

Valts Liepiņš

# Pacientam pielāgota digitāla aortas modeļa izveides automatizācijas iespējas

## *Opportunities for automatic creation of personalized digital aorta model*

E-pasts: valtsl97@gmail.com

Līdzautori: Jānis Virbulis un Vadims Geža

### **Abstract**

Thoracic aorta aneurysm is a pathological enlargement of aorta, which develops asymptotically and untreated can cause lethal consequences.

At the moment, the diameter of the aorta is used for the diagnosis of this disease, which is measured from computed tomography images. However, this criterion leaves around 1/3 of cases undiagnosed [Neri et al., 2005]. The aim of this study was to create a model for calculating blood flow in the thoracic aorta, based on which a diagnostic method using the physical flow parameters could be created. Computed tomography images of real patients were used for creation of digital models of the aorta. These images were processed by a medical image analysis software "3DSlicer". To commence numerical flow calculations, the inflow and outflow regions of the acquired surface mesh were found, and a three-dimensional mesh of finite elements was generated. OpenFOAM, an open source computational fluid dynamics toolbox was used for numerical flow calculations. To customize the method for each individual case, it is important to achieve an automatic recognition of the structure of the aorta. This was achieved by generating a skeleton of the surface model, which describes the topology of the aorta. Blood flow simulations in stationary and dynamic conditions were conducted, using the generated three-dimensional mesh, simultaneously optimizing the most fitting boundary conditions to the region that is being studied.

The suitability of the generated mesh for fluid dynamics simulations was tested in this study. The next step is the simulation of a physiological blood flow that takes

into account the individual blood flow parameters of the patient, as well as the elastic effects of the overall arterial tree on the flow in the aorta.

**Keywords:** blood flow simulation, aortic aneurysm, OpenFOAM, patient-specific mesh generation

## Ievads

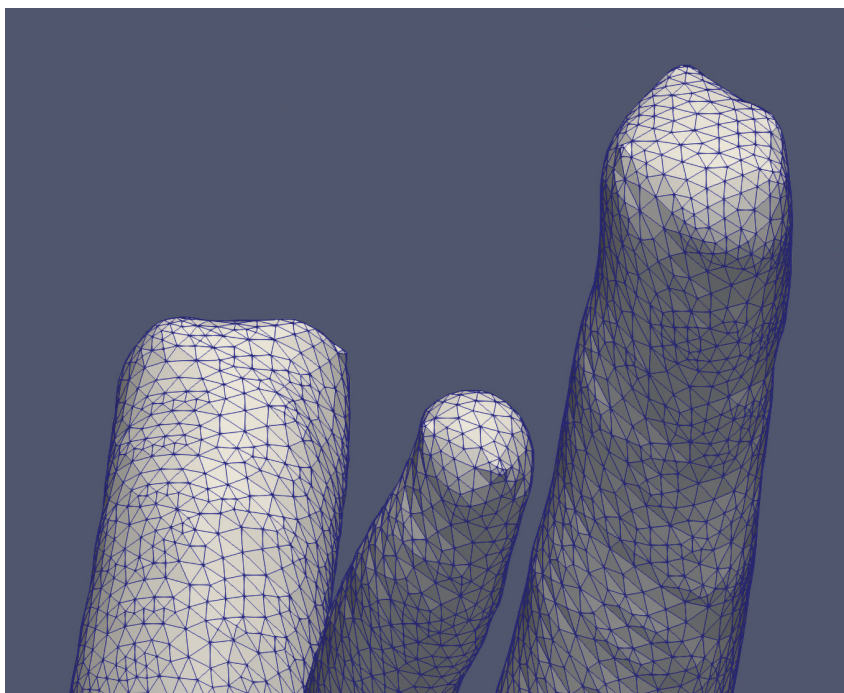
Aorta ir lielākā artērija cilvēka ķermenī, kura ir savienota ar sirdi un no kuras izriet viss arteriālais asinsvadu koks. Tā sastāv no divām daļām — torakālās un vēdera aortas. Torakālā aorta sastāv no trīs posmiem: augšupejošās daļas, loka un lejupejošās daļas. Torakālās aortas loka liekums ir lielāks par 180°, un no tā atdalās trīs lielas artērijas, kas apasiņo galvu un abas rokas.

