

**VILNIAUS UNIVERSITETAS  
MEDICINOS FAKULTETAS**

Baigiamasis darbas

**Pilvinės aortos aneurizmos automatinės detekcijos nauda matuojant aneurizmos tūrį.  
Literatūros apžvalga ir modelio sukūrimas**

**The Value of Automatic Abdominal Aortic Aneurysm Detection for Aortic Volume  
Measurement.  
Literature Review and Volume Model Development**

**Austėja Račytė**  
VI kursas, 12 grupė

**Patologijos, teismo medicinos ir farmakologijos katedra**

Darbo vadovas

Dr. Tomas Baltrūnas

Katedros vadovas

Prof. dr. Arvydas Laurinavičius

2024-05-10

Studentės elektroninio pašto adresas – [austeja.racyte@mf.stud.vu.lt](mailto:austeja.racyte@mf.stud.vu.lt)

## SANTRAUKA

Aortos diametras jau beveik 20 metų yra pagrindinis parametras, naudojamas klinikinėje praktikoje diagnozuojant aortos aneurizmas, stebint jų progresavimą, sprendžiant dėl intervencinio gydymo ir sekant aortos būklę po gydymo. Nepaisant plataus naudojimo, diametro matavimas turi ir trūkumų. Dėl to pastaruoju metu literatūroje vis daugiau yra užsimenama apie pranašesnę bei tikslesnę metodą – aortos aneurizmos tūrio matavimą. Nors tūrio matavimas geriau negu diametras padeda pastebėti aneurizmos maišo kitimus po endovaskulinių intervencijų, tiksliau parodo aneurizmos didėjimą, kasdienėje klinikinėje praktikoje tūrio matavimas nėra taikomas dėl tam tikrų techninių kliūčių. Kadangi manoma, jog didelės laiko sąnaudos yra pagrindinis tūrio matavimo trūkumas, sukeliantis neatitikimą tarp darbo krūvio ir darbo jėgos, šiame darbe buvo nuspręsta palyginti laiko sąnaudas, matuojant aortos aneurizmos tūrį rankiniu bei visiškai automatiniu būdu. Šiam tyrimui atlikti buvo naudojami dešimties pacientų, kuriems buvo diagnozuota pilvo aortos aneurizma, pilvo ir dubens srities kompiuterinės tomografijos angiografijų (KTA) rinkiniai. Iš viso analizuota 20 KTA vaizdų serijų. Visų pacientų aortos ir bendrųjų klubinių arterijų tūriai buvo apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant 3mensio ir OsiriX programas bei automatiniu būdu naudojant EndoArt dirbtinio intelekto algoritmą. Kiekvieno matavimo metu laiko sąnaudos buvo fiksuojamos, o vėliau palygintos. Lyginant su automatiniu aortos ir bendrųjų klubinių arterijų tūrio skaičiavimu, statistiškai reikšmingai didesnės laiko sąnaudos buvo stebėtos skaičiuojant tūrį rankiniu būdu ( $p < 0.001$ , remiantis Vilkoksono kriterijumi). Šio tiriamojo darbo rezultatai pabrėžia automatinio aortos aneurizmų tūrio skaičiavimo naudą. Automatinis tūrio skaičiavimas klinikinėje praktikoje padėtų sutaupyti laiko, sumažintų neatitikimą tarp darbo krūvio ir darbo jėgos bei padėtų tiksliau užfiksuoti mažus, bet kliniškai svarbius aneurizmų pokyčius.

**Raktažodžiai:** aortos aneurizma; diametras; tūris; dirbtinis intelektas.

## SUMMARY

For almost 20 years, aortic diameter has been the main parameter used not only for diagnosing aortic aneurysms, but also for surveillance, clinical decision-making and follow-ups after interventions. Despite its widespread use, diameter measurement has some relevant limitations. Therefore, aortic aneurysm volume measurement has recently been reported as a superior and more accurate method than diameter. Although volume measurement excels in detecting

aneurysm sac changes post-endovascular interventions and more accurately reflects aneurysm growth, it still not used in daily clinical practice due to technical limitations. Given that high time consumption is considered the primary drawback of volume measurement, leading to a mismatch between workload and workforce, this study aimed to compare the time consumption of manual and fully automatic aortic aneurysm volume measurement. Ten sets of abdominal and pelvic computed tomography angiography (CTA) images from 10 patients with abdominal aortic aneurysms (totaling 20 CTA image series) were utilized. Aortic and common iliac artery volumes were calculated manually in all patients using the 3mensio and OsiriX software and automatically using the EndoArt artificial intelligence algorithm. The time consumption for each measurement was recorded and then compared. Statistically significantly higher time costs were observed for manual volume calculation compared to fully automatic measurement ( $p < 0.001$ , based on Wilcoxon's criterion). These findings highlight the benefits of automatic aortic aneurysm volume measurement. Implementing automatic volume measurement in clinical practice would save time, mitigate the mismatch between workload and workforce, and enable more accurate detection of small yet clinically relevant aneurysm size changes.

**Keywords:** aortic aneurysm; diameter; volume; artificial intelligence.

## ĮVADAS

Aneurizma (gr. ἀνεύρυσμα – išsiplėtimas) – patologinis kraujagyslės išsiplėtimas, kai jos diametras tampa 50% didesnis negu normalus (1). Iš visų aortos aneurizmų pilvo aortos aneurizmos (PAA) yra pačios dažniausios (2). Krūtininė ir pilvinė aortos dalys yra embriologiškai skirtingos: krūtininė aorta formuojasi iš poašinės mezodermos (somitų), o pilvinė aortos dalis formuojasi iš šoninės mezodermos (visceralinio lapelio). Dėl šių embriologinių skirtumų, krūtininėje aortos dalyje natūraliai yra daugiau elastino negu kolageno (santykis 2:1), o pilvinėje dalyje elastino mažiau negu kolageno (santykis 1:2). Kadangi elastinas yra labai svarbu normaliam kraujagyslės sienos elastingumui, natūraliai mažesnis jo kiekis yra vienas iš faktorių, lemiančių, jog aneurizmos dažniausiai formuojasi pilvo srityje (3). Pilvo aortos aneurizmos formavimasis yra sudėtingas patofiziologinis procesas, kurio pagrindiniai komponentai yra proteolizė, oksidacinis stresas, imuninis uždegiminis atsakas ir aortos sienos lygiųjų raumenų apoptozė (4). Dėl šių procesų aortos sienoje papildomai sumažėja elastino skaidulų ir ji praranda elastingumą, mažėja jos sienos rezistentiškumas ir sutrinka aortos gebėjimas palaikyti normalų diametrą tarp pulsinių bangų. Be to, dėl lygiųjų raumenų apoptozės aortos sienoje ima kauptis kolagenas. Šie pokyčiai lemia tai, kad

palaipsniui aortos aneurizmos progresuoja. PAA pavojingos tuo, kad dažniausiai joms yra būdinga besimptomė eiga, kuri leidžia aneurizmai nekontroliuojamai didėti, o tai ilgainiui lemia aneurizmos plyšimą. Aneurizmai plyšus tik apie 50% pacientų pasiekia gydymo įstaigą gyvi, o bendras plyšusių PAA mirtingumas siekia net 80-90% (5). Laiku atlikta pilvinių aortos aneurizmų diagnostika, sekimas bei gydymas yra labai svarbūs norint sumažinti plyšusių aneurizmų sukeltamų mirčių skaičių.

Šiuo metu aortos aneurizmos diametras yra pagrindinis matmuo, naudojamas tiek aneurizmos diagnozavimui, tiek priimant sprendimus dėl aneurizmos gydymo, tiek pacientų sekimui iki ir po gydymo (6,7). PAA yra diagnozuojama, kai aortos diametras siekia ir/ar viršija 3,0 cm, o aneurizmos gydymas yra indikuotinas, kai aortos diametras pasiekia 5,5 cm vyrams bei 5,0 cm moterims. Jeigu aneurizmos diametras didėja daugiau kaip 1,0 cm per metus, rekomenduojama pacientą kuo greičiau nukreipti kraujagyslių chirurgo konsultacijai (7). Nepaisant to, kad diametras yra visame pasaulyje plačiausiai naudojamas parametras PAA diagnostikai, sekimui bei gydymui, vis dažniau yra užsimenama apie šio matavimo trūkumus (8). Yra manoma, kad aortos aneurizmos maksimalaus diametro matavimas nepakankamai tiksliai atspindi aneurizmos formos pokyčius, kadangi aneurizma gali didėti ne tik maksimalaus diametro vietoje. Taip pat esant dideliame aortos vingiuotumui, matavimai gali būti netikslūs ir prastai atsikartoti tarp vertintojų. Verta paminėti ir tai, kad matuojant tik diametrą didėja rizika nepastebėti mažų aneurizmos dydžio pokyčių, kurie kartais irgi lemia aneurizmos plyšimą (9–11).

