

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Љубица М. Милановић

**ПРОВЕРА БИОМЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ПРЕ- И
ПОСТОПЕРАТИВНИХ МОДЕЛА АКУТНЕ ДИСЕКЦИЈЕ
АОРТЕ ПРИ НОРМАЛНОМ КРВНОМ ПРИТИСКУ**

завршни рад

Крагујевац, 2020.

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање

Предмет: Основи биоинжењеринга

Број индекса: 41/2017

Љубица М. Милановић

**ПРОВЕРА БИОМЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ПРЕ-
И ПОСТОПЕРАТИВНИХ МОДЕЛА АКУТНЕ ДИСЕКЦИЈЕ
АОРТЕ ПРИ НОРМАЛНОМ КРВНОМ ПРИТИСКУ**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Ненад Филиповић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Опише анатомију, хистологију и физиологију аорте, у кратким цртама;
- Представи и објасни појам и настанак дисекције аорте;
- Наведете методе дијагностиковања и лечења дисекције аорте, уз кратак опис претходних истраживања;
- Објасни поступак генерисања модела и рачунарске симулације;
- Уради анализу добијених резултата.

Препоручена литература:

- [1] **Филиповић Н**, “Основи биоинжењеринга”, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2012.
- [2] **A. C. Guyton and J. E. Hall**, “Textbook of Medical Physiology”, Philadelphia, 2011, 12. издање
- [3] <https://www.materialise.com/en/medical/mimics-innovation-suite/mimics>
- [4] PAKF – Program for fluid dynamics simulation, **Filipovic et al**
[<http://www.bioirc.ac.rs/index.php/software/5-pak>]

Крагујевац, 2020

Ментор:
Др Ненад Филиповић, ред. проф

РЕЗИМЕ

Аорта је главни и највећи крвни суд у телу. Излази директно из срца и даје гране које хране срце (*коронарне артерије*), затим крвне судове који допремају крв у главу и руке, да би се потом спустила ка стомаку и доњим екстремитетима. Подељена је у анатомском смислу на узлазну аорту, лук аорте и нисходну грудну аорту која на нивоу дијафрагме постаје стомачна аорта. Зид аорте се састоји од три главна слоја: *tunica intima*, *tunica media* и *tunica adventitia*.

Дисекција аорте је руптура слоја интима са последичним раслојавањем њеног зида преусмереном крвном струјом, при чему долази до формирања лажног лумена у неком од слојева медије са компромитовањем протока крви кроз прави лумен аорте и опструкцијом протока крви кроз њене бочне гране. Акутна дисекција аорте је ургентно хируршко стање које са собом носи веома висок морталитет.

Као додатна помоћ лекарима развијене су рачунарске методе за испитивање дисектиране аорте и других њених болести, засноване на методи коначних елемената као и методи динамике флуида.

У раду су реконструисани тродимензионални модели дисектиране аорте добијене на основу СТ снимака пацијента пре и после операције и испитиване су биомеханичке карактеристике модела (притисак, смичући напони и брзина протока крви).

Коришћени програми за моделирање аорте били су: “Materialise Mimics”, “Geomagic Studio” и “Simens Femap”. “Materialise Mimics” служио је да се из 2D СТ снимака добије 3D модел дисектиране аорте. Финија обрада модела урађена је у програмима “Geomagic Studio” и “Simens Femap”. “Geomagic Studio” служио је да се среди површинска мрежа троугаоних коначних елемената, док је програм “Simens Femap” коришћен како би указао на места са неправилном геометријом. Након обраде и креирања 3D модела, пуштен је прорачун у програму ПАКФ.

Закључак је, на основу анализе добијених резултата, да је дошло до повећања притиска и боље функције аорте, што доприноси побољшању општег стања пацијента након операције.

Кључне речи: акутна аортна дисекција, операција, рачунарска динамика флуида

ABSTRACT

Aorta is the main and the biggest blood vessel in a body. It comes directly from the heart and makes branches that nourish the heart (coronary arteries), then blood vessels that supplies blood to the head and arms and finally it goes down to the stomach and lower limbs. Anatomically, it is divided into ascending aorta, aortic arch and descending chest aorta which, at the level of diaphragm, becomes stomach aorta. The wall of the aorta consists of three major layers: *tunica intima*, *tunica media* and *tunica adventitia*.

The dissection of the aorta is a rupture of the *intima* with the result of its wall's stratification by redirected blood stream in the process of which there is a formation of false lumen in some of the layers of *media* with comprising of blood flow through actual aortic lumen and the obstruction of blood flow through its lateral branches. An acute dissection of aorta is an urgent surgical condition which by itself causes a high mortality rate.

As an additional help to doctors, computer methods have been developed for examination of dissected aorta and its other diseases, based on the method of final elements as well as the method of fluid dynamics.

In this study three-dimensional models of dissected aorta have been reconstructed, given by CT recording of the patients, before and after the operation and tested bio-mechanic characteristics of the models (pressure, shearing tension and blood flow speed).

The programmes used for modeling of aorta were: "Materialise Mimics", "Geomagic Studio" and "Simens Femap". "Materialise Mimics" served to get 3D model of dissected aorta out of 2D CT record. A more fine interpretation of the model was done in programmes "Geomagic Studio" and "Simens Femap". "Geomagic Studio" served to arrange the surface net of triangular final elements, while programme "Simens Femap" was used to indicate places with irregular geometry. After processing and the creation of 3D model a calculation in PAKF programme was put into operation.

The conclusion, according to the analysis of the obtained results, is that there was an increase in pressure and a better function of aorta, which contributes to the improvement of the general condition of the patients after the operation.

Key words: acute aorta dissection, operation, computer fluid dynamics

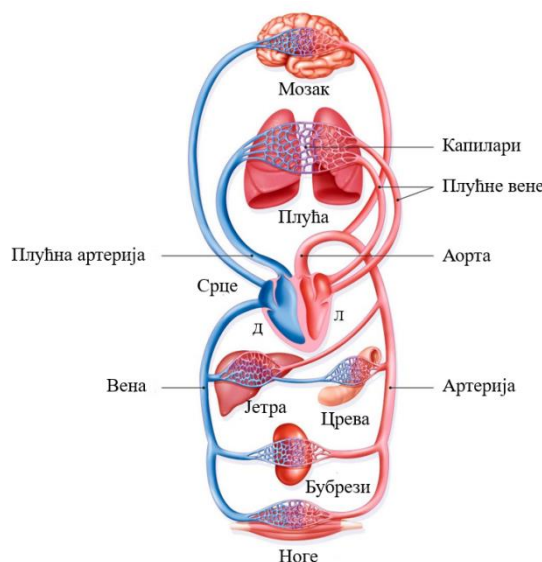
САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. КАРАКТЕРИСТИКЕ АОРТЕ	3
2.1. АНАТОМИЈА АОРТЕ.....	3
2.1.1. Узлазна аорта.....	3
2.1.2. Аортни лук.....	3
2.1.3. Силазна грудна аорта.....	4
2.1.4. Абдоминална аорта.....	4
2.2. ХИСТОЛОГИЈА АОРТЕ	5
2.3. ФИЗИОЛОШКА УЛОГА АОРТЕ.....	6
3. ПОЈАМ И НАСТАНАК ДИСЕКЦИЈЕ АОРТЕ.....	7
3.1. МЕТОДЕ ДИЈАГНОСТИКОВАЊА	9
3.1.1. Ехокардиографија	9
3.1.2. Компјутерска томографија са појачаним контрастом (СТ)	10
3.1.3. Магнетна резонанца (MRI)	11
3.2. МЕТОДЕ ЛЕЧЕЊА	11
4. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ НУМЕРИЧКИХ АНАЛИЗА ДИСЕКЦИЈЕ АОРТЕ	13
5. ГЕНЕРИСАЊЕ МОДЕЛА.....	19
5.1. РЕКОНСТРУКЦИЈА 3D ГЕОМЕТРИЈЕ НА ОСНОВУ 2D СЛИКА (MIMICS).....	19
5.2. МОДЕЛИРАЊЕ ФИНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ ПОВРШИНСКИХ 3D МОДЕЛА (GEOMAGIC).....	23
5.3. ГЕНЕРИСАЊЕ ЗАПРЕМИНСКИХ 3D МОДЕЛА.....	25
6. РАЧУНАРСКА СИМУЛАЦИЈА	26
6.1. ГРАНИЧНИ УСЛОВИ И МАТЕРИЈАЛНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ	26
7. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	27
7.1. РЕЗУЛТАТИ КРВНОГ ПРИТИСКА ПРЕ И ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЈЕ	27
7.2. СМИЧУЋИ НАПОНИ НА ЗИДОВИМА АОРТЕ ПРЕ И ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЈЕ.....	28
7.3. БРЗИНЕ ПРОТОКА КРВИ КРОЗ АОРТУ ПРЕ И ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЈЕ	31
8. ЗАКЉУЧАК	32
9. ЛИТЕРАТУРА	33

1. УВОД

Кардиоваскуларни систем сачињавају срце и крвни судови. То је затворени систем који омогућава циркулацију крви у организму. Основна улога кардиоваскуларног система и крви је транспортна. Тим путем се омогућава доток кисеоника из плућа до ткива како би се обезбедио оксидативни процес у ћелијама; врши се пренос хранљивих материја из органа за варење неопходних за обнављање ткива и за енергетске потребе; обавља се транспорт хормона до ефекторних органа у којима они регулишу метаболичке процесе; елиминишу се из ткива продукти метаболичке разградње, који се потом избацују из организма путем бубрега, изузев угљен-диоксида који се одстрањује преко плућа издахнутим ваздухом; обезбеђује се транспорт састојака крви неопходних за згрушавање до оних делова циркулаторног система где постоји склоност крварењу; у циљу одбране од инфекција и других штетних агенаса преносе се до угрожених делова тела неопходни фактори одбране (антитела, бела крвна зрнца). Према томе, стална и адекватна циркулација крви кроз кардиоваскуларни систем неопходна је за очување интегритета живог организма [1].

Централну улогу у перманентном кретању крви унутар кардиоваскуларног система има срце, које делује као пумпа. Састоји се из две преткоморе и две коморе. Крв из доњих делова тела долази у десну преткомору доњом шупљом веном, а из горњих путем горње шупље вене. Из десне преткоморе крв струји у десну комору, која се ритмичким контраховањем избацује у плућну артерију. Гранајући се у све ситније гране, систем плућне артерије омогућава да целокупна крв пристигла из десне стране срца дође у капиларима у блиски контакт са ваздухом у најперифернијим и најситнијим деловима дисајних путева – алвеолама, где се кроз алвеолокапиларну мембрану обавља размена гасова. Путем плућних вена крв се прикупља из оба плућна крила и улива у леву преткомору, из ње струји у леву комору, а потом се контракцијом коморе избацује у аорту (слика 1).



Слика 1. Приказ малог и великог крвотока [2]

Из аорте се крв разноси путем артерија и њихових грана у све делове тела. У најситнијим огранцима крвних судова – капиларима – врши се размена и потом се крв кроз систем вена прикупља у горњу и доњу шупљу вену. Систем крвних судова од изласка из леве коморе до уласка у десну преткомору зове се велики или системски крвоток, а од изласка из десне коморе до уласка у леву преткомору носи назив мали или плућни крвоток. [1]

Артеријски крвни притисак (*tensio arterialis*, ТА) је притисак крви на зидове артеријских крвних судова и притисак зидова артерија на циркулишућу крв (акција – реакција). Он зависи од стања срца, количине и вискозитета крви и еластичности крвних судова. Висина крвног притиска (P) зависи од ударног волумена крви леве коморе срца (Q) и периферног отпора у крвним судовима (R):

$$P = Q \times R$$

При сваком избацивању крви из леве срчане коморе притисак расте, док исти полако опада у периоду између две контракције када се крв улива из преткомора у коморе и срце припрема за нову контракцију. Из тог разлога се одређују две вредности: горњи (сistolни) и доњи (дијастолни) крвни притисак. Систолни (максимални) крвни притисак јавља се у артеријама после 0,1 – 0,2 s од почетка систоле и износи 15,96 – 18,62 kPa (120 – 140 mmHg). Дијастолни (минимални) притисак јавља се у артеријама на крају дијастоле комора, а износи 7,98 – 10,64 kPa (60 – 80 mmHg). Повишење систолног притиска изнад 20 kPa (150 mmHg) и дијастолног изнад 12,66 kPa (96 mmHg), назива се хипертензија. Хипотензија је стање када је систолни притисак испод 13,3 kPa (100 mmHg) [3].

Дисекција аорте, која је основни и највећи крвни суд у телу човека, представља ургентно стање у хирургији. Настаје када након расцепа унутрашњег слоја зида аорте крв уђе између слојева и доведе до његовог раслојавања. Код дисекције аорте, нарочито њеног усходног дела (Дебејки тип I и II) постоји највећа опасност од прскања аорте и тренутне смрти. Нерегулисан крвни притисак и слабост зида аорте су главни фактори ризика. Симптоми дисекције аорте су драматични. Везани су често за скок крвног притиска, праћен снажним раздирућим болом у грудима који се шири ка леђима и према ногама у зависности од обима дисекције. Може доћи и до оштећења аортног записка, инфаркта миокарда, шлога и других веома озбиљних компликација. Због свега овога дисекција аорте је обољење са високом стопом смртности и треба је оперисати у прва 24 часа од појаве симптома. Операција подразумева да оболелу аорту треба заменити вештачком протезом како не би дошло до њеног пуцања. Ова протеза, која се назива тубуларни графт, синтетичка је савитљива цев порозних зидова коју убрзо након операције са унутрашње стране прекрије слој ткива тако да се понаша као саставни део организма. На овај начин би требало, ако је могуће, затворити лажни и повећати проток кроз прави лумен.

Циљ овог рада је одређивање притисака, смичућих напона и брзина протока крви кроз дисектирану аорту пре и после операције применом нумеричке симулације.

Задатак рада је реконструисање тродимензионалних модела дисектиране аорте добијене на основу СТ снимака пацијента пре и после операције и испитивање биомеханичких карактеристика модела.

2. КАРАКТЕРИСТИКЕ АОРТЕ

Аорта је први артеријски сегмент системске циркулације крви, која је директно повезана са срцем.

Ефикасно описивање зидова аорте захтева основно знање и разумевање анатомије, хистологије и физиологије аорте. Ово је од изузетне важности за разумевање општих биомеханичких карактеристика артеријских зидова и компонената које обезбеђују главни допринос процесу деформације.

Геометријска, хистолошка и механичка својства аорте се мењају од узлазне аорте према трбушној, која одржава услове за оптимални механички рад.

2.1. АНАТОМИЈА АОРТЕ

Аорта почиње у горњем делу леве коморе, одакле иде навише, затим се лучно савија назад и у лево преко корена левог плућног крила, након чега се пружа наниже са леве стране кичменог стуба читавом дужином грудне шупљине коју напушта кроз аортни отвор на дијафрагми и улази у трбушну дупљу. На том месту се смањује њен дијаметар који је од 3 cm на изласку из леве коморе смањен на мање од 2 cm у трбушној дупљи. У нивоу четвртог лумбалног пршљена аорта се дели на своје две завршне гране, леву и десну илијачну артерију, које затим иду наниже и латерално и исхрањују одговарајући доњи екстремитет [4].