Aortas aneirisma ir slimība, kas novājinātas aortas muskulatūras un aortā valdošā augstā asins spiediena iespaidā sāk deformēt aortas sienas. Neārstēta aortas aneirisma var novest līdz aortas plīsumam, kurš parasti ir letāls slimības iznākums [Braunwald et al. 2001]. Šī galvenokārt ir vecuma ierosināta slimība, un Latvijā 40% no aortas aneirisma slimniekiem mirst pēkšņā nāvē. Šobrīd šī slimība tiek diagnosticēta, novērtējot aortas diametru [2014 ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases 2014]. Tomēr ar šo metodi nav iespējams diagnosticēt 1/3 no slimības izpausmes gadījumiem [Neri et al. 2005]. Tā kā cilvēku ķermeņu izmēri un to proporcijas ir dažādas, šī diagnosticēšanas metode ir nepietiekama. Tā vietā slimības kritērijus varētu balstīt uz pacienta asins plūsmas īpašībām, kas arī ir viens no aortas deformācijas tiešajiem cēloņiem. Viens no veidiem, kā šādu diagnostikas metodi var realizēt, ir izveidot pacienta aortas fizikāli akurātu modeli, uz kura būtu iespējams simulēt pacientam pielāgotu asins plūsmu. Ir svarīgi izstrādāt vienotu šāda modeļa uzstādīšanas metodoloģiju, lai būtu iespējams veikt tālākus pētījumus un salīdzināt dažādu pacientu aortu simulāciju rezultātus. Viens no šīs metodoloģijas posmiem ir pacienta aortas atveidošana virtuālā vidē, kuras apskats un metožu salīdzinājums ir galvenais šī pētījuma mērķis. Pētījumā izvirzītie uzdevumi bija izveidot automatizētu metodi uz pacienta aortas balstīta skaitliskā režģa ģenerēšanai, to pārbaudīt ar tuvinātu asins plūsmas skaitlisko aprēķinu un dažādu aortas simulācijas robežnosacījumu izpēti.

Asins ir neņūtona veida šķidrums ar viskoelastiskām īpašībām. Tas nozīmē, ka tās plūsmas attīstība ir grūtāk paredzama nekā ūdenim līdzīgām vielām. Papildu sarežģītību asins plūsmas attīstības simulēšanai rada artēriju elastīgā daba, kas asins spiediena iespaidā nepārtraukti izplešas un saraujas. Tādēļ fizioloģiski akurāta asins plūsmas skaitliskā modelēšana ir ārpus šī pētījuma iespējām. Tā vietā asins plūsma tika simulēta ar ņūtona veida šķidrums tuvinājumu un artēriju elastība tika ignorēta. Šie skaitliskie aprēķini tika veikti, lai objektīvi novērtētu pētījumā izstrādātā režģa kvalitāti un lietojamību skaitlisko aprēķinu veikšanai.

Aortas modeļa izstrāde tiek sākota ar pacienta aortas izmēru un formas iegūšanu. Ērts un neinvazīvs risinājums ir datortomogrāfija, kas ļauj iegūt aortas telpisko attēlojumu ar akurātiem izmēriem un proporcijām. Ņemot vērā, ka aorta nepārtraukti pulsē un maina savus izmērus asins cirkulācijas laikā, ir nepieciešams sasinchronizēt iekārtu, kas veic datortomogrāfijas uzņēmumu, ar asinsrites cikla pulsu. Šādi ir iespējams iegūt asu jeb fokusētu visa krūškurvja telpisku attēlu. Datortomogrāfijas uzņēmumu apstrādei šajā pētījumā tika izvēlēta "Kitware" programatūra "3DSlicer" [Slicer.org. 2019]. Šī ir bezmaksas atvērta pirmkoda programatūra, kuru izstrādā atzīta kompānija, kas nodrošina ilgtermiņa programatūras atbalstu, pieejamību un padara metodoloģiju atkārtojamu citām pētniecības grupām. Ar šīs programmas palīdzību ir iespējams atlasīt telpisku apgabalu, kas atbilst viena veida audiem. Šo apgabalu var saglabāt kā trīsdimensionālu virsmas modeli, kuru ir iespējams apstrādāt ar dažādiem modelēšanas rīkiem.