Pastaruoju metu vis daugiau kalbama apie aneurizmų tūrio matavimą ir jo pranašumus. Aortos aneurizmos tūrio matavimas leidžia gerai identifikuoti aneurizmos morfologiją trimis dimensijomis (3D) (12). Tai ypatingai svarbu vertinant maišinio tipo aneurizmas, kadangi yra žinoma, jog joms yra būdingas silpnas ryšys tarp didėjančio diametro ir plyšimo rizikos (11). Be to, tūrio matavimas tiksliau negu diametras atspindi ne tik didelius, bet ir mažus aneurizmos maišo pokyčius (12). Taigi, tūrio matavimas gali būti vertingesnis negu diametras sekant pacientus po endovaskulinių intervencijų.

Nors mokslinėje literatūroje daugėja įrodymų, teigiančių, kad aneurizmos tūrio matavimas yra tikslesnis negu diametro, tūrio matavimas dar nėra taikomas kasdienėje klinikinėje praktikoje dėl kelių techninių kliūčių. Tūrio apskaičiavimui reikalinga ne tik speciali programinė įranga, bet ir tam tikri įgūdžiai. Tačiau, manoma, kad svarbiausias šio metodo trūkumas yra didelės laiko sąnaudos, reikalingos išmatuoti vieno paciento aortos tūrį (13,14). Nesant automatizuoto

tūrio matavimo, rutiniškas tūrio matavimas yra sunkiai įgyvendinamas dėl darbo krūvio ir darbo jėgos neatitikimo. Šiuo metu yra stebimas ryškus radiologų darbo krūvio didėjimas dėl išaugusio radiologinių tyrimų, ypač kompiuterinių tomografijų (KT), kiekio (15,16). Vienoje iš tai vertinančių studijų buvo apskaičiuota, jog nuo 2006 iki 2020 metų atliekamų įvairių sričių KT kiekis dideliame vakarų Europos centre išaugo net 500%, tačiau vaizdus analizuojančių specialistų kiekis nepadidėjo (15). Šis darbo krūvio ir darbo jėgos neatitikimas lemia didėjančią specialistų nuovargį, perdegimo sindromą bei dėl šių priežasčių atsirandančius netikslumus vertinant radiologinius vaizdus (17,18). Tokia situacija leidžia manyti, jog automatinis aortos tūrio matavimas, mažinantis laiko sąnaudas ir darbo krūvį, yra labai svarbus žingsnis į priekį, perkelsiantis tūrio matavimą iš mokslinių tyrimų srities į kasdienę klinikinę praktiką.

Atsižvelgiant į tai, kad didelės laiko sąnaudos yra laikomos pagrindiniu tūrio matavimo trūkumu, šiame darbe buvo nuspręsta palyginti laiko sąnaudas matuojant aortos aneurizmos tūrį rankiniu bei visiškai automatinu būdu.

**Hipotezė** – laiko sąnaudos, reikalingos aortos tūrio apskaičiavimui rankiniu būdu, yra statistiškai reikšmingai didesnės negu laiko sąnaudos, reikalingos automatiniam aortos aneurizmos tūrio apskaičiavimui.

**Darbo tikslas** – palyginti laiko sąnaudas, reikalingas išmatuoti aortos aneurizmos tūrį rankiniu bei visiškai automatinu būdu.

#### **Uždaviniai:**

- Apskaičiuoti 10-ies pacientų aortos bei bendrųjų klubinių arterijų tūrį rankiniu būdu naudojant rinkoje plačiausiai taikomas vaizdų archyvavimo ir peržiūros programas 3mensio bei OsiriX MD;
- Apskaičiuoti tų pačių 10-ies pacientų aortos bei klubinių arterijų tūrį visiškai automatinu būdu naudojant dirbtinio intelekto algoritmą EndoArt (UAB „Turimeda“);
- Palyginti gautas laiko sąnaudas;
- Įvertinti, ar gautos laiko sąnaudos statistiškai reikšmingai skiriasi tarpusavyje;
- Apžvelgti literatūrą, analizuojančią automatinį aortos aneurizmų tūrio matavimą.

## TIRIAMIEJI IR METODAI

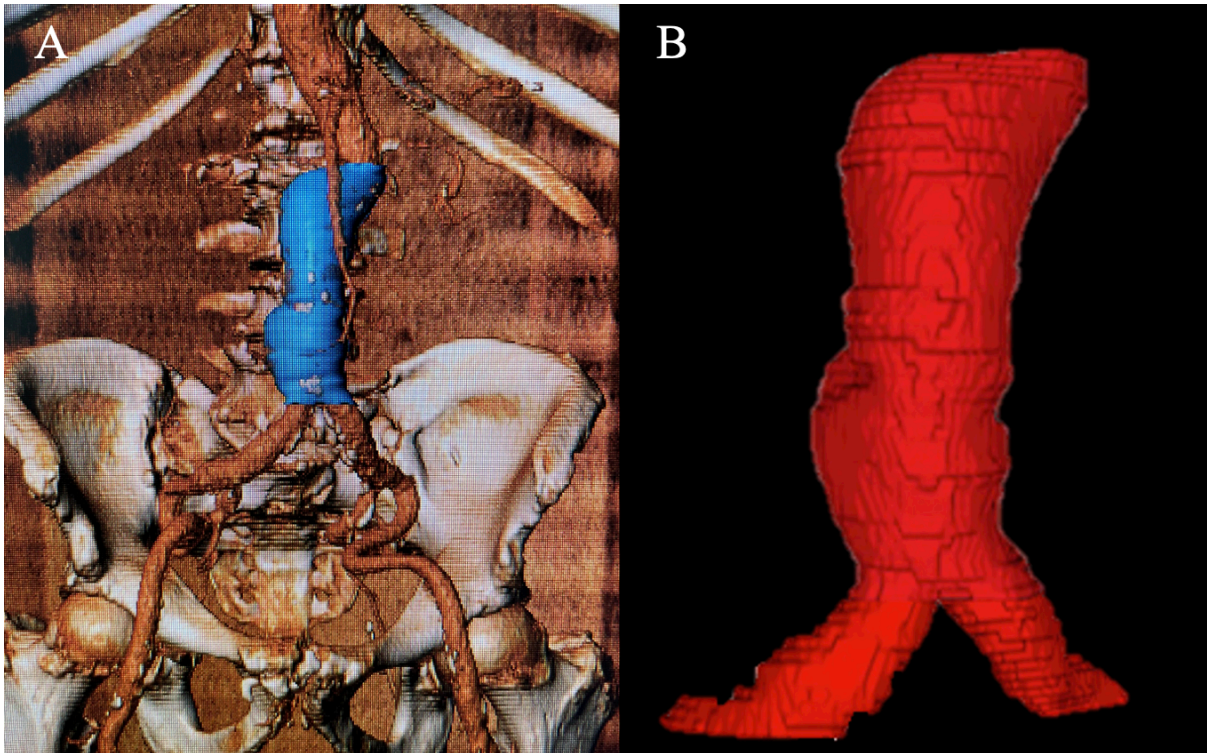
Tai yra analitinio pobūdžio mokslo tiriamasis darbas, analizuojantis ir lyginantis laiko sąnaudas, reikalingas pilvo aortos aneurizmos tūrio apskaičiavimui rankiniu ir visiškai automatiniu būdu naudojant EndoArt dirbtinio intelekto algoritmą. Tyrimas buvo vykdomas 2022–2023 metais, gautų duomenų analizė buvo atliekama 2024 metų sausio–kovo mėnesiais. Laiko sąnaudų skaičiavimas yra svarbus pagrindžiant EndoArt klinikinę naudą bei toliau vystant automatinio aortos tūrio skaičiavimo modelį.

### **Tiriamasis objektas**

Šiam tyrimui atlikti buvo naudojami dešimties visiškai anonimizuotų pacientų pilvo ir dubens srities kompiuterinės tomografijos angiografijų (KTA) rinkiniai. Vieno paciento vaizdų rinkinį sudarė pilvo ir dubens srities KTA, atlikta PAA diagnozavimo metu ir to paties paciento pilvo ir dubens KTA, atlikta kontrolinio vizito metu. Taigi, iš viso tyrimo metu buvo analizuota 20 atskirų KTA. Vaizdai buvo gauti iš UAB „Turimeda“ anonimizuotų KTA vaizdų bazės. Kriterijus, kuriuo remiantis KTA vaizdai buvo įtraukiami į tyrimą – PAA diametras didesnis nei 3 cm. Kadangi pacientų duomenys buvo anonimizuoti, kiekvieno paciento vaizdų rinkiniai buvo pseudonimizuoti siekiant juos identifikuoti duomenų kaupimo ir analizės metu.

