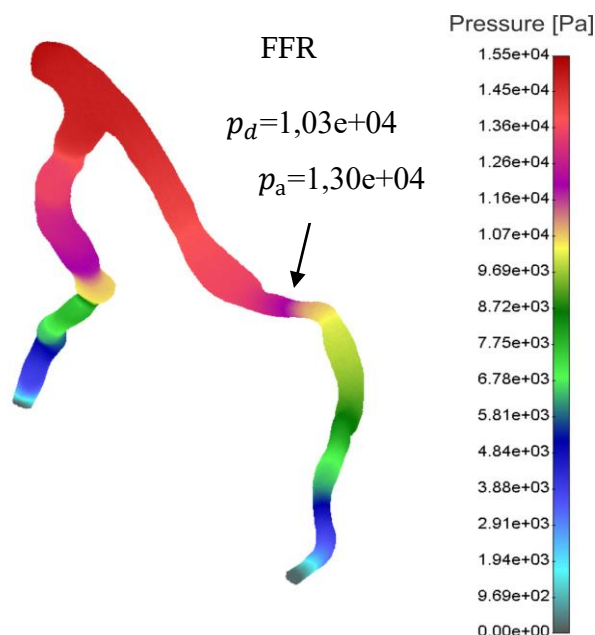
FFR омогућава у реалном времену процјену ефеката суженог пловила и омогућава истовремени третман дилатацијом и стентовањем балона. С друге стране, FFR је инвазивна процедура за која постоје неинвазивне (мање драстичне) алтернативе, као што је тестирање срце на стрес. [13]

11.1 Рачунање притиска на местима где се појављује стеноза на коронарним артеријама пацијената

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} \quad p_d - \text{притисак после стенозе, } p_a - \text{притисак пре стенозе}$$

Рачунање притисак првог пацијента на месту сужења, стенозе:

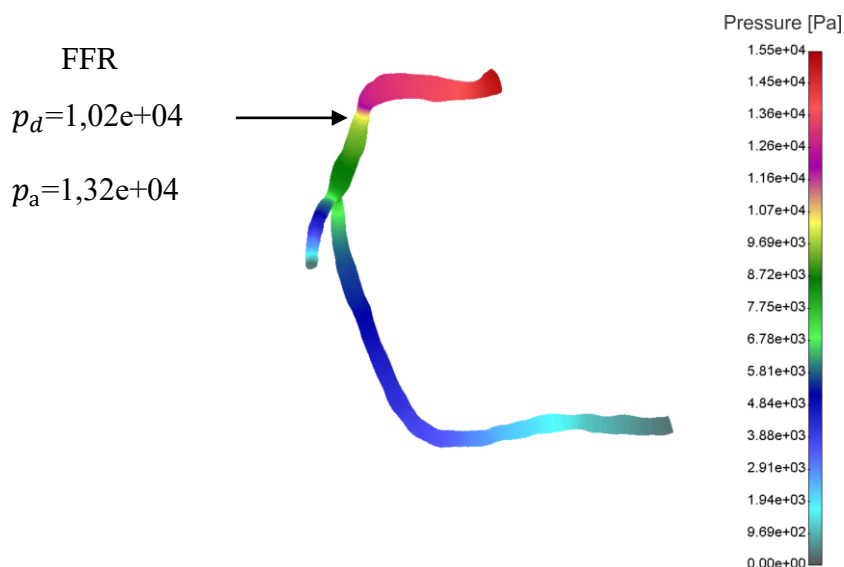
Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима



Слика 54 - FFR на левој коронарној артерији првог пацијента

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,03e+04 / 1,30e+04 = 0,79$$

FFR (Слика 1) од 0,79 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 79% онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална, а његова нормална вредност је од 1 до 0, без обзира на пацијента, артерију, крвни притисак и тако даље. Мерење FFR -а је независно од промена системског крвног притиска, срчане фреквенце или миокардне контрактилности и врло је поновљиво.