Šādi iegūts aortas virsmas modelis vēl nav derīgs skaitlisko aprēķinu veikšanai. Iegūtā virsma vietām var būt nepietiekami gluda vai aortas modeļa gali noapažoti un ar neizteiksmīgām robežām (skat. 1. attēlu). Šie defekti rodas no datortomogrāfijas izšķirtspējas ierobežojumiem, kur audu reģionu robežas ir pārāk izplūdušas, lai akurāti rekonstruētu trīsdimensionālu virsmas modeli. Virsmas gludināšanai eksistē dažādi efektīvi risinājumi, tomēr lielākas problēmas sagādā aortas galu kvalitātes uzlabošana. Aortas modeļa galu kvalitāte ir būtiska, jo, lai veiktu skaitliskus aprēķinus, ir nepieciešams norādīt asins plūsmas sākuma nosacījumus, kurus definē uz fizikālā apgabala ieplūdes un izplūdes virsmām. Sākuma nosacījumi ir jānorāda uz plakanas virsmas, kas ir apskatāmās caurules, šajā

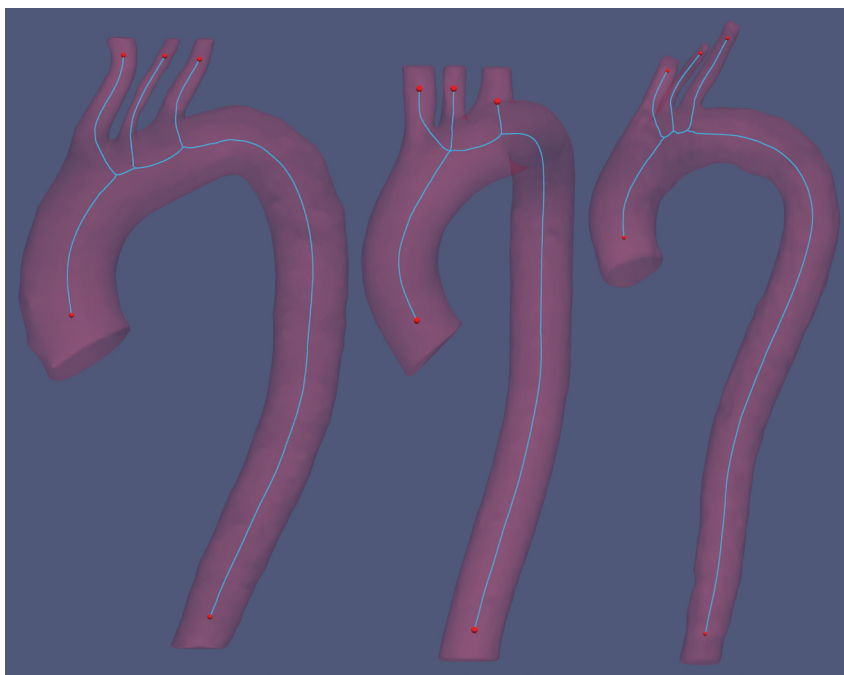


**1. attēls.** Trīs lielākie aortas atzari, caur kuriem asinis izplūst no aortas. Skaitlisko aprēķinu veikšanai visām izplūdēm un ieplūdēm ir nepieciešams norādīt atvērto virsmu, līdz ar to ir jānošķeļ aortu galu noapaļojumi

gadījumā aortas, šķērs griezumus. Šo šķērs griezumus ir iespējams norādīt patvaļīgi, bet, tā kā pētījuma mērķis ir izstrādāt vienotu aortas apstrādes metodoloģiju, šis process ir jāautomatizē.

Pirmā pētījumā izstrādātā metode balstās uz atsevišķu virsmas elementu savstarpējo analīzi un ļauj atrast asus pārliekuma punktus uz virsmas. Dažos gadījumos šādi var veiksmīgi atrast aortas galus, tomēr šī metode nebija uzticams risinājums. Otrā pētījumā izstrādātā metode balstās uz virsmas topoloģijas analīzi un pievērš uzmanību aortas formas struktūrai. Viegli apstrādājamu virsmas modeļa struktūru ir iespējams iegūt ar CGAL rīkkopas virsmas skeletizācijas rīku, kurš no virsmas modeļa iegūst viendimensionālu ģeometrisku objektu (skat. 2. attēlu).