### **Rankinis tūrio skaičiavimas**

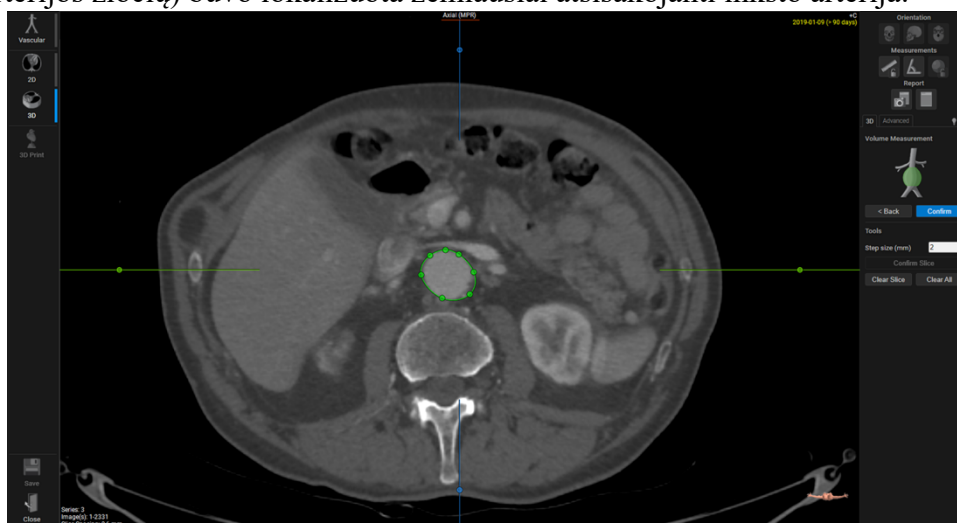
Tyrimo metu visų pacientų pilvo aortos bei bendrųjų klubinių arterijų tūriai buvo apskaičiuoti rankiniu būdu naudojant dvi skirtingas radiologinių vaizdų archyvavimo ir peržiūros programas: 3mensio Medical Imaging B. V. (Utrechtas, Nyderlandai) ir OsiriX (Ženeva, Šveicarija, versija 13.0) (1 paveikslas). 3mensio – programa, validuota širdies ir kraujagyslių sistemos vaizdų peržiūrai bei archyvavimui. Šiame tyrime rankiniam tūrio matavimui buvo naudota 3mensio Vascular (versija 10.4) programinė įranga, kuri yra skirta aortos endovaskulinėms procedūroms planuoti. OsiriX – plačiausiai pasaulyje naudojama kompiuterinės tomografijos (KT) vaizdų peržiūros programa, suteikianti galimybę vaizdus peržiūrėti tiek dvimatėje (2D), tiek trimatėje (3D) erdvėje. Nei vienoje iš šių programų nėra visiškai automatinės kraujagyslių tūrio skaičiavimo funkcijos.



**1 paveikslas.** Aortos tūrio skaičiavimas rankiniu būdu. A – aorta segmentuota naudojant 3mensio; B – OsiriX programos sugeneruotas aortos ir klubinių arterijų modelis.

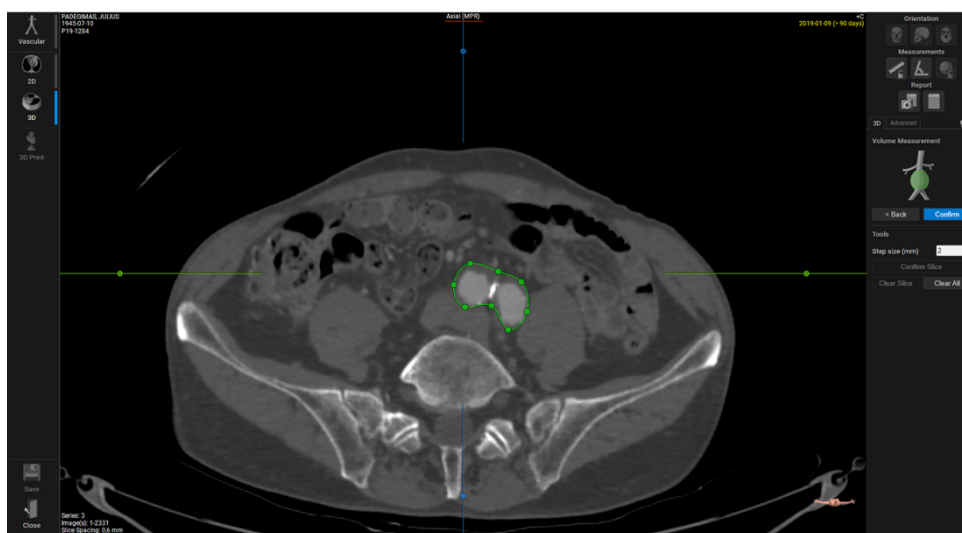
### Rankinis tūrio skaičiavimas naudojant 3mensio

1. Anoniminiai, identifikaciniais numeriais pseudonimizuoti pacientų KTA vaizdų rinkiniai buvo įkelti į 3mensio programą.
2. KTA vaizdai buvo atidaryti ašinėje plokštumoje, buvo sureguliuotas kontrastingumas.
3. Pagal anatominius orientyrus (L1-L2 slankstelių lygyje, žemiau viršutinės pasaito arterijos žiočių) buvo lokalizuota žemiausiai atsišakojanti inksto arterija.



**2 paveikslas.** Rankinis diametro žymėjimas naudojant 3mensio programą – aortos žymėjimo pradžia (po žemiausiai atsišakojančia inksto arterija).

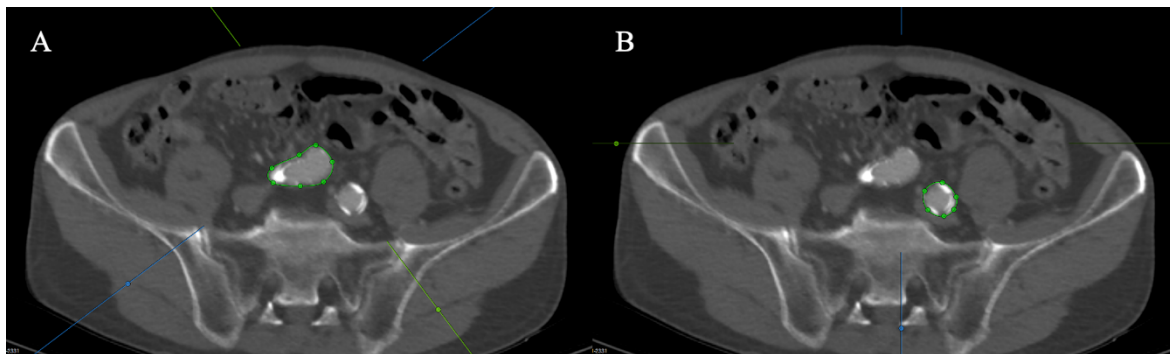
4. Buvo pasirinktas plokštumos vaizdas, kuriame inksto arterija jau atsišakojusi ir naudojant *Volume Measurement* funkciją rankiniu būdu pažymėtas aortos diametras (2 paveikslas).
5. Pažymėjus aortos diametrą proksimaliniame tūrio skaičiavimo taške (iškart po žemiausios inksto arterijos atsišakojimu) programa sugeneruoja preliminarius diametrus kiekvienam distaliau esančiam plokštumos vaizdui. Tiksliausiam tūriui gauti buvo pasirinktas mažiausias programoje įmanomas žingsnis tarp vaizdų (angl. step size) – 2 mm.
6. Kiekvieno plokštumos vaizdo sugeneruotas diametras buvo patikrintas rankiniu būdu ir esant poreikiui koreguotas. Kiekvienas plokštumos vaizdas iki aortos bifurkacijos buvo patvirtintas naudojant funkciją *Confirm Slice* (3 paveikslas).



**3 paveikslas.** Rankinis diametro žymėjimas naudojant 3mensio programą – aortos žymėjimo pabaiga ties aortos bifurkacija.

7. Diametro žymėjimo metu programa etapiškai skaičiuoja tūrį (po kiekvieno patvirtinto plokštumos vaizdo – tūris sumuojasi ir didėja).
8. Apskaičiavus aortos tūrį, remiantis tokiu pačiu protokolu buvo apskaičiuoti kairės ir dešinės bendrųjų klubinių arterijų tūriai (nuo aortos bifurkacijos iki bendrosios klubinės arterijos bifurkacijos) (4 paveikslas).
9. Aortos, kairės bendrosios klubinės arterijos ir dešinės bendrosios klubinės arterijos gauti tūriai buvo sumuojami.
10. Aortos, kairės bendrosios klubinės arterijos ir dešinės bendrosios klubinės arterijos gauti tūriai buvo sumuojami.