2.1.1. Узлазна аорта

Узлазна аорта је дугачка око 5 cm, простира се од горњег дела базе леве коморе, у нивоу хрскавице трећег ребра иза леве половине грудне кости, пружа се навише укосом и удесно пратећи срчану осовину све до нивоа горњег дела друге ребарне хрскавице, када се савија и налази се на око 6 cm иза задњег зида грудне кости. На споју са левом комором насупрот аортним залисцима налазе се три мање дилатације које називамо аортним синусима. На споју узлазне аорте са аортним луком њен дијаметар се увећава на рачун проширења десног зида које зовемо аортни булбус. Усходна аорта је обмотана серозним перикардом и у блиском контакту је напред са десном преткомором и десним плућним крилом, односно у горњем сегменту са горњом шупљом вену са десне стране, лево са плућном артеријом, односно са њеном десном граном и левом преткомором са задње стране. Једине две гране које даје усходна аорта су лева и десна коронарна артерија које се од ње одвајају одмах на почетку у нивоу семилунарних залистака. Узлазна аорта најчешће оболева од дисекције, која је често удружена са конгениталним поремећајима као што је бикуспидна валвула [4].

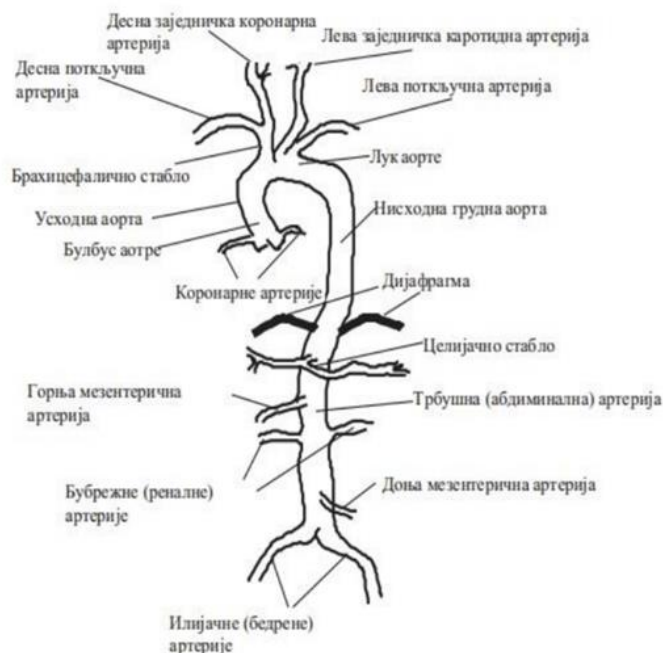
2.1.2. Аортни лук

Аортни лук, односно трансферзална аорта, почиње у нивоу горње ивице другог десног костостерналног зглоба, затим се пружа уназад и улево испред и са леве стране трахеје, а затим наниже са леве стране четвртог грудног пршљена и у нивоу његове доње ивице постаје силазна грудна аорта када заузима одговарајућу силазну путању. На тај начин овај део аорте има две кривине чије конвексне површине гледају напред односно назад и лево, а горња граница је на око 2.5 cm испод горње ивице манубријума грудне кости. Предњи зид лука аорте је покривен плеуром и предњом ивицом оба плућна крила односно остатком тимуса. Како се лук аорте простира уназад, са његове леве стране су лево плућно крило, односно плеура, четири

нерва: леви френични нерв, горња кардијална грана левог вагуса, горња кардијална грана левог симпатичког стабла и стабло левог вагуса. Заједно са овим нервом са десне стране лука аорте налазе се једњак, главни лимфни пут и трахеја. Са горње стране се налазе лева каротидна и поткључна артерија односно лева брахицефалична вена. Доњи део лука је у контакту са левим бронхом и бифуркацијом плућне артерије. На том сегменту лумен аорте је нешто ужи, док се сегмент одмах иза сужења вретенасто шири (до 3 cm). Тај део се зове аортно вретено, а означава спој лука и силазне торакалне аорте. Главне гране аортног лука су брахицефалично стабло, лева заједничка каротидна артерија и лева поткључна артерија које исхрађују оба горња екстремитета, врат и главу. Овај део аорте је ретко изоловано оболео. Дисекција аорте која започне у узлазној аорти често се простире и кроз аортни лук [4].

2.1.3. Силазна грудна аорта

Силазна грудна аорта почиње од доње ивице четвртог грудног пршљена, настављајући се на аортни лук, а завршава на доњој ивици дванаестог грудног пршљена, где пролази кроз аортни отвор на дијафрагми. У свом почетном делу се налази са леве стране кичменог стуба, међутим, како се спушта наниже, прелази постепено на предњу страну кичменог стуба, где се налази у свом завршном делу. Испред силазне аорте налазе се лево плућно крило, перикард, једњак и на крају дијафрагма. Једњак заједно са пратећим нервним стаблом у свом доњем сегменту прелази на предњу страну аорте. Са десне и задње стране налази се хемиазигосна вена и торакални лимфни дуктус. Правећи конкавну кривину напред овај део аорте не мења свој дијаметар с обзиром на то да је калибар бочних грана мали. Аорта даје висцералне гране (за перикард, бронх, езофагус и медијастинум), односно паријеталне (интеркосталне, субкосталне и горњу френичну артерију). Овај сегмент аорте најчешће оболева од акутне дисекције [4].



Слика 2. Приказ сегмената аорте [5]

2.1.4. Абдоминална аорта

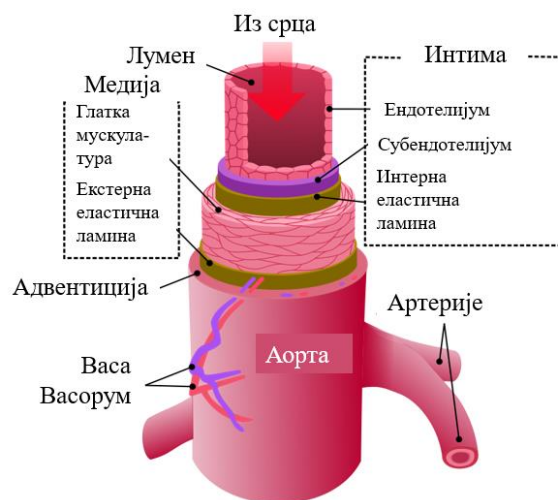
Абдоминална аорта почиње од аортног отвора на дијафрагми у нивоу доње ивице последњег грудног пршљена, пружа се наниже испред кичменог стуба и завршава у нивоу

четвртог лумбалног пршљена дајући две завршне илијачне артерије. Са предње стране покрива је мали оментум и желудац иза кога су гране целијачног стабла, испод је лијенална вена, гуштерача, лева ренална вена, доње партије дуоденума, мезентеријум и аортни плексус. Са десне стране проксимално је азигос вена и лимфне структуре – хиларна цистерна и грудни дуктус, а у доњем делу доња шупља вена. Са леве стране је леви целијачни ганглион, горња партија дуоденума и танко црево. Абдоминална аорта има висцералне гране (целијачно стабло, горња и доња мезентерична, средња супраренална, лева и десна ренална и сперматична/оваријална артерија), односно паријеталне (доња френична, лумбалне и средња сакрална артерија). Док је типично место почетка дисекције на торакалној аорти, на абдоминалном сегменту је знатно чешћа анеуризматска болест, па се самим тим овде често среће и руптура анеуризме [4].

2.2. ХИСТОЛОГИЈА АОРТЕ

Нормалан зид аорте је сачињен од три слоја: tunica intima, tunica media и tunica adventitia.

Интима је унутрашњи слој артерије. Састоји се од једног слоја ендотелијалних ћелија које облажу зид артерије и леже на танкој базалној мембрани. Постоји и субендотелијални слој чија дебљина зависи од топографије, старости и болести. Код здравих, младих индивидуа интима је веома танка и практично не доприноси механичким особинама ткива зида артерије. Међутим, са годинама, интима дебља и постаје чвршћа (arteriosclerosis), тако да допринос механичким особинама може бити значајан. Ово укључује таложење масних наслага, калцијума, колагених влакана, продукте ћелијског отпада и фибрина. Као резултат овог таложења настаје атеросклеротични плак. Плак може бити веома комплексне геометрије и биомеханичке композиције. Патолошке промене су повезане са значајним променама у механичким особинама зида артерије [4].



Слика 3. Приказ слојева аорте [6]

Медија је средњи слој артеријског зида и састоји се од комплексне тродимензионалне мреже глатких мишићних ћелија, влакна еластина и колагена. Фенестриране еластичне ламине раздвајају медију у већи број добро дефинисаних концентричних влакана – ојачани средњи слојеви. Оријентацијаи веза између влакана колагена и еластина, еластичних ламина и глатких мишићних ћелија заједно чине континуалан фиброзни хеликс. Хеликс има веома мали ход тако да су влакна у средини практично кружно оријентисана. Овај структурни распоред даје медији велику чврстоћу, еластичност и способност да издржи оптерећење и у лонгитудиналном и

циркумференцијалном правцу. Са механичке тачке гледишта медија је најзначајнији слој у здравој артерији [4]. Медија се понаша механички као да су њене особине материјала хомогене [5].

Адвентиција је спољашњи слој артеријског зида и састоји се од фибробласта и фиброцита (ћелија које производе колаген и еластин), хистолошких супстанци и дебелог омотача колагених влакана које формирају фиброзно ткиво. Адвентиција је континуално окружена везивним ткивом. Влакна колагена распоређена су у хеликалне структуре које ојачавају зид. Они значајно доприносе стабилности и чврстоћи артеријског зида. Адвентиција је знатно мање чврста у неоптерећеном стању и ниским притисцима од медије. Међутим, на високим притисцима колагена влакна достижу своју исправљену дужину и адвентиција се претвара у “чврст омотач” који спречава артерију од прекомерног истезања и руптуре [7].

Еластични крвни суд као што је аорта има минимално развијен адвентицијални слој. У њему се налазе *vasa vasorum* који потичу од околних интеркосталних и мишићних грана, а исхрађују мишићни и адвентицијални слој односно додатно регулишу функцију мишићних ћелија [4]. *Vasa vasorum* је специјализована микроваскулатура која има функцију преношења молекула из крви у адвентицију. Осим тога, она одговора на потребе за кисеоником и хранљивим материјама у адвентиционалном и спољном медијалном слоју, када залихе нису задовољене дифузијом са луминалне површине [8]. Додатно ослабљен доток нутритивних материја преко интима може бити подстицај за стварање нових *vasa vasorum* канала који долазе до спољашњег зида медијалне ламеле. Ове промене у зиду инфареналне аорте ремете њену структуру, што није случај код торакалне аорте. Напон у зиду, односно деформације услед високог притиска могу утицати на функцију ових нутритивних крвних судова који исхрађују спољашње две трећине аортног зида и тако учествују у настанку патолошких стања [4].

2.3. ФИЗИОЛОШКА УЛОГА АОРТЕ

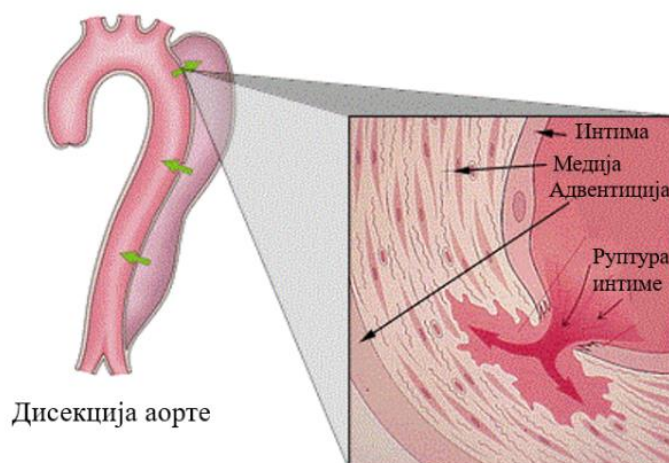
Аорта представља почетак артеријског система и њена главна улога је да спроведе крв до мањих артерија, односно до периферних ткива, као и да ублажи пулсације леве коморе. Ова функција зависи од осцилаторног притиска, протока и фреквенције, које опет зависе од дијаметра и еластичности [9]. Због свог великог дијаметра аорта не пружа велики отпор протоку крви и задржава велику запремину крви током систоле коју затим истисне током дијастоле. Осим дијаметра ову функцију аорте омогућава и њена структура ћелија медије – организоване у групе које се преклапају и повезују еластичним влакнима. Основни структурни протеини који омогућавају ову функцију аорте су колаген који даје снагу и чврстину, односно еластин који даје еластичност.

Екстрацелуларни матрикс чине и бројни други протеини, те овај простор нема само пасивну структуру, већ је активан посебно у процесима одбране и настанка болести. Ћелијске зоне су испресецане аћелијском уском зоном снопова колагених влакана.

Структура зида аорте се разликује између аортних сегмената, што се може објаснити другачијим хемодинамичким карактеристикама. Абдоминална аорта обезбеђује перфузију абдоминалних органа, али и мишића доњих екстремитета, због чега је она изложена великим осцилацијама у брзини, односно количини протока [10].

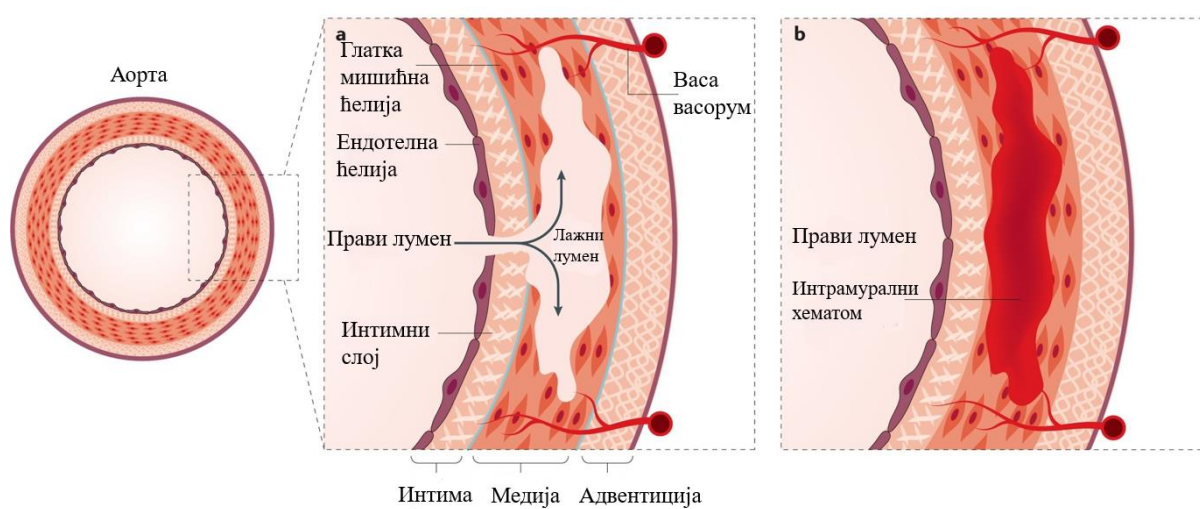
3. ПОЈАМ И НАСТАНАК ДИСЕКЦИЈЕ АОРТЕ

Постоје две водеће теорије у вези са настанком дисекције аорте. Према првој теорији долази до стварања прслине у слоју интима која је праћена продором крви из лумена аорте у ослабљени и осетљиви медијални простор. Приликом продора крви у медијални простор долази до дегенерације еластичних влакана као и губитка ћелија глатких мишића. На слици 4 је приказан изглед аорте према овој теорији [11].