Apstrādātais aortas virsmas modelis tālāk var tikt izmantots, lai ģenerētu trīsdimensionālu režģi skaitlisko aprēķinu veikšanai ar galīgo



**2. attēls.** Trīs dažādu pacientu aortu modeļi. Ar zilu līniju ir attēloti automātiski uzģenerētie virsmas modeļa skeleti. Ar sarkaniem punktiem ir atzīmēti automātiski atrastie modeļa galapunkti, kas ir nepieciešami, lai nogrieztu noapaļotos aortu galus

elementu metodi (*Finite Element Method*). Galīgo elementu režģi ir iespējams uzģenerēt, izmantojot vienu no divām metodēm: kombinējot matemātiski vienkārši uzdozamu formu režģus, līdz tiek iegūts vēlamās formas režģis, vai arī uzģenerējot visaptverošu maza izmēra elementu bāzes režģi, iezīmējot tajā vēlamās formas reģionu, un tad, paturot tikai šim reģionam piederošos elementus, uzlabo robeželementu atbilstību vēlamajai formai. Šajā pētījumā tika izvēlēta otrā, lejupejošā stila, režģa ģenerēšanas metode. Lai gan šai metodei ir augsta uzstādīšanas sarežģītība ar lielu pielāgojamo parametru skaitu, šī metode ļauj izveidot strukturētu režģi no brīvformas virsmas modeļa. Šāda režģa ģenerēšanai tika izvēlēts “OpenFOAM” “snappyHexMesh” rīks.

Lai novērtētu iegūtā režģa lietojamību, uz tā tika veikti vairāki hidrodinamikas aprēķini. Veiktie aprēķini neatbilst fizioloģiskajai asins plūsmai,

kuras akurātai simulēšanai būtu jāņem vērā aortas sienu kustības dinamika un visa arteriālā asinsvadu koka elastības ietekme uz šo plūsmu.

## 1. Metodes

Pacientam izveido torsa datortomogrāfijas uzņēmumu, kurš tiek veikts piecu minūšu laikā, un katru mērījumu veic sistoles sākuma momentā. Sistoles sākuma momentu nosaka ar kardiogrammas palīdzību, kas ir savienota ar datortomogrāfijas konsoli. Iegūto datortomogrāfijas uzņēmumu apstrādā ar “Kitware” “3DSlicer” programmatūru, iezīmējot trīsdimensionālu aortas audu reģionu, kuram tiks izstrādāts skaitliskais modelis. Iezīmēto reģionu ekstrapolē ar “3DSlicer” funkciju “Grow from seeds” un eksportē kā trīsdimensionālu virsmas modeli STL formātā.

Pirmā izstrādātā aortas virsmas modeļa galu atrašanas metode balstās uz atsevišķu virsmas elementu analīzi. Izmantojot “OpenFOAM” “surfaceFeatures” rīku, atrod visus punktus starp elementiem, kuru savstarpēji veidotais leņķis ir šaurāks par  $172^\circ$ . Šāds leņķis tika izvēlēts, jo tas ir pietiekami šaurs, lai netiktu ņemts vērā aortas virsmas negludums un lai tas atbilstu aortas galu noapaļojumam. Iegūto punktu filtrēšanai un grupēšanai izmanto “DBScan” algoritmu ar parametriem minimālajam blakusesošo punktu skaitam, kas no apskatāmā punkta atrodas tuvāk par attālumu. Katrai izfiltrētajai punktu grupai atrod plakni, kurā grupas punkti ir izkārtoti, izmantojot mazāko kvadrātu metodes ģeometrisko interpretāciju ar literatūrā piedāvāto algoritmu [Eberly 1999]. Plaknes izmēri atbilst aortas šķērsgriezuma vietas diametram ar mazu papildus pievienotu robežu. Iegūtās plaknes saglabā atsevišķi kā trīsdimensionālas virsmas modeļus STL formātā.