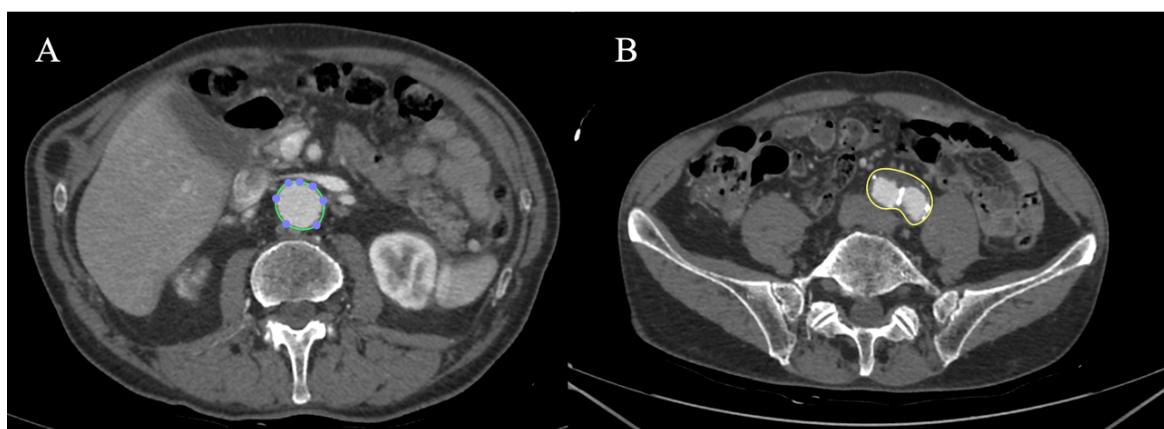




**4 paveikslas.** Bendrųjų klubinių arterijų rankinis diametro žymėjimas bei tūrio apskaičiavimas. A – dešinės bendrosios klubinės arterijos diametro žymėjimas; B – kairės bendrosios klubinės arterijos diametro žymėjimas.

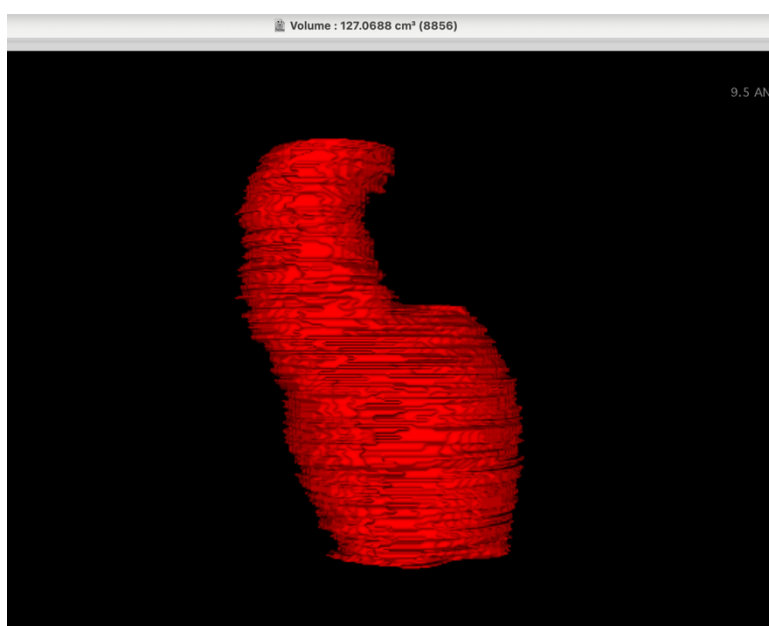
### Rankinis tūrio skaičiavimas naudojant OsiriX

1. Anoniminiai, identifikaciniais numeriais pseudonimizuoti pacientų KTA vaizdų rinkiniai buvo įkelti į OsiriX programą.
2. KTA vaizdai buvo atidaryti ašinėje plokštumoje, buvo sureguliuotas kontrastingumas.
3. Pagal anatominius orientyrus (L1-L2 slankstelių lygyje, žemiau viršutinės pasaito arterijos žiočių) buvo lokalizuota žemiausiai atsišakojanti inksto arterija.
4. Buvo pasirinktas plokštumos vaizdas, kuriame inksto arterija jau atsišakojusi ir naudojant *Closed Polygon* funkciją rankiniu būdu jame buvo pažymėtas aortos diametras.
5. Pažymėjus aortos diametrą proksimaliniame tūrio skaičiavimo taške (iškart po žemiausios inksto arterijos atsišakojimu), kas 10-ame distaliau esančiame plokštumos vaizde naudojant *Closed Polygon* funkciją buvo pažymėtas aortos diametras iki aortos bifurkacijos (5 paveikslas).



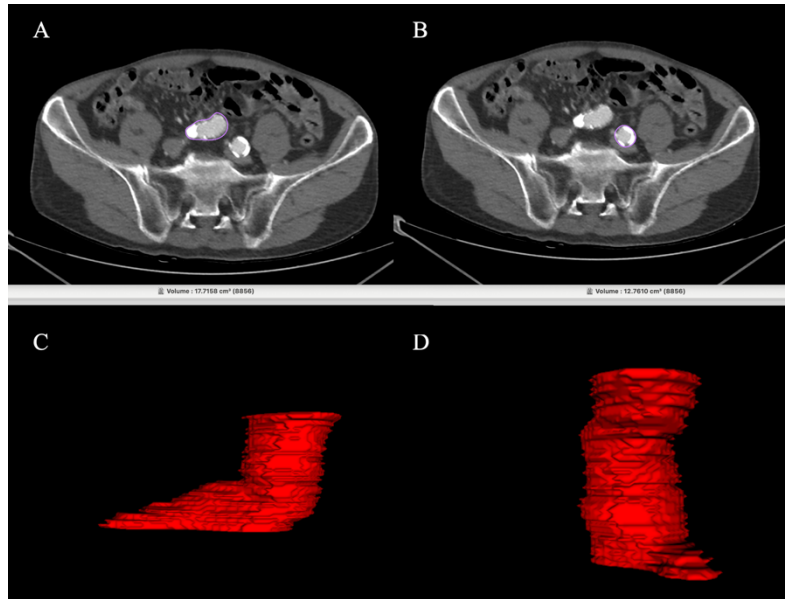
**5 paveikslas.** Rankinis diametro žymėjimas naudojant OsiriX programą. A – aortos žymėjimo pradžia (po žemiausiai atsišakojančia inksto arterija); B – aortos žymėjimo pabaiga ties aortos bifurkacija.

6. Tada buvo pasirinkta funkcija *ROI > ROI Volume > Generate Missing ROIs*. Tokiu būdu programa sugeneruoja tarpuose tarp rankinių žymėjimų likusių plokštumos vaizdų aortos diametrą.
7. Sugeneruotas diametras kiekviename plokštumos vaizde buvo patikrintas rankiniu būdu ir, jeigu reikia, koreguotas.
8. Pažymėjus diametrą visuose plokštumos vaizduose buvo pasirinkta funkcija *ROI > ROI Volume > Compute Volume...* Tokiu būdu programa sugeneruoja aortos tūrį tame segmente, kuriame buvo pažymėtas diametras (6 paveikslas).



**6 paveikslas.** OsiriX programa sugeneruotas aortos tūris (127.0688 cm<sup>3</sup>).

9. Apskaičiavus aortos tūrį, naudojantis tomis pačiomis programos funkcijomis buvo apskaičiuojami kairės ir dešinės bendrųjų klubinių arterijų tūriai: nuo aortos bifurkacijos iki bendrosios klubinės arterijos bifurkacijos, iš pradžių žymimas diametras, tada sugeneruojamas tūris (7 paveikslas).
10. Aortos, kairės bendrosios klubinės arterijos ir dešinės bendrosios klubinės arterijos gauti tūriai buvo sumuojami.