Слика 4. Приказ настанка дисекције аорте према теорији стварања прслине у слоју интима [12]

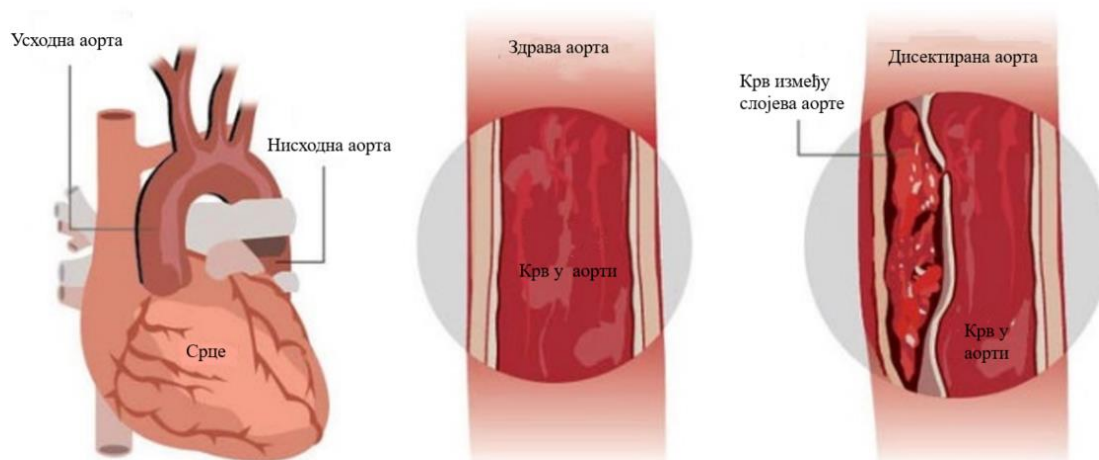
Према другој теорији претпоставља се да почетна руптура vasa vasorum-а доводи до крварења унутар зида аорте, где накнадно долази до оштећења интима и ширења дисекцијског отвора (слика 5) [11].



Слика 5. Приказ настанка дисекције аорте према теорији почетне руптуре vasa vasorum-а [13]

Одвајање лажног лумена са крвљу доводи до слабљења компресије правог лумена, што даље доводи до недовољне префузије виталних органа и касније клинички нежељених догађаја.

На слици 6 приказано је поређење изгледа здраве и дисектиране аорте.



Слика 6. Приказ здраве и дисектиране аорте [14]

Клиничке компликације дисекције аорте укључују развој перикардног излива који изазива тампонаду, повећани проток кроз руптуру аорте или малперфузијске синдроме попут поремећаја протока коронарне артерије, цереброваскуларне несреће, мезентеричне исхемије, исхемијског колитиса или исхемије кичме [11].

Фактори ризика за развој ове болести могу се поделити у 3 групе: стечене, наследне и јатрогене.

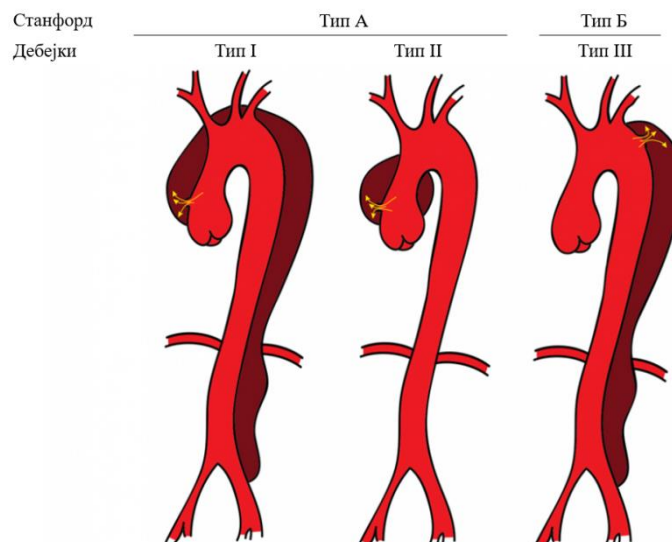
Стечени фактори ризика су хипертензија (присутна у 75%), атеросклероза (присутна у ~ 30%). Хипертензија, зависност о амфетаминима, трудноћа и интензивно вежбање или стања која повећавају интрааортни притисак или волумен možданог удара могу ослабити артеријски зид, предиспонирајући га за акутну дисекцију аорте. Употреба дувана и хиперлипидемија су додатни фактори ризика за дисекцију аорте. Утичу на разградњу медијалног зида, тачније разградњу колагена и еластина [11].

Генетске болести и поремећаји везивног ткива играју велику улогу у стварању дисекције аорте. Сви синдроми попут Марфановог, Ехлерс–Данлосовог, Лоис Диетеовог, породична склоност ка дисекцији аорте – доводе до стварања дисекције. Пацијенти који имају урођену ману, бикуспидни аортни залистак, такође имају предиспозиције за настанак дисекције [9].

Јатрогени узроци дисекције су ретки случајеви (око 5% свих дисекција аорте). Пацијенти са отвореном операцијом на срцу или заменом аортног заљиска имају повећане шансе да добију дисекцију аорте [11].

Дисекцију аорте можемо класификовати према двојници научника Стенфорду и Дебејкију (слика 7).

Према Дебејкију тип I креће од усходног дела аорте, захвата аортни лук, а често и ван њега, дистално. Тип II је ограничен на усходни део аорте, док тип III обухвата целу нисходну аорту.



Слика 7. Приказ класификације дисекције аорте [15]

Према Стенфорду постоје два типа – тип А и тип Б. У тип А је сврстао дисекцију која утиче на усходни део аорте, док је у тип Б сврстао дисектиране делове аорте који не утичу на узлазни део аорте [16].

3.1. МЕТОДЕ ДИЈАГНОСТИКОВАЊА

Дисекција аорте може да се детектује на два начина – лабораторијски и различитим врстама снимања људског тела.

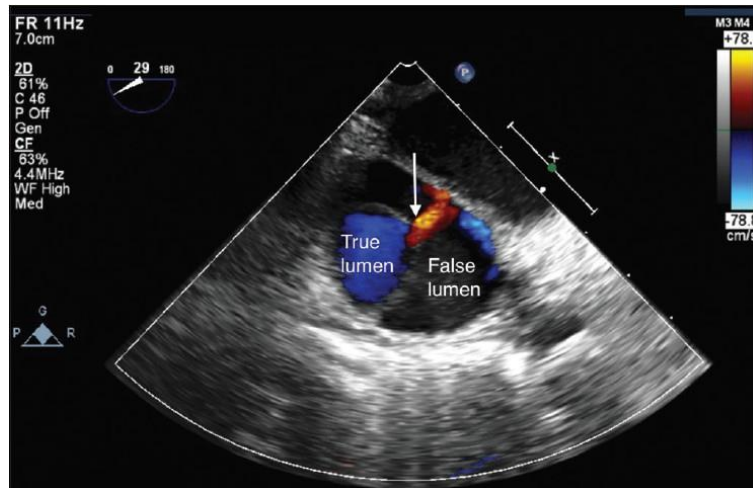
Иако не постоји чврсто утврђен, клинички доступан серум за биомаркер тестове који су специфични за дисекцију аорте, постоји велико интересовање за развој биомаркера који могу помоћи у раној дијагнози или искључивању дисекције аорте као могуће болести код пацијента. Теоретски, мерење нивоа глатких мишића у серуму, растворљиви фрагменти еластина, тешки ланци миозина и креатин киназа–ББ изоформа могли би бити показатељи да је крв дошла до медијалног слоја аорте [11].

Кључни елемент у избору начина снимања је брзо добијање и тачна потврда дијагнозе, минимизирање кашњења на одговарајуће хитне терапије. Ехокардиографија, MRI и контрастом појачан СТ су најчешће изведени модалитети снимања за процену дисекције аорте.

Када је врло вероватно да пацијент има дисекцију аорте, а почетни тест је двосмислен или негативан, потребно је урадити други дијагностички тест. Осим успостављања дијагнозе дисекције аорте, правилним одабиром снимања може се пружити додатна информација о потенцијалним компликацијама, укључујући степен дисекције; о месту стварања лажног лумена и поновног уласка у прави лумен; о присуству тромба у лажном лумену; о укључености других крвних судова; о захватању аортног записка и перикардном ефекту [11].

3.1.1. Ехокардиографија

Трансторакална ехокардиографија и транс–езофагел ехокардиографија играју централну улогу у дијагностиковању дисекције аорте. Упркос ограниченој осетљивости, предност је у томе што су једноставни, брзи и лако доступни у ургентним центрима [11].



Слика 8. Приказ правог и лажног лумена трансторакалном ехокардиографијом [17]

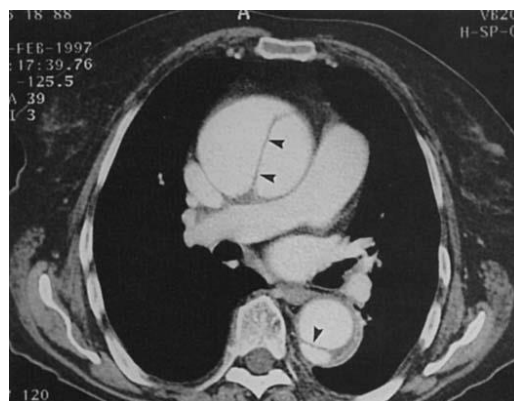
Трансторакална ехокардиографија има пријављену осетљивост од 59% до 83% и специфичност од 63% до 93% за дијагностиковање дисекције аорте [11]. На слици 8 је приказ снимка методом ехокардиографије дисектиране аорте.

Трансторакална ехокардиографија има већу осетљивост у дијагностицирању типа А, по Стенфорду (78% – 100%), у поређењу са дисекцијама типа Б (31% – 55%). Без обзира на то, ова метода зависи од оператера, а постоји значајна варијабилност квалитета слике због става тела, положаја пацијента или респираторног стања, што ову методу чини непоузданом за отклањање сумње у постојање дисекције аорте [11].

3.1.2. Компјутерска томографија са појачаним контрастом (СТ)

Контрастом појачан СТ је метода која се најчешће користи за испитивање зида аорте тј. постојања руптуре у слоју интима због његове дијагностичке тачности и брзине којом се добија снимак. Изузетно је осетљив у разликовању три подтипа акутног аортног синдрома. Контрастом појачан СТ омогућава тродимензионалну реконструкцију, што омогућава лакшу процену укључености других крвних артерија. Тродимензионална реконструкција представља кључан корак за планирање хируршког захвата. На слици 9 је приказан СТ снимак на коме се види дисекција аорте [11].

Малперфузија аортног лука, трбушних органа и доњих екстремитета лако се препознаје СТ ангиографијом.



Слика 9. Приказ дисекције аорте тип А на СТ снимку у аксијалној равни (врх стрелица показује слој интима) [18]

Радиографске карактеристике потребне за утврђивање дијагнозе дисекције аорте компјутерском томографијом су или присуство два различита лумена са видљивим слојем интима (најчешћи налаз) или детекција два лумена различитом стопом непрозирности контрастног материјала. С друге стране, интрамурални хематом се појављује као дифузно задебљање зида аорте, често са појачаним контрастом [11].

3.1.3. Магнетна резонанца (MRI)

Магнетна резонанца има сличан профил осетљивости и специфичности као контрастом појачан СТ код дијагностиковања дисекције аорте, уз предност штедње пацијента од изложености јонизујућем зрачењу.



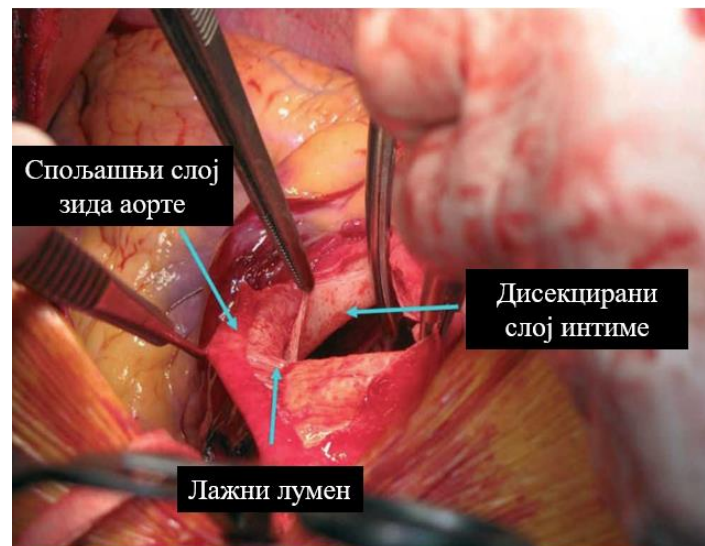
Слика 10. Приказ дисекције аорте методом магнетне резонанце [19]

Поред тога, она дозвољава мултипланарно снимање са 3D реконструкцијом, чиме се постиже боља осетљивост на детекцију слоја интима (88% осетљивости код MRI насупротив 75% код СТ) [11]. На слици 10 је приказана дисекција аорте методом магнетне резонанце. Међутим, MRI захтева да пацијенти леже непомично у окружењу које је релативно без надзора током дужег временског периода, и због тога то није обично први избор методе дијагностиковања. Коришћена магнетна резонанца ангиографијом (MRA) има веће предности јер омогућава краће време добијања снимака, а истовремено омогућава бољи квалитет снимања аорте и крвних судова који се гранају [11].

3.2. МЕТОДЕ ЛЕЧЕЊА

Конзервативно лечење је важан део лечења дисекције аорте. Темелји се на снижавању крвног притиска, јер се делимично зауставља процес руптуре зида аорте и донекле спречава могућа руптура спољног слоја, односно лажног лумена. Повишени крвни притисак се обично контролоше интравенским лековима. У ретким случајевима када постоје контраиндикације за хируршки захват примена антихипертензивних лекова је и једини начин лечења дисекције аорте. Јасно је да су тада резултати знатно слабији него они који се добијају хируршким лечењем (слика 11).

Врста хирушког захвата зависи од типа дисекције. Код Стенфорд типа А је потребна хитна интервенција, због велике могућности да ће доћи до руптуре спољашњег слоја, што за последицу има хематоперикард, тампонаду и наглу смрт. Операција се обавља на заустављеном срцу уз потпору кардиопулмоналног бајпаса. Опсег замене узлазне аорте зависи од степена захваћености залиска аорте односно од придружене инсуфицијенције аорте. Циљ операције је довести до настанка тромбозе у лажном лумену што за последицу има његово затварање. Обично снижени притисак доводи до смањења протока у лажном лумену до мере да се створи тромбоза [20].