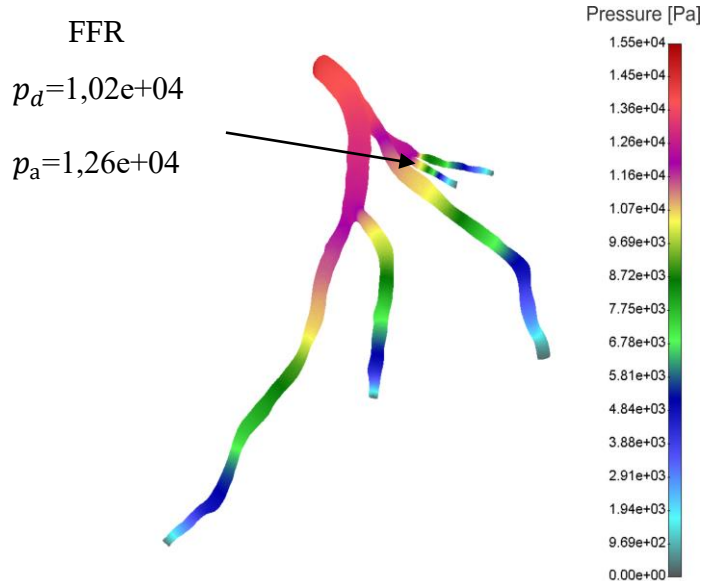


Слика 55 - FFR на десној коронарној артерији првог пацијента

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,02e+0,4 / 1,32e+0,4 = 0,72$$

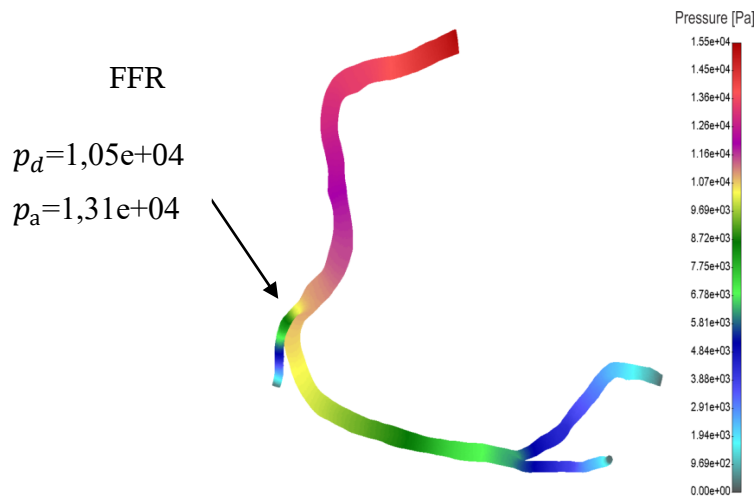
FFR (Слика 55) од 0,77 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 77% онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална, а његова нормална вредност је 1 без обзира на пацијента, артерију, крвни притисак и тако даље.



Слика 56 - FFR на левој коронарној артерији другог пацијента

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,02e+0,4 / 1,26e+0,4 = 0,80$$

FFR (Слика 56) од 0,80 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 80 % онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална.

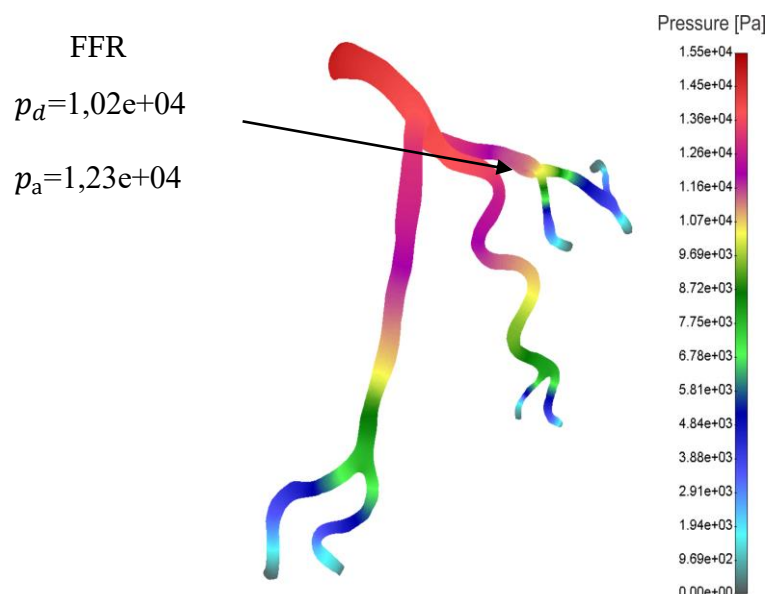


Слика 57 - FFR на десној коронарној артерији другог пацијента

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,05e+0,4 / 1,31e+0,4 = 0,80$$