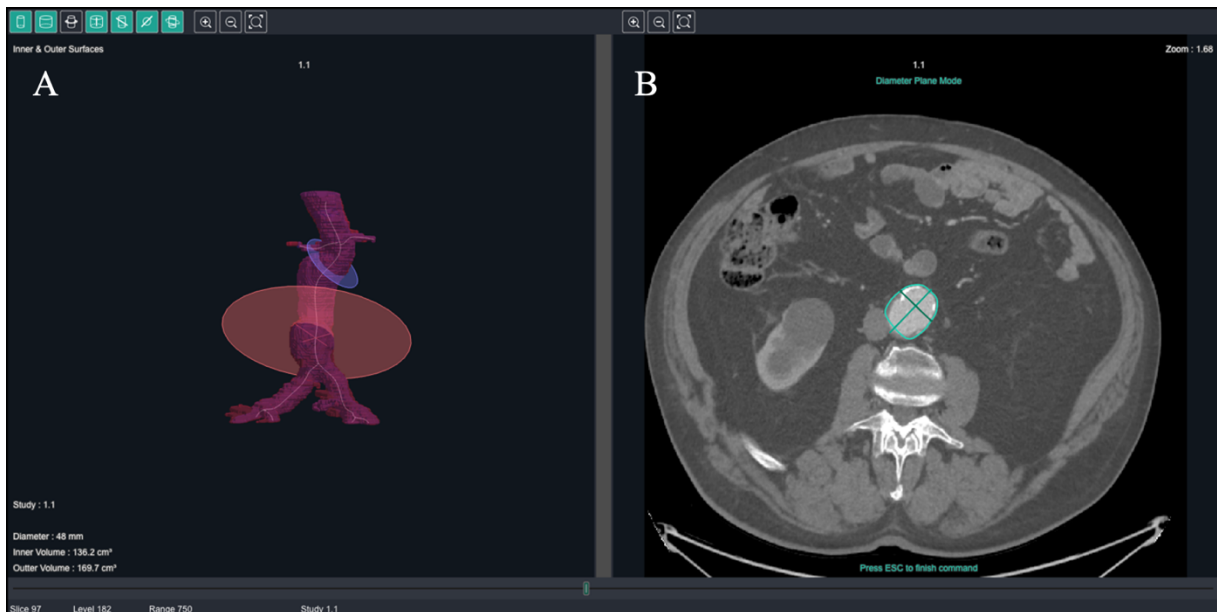
**7 paveikslas.** Bendrųjų klubinių arterijų rankinis diametro žymėjimas bei tūrio apskaičiavimas. A – dešinės bendrosios klubinės arterijos diametro žymėjimas; B – kairės bendrosios klubinės arterijos diametro žymėjimas; C – OsiriX programa sugeneruotas dešinės bendrosios klubinės arterijos tūris (17.7158 cm<sup>3</sup>); D – OsiriX programa sugeneruotas kairės bendrosios klubinės arterijos tūris (12.7610 cm<sup>3</sup>).

Kiekvieno paciento kraujagyslių tūrio matavimas visada buvo atliktas nepertraukiamai. Matuojant tūrį rankiniu būdu, tiek naudojant 3mensio, tiek OsiriX programas, laikas buvo skaičiuotas nuo matavimo pradžios, kuria laikomas žemiau atsišakojančios inksto arterijos lokalizavimas, iki gauto bendro tūrio (aortos, kairės bendrosios klubinės arterijos ir dešinės bendrosios klubinės arterijos tūrių suma). Laiko sąnaudos buvo fiksuotos naudojant laikmatį ir archyvuotos Microsoft Excel (Redmontas, Vašingtonas, JAV, versija 16.78.3) programoje. Rankiniai tūrio matavimai buvo atlikti apmokytos VI kurso medicinos studentės, kuri iki šio tyrimo rankiniu būdu buvo segmentavusi daugiau kaip 100 KTA vaizdų serijų. Šio tyrimo metu atlikti rankiniai žymėjimai buvo patikrinti kraujagyslių chirurgo, turinčio daugiau nei 10 metų darbo stažą kraujagyslių chirurgijoje.

### **Automatinis tūrio skaičiavimas**

Šio tyrimo metu automatiniam pacientų aortos bei klubinių arterijų tūrių apskaičiavimui buvo naudotas EndoArt dirbtinio intelekto algoritmas. Šis dirbtinio intelekto algoritmas geba automatiškai identifikuoti aortą, atskirti aortoje tekantį kraują nuo trombinių masių bei iš karto pateikti bendrą kraujagyslės tūrį ir pratekančio kraujo tūrį (8 paveikslas). EndoArt turi CE ženklą ir priklauso 1-ai medicinos priemonių klasei. Anoniminiai, identifikaciniais numeriais pseudonimizuoti tų pačių dešimties pacientų KTA vaizdų rinkiniai buvo patalpinti į EndoArt

debesijos (angl. cloud) serverį (app.turimeda.com). Šie konkretūs vaizdai prieš tai nebuvo naudoti EndoArt apmokymo procese. Aortos ir klubinių arterijų tūriai bei vaizdų rekonstrukcijos buvo automatiškai gauti po KTA vaizdų įkėlimo.



**8 paveikslas.** Automatinis aortos tūrio skaičiavimas naudojant EndoArt dirbtinio intelekto algoritmą. A – automatiškai segmentuota aorta, apskaičiuoti tūriai (pratekančios dalies bei bendras tūris); B – analizuojamo paciento vaizdų skersinis pjūvis, kuriame vaizduojamas automatinis diametro matavimas.

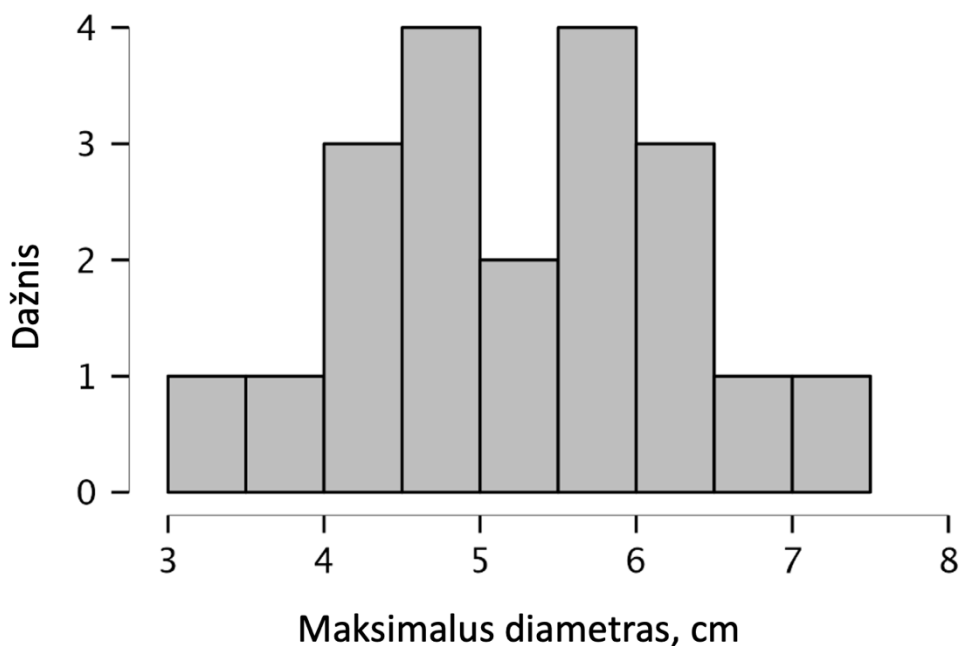
### Statistinė analizė

Statistinė analizė buvo atlikta naudojant JASP (Amsterdamas, Nyderlandai, versija 0.17.3) bei Microsoft Excel (Redmontas, Vašingtonas, JAV, versija 16.78.3) programas. Gauso pasiskirstymas ir duomenų homogeniškumas buvo patikrinti naudojant Shapiro ir Wilko testą. Duomenys pateikiami naudojant standartinį nuokrypį (angl. standard deviation,  $\pm$ SD) arba interkvartilinį intervalą (25–75%) (angl. interquartile range, IQR). Statistinis reikšmingumas, skirtumui tarp vidurkių nustatyti, vertintas Stjudento t-testu, kai duomenys pasiskirstė normaliai, ir Vilkoksono kriterijumi, kai duomenys pasiskirstė nenormaliai. Laiko sąnaudos, reikalingos automatiniam tūrio skaičiavimui naudojant EndoArt programą visų skaičiavimų metu buvo prilygintos nuliui. Skirtumas laikytas statistiškai reikšmingu, jei p vertė buvo  $<0.05$ , (kai  $\alpha = 0.05$ ).

## REZULTATAI

### KTA vaizdų charakteristikos

Šiame tiriamajame darbe buvo išanalizuota 20 skirtingų, anonimizuotų KTA vaizdų, priklausančių dešimčiai pacientų, kuriems buvo diagnozuota pilvo aortos aneurizma. Visos KTA buvo atliktos naudojant daugiapjūvius kompiuterinius tomografus ligos diagnozavimo bei kontrolinio vizito metu. Plokštumos vaizdų (angl. slice) kiekis analizuotuose KTA vaizduose varijavo nuo 111 iki 2882, plokštumos vaizdų mediana buvo 406.5 (interkvartilinis intervalas – 360). Plokštumos vaizdų storis įtrauktuose KTA vaizduose varijavo nuo 0.625 mm iki 5 mm, o storio mediana buvo 1.625 mm (interkvartilinis intervalas – 1.25). Į analizę įtrauktų pacientų pilvo aortos aneurizmų diametras svyravo nuo 3.1 cm iki 7.2 cm, bendras pacientų diametro vidurkis buvo 5.277 cm ( $\pm 1.044$ ) (9 paveikslas).