Слика 11. Приказ хирушког лечења [21]

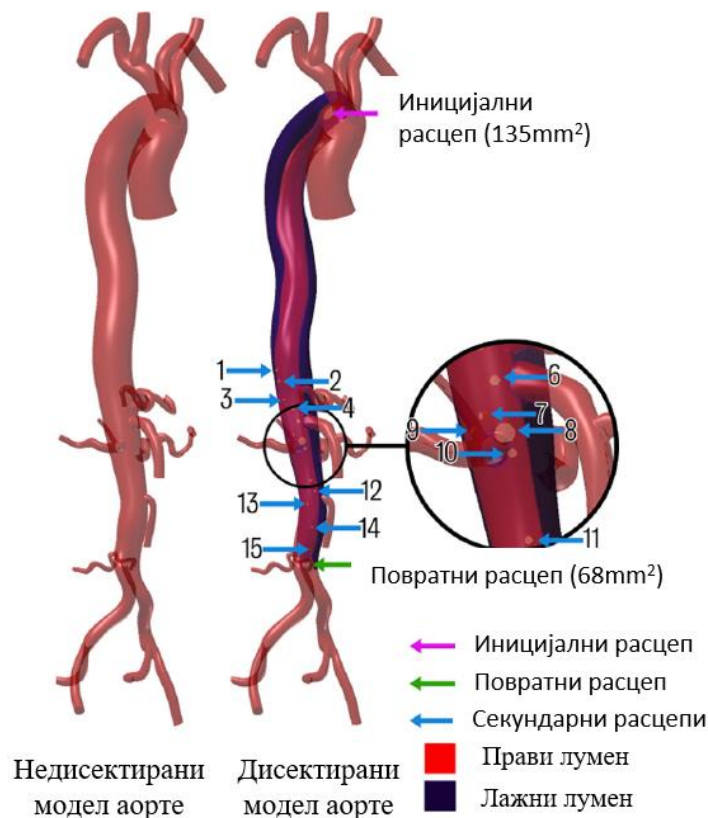
Након операције пацијенти се смештају у кардиохирушку јединицу интензивног лечења. Врло честе компликације могу бити поремећаји срчаног ритма. Неки од поремећаја су: фибрилација артерија (најчешћа), док је вентрикуларна тахикардија витално угрожавајуће стање, где здравствени тим мора да у најкраћем могућем року реагује. Стопа операцијске смртности је у већини светских центара око 10%. Постоји одређено смањење те стопе последњих неколико година, посебно после почетка примене биолошког лепка [20].

Врло строга контрола крвног притиска у постоперацијском периоду је пресудна за спречавање напредовања на неизмењеном делу аорте. Код пацијената оперисаних због дисекције аорте често долази до појаве анеуризми на неизмењеном делу аорте, каткад и неколико година или десетак година након прве операције [20].

4. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ НУМЕРИЧКИХ АНАЛИЗА ДИСЕКЦИЈЕ АОРТЕ

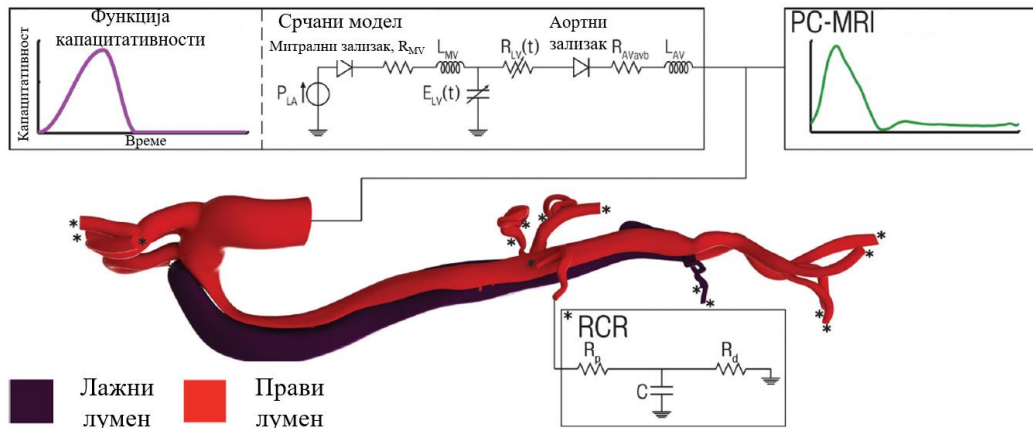
Са развојем технологије у данашње време се све чешће користе различите рачунарске методе за симулацију одређених карактеристика и испитивања различитих болести у области медицине са циљем лакшег и бржег проналаaska решења за одређене проблеме. Неке од најпопуларнијих метода које се тренутно користе за испитивање карактеристика аорте, дисектиране аорте и других њених болести засноване су на методи коначних елемената, као и на методи динамике флуида.

Група научника предвођена Dillon-Murphy D. радила је на аорти која има Стенфорд тип Б дисекције [21]. Урадили су СТ снимке мушкарца старог 49 година. Акутна дисекција аорте се простирала 5mm дистално од леве субклавијалне артерије, протежући се читавом дужином нисходне аорте и завршавајући 5 mm удаљено од леве илијачне бифуркације. Они су правили различите моделе дисекције аорте који су имали различит број прикључних руптура између лумена. На слици 12 приказан је модел дисектиране аорте коју су добили.



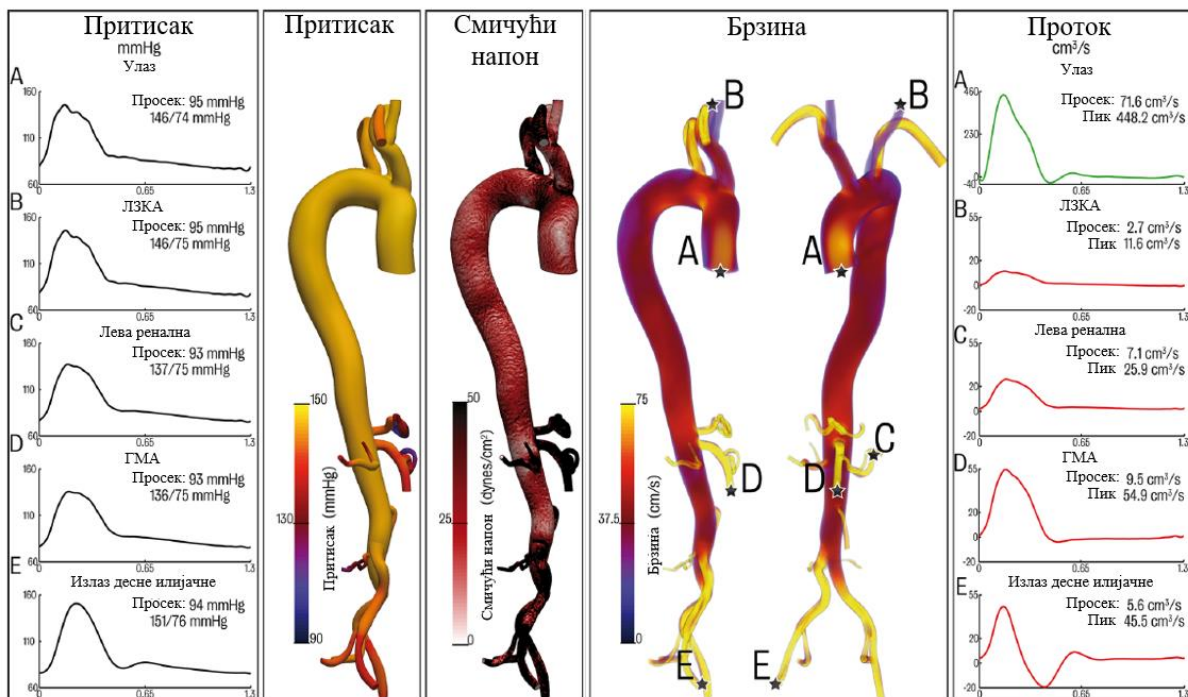
Слика 12. Приказ модела дисектиране и недисектиране аорте [21]

Граничне услове добили су коришћењем 2D PC-MRI у узлазној аорти, а на излазу су користили нултидимензионални модел (Windkessel) који је подешен тако да одговара подацима добијених 2D PC-MRI у силазној аорти. На слици 13 је шематски приказ граничних услова које су користили.



Слика 13. Шематски приказ граничних услова на улазу у аорту [21]

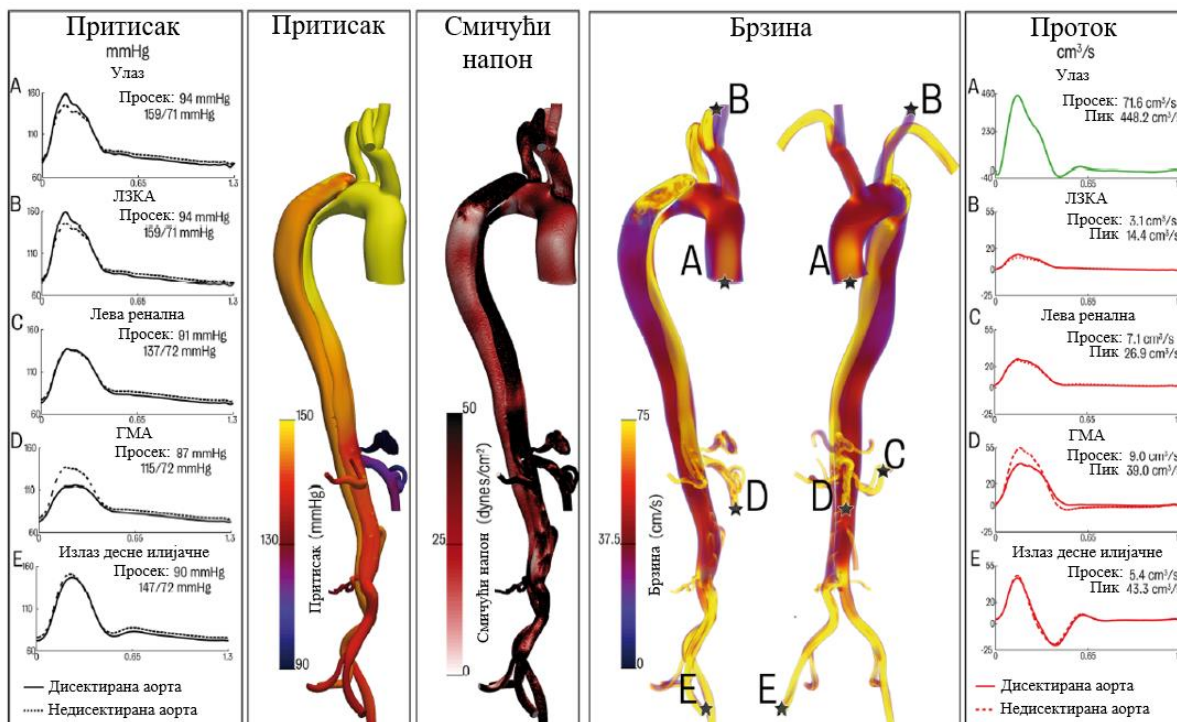
На слици 14 су приказани резултати притиска и смичућег напона на здравој аорти. Слика 15 приказује добијене вредности брзине крви. Добијени резултати приказују да су физиолошки реалистични распони притиска и брзина.



Слика 14. Приказ резултата притиска и смичућег напона на здравој аорти [21]

Слика 15. Приказ резултата брзине на здравој аорти [21]

На слици 16 су приказани резултати притиска и смичућег напона у дисектираној аорти, као и приказ поређења графика добијених у здравој и дисектираној аорти. Слика 17 приказује брзину крви коју су добили у дисектираној аорти, као и поређење резултата протока у здравој и дисектираној аорти [21].

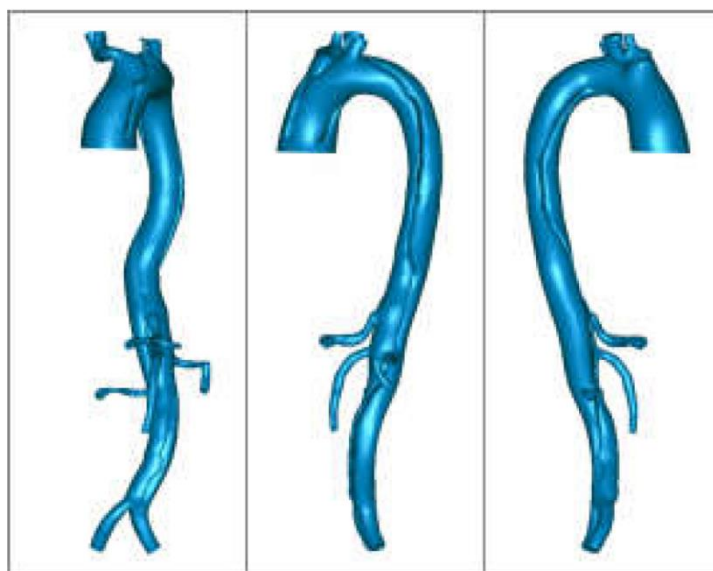


Слика 16. Приказ резултата притиска и смичућег напона у дисектираној аорти [21]

Приметили су локалне регије повећане брзине, притиска, напона смицања зида и промене у расподели протока, нарочито у уском правом лумену и око примарног улаза.

Након израчунавања компјутерском динамиком флуида добијене резултате су упоредили са 4D PC-MRI. Проучавали су утицај секундарних руптура, откривајући значајне хемодинамичке промене када оне у модел нису укључене. Уочили су да долази до пораста протока у правом лумену који прелази 200% , као и пад притиска од 18% [21].

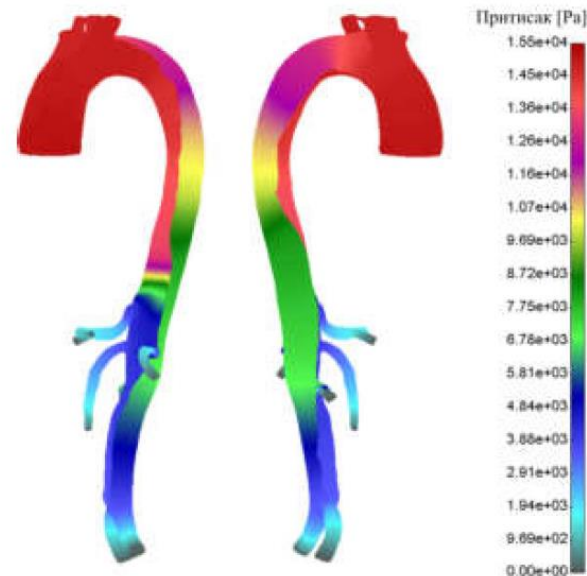
Група научника предвођена Савелјић И. радила је на моделу акутне аортне дисекције [22]. Радили су нумеричку анализу преоперативног и постоперативног модела. На основу СТ снимака направили су 3D модел у програму “Materialise Mimics 10.01”.