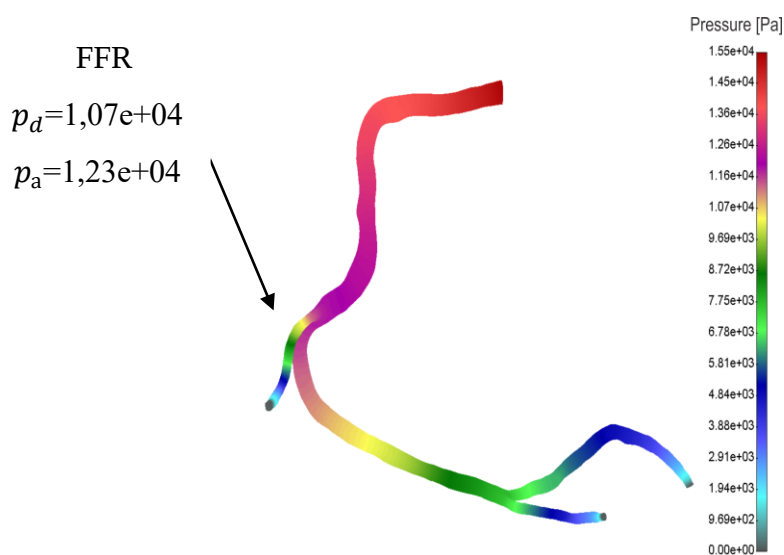
FFR (Слика 57) од 0,80 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 80 % онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална.



Слика 58 - FFR на левој коронарној артерији трећег пацијента

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,02e+0,4 / 1,23e+0,4 = 0,82$$

FFR (Слика 58) од 0,82 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 82 % онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална.