Otrā izstrādātā aortas virsmas modeļa galu atrašanas metode balstās uz aortas virsmas modeļa topoloģisku analīzi. Izmantojot rīkkopas CGAL “Triangulated Surface Mesh Skeletonization” algoritmu, tiek iegūts virsmas struktūras skelets, kā viendimensionāls telpisks objekts [CGAL Editorial Board 2019]. Apskatot katru no struktūras skeletu veidojošajiem punktiem, atrod tādus punktus, kuri ir savienoti tikai ar vienu blakusesošu punktu. Šos punktus sauc par gala punktiem. Apskata taisni, kas savieno gala punktu ar tā blakusesošo punktu un to pagarina gala punkta virzienā,

līdz tā šķērso aortas modeļa virsmu. Krustpunkta atrašanai izmanto CGAL “AABB Tree” algoritmu. Izveido šķērsriezuma plakni uz pagarinātās taisnes vietā, kur aortas diametra izmaiņa ir nemainīga. Iegūtās plaknes saglabā atsevišķi, kā trīsdimensionālas virsmas modeļus STL formātā.

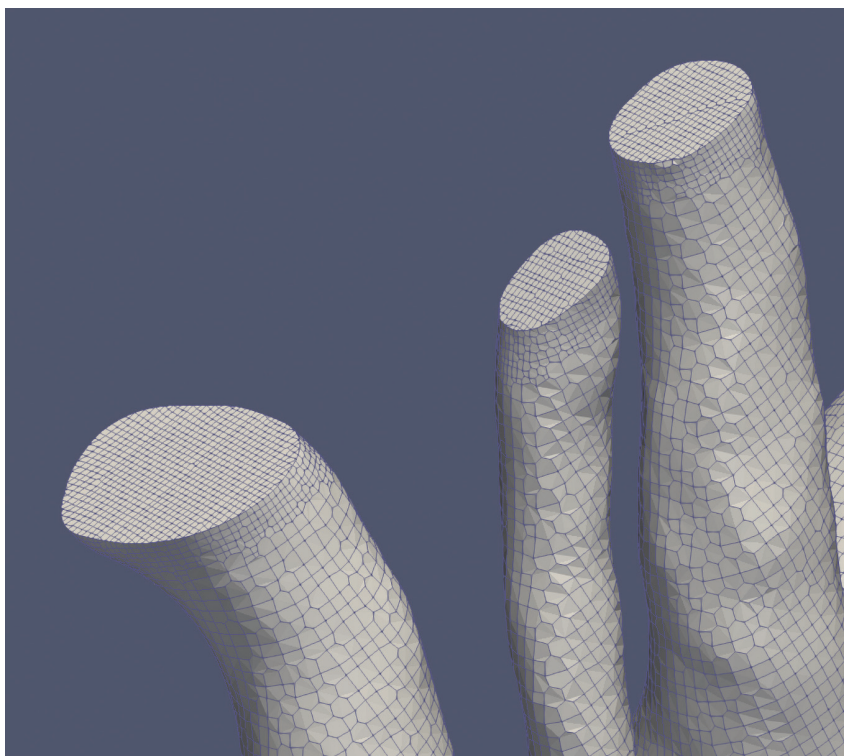
Iegūto plakni kopā ar aortas virsmas modeli uzdod “OpenFOAM” “snappyBlockMesh” rīka konfigurācijas failā un ģenerē trīsdimensionālu galīgo elementu režģi.

Iegūtā aortas režģa modelis tiek pārbaudīts, uz tā veicot asins plūsmas aprēķinus, izmantojot Ņūtona veida šķidrums tuvinājumu. Šķidrums plūsmas attīstība tika risināta ar Navjē–Stoksa parciāldiferenciālvienādojumiem, izmantojot galīgo elementu metodi. Šis aprēķins tika veikts, stacionāram gadījumam izmantojot “OpenFOAM” “simpleFoam” risinātāju. Kā ieplūdes robežnosacījumu izmantoja plūsmas daudzumu, bet izplūdes robežnosacījumi tika fiksēti uz lielu spiedienu.

## 2. Rezultāti un diskusija

Pētījumā tika izstrādātas divas dažādas metodes aortas virsmas modeļa ieplūdes un izplūdes robežu meklēšanai. Sākotnēji izstrādātā metode tika balstīta uz atsevišķu virsmas modeļa elementu analīzi. Šāda metode nespēja apmierinoši atpazīt atvērtos galus dažādu formu, izmēru un kvalitātes aortu modeļiem. Secinot, ka izvēlēta metode ir neadekvāta aortu modeļu apstrādei, tika apsvērti alternatīvi veidi, kā analizēt aortas virsmas modeli. Pievēršot uzmanību aortas virsmas modeļa vispārējai formai, tika izvirzīta ideja vienkāršot trīsdimensionālo aortas modeli, saglabājot tikai tās strukturālo informāciju. Apskatot virsmas modeļa reducēšanas risinājumus, tika atrasta virsmas skeletizēšanas metode. Ar virsmas skeletu veiksmīgi izdevās automātiski atrast dažādu aortas modeļu robežas.