Слика 18. Приказ 3D модела дисектиране аорте [22]

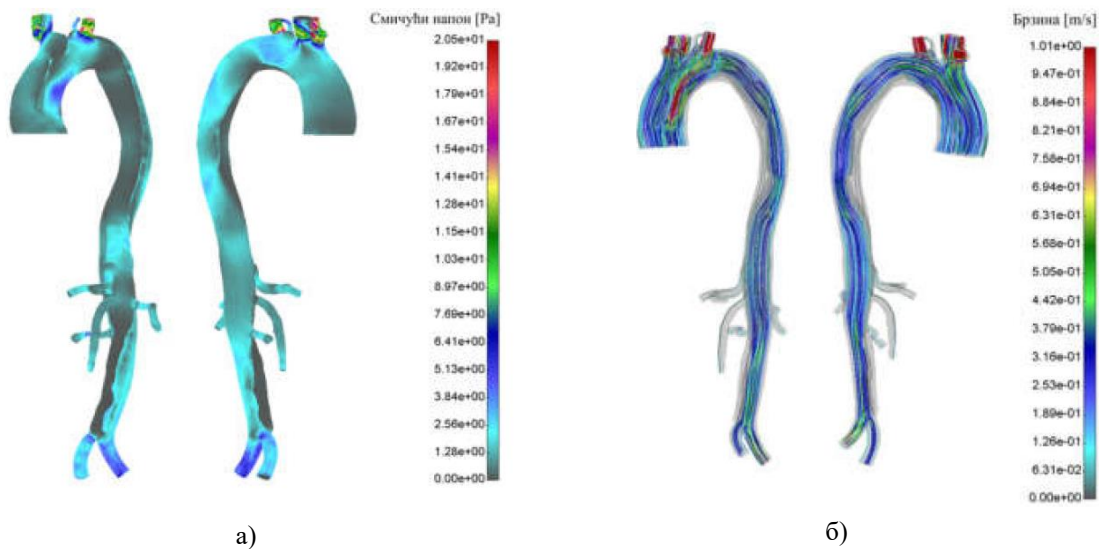
Наредна фаза је била да уз примену програма “Geomagic Studio 10” са модела уклоне шумове и непотребне делове, а делове од интереса припреме што боље за генерисање запреминске мреже коначних елемената. На слици 18 приказан је добијени 3D модел дисектиране аорте.

На сликама 19 и 20 приказани су резултати преоперативног модела. Слика 19 приказује добијене вредности притиска који делује на зид.



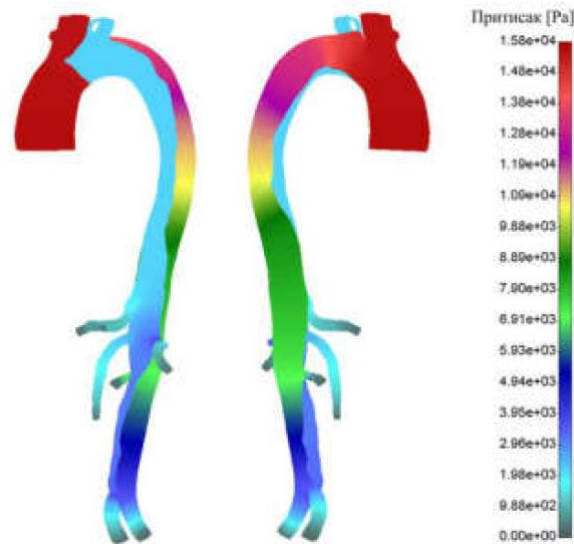
Слика 19. Приказ резултата притиска деловања крви на зид аорте на преоперативном моделу [22]

Слика 20а) приказује добијене вредности смичућег напона, а слика 20б) приказује вредности брзине.



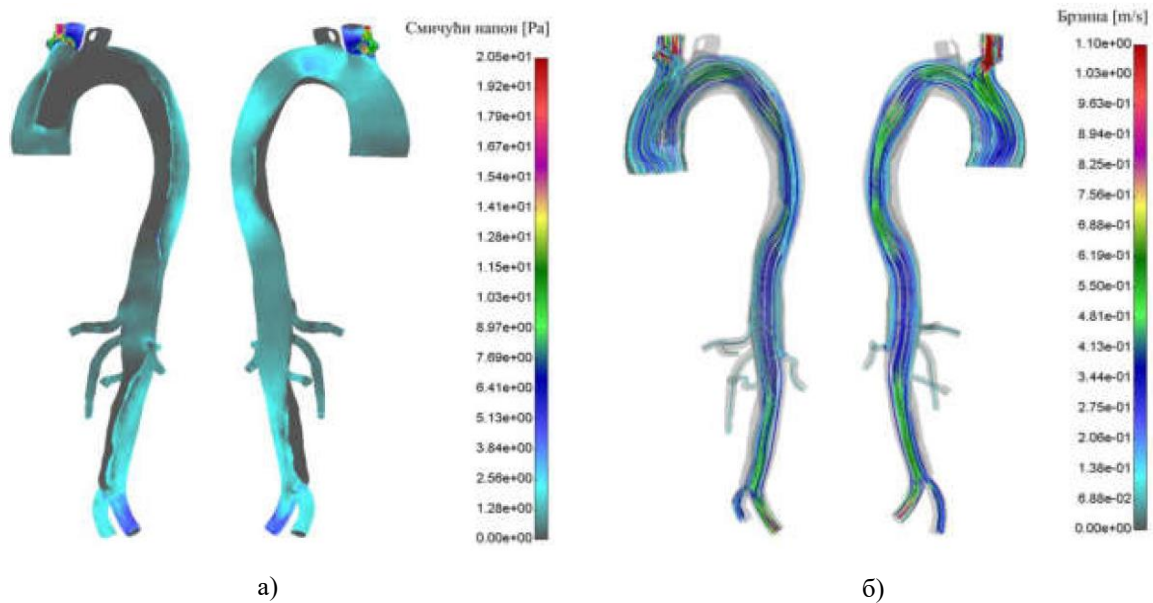
Слика 20. Приказ резултата смичућег напона а) и брзине б) на преоперативном моделу [22]

Постоперативни модел геометрије пацијента подразумевао је замену усходне аорте стент графтом и затварање протока кроз лажни лумен, што се све изводи компјутерском манипулацијом. На сликама 21 и 22 приказани су резултати на постоперативном моделу дисектиране аорте. Слика 21 приказује добијене вредности притиска.



Слика 21. Приказ резултата притиска деловања крви на зид аорте на постоперативном моделу [21]

Слика 22а) приказује вредности смичућег напона, а слика 22б) брзине.



Слика 22. Приказ резултата смичућег напона а) и брзине б) на постоперативном моделу [22]

Поређењем резултата пре и после операције закључили су да предложени постоперативни захват замене усходне аорте, и истовремено затварање лажног лумена, даје релативно добре резултате у смислу коначног исхода операције. Осим пада протока у левој субклавијалној грани, као и у левој заједничкој каротидној артерији, бележи се пораст протока у готово свим осталим артеријама. Виртуелном манипулацијом преоперативног модела овог пацијента пружа се далеко јаснија слика о томе шта се дешава са протоцима грана аортног лука, као и дисталних грана, и на тај начин лекари могу да предвиде да ли ће добијени проток моћи да задовољи потребе осталих органа у телу [22].

Циљ овог рада [22] био је да се спроведеном симулацијом нумеричким путем одреди однос правог и лажног лумена акутне аортне дисекције. Од великог је значаја предвидети понашање лажног лумена и његову пропагацију у даљем току развоја болести, као и одређивање

потенцијалних места за настанак повратних процепа или руптуре. На тај начин могуће је предвидети на који начин ће операција имати утицај на даљи рад органа. Могуће је одредити вредности притиска, смичућих напона, и, што је најбитније, протока крви и на тај начин избећи грешке приликом планирања извођења захвата и предвидети постоперативни опоравак пацијента [22].

5. ГЕНЕРИСАЊЕ МОДЕЛА

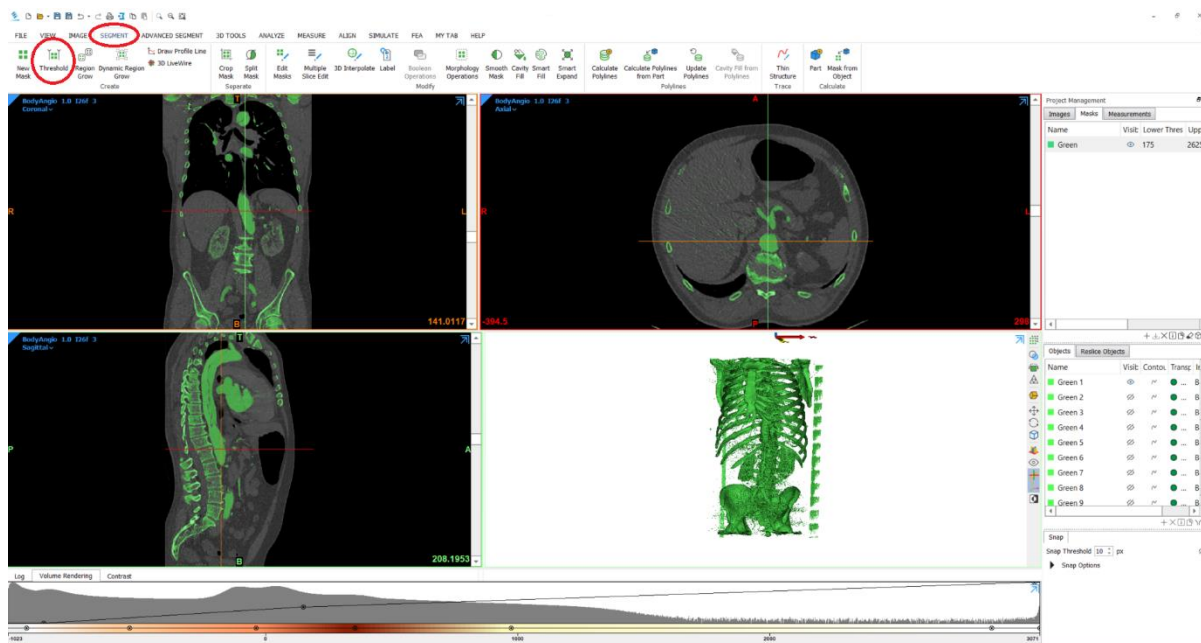
Задатак рада је реконструисање тродимензионалних модела дисектиране аорте добијене на основу СТ снимака пацијента пре и после операције и испитивање биомеханичких карактеристика модела. Реконструкција тродимензионалног модела је постигнута помоћу програма “Materialise Mimics”, “Geomagic Studio” и “Simens Femap”. За почетне СТ снимке приликом реконструкције модела коришћени су снимци у “DICOM” формату.

5.1. РЕКОНСТРУКЦИЈА 3D ГЕОМЕТРИЈЕ НА ОСНОВУ 2D СЛИКА (MIMICS)

Први корак у програму “Materialise Mimics” је да се притиском на опцију “New Project” увезу СТ снимци. Након одабира снимака опцијом “Next” почиње учитавање снимака у програм. Када се учитавање заврши програм ће показати више дводимензионалних слика модела, при чему је потребно селектовати све слике истовремено и притиснути опцију “Open”, да би се цео модел реконструисао. Након тога у програму ће се појавити снимак аорте са околним органима које треба отклонити.

Снимак у програму је подељен у три равни које се називају аксијална, коронална и сагитална. Аксијална раван представља поглед одозго, коронална раван представља поглед спреда, а сагитална раван поглед са стране. Поред ове три равни у средини екрана може да се види и поље у коме се приказује издвојени тродимензионални модел.

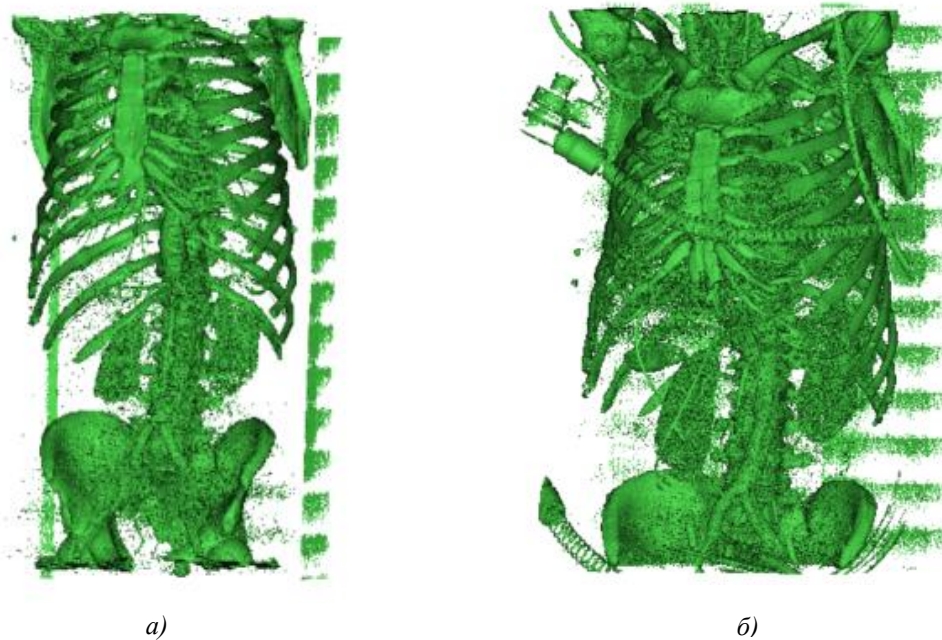
Пошто, отварањем слика у програму не може најбоље да се уочи сама аорта потребно је извршити подешавање “Threshold”, које се налази у падајућем менију “Segment”.



Слика 23. Изглед програма

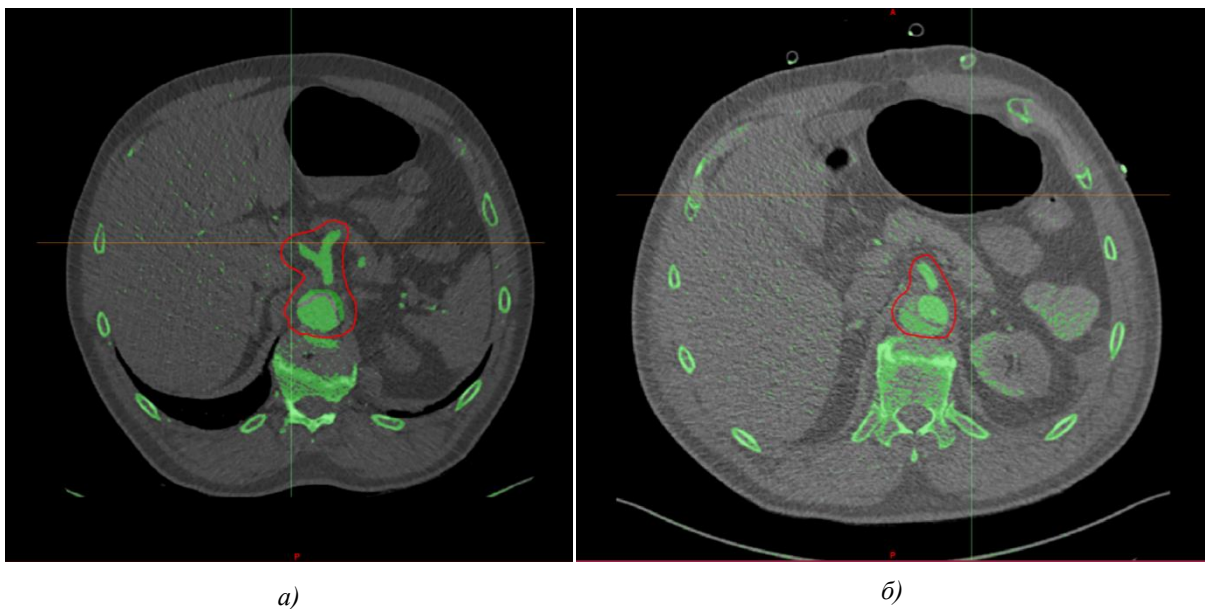
Овом опцијом одређује се гранична вредност модела који ће бити приказан на тродимензионалном екрану програма. За приказ аорте одабране вредности “Threshold” су од 175 до 2625. На слици 23 приказан је изглед програма, као и добијени преоперативни модел након

одабира “Threshold” опције. На слици 24а) приказан је модел пре операције, а на слици 24б) после операције.