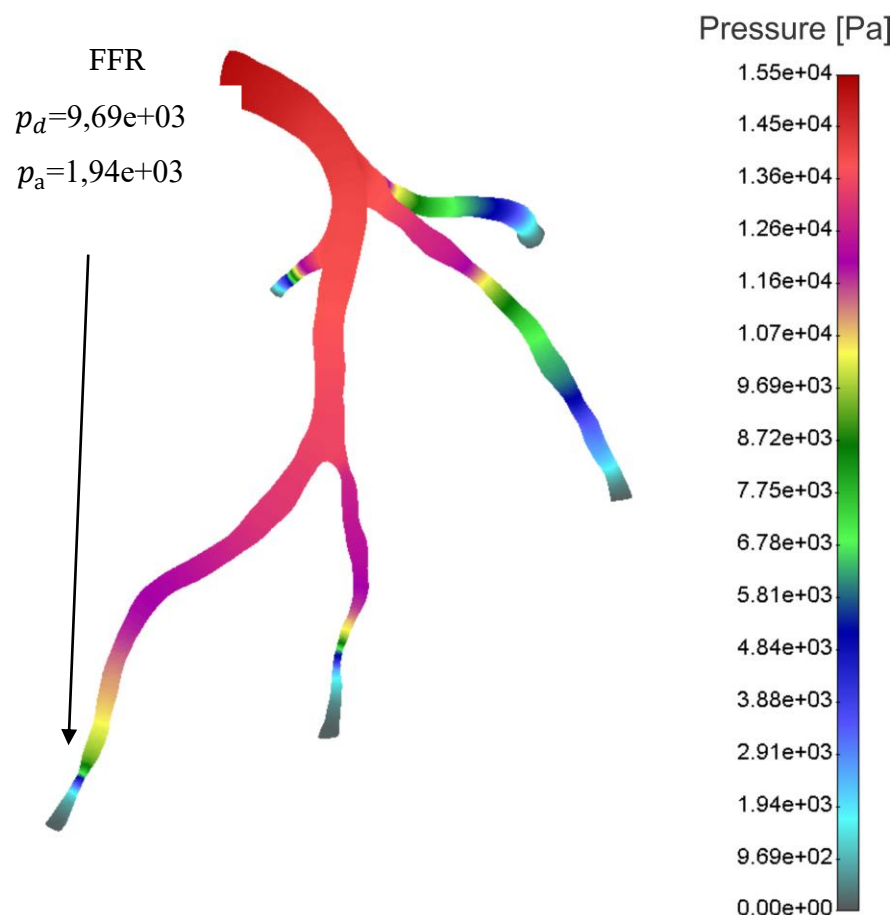


Слика 59 - FFR на десној коронарној артерији трећег пацијента

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,07e+0,4 / 1,23e+0,4 = 0,86$$

FFR (Слика 59) од 0,86 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 86 % онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална.



Слика 60 - FFR на левој коронарној артерији четвртог пацијента

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,94e+0,3 / 9,69e+0,3 = 0,20$$

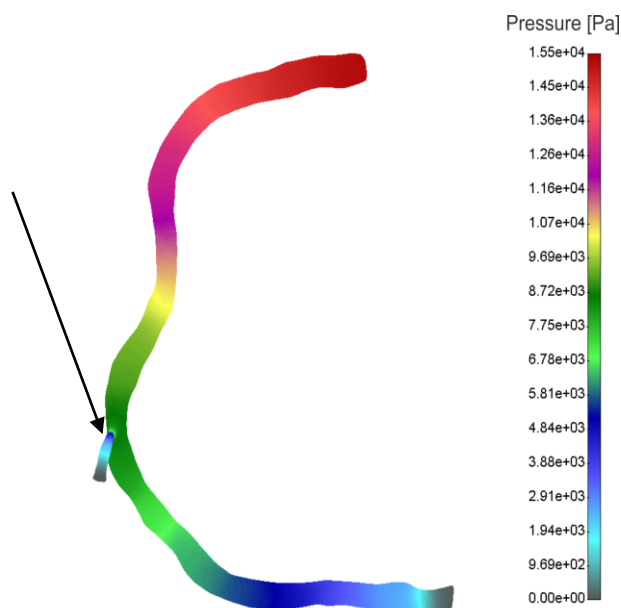
FFR (Слика 60) од 0,20 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 20 % онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална.