No apstrādātā aortas virsmas modeļa izdevās izveidot trīsdimensionālu skaitlisko režģi (skat. 3. attēlu), uz kura bija iespējams veikt šķidrums dinamikas skaitliskos aprēķinus. Lai gan no aprēķiniem bija iespējams iegūt fiziski ticamus rezultātus, režģa kvalitāte asins plūsmas skaitlisko aprēķinu veikšanai būtu nepietiekama. Kvalitāti būtu iespējams uzlabot, izveidojot režģa robežslāņus, kā arī panākot, lai bāzes režģa elementi būtu orientēti līdz ar aortas lejteces virzienu.



**3. attēls.** Trīs lielākie aortas atzari ar automātiski nošķeltiem galiem. Ar zilām līnijām ir attēlotas uz virsmas redzamās trīsdimensionālā skaitliskā režģa šūnu šķautnes. Ar līdzīgām šūnām ir aizpildīts viss aortas modeļa tilpums

Veiktajiem hidrodinamikas skaitliskajiem aprēķiniem tika izvēlēti fizioloģiskai asins plūsmai līdzīgi sākuma nosacījumi. Tika apskatīti dažādi modeļi aortas asins plūsmas robežnosacījumiem. Pēc literatūras izpētes tika secināts, ka vislielāko ietekmi uz asins plūsmas fizioloģisko akurātumu atstāj arteriālā asinsvadu koka elastības ietekme uz plūsmu aortā [Olufsen 1999]. Olufsenas pētījumā tika izstrādāta metode trīsdimensionāla aortas apgabala apvienošanai ar viendimensionālu arteriālā koka modeli, ko savā pētījumā izstrādājuši Vignons un Teilors [Vingon, Taylor 2004]. Lai gan arteriālā koka elastība parasti netiek ņemta vērā, Olufsenas pētījums veiksmīgi nodemonstrēja tā ietekmes būtību. Līdz ar to turpmākos



pētījumos būtu jāvelta uzmanība arteriālā koka ietekmei uz asins plūsmu aortas modelī.

## Secinājumi

Ir izdevies izstrādāt algoritmu un programmatūru pacienta aortas skaitliska modeļa izveidei no datortomogrāfijas uzņēmumiem.

Pacientam pielāgotā skaitliskā režģa izveides automatizācijai visstabilākā metode ir aortas virsmas strukturālā skeleta analīze, ar kuras var atrast aortas robežu ģeometriskos apgabalus.

## Izmantotā literatūra

1. Braunwald, E., Libby, P. and Zipes, D. (2001). *Heart Disease*. Philadelphia, Pa: Saunders.
2. CGAL Editorial Board (2019). *The Computational Geometry Algorithms Library*. The CGAL Project. Pieejams: <https://www.cgal.org/> (skatīts 15.11.2019.).
3. Eberly, D. (1999). *Least Squares Fitting of Data by Linear or Quadratic Structures*. Geometric tools. Pieejams: <https://www.geometrictools.com/Documentation/LeastSquaresFitting.pdf> (skatīts 15.11.2019.).
4. Neri, E., Barabesi, L., Bukla, D., Vricella, L., Benvenuti, A., Tucci, E., Sassi, C., Massetti, M. (2005). Limited Role of Aortic Size in the Genesis of Acute Type A Aortic Dissection. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 28(6), p. 857–863.
5. Olufsen, M. (1999). Structured Tree Outflow Condition for Blood Flow in Larger Systemic Arteries. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 276(1), p. H257–H268.
6. Slicer.org. (2019). *3D Slicer*. Kitware. Pieejams: <https://www.slicer.org/> (skatīts 15.11.2019.).
7. Vignon, I. E., Taylor, C. A. (2004). Outflow Boundary Conditions for One-dimensional Finite Element Modeling of Blood Flow and Pressure Waves in Arteries. *Wave Motion*, 39(4), p. 361–374.
8. 2014 ESC Guidelines on the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases (2014). *European Heart Journal*, 35(41), p. 2873–2926.