Слика 24. Приказ изгледа преоперативног (а) и постоперативног (б) модела

Да би се издвојила аорта било је потребно да се на свакој слици препозна попречни пресек аорте (дат је пример слике на слици 25) и да се обрише све што није аорта, при чему је требало водити рачуна да се не обришу артерије које излазе из ње.



Слика 25. Приказ попречног пресека аорте пре операције (а) и после операције (б)

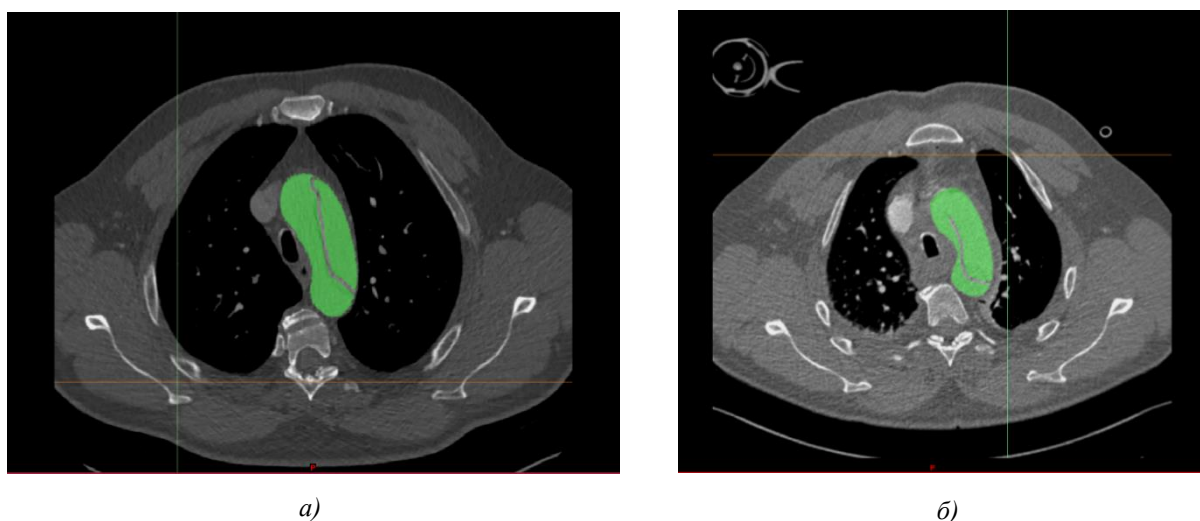
На моделу аорте, како пре тако и после операције, на аортном луку нису обрисани почети три велике артерије које исхрањују главу, врат и горње екстремитете, почетак целијачног

стабла, горња мезентерична артерија, реналне и илијчне артерије на нисходном делу аорте. За брисање органа који нису потребни за израду модела коришћен је алат “Multiple Slice Edit” (слика 26).



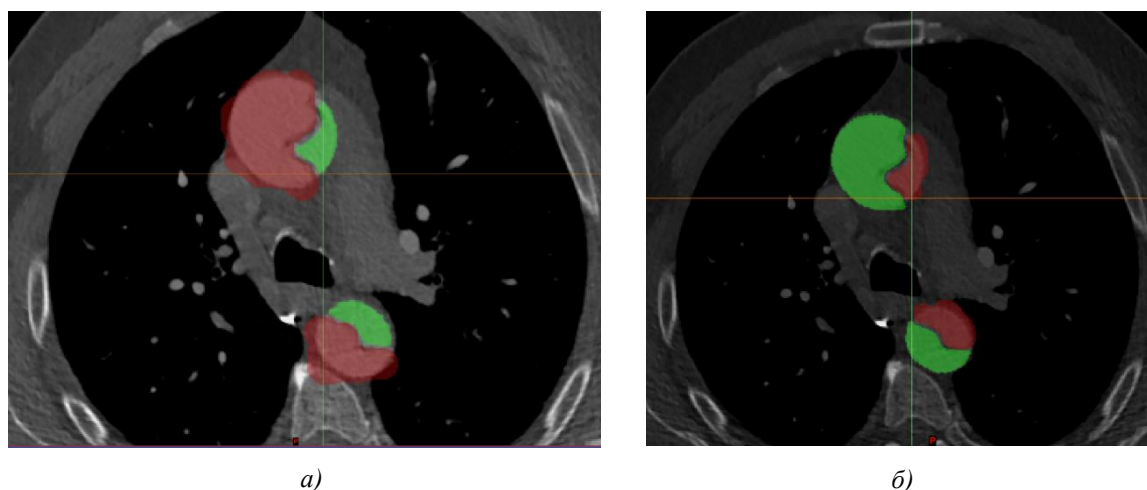
Слика 26. Приказ позиције алата “Multiple Slice Edit” и “Edit Masks”

Наредни корак у изради модела је да се на свакој слици препозна где је зид између правог и лажног лумена који је потом брисан помоћу алата “Edit Masks”. На слици 27 је приказ након брисања зида између лумена. После овог корака ради се раздвајање лумена на посебне моделе помоћу алата “Edit Masks”.



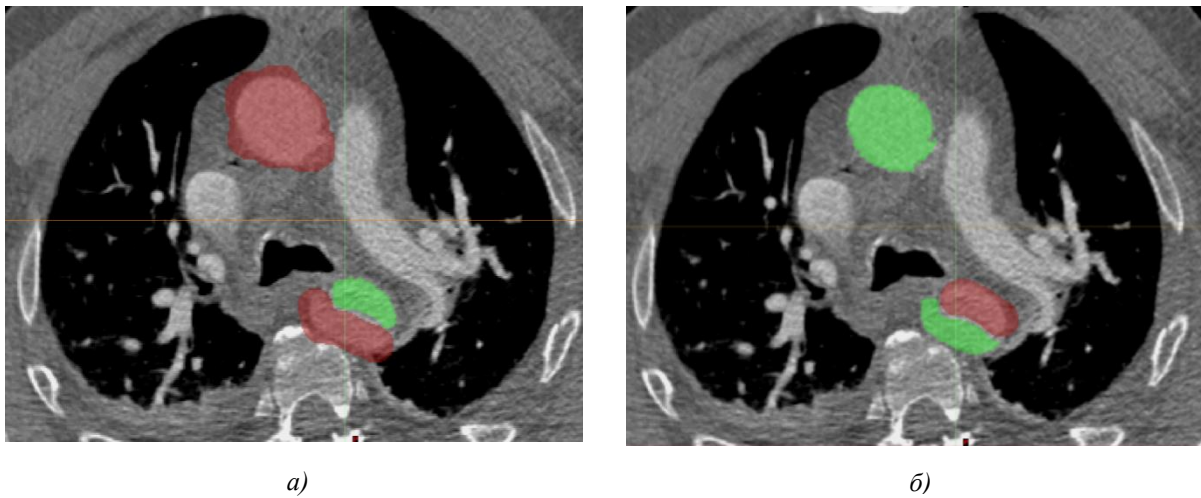
Слика 27. Приказ изгледа слике одвојених лумена на преоперативном (а) и постоперативном (б) моделу

На слици 28а) је приказано обележавање правог лумена, а на слици 28б) лажног лумена на преоперативном моделу, након чега следи њихово брисање, како би се на једном моделу сачувао лажни, а на другом прави лумен.



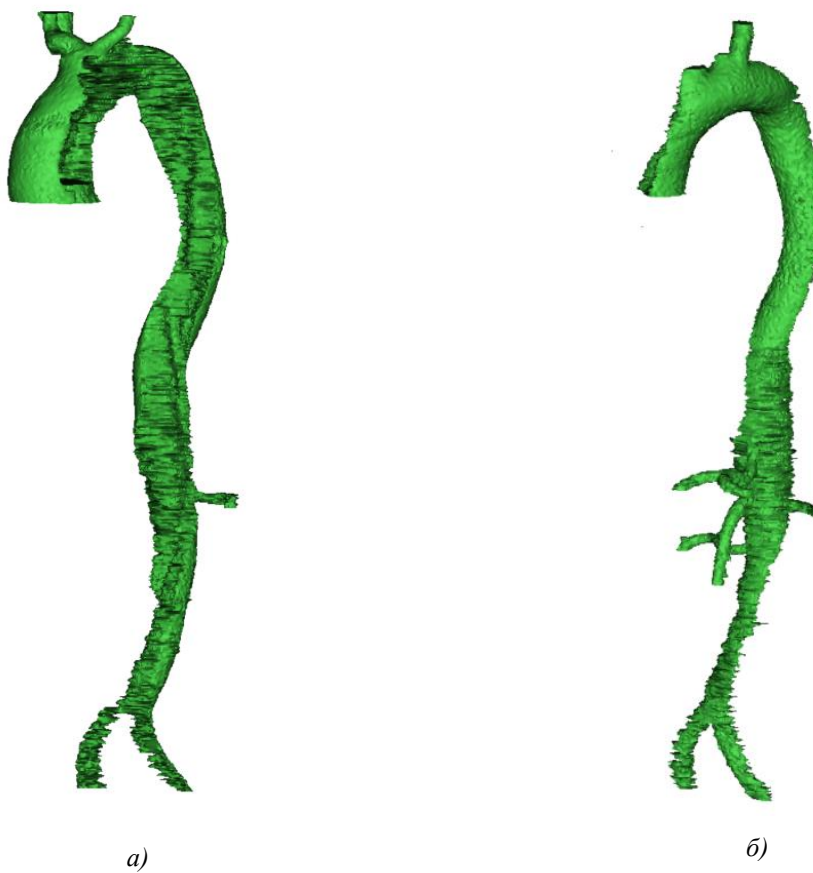
Слика 28. Приказ изгледа слике обележавања правог (а) и лажног (б) лумена на преоперативном моделу

На слици 29а) је приказано обележавање правог лумена, а на слици 29б) лажног лумена на постоперативном моделу након чега следи њихово брисање.



Слика 29. Приказ изгледа слике обележавања правог (а) и лажног (б) лумена на постоперативном моделу

На слици 30а) приказан је модел правог лумена, а на слици 30б) приказан је модел лажног лумена преоперативног модела.

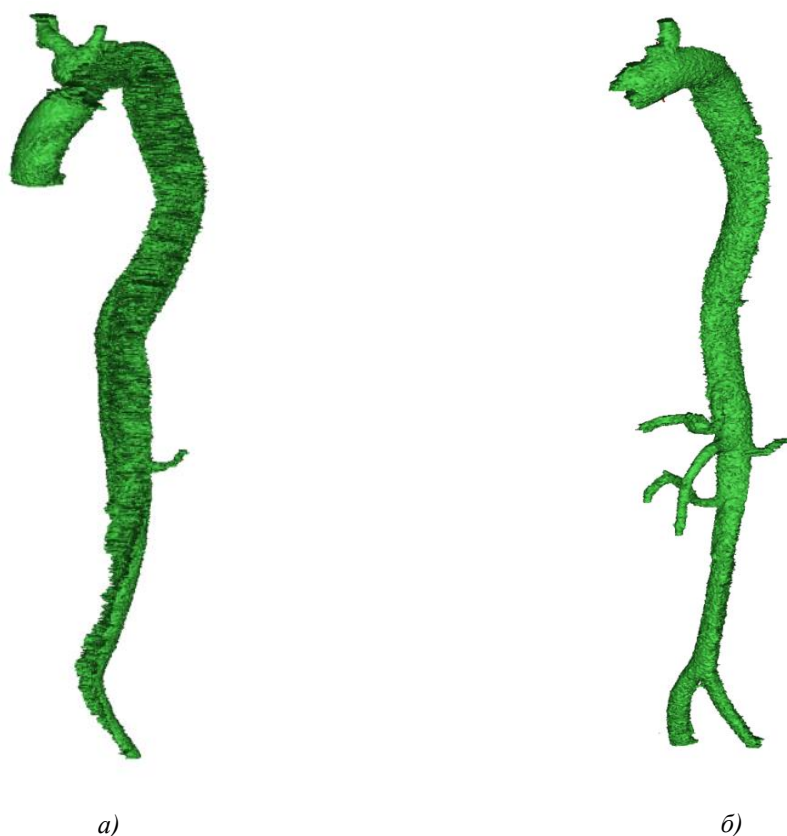


Слика 30. Приказ изгледа модела правог (а) и лажног (б) лумена на преоперативном моделу

На основу изгледа модела може да се уочи да прави лумен постоји у артеријама које полазе са аортног лука, осим субклавијалне артерије, док мало више од половине торакалне и абдоминалне аорте, део леве реналне и обе илијачне артерије чине прави лумен. Лажни лумен обухвата преостали део аорте, субклавијалну артерију, целијачно стабло, горњу мезентеричну артерију, преостали део леве реналне артерије, целу десну реналну артерију и захвата илијачне артерије.

Лажни лумен почиње у усходном делу аорте и завршава се у илијачним артеријама, из чега може да се закључи да је реч о типу I према Дебејкију и типу A према Стенфорду.

На слици 31а) приказан је модел правог лумена, а на слици 30б) приказан је модел лажног лумена постоперативног модела.



Слика 31. Приказ изгледа модела правог (а) и лажног (б) лумена на постоперативном моделу

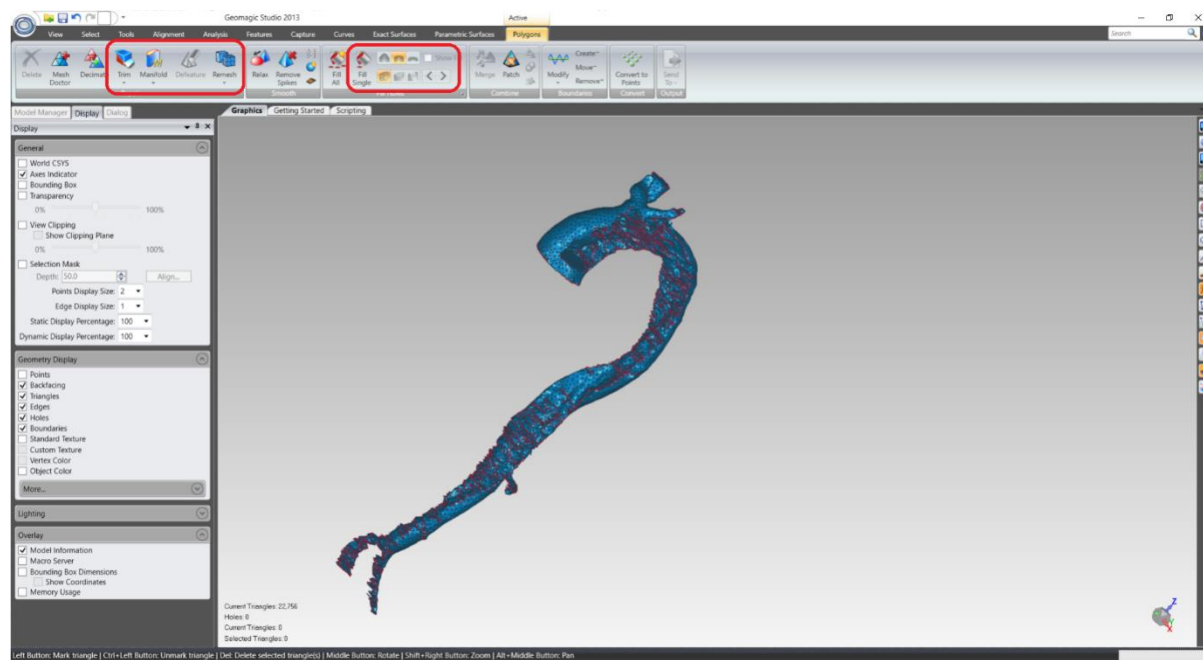
На основу изгледа модела може да се уочи да је усходни део аорте замењен тубулар графтом и да је повећан пречник лажног лумена.