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

FFR

$$p_d = 6,78e+03$$

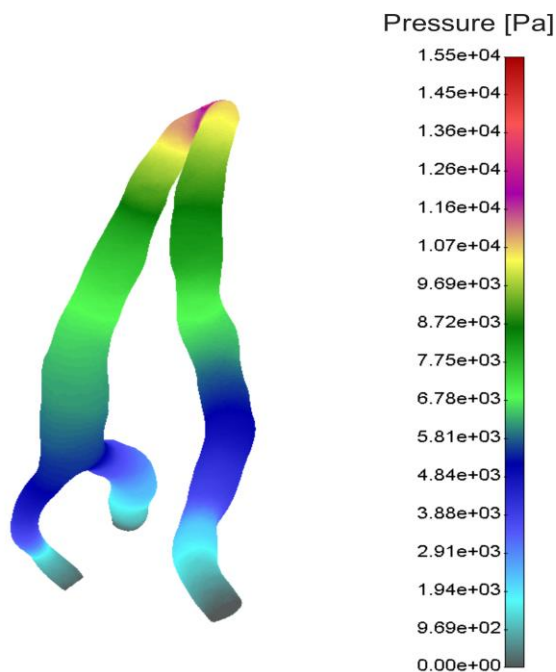
$$p_a = 1,94e+03$$



Слика 61 - FFR на десној коронарној артерији четвртог пацијента

$$FFR = \frac{p_d}{p_a} = 1,94e+03 / 6,78e+03 = 0,28$$

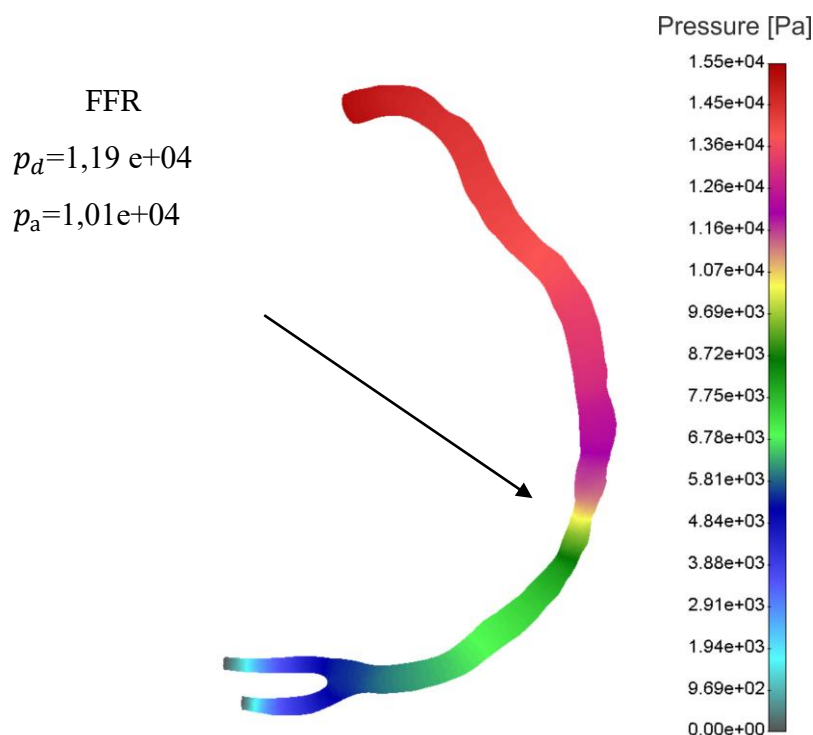
FFR (Слика 61) од 0,28 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 28% онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална.



Слика 62 - FFR на левој коронарној артерији петог пацијента

Биомеханичка анализа коронарних артерија на реалним пацијентима

Лева коронарна артерија петог пацијента не садржи превелико сужење сужење или стенозу (Слика 62). Па нема потребе за рачунањем FFR-а.



Слика 62 - FFR на десној коронарној артерији петог пацијента

$$\text{FFR} = \frac{p_d}{p_a} = 1,01 \text{ e}+03 / 1,19 \text{ e}+03 = 0,84$$

FFR (Слика 62) од 0,84 значи да максимални проток крви (и снабдевање кисеоником) са миокардном дистрибуцијом одговарајуће артерије достиже 84% онога што би било ако би та артерија била потпуно нормална.

12. ЗАКЉУЧАК

У овом задатку је направљена компилација више софтвера као што су Mimics-a који је коришћен за добијање модела, затим Geomagic за сређивање добијеног модела и FEMAP-a који је коришћен за симулацију и добијање резултата и приказ оптерећења коронарних артерија.

Анализом код свих пет пацијената дала нам је резултате расподеле притиска и смичућег напона. На крају можемо закључити да је притисак 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. Регије са најмањим смицајним напоном јесу регије са развијеним плаком.

Ове технологија је широко применљива у образовним институцијама и истраживачким и развојним центрима, тако да се очекује њен даљи развој посто број оболелих пацијената је у константном порасту.

13. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://sh.wiktionary.org/wiki/bioin%C5%BEenjerstvo>
- [2] <http://www.stetoskop.info/Lekovi-za-bolesti-srca-i-krvnih-sudova-b13-bs102-p0-book.htm>
- [3] <https://sr.wikipedia.org/sr/%D0%9A%D1%80%D0%B2>
- [4] https://bs.wikipedia.org/wiki/Krvni_sud
- [5] <http://www.stetoskop.info/Arterijska-hipertenzija-Povisen-krvni-pritisak-586-c29-sickness.htm>
- [6] <https://riznica.wordpress.com/2009/08/02/sta-su-arterije-vene-i-kapilari/>
- [7] <http://www.kardiologija.in.rs/Bolesti%20aorte.htm>
- [8] http://www.kardiologija.in.rs/fiziologija_srca.htm
- [9] <http://www.ikvbd.com/za-bolesnike/opste-informacije/koronarna-bolest/>
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Mimics>
- [11] <https://www.3dsystems.com/press-releases/geomagic/announces-studio-2013>
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Femap>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Fractional_flow_reserve