**9 paveikslas.** Maksimalių aortos diametrų pasiskirstymas.

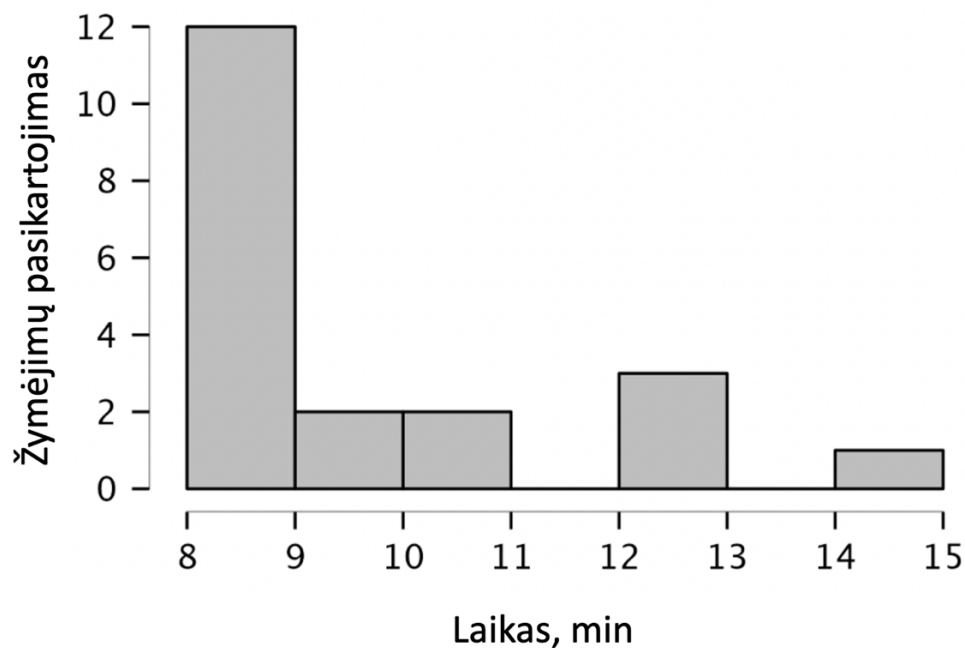
### Apskaičiuoti tūriai

Tūrių, išmatuotų naudojant 3mensio programą, vidurkis buvo 230.095 ml ( $\pm 106.436$ ), o naudojant OsiriX programą visų analizuotų tūrių vidurkis buvo 240.83 ml ( $\pm 110.919$ ). Palyginus tūrius, apskaičiuotus naudojant 3mensio ir OsiriX, buvo pastebėtas statistiškai reikšmingas skirtumas ( $p < 0.001$ , remiantis Vilkoksono kriterijumi). Visiškai automatinio būdu EndoArt apskaičiuotas tūrių vidurkis buvo 196.135 ml ( $\pm 90.747$ ). Automatinio būdu

apskaičiuoti tūriai statistiškai reikšmingai skyrėsi nuo rankiniu būdu apskaičiuotų aneurizmų tūrių (EndoArt ir 3mensio –  $p < 0.001$ , remiantis Stjudento t-testu; EndoArt ir OsiriX –  $p < 0.001$ , remiantis Vilkoksono kriterijumi).

### Laiko sąnaudos naudojant 3mensio programą

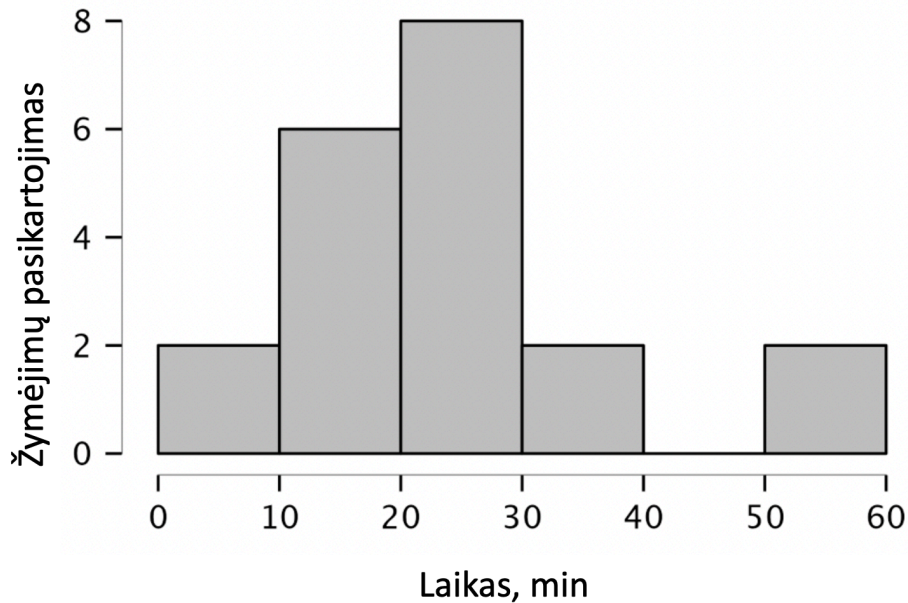
Laiko sąnaudų, reikalingų rankiniam aortos bei klubinių arterijų tūrio skaičiavimui naudojant 3mensio programą, mediana buvo 9 minutės (interkvartilinis intervalas – 2.5). Minimalus laiko kiekis, reikalingas vieno paciento kraujagyslių tūriui išmatuoti, buvo 8 minutės, maksimalus laikas, reikalingas vieno paciento vaizdams įvertinti, 15 minučių (10 paveikslas).



**10 paveikslas.** Laiko sąnaudų pasiskirstymas naudojant 3mensio programą.

### Laiko sąnaudos naudojant OsiriX programą

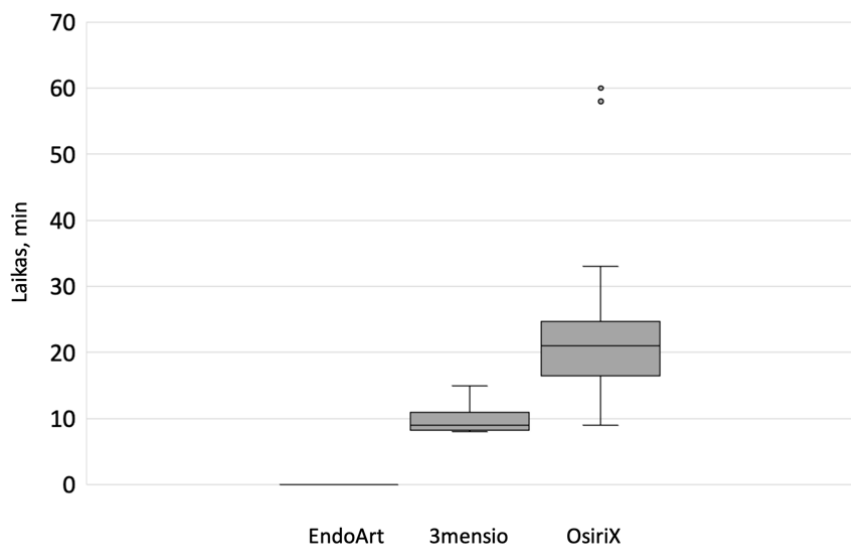
Laiko sąnaudų, reikalingų rankiniam aortos bei klubinių arterijų tūrio skaičiavimui naudojant OsiriX programą, mediana buvo 21,0 minutė (interkvartilinis intervalas – 6.75). Minimalus laiko kiekis, reikalingas vieno paciento kraujagyslių tūriui išmatuoti, buvo 9 minutės, maksimalus laikas, reikalingas vieno paciento vaizdams, 60 minučių (11 paveikslas).



**12 paveikslas.** Laiko sąnaudų pasiskirstymas naudojant OsiriX programą.

### Laiko sąnaudų palyginimas

Laiko sąnaudų palyginimai buvo atlikti tarp EndoArt ir 3mensio bei tarp EndoArt ir OsiriX laiko sąnaudų. Laiko sąnaudos, reikalingos automatiniam tūrio skaičiavimui naudojant EndoArt programą, visų skaičiavimų metu buvo prilygintos nuliui. Lyginant su automatiniu aortos ir klubinių arterijų tūrio skaičiavimu, statistiškai reikšmingai didesnės laiko sąnaudos buvo stebėtos skaičiuojant tūrį rankiniu būdu (abiem atvejais  $p < 0.001$ , remiantis Vilkoksono kriterijumi). Laiko sąnaudos taip pat statistiškai reikšmingai skyrėsi tarp skirtingomis programomis rankiniu būdu atliktų matavimų ( $p < 0.001$ , remiantis Vilkoksono kriterijumi) (13 paveikslas).



**13 paveikslas.** Laiko sąnaudų palyginimas tarp EndoArt, 3mensio ir OsiriX.

## APTARIMAS

Pirmą kartą mokslinėje literatūroje aortos aneurizmų diametro matavimas Szilagy et al. buvo paminėtas 1972 metais (19). Nuo tada diametro matavimo reikšmė klinikinėje praktikoje diagnozuojant, sekant bei gydant aortos aneurizmas tik didėjo. Aortos aneurizmos dydis, atsižvelgiant į diametrą, ne vieno autoriaus buvo laikomas prognostiniu paciento išėities rodikliu (20–23). 2006 metais publikuotose Amerikos Kardiologijos Koledžo (angl. American College of Cardiology) ir Amerikos Širdies Asociacijos (angl. American Heart Association) gairėse aortos diameteras jau buvo įtrauktas kaip parametras, pagal kurį rekomenduojama spręsti dėl intervencinio gydymo reikalingumo (24). Praėjus beveik dvidešimčiai metų, diameteras klinikinėje praktikoje vis dar laikomas svarbiausiu matmeniu kalbant apie aortos aneurizmas (7).

Nepaisant to, kad jau daugelį metų diameteras yra pagrindinis parametras diagnozuojant, sekant bei gydant aortos aneurizmas, vystantis technologijoms bei atliekant daugiau klinikinių tyrimų šioje srityje, buvo pastebėti tam tikri diametro matavimo trūkumai bei netikslumai. 2012 metais Long et al. apžvelgė ir išanalizavo aortos aneurizmų diametro matavimą naudojant skirtingus metodus (ultragarsą bei KTA). Išanalizavę 56 studijas, kuriose buvo matuojamas aortos aneurizmų diameteras, autoriai pastebėjo, kad diametro matavimo būdas stipriai varijuoja (skiriasi plokštumos bei matavimo atskaitos taškai), o daugelyje studijų net nėra aiškiai apibūdintas. Pasak autorių, standartizuoto diametro matavimo nebuvimas lemia netikslus rezultatus klinikiniuose tyrimuose, įtraukiančiuose diametro matavimą, bei apsunkina sprendimų priėmimą klinikinėje praktikoje (6). Be to, matuojant vien tik diametrą didėja rizika nepastebėti mažų aneurizmos dydžio ir/ar formos pokyčių. Nors yra žinoma, kad didesnė plyšimo rizika yra būdinga didelėms aortos aneurizmoms, apie 2% mažų aortos aneurizmų taip pat plyšta, todėl maži aneurizmos dydžio pokyčiai klinikinėje praktikoje neturėtų likti nepastebėti (9–11). Svarbu paminėti ir tai, kad literatūros duomenimis, diametro matavimui yra būdingas didelis matavimų variabilumas tarp jį matuojančių specialistų (angl. intraobserver variability) bei tarp skirtingų matavimų, atliktų to paties specialisto (angl. interobserver variability) (25–27). Dėl didelio matavimų variabilumo atsiradusi paklaida gali suteikti klaidingą informaciją apie aneurizmos progresavimą po endovaskulinio gydymo.

Pastaruoju metu literatūroje vis daugiau yra rašoma apie aortos aneurizmos tūrio matavimą. Šis metodas pranašesnis bei tikslesnis nei diametro matavimas. Aortos aneurizmos tūris gali būti matuojamas keliais skirtingais metodais: 3D KTA, 3D Magnetinio Rezonanso Angiografija



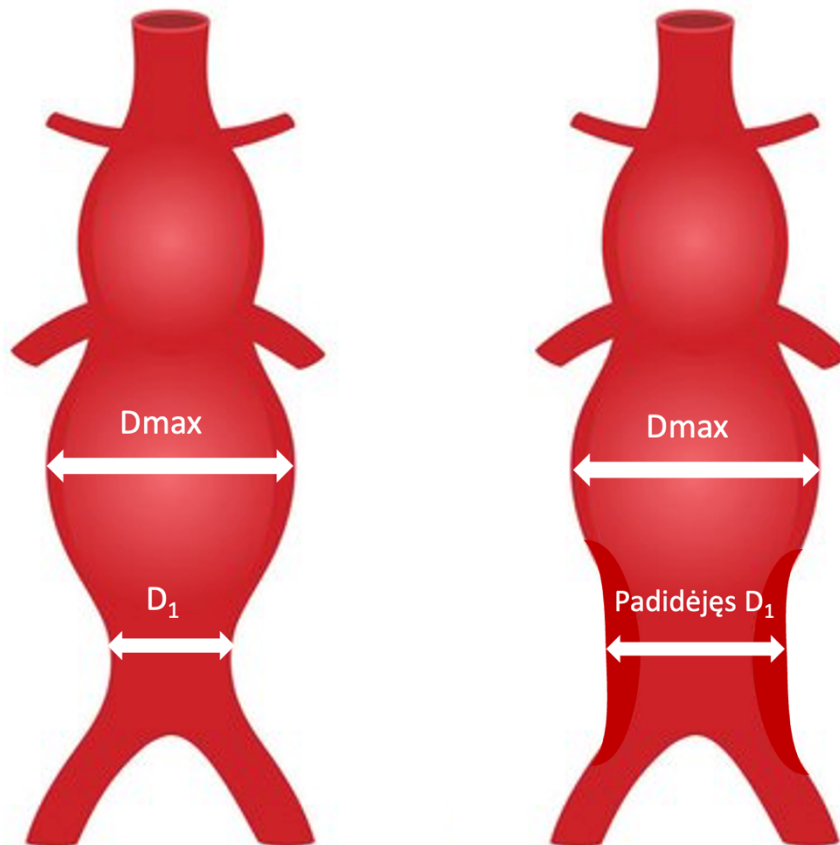
(MRA) bei 3D ultrasonografija (11,28). 2023 metais Vaitėnas et al. atliko sisteminę apžvalgą, į kurią įtraukė 19 klinikinių studijų, lyginančių aortos aneurizmos tūrio ir diametro skaičiavimą. Didžioji dalis (n=17) į apžvalgą įtrauktų studijų išskyrė tūrio matavimą kaip pranašesnę metodą (29). Yra manoma, kad tūrio matavimas kasdienėje praktikoje būtų ypač naudingas sekant pacientus po endovaskulinių aortos aneurizmos operacijų (1 lentelė) (26,30–33). Taip pat, kadangi aneurizma ne visada didėja toje vietoje, kurioje stebimas jos didžiausias diametras, maksimalaus aneurizmos diametro matavimas gali neviseškai atspindėti jos pokyčius (34). Tūrio pokyčiai visada atspindi aneurizmos didėjimą (14 paveikslas).

**1 lentelė.** Studijos, analizuojančios tūrio ir diametro matavimus po endovaskulinio aortos aneurizmų gydymo.

Autorius, metai	Įtraukti pacientai	Rezultatai
Wever et al. (2000)	Pacientai po planinio endovaskulinio PAA gydymo.	Koreliacija tarp aneurizmo tūrio didėjimo ir užtekėjimo (angl. endoleak) ( $r = 0.37$ po 6 mėnesių, $r = 0.25$ po 12 mėnesių) stipresnė negu koreliacija tarp aneurizmos diametro ir užtekėjimo ( $r = -0.07$ ir $r = 0.11$ , atitinkamai).
Kritpracha et al. (2004)	Pacientai po planinio endovaskulinio PAA gydymo.	Daugeliu atvejų PAA dydžio kitimo nepavyko užfiksuoti matuojant diametrą. 27% įtrauktų atvejų buvo fiksuojamas reikšmingai padidėjęs tūris, nesant diametro padidėjimo.
Bargellini et al. (2005)	Pacientai po planinio endovaskulinio PAA gydymo.	Stipriausias nepriklausomas užtekėjimo prediktorius buvo tūrio padidėjimas $<0.3\%$ praėjus 6 mėnesiams po endovaskulinio gydymo.
Schnitzbauer et al. (2018)	Pacientai po planinio endovaskulinio PAA gydymo.	Matuojant anksti neaptiktas tūrio padidėjimas 61-72% pacientų, kuriems pasireiškė II tipo užtekėjimas.

Franchin et al. (2021)	Pacientai prieš ir po planinio endovaskulinio PAA gydymo.	Tūrio matavimas buvo jautresnis negu diametro` vertinant aneurizmos maišo mažėjimą po endovaskulinio gydymo.
---------------------------	---	--

PAA – pilvo aortos aneurizma.



**14 paveikslas.** Aneurizmos tūrio didėjimas nesikeičiant maksimaliam aneurizmos diametru ( $D_{max}$ ). Aneurizmos diametru didėjant nemaksimalaus diametro vietoje (paveiksle pažymėta  $D_1$ ), bendras aneurizmos tūris didėja, o maksimalus diametras, kuris ir yra rutiniškai matuojamas, išlieka nepakitęs.

Keli autoriai pabrėžė aneurizmos tūrio sąsają su didžiausiu sienos tempimu (angl. peak wall stress, PWS) ir didžiausiu sienos plyšimo indeksu (angl. peak wall rupture index, PWRI). Yra manoma, kad šie parametrai svarbūs vertinant aneurizmos plyšimo riziką (35). Raghavan et al. apskaičiavo, kad iš visų parametų tūris ir PWS koreliuoja stipriausiai (koreliacijos koeficientas 0,7), o Liljeqvist et al. atlikę tyrimą teigia, jog tūrio didėjimas su PWS ir PWRI koreliavo labiau

negu diametras (36,37). Taigi, galima daryti prielaidą, kad tūrio matavimas galėtų būti tinkamesnis parametras ir vertinant aneurizmos plyšimo riziką. Spanos et al. tyrė plyšusių ir neplyšusių aortos aneurizmų morfologiją ir pastebėjo, kad aneurizmų tūriai tarp šių grupių skyrėsi statistiškai reikšmingai, o plyšusių ir neplyšusių aneurizmų maksimalūs diametrai statistiškai reikšmingai nesiskyrė (10).

Nors mokslinėje literatūroje teigiama, kad tūrio matavimas daugeliu aspektų yra pranašesnis už diametro matavimą, iki šiol tūris nėra rutiniškai matuojamas kasdienėje klinikinėje praktikoje. Taip yra dėl to, kad rankiniam aortos tūrio matavimui reikalinga speciali programinė įranga bei tam tikri įgūdžiai, tačiau pagrindinis tūrio matavimo trūkumas yra didelės laiko sąnaudos, galinčios siekti valandą ar daugiau vieno paciento aortos tūriui apskaičiuoti (2 lentelė) (13,38–40). Šio tyrimo metu, naudojant labiausiai automatizuotus rinkoje esančius įrankius (3mensio ir OsiriX), gautų laiko sąnaudų mediana matuojant tūrį rankiniu būdu buvo 9 ir 21 minutė. Taip pat buvo atvejų, kai rankinio aortos tūrio skaičiavimo laikas siekė vieną valandą. Taigi, šio tyrimo metu gautos laiko sąnaudos atitinka literatūroje pateikiamą situaciją. Minėtina tai, kad endovaskulinės aortos operacijos, kurių kiekis pastaruoju metu didėja, reikalauja kruopštaus pacientų sekimo (7). Norint įvertinti paciento aortos būklę po endovaskulinio gydymo, turi būti lyginami to paties paciento KTA vaizdai, atlikti skirtingu laiku po intervencijos. Suprantama, kad atliekant šį vertinimą rankiniu būdu, laiko sąnaudos dar labiau išauga. Būtent šie aortos tūrio skaičiavimo rankiniu būdu trūkumai ir sukelia neatitikimą tarp darbo krūvio ir darbo jėgos bei riboja tūrio matavimo taikymą klinikiniame darbe. Efektyvus būdas, padėsiantis išspręsti šią problemą, yra automatinis aortos tūrio skaičiavimas.

**2 lentelė.** Literatūroje pateiktos laiko sąnaudos, reikalingos rankiniam tūrio skaičiavimui.

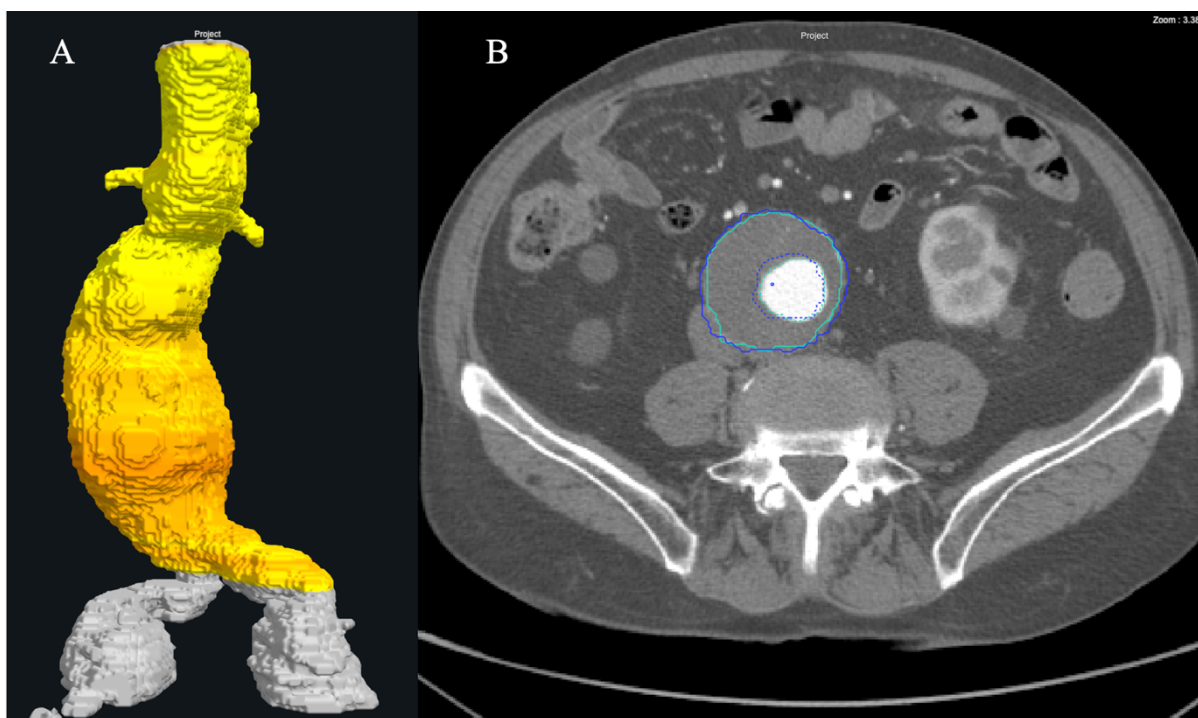
Autorius, metai	Įtraukti pacientai	Rankinio aortos žymėjimo laiko sąnaudos
Lareyre et al. (2019)	Pacientai, kuriems diagnozuota PAA.	Nuo 25 min. iki 60 min. vienam pacientui.
Caradu et al. (2020)	Pacientai, kuriems diagnozuota PAA.	Nuo 5 min. iki 80 min. vienam pacientui.

Caradu et al. (2022)	Pacientai, po endovaskulinio PAA gydymo.	Vidutiniškai 22 min. vienam pacientui.
Kesävuori et al., (2023)	Pacientai, kuriems diagnozuota B tipo aortos disekacija.	Vidutiniškai 60 min. vienam pacientui.

PAA – pilvo aortos aneurizma.

2000 metais Subasic et al. aprašė pusiau automatinį algoritmą aortai segmentuoti. Šio modelio matavimų tikslumas beveik nesiskyrė nuo žmogaus atliktų matavimų (41). 2003 metais Bruijne et al. pristatė kitą aortos aneurizmos maišui bei prisieniniams trombam segmentuoti skirtą pusiau automatinį algoritmą (42). Zhuge et al. aprašė algoritmą, kurio skaičiavimams atlikti reikalingas rankinis kraujagyslės proksimalinio bei distalinio plokštumos vaizdų pažymėjimas (43). Pusiau automatinio bei rankiniu būdu apskaičiuoto tūrio sutapimas buvo 95.3% +/- 1.4. Laikas, reikalingas pusiau automatiniam matavimui buvo 7.4 min +/- 3.8, o rankinis matavimas Zhuge et al. atliktame tyrime užėmė nuo 20 iki 30 minučių. Taigi, pirmieji bandymai palengvinti aortos tūrio skaičiavimą buvo atlikti daugiau nei prieš 20 metų, o šiuo metu dirbtinio intelekto pagalba yra kuriami visiškai automatinio aortos segmentavimo algoritmai.

Vienas iš vis dar vystomų automatinių aortos tūrio skaičiavimo algoritmų yra