5.2. МОДЕЛИРАЊЕ ФИНЕ ГЕОМЕТРИЈЕ ПОВРШИНСКИХ 3D МОДЕЛА (GEOMAGIC)

Након добијене грубе геометрије правог и лажног лумена, циљ је да се сама геометрија среди на што бољи начин тако да модел правилно репрезентује сам изглед аорте. Овај поступак се назива “израда fine геометрије површинских тродимензионалних модела”.

Даља обрада модела је подразумевала да се сваки лумен уређује посебно. Улазни фајлови у “Geomagic Studio”, тј. излазни фајлови из “Materialise Mimics”, била су два ASCII (stl) фајла – по један за сваки лумен.

На оба лумена примењивани су исти алати из падајућег менија „Polygons”, као што су “Decimate”, “Trim”, “Remesh”, “Manifold”, “Fill Single”. На примеру правог лумена преоперативног модела, на слици 32, приказани су ови алати.



Слика 32. Приказ изгледа програма и алата

Опција “Decimate” коришћена је са циљем смањења броја елемената (троуглића) са нешто више од 300 000 на приближно 40 000 од којих је сачињен сам модел, пошто код њега није било потребе за првобитним бројем елемената.

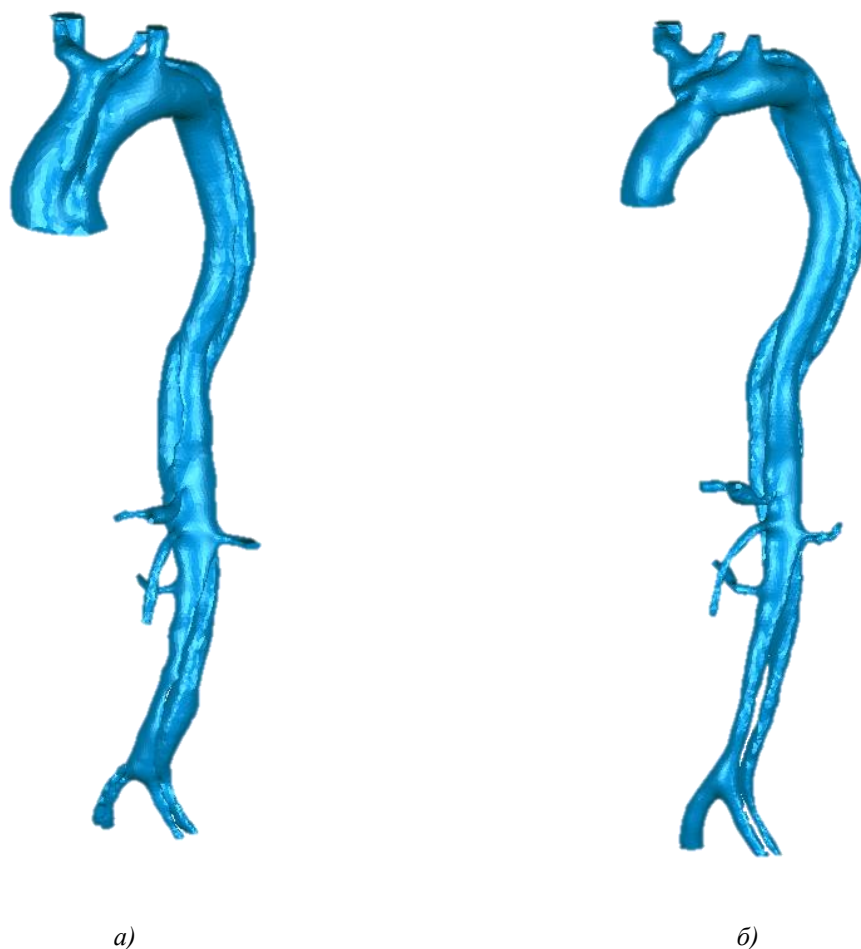
С обзиром на то да су на појединим местима аорте, као и артеријама које излазе из ње мањи пречници, било је потребно да се користи опција “Remesh”. Она нам омогућава да на тим местима смањимо величину троуглића, а тиме повећавамо њихов број и креирамо правилнији и веродостојнији изглед артерија.

Опција “Manifold” служи да након брисања троуглића обрише све слободне троуглиће. Опција „Fill Single” помоћу различитих подалатки као што су: “Curvature”, “Tangent”, “Flat”, “Complete”, “Partial”, “Bridge” служи за попуњавање отвора.

Након сређивања оба лумена одвојено они се спајају. Оба лумена се истовремено увезу као ASCII (stl) фајл, па се сачувају као један ASCII (stl) фајл.

У усходном делу аорте је спојен улаз правог и лажног лумена, као и излаз код леве реналне артерије помоћу алатки “Fill Single” и “Bridge”.

С обзиром на то да су улаз и излази након сређивања заобљени, било је потребно извршити њихово поравнање тако да буду у нормалној равни на правац кретања крви. Ово је извршено помоћу опције “Trim”, конкретно помоћу подопције “Trim with Sheet”. Ова опција нам омогућава сечење самог модела, као и аутоматско затварање отвора који су настали истим. Након сечења потребно је опет извршити сређивање мреже на исеченим местима, водећи рачуна о томе да ова места остану у равни. На слици 33 је приказан изглед модела после сређивања.



Слика 33. Приказ изгледа модела пре (а) и после (б) операције

5.3. ГЕНЕРИСАЊЕ ЗАПРЕМИНСКИХ 3D МОДЕЛА

Након моделирања fine геометрије површинских 3D модела потребно је испунити их тетраедрима, односно генерисати запреминске 3D моделе, за шта је коришћен Femap програм. После генерисања запреминских 3D модела који су испуњени тетраедрима, потребно је тетраедре конвертовати у 3D осмочворне *brick* елементе. Рачунање осмочворним елементима води до ефикаснијег решења у поређењу са четворочворним тетраедарним елементима. Приликом прорачунавања употребом *brick* елемената нема потребе за генерисањем великог броја призми близу зида ради добијања квалитетнијих резултата за расподелу смичућег напона на зиду. Из тог разлога су тетраедарни елементи конвертовани у осмочворне *brick* елементе, применом FEM_PAK конвертера који је развијен у Центру за биоинжењеринг на Факултету инжењерских наука.

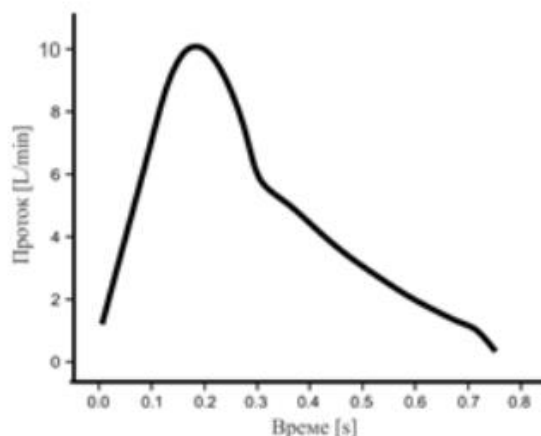
6. РАЧУНАРСКА СИМУЛАЦИЈА

За рачунарску симулацију протока флуида кроз дисектирану аорту потребно је креирати *dat* фајл који садржи податке о координатама чворова и елемената модела, методе решавања једначина, граничне услове, материјалне карактеристике и сл. Овај фајл би требало да се форматира тако да га солвер ПАКФ [23], који је развијен на Факултету инжењерских наука, може учитати.

6.1. ГРАНИЧНИ УСЛОВИ И МАТЕРИЈАЛНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Задати гранични услови за крв су параболичан профил улазне брзине на почетку усходног дела аорте, који симулира срчани циклус, и нултна вредност површинског напона на излазу модела [24]. Зидови модела су ригидни, док је брзина крви на зиду једнака нули.

Запремински проток флуида од срца до аортног система усвојен је из литературе [24] и приказан је на слици 34. Усвојен је податак да пацијенти имају 70 откуцаја срца по минути, тако да средњи проток струјања крви износи 5 l/min. Симулације су спроведене са једним целим срчаним циклусом, а сви резултати приказани у овом раду су презентовани за максимум систоле (0.22 s).



Слика 34. Приказ запреминског протока флуида [24]

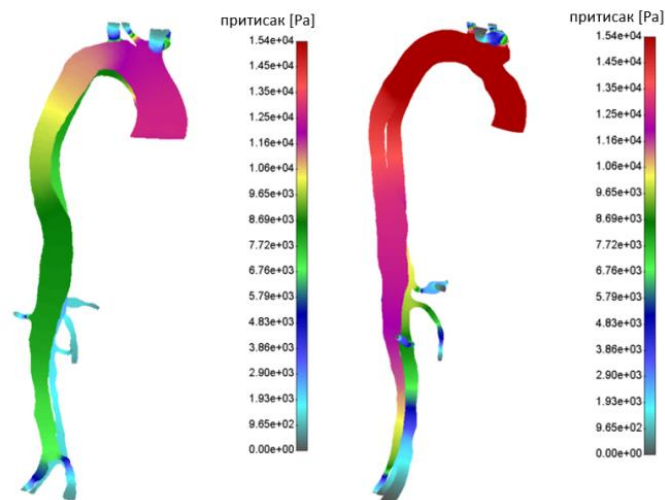
Преузето је из литературе и да је густина крви $\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$, динамичке вискозности $\mu = 0.0037 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Претпоставља се да је проток крви ламинаран, пошто се претпоставља да ниска средња брзина резултира мале вредности Рејнолдсовог броја. Крв се моделира као нестишљива Њутновска течност, одговарајућа за веће артерије [24].

7. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

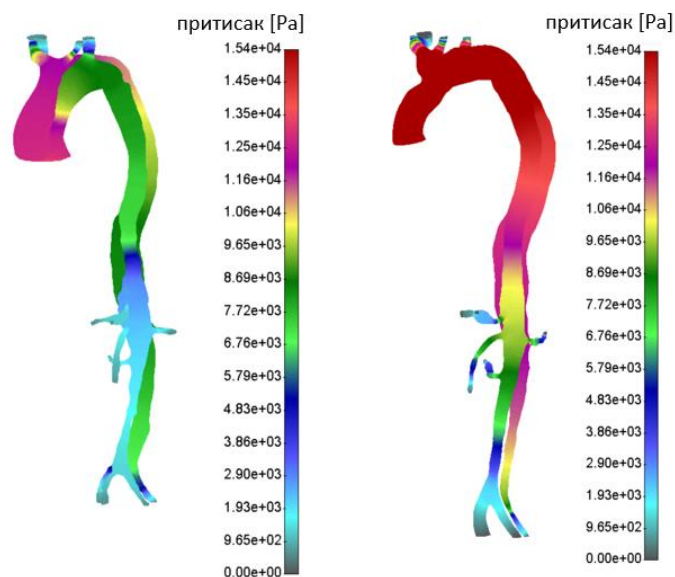
После операције и уградње тубуларног графта на усходном делу аорте није затворен лажни лумен због опструкције протока крви кроз бочне гране, које се због места дисекције сада напајају из лажног лумена, што се види на израђеним моделима. Такође, после операције десна илијачна артерија остаје без снабдевања из правог лумена.

7.1. РЕЗУЛТАТИ КРВНОГ ПРИТИСКА ПРЕ И ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЈЕ

На сликама 35 и 36 су приказане зоне различитог притиска правог и лажног лумена дуж аорте пре и после операције.



Слика 35. Приказ притиска кроз прави лумен пре и после операције



Слика 36. Приказ притиска кроз лажни лумен пре и после операције

Табела 1 представља очитане вредности крвног притиска са ових слика у оба лумена аорте пре и после операције. За израчунавање процента повећања притиска узете су средње вредности крвног притиска за дати сегмент.

Табела 1. Вредности крвног притиска у правом и лажном лумену пре и после операције

ред. бр.	карактеристична места	Прави лумен [кРа]			Лажни лумен [кРа]		
		пре операције	после операције	%	пре операције	после операције	%
1	усходна аорта	13,5 – 12,5	15,4	18	1,2 – 8,7	15,4	211
2	лука аорте	12,5 – 11,6	15,4	28	8,7	15,4	77
3	улаз у брахицефалично стабло	9,7	15,4	59	/	/	/
4	улаз у леву каротидну артерију	9,7	15,4	59	/	/	/
5	улаз у субклавијалну артерију	/	/	/	4,8	15,4	221
6	торакална аорта	11,6 – 7,7	15,4 – 12,5	45	8,7 – 5,8	15,4 – 13,5	99
7	абдоминална аорта	7,7 – 6,8	12,5 – 9,7	53	5,8 – 1,9	12,5 – 1,9	87
8	улаз у целијачно стабло	/	/	/	1,9	9,7	411
9	улаз у горњу мезентеричну артерију	/	/	/	1,9	9,7	411
10	улаз у леву реналну артерију	7,7	10,6	38	1,9	8,7	358
11	улаз у десну реналну артерију	/	/	/	1,9	8,7	358
12	улаз у леву илијачну артерију	6,7	9,7	45	1	1,9	90
13	улаз у десну илијачну артерију	6,7	/	/	1	1,9	90

Вредности крвног притиска после операције су повећане у свим сегментима аорте. У усходном делу код правог лумена дошло је до повећања притиска за 18%, док на истом месту код лажног лумена то повећање износи 211%. Сви улази у бочне артерије имају притисак од 59%, до чак пет пута већи од оног пре операције. У торакалној аорти притисак је повећан у правом лумену за 45%, а у лажном за 99%. У абдоминалној аорти, такође, повећање је за 53% у правом и 87% у лажном лумену.

7.2. СМИЧУЋИ НАПОНИ НА ЗИДОВИМА АОРТЕ ПРЕ И ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЈЕ

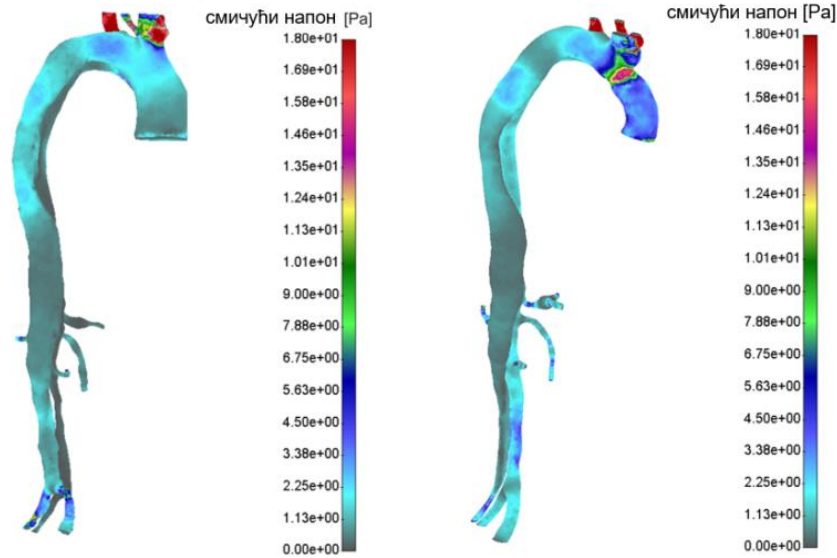
Вредности смичућих напона су у корелацији са ширењем процепа код дисекције аорте, стварањем нових процепа, као и формирањем анеуризме (проширење аорте).

Усходна аорта на правом лумену, пре операције, има вредност смичућих напона од 1,13 Ра, која постепено расте према луку аорте где достиже вредност од 3,4 Ра, да би се низ торакалну аорту смањила на 2,25 Ра. На улазу у брахицефалично стабло и леву заједничку каротидну артерију вредности смичућих напона су 4,5 Ра.

Вредности смичућих напона после операције у тубуларном графту (усходни део аорте) износе 3,4 Ра, након чега се разликују у правом и лажном лумену: на улазу у прави лумен 15,8 Ра, на улазу у лажни лумен 13,5 Ра.

Смичући напон у луку аорте правог лумена иде од 6,7 до 2,25 Ра, у торакалном делу расте до 3,4 Ра, затим опада до 2,25 Ра на њеном крају. Абдоминални део има вредности смичућих напона од 2,25 Ра до 1,13 Ра. На улазу у брахицефалично стабло и леву заједничку каротидну артерију вредности смичућих напона после операције износе 6,7 Ра. Из правог лумена делимично се напајају лева ренална и лева илијачна артерија на чијем улазу су смичући напони 2,25 Ра.

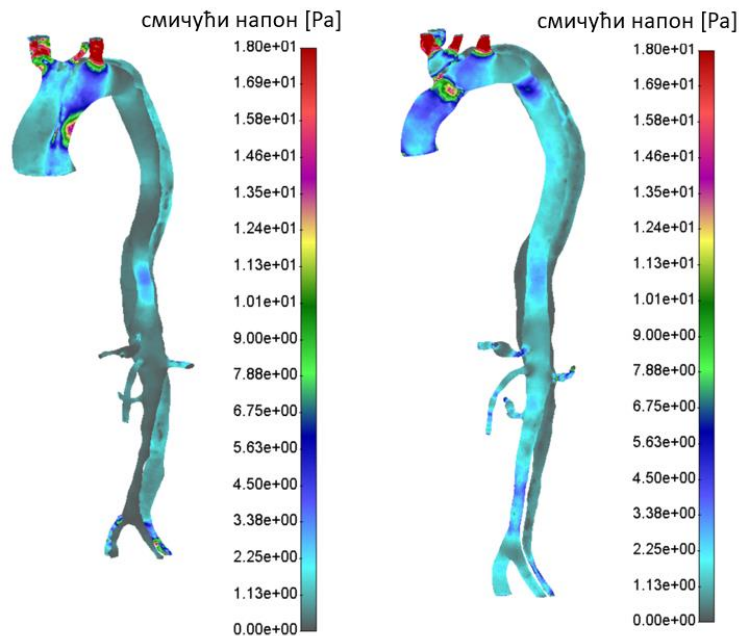
На слици 37 дат је приказ смичућих напона који делују на зид правог лумена аорте пре и после операције.



Слика 37. Приказ смичућих напона који делују на зид аорте у правом лумену пре и после операције

На усходном делу аорте, пре операције, лажни лумен има вредности смичућих напона 5,6 Pa до улаза у субклавијалну артерију. На унутрашњој страни усходне аорте лажног лумена смичући напони достижу максималну вредност од 14,6 Pa. Торакални део лажног лумена има вредности напона 1,13 Pa. Те вредности се повећавају на почетку абдоминалног дела до 3,4 Pa, затим смањују до 2,2 Pa на његовом крају. Све рачве код лажног лумена абдоминалне аорте имају вредности смичућег напона 1,13 Pa.

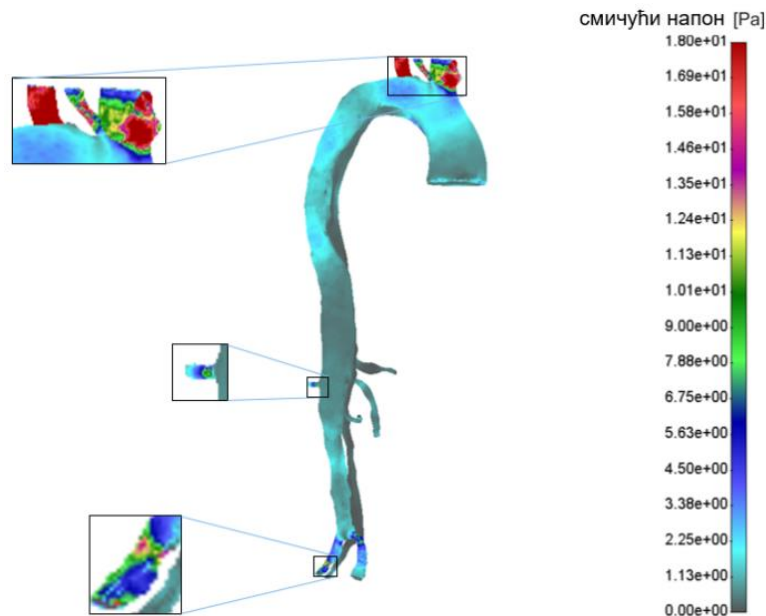
На слици 38 дат је приказ смичућих напона који делују на зид лажног лумена аорте пре и после операције.



Слика 38. Приказ смичућих напона који делују на зид аорте у лажном лумену пре и после операције

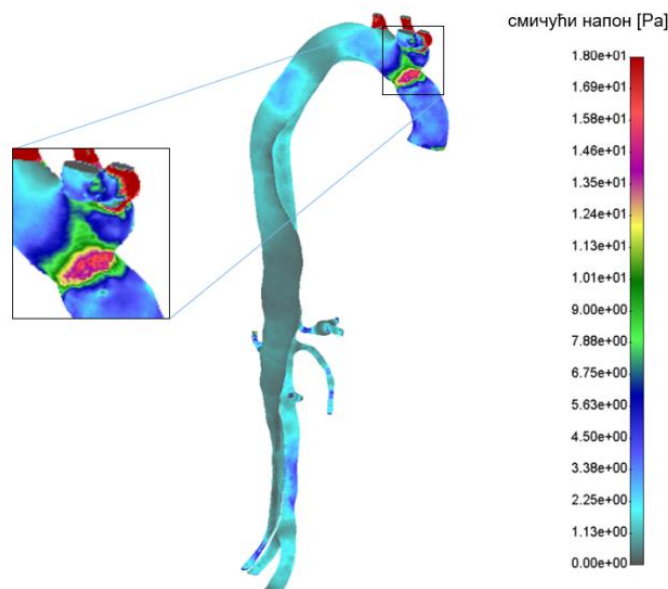
На луку лажног лумена после операције смичући напони су 3,4 - 1,13 Pa. На торакалном делу се повећавају до 4,5 Pa, затим опадају до 1,13 Pa. Абдоминални део лажног лумена после

операције има вредност смичућег напона на свом почетку од 1,13 Pa, након чега расте до 3,4 Pa, затим опада до 1,13 Pa, па расте до 3,4 Pa, да би на крају опет износила 1,13 Pa. Улаз у субклавијалну артерију, која се напаја из лажног лумена, износи 6,7 Pa. Целијачно стабло и исходиште лажног лумена леве реналне артерије имају напон 2,25 Pa, а улаз горње мезентеричне артерије 1,13 Pa. Бифуркација илијачних артерија лажног лумена има вредност смичућег напона 1,13 Pa.



Слика 39. Приказ карактеристичних места смичућих напона на зидовима аорте пре операције

На сликама 39 и 40 истакнута су критична места на зидове аорте пре и после операције.

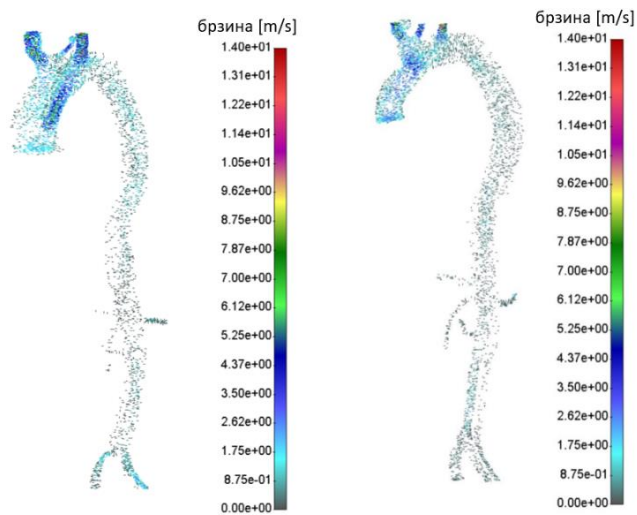


Слика 40. Приказ карактеристичних места смичућих напона на зидовима аорте после операције

На основу графичких приказа критичних места пре и после операције може да се примети да је број критичних места смањен након операције.

7.3. БРЗИНЕ ПРОТОКА КРВИ КРОЗ АОРТУ ПРЕ И ПОСЛЕ ОПЕРАЦИЈЕ

Брзине протока крви кроз аорту пре и после операције дате су на слици 41.



Слика 41. Приказ брзине кретања крви кроз аорту

8. ЗАКЉУЧАК

Хируршком интервенцијом замењен је усходни део аорте тубуларним графтом чиме је крвни притисак повишен до нормалног у свим сегментима аорте и њеним исходиштима. Захваљујући нормалном крвном притиску унутар аорте после операције може се претпоставити да је сада боља прокрвљеност свих делова тела као и органа, са изузетком десне ноге, која се, због затварања правог лумена на десној илијачној артерији, исхрањује само из лажног лумена.

Уколико је пацијент боловао од хипертензије, пре настанка дисекције аорте, или је добио након операције, постоји повећан ризик, те је неопходно додатном терапијом држати крвни притисак у оптималним границама.

Смичући напони на зиду аорте после операције добили су уједначеније вредности, са мање критичних зона. Претпоставка је да ће се напон на прелазу између тубуларног графта и аорте временом смањити.

Може се закључити да су брзине кретања крви после операције повећане самим повећањем смичућих напона, у већини делова артеријског крвотока што би требало да доведе до већег протока и смањења ризика од стварања плака на зидовима крвних судова и атеросклерозе.

Главни закључак овог рада је да се рачунарском симулацијом потврдило побољшање у снабдевању крвљу ткива и органа после операције аорте иако је снабдевање појединих делова тела и даље из лажног лумена. Такође, уочен је и проблем исхране десне ноге, који би могао да се реши будућом интервенцијом.

Допринос рачунарске симулације у медицини је, очигледно, велики, јер лекарима омогућава увид у стања која нису у могућности да сагледају на други начин. Симулацијама операција лекари могу да дођу до правог решења за захват који би требало да изведу, или да на основу симулација постоперативног тока закључе о процесу опоравка пацијента.

9. ЛИТЕРАТУРА

1. **Ванлић – Разуменић Н**, “Радиофармацеутици синтеза, особине и примена”, Веларта, 1998, 263 – 264.
2. <https://www.tes.com/lessons/W2PQDQz9GUvc2w/veliki-optok-krvi>, приступљено: јул 2020
3. **Баљозовић А, Јокић К, Хити Р, Баљозовић Н**, “Здравствена нега 2”, Завод за уџбенике, 1992, 16
4. **Кончар И**, “Одређивање биомеханичких, анатомских и патоморфолошких параметара који утичу на снагу анеуризматског зида и њихова улога у процени ризика од руптуре анеуризме абдоминалне аорте”, докторска дисертација, Медицински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2017.
5. **Филиповић Н**, “Основи биоинжењеринга”, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2012.
6. <https://en.wikipedia.org/wiki/Artery#/media/File:Artery.svg> , приступљено: август 2020.
7. Stephen C. Cowin and Jay D. Humphrey. Cardiovascular Soft Tissue Mechanics. Kluwer Academic Publishers, 2004.
8. **Mulligan-Kohoe J. M, Simons M**, “Vasa Vasorum in Normal and Diseased Arteries”, Circulatio, Jun 2014, vol. 129. No.
9. **U: Levy B, Tedgui A, ed.**, “Biology of the Arterial Wall”, Norwell, MA: Kluwer Academic; 1999.
10. **Geer JC, eds.**, “Pathogenesis of Atherosclerosis“, Baltimore: Williams & Wilkins, chap 6 , 1972.
11. **Al'Aref J. S, Lau C., Swaminathan R.V, Feldman N. D**, “A contemporary Review of Acute Aortic Dissection”, Open Access Emergency Medicine, October 2015.
12. <http://141.211.217.40/about.html>, приступљено: јул 2020. године
13. <https://www.nature.com/articles/nrdp201653>, приступљено: јул 2020. године
14. <https://ikvbnv.ns.ac.rs/old/sr/za-pacijente/srce-i-bolesti-srca/547-disekcija-aorte>, приступљено: август 2020. године
15. <https://smw.ch/article/doi/smw.2017.14489>, приступљено јул 2020. године
16. **Thurmurthy S. G, Karthikesalingam A, Patterson B. O., Holt P. J. E., Thompson M. M.**, “The diagnosis and management of aortic dissection”, <https://www.bmj.com/content/344/bmj.d8290>, January 2012.
17. http://www.annals.in/viewimage.asp?img=AnnCardAnaesth_2014_17_4_302_142071_f4.jpg, приступљено: август 2020. године
18. https://www.researchgate.net/figure/Type-A-aortic-dissection-at-CT-Axial-image-from-spiral-CT-scan-reveals-aortic_fig4_12712669, приступљено: август 2020. године
19. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcvm.2015.00005/full>, приступљено: август 2020. године

20. **Будић Д**, “Здравствена нега болесника са дисекцијом аорте”, Свеучилиште у Сплиту, Сплит, 2014.
21. **Dillon-Murphy D, Noorani A, Nordsletten D, Figueroa C.A**, “Multy-modality image-based computational analysis of haemodynamics in aortic dissection”, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 15, 857-876, 2016.
22. **Савељић И, Филиповић Н, Велички Ј**, “Нумеричка анализа преоперативног и постоперативног модела акутне аортне дисекције”, *Инфотех-Јахорина*, vol. 16, Март 2017.
23. **РАКФ** - Program for fluid dynamics simulation, **Filipovic et al** [<http://www.bioirc.ac.rs/index.php/software/5-pak>]
24. **Савељић И**, “Нумеричко решавање односа правог и лажног лумена акутне аортне дисекције”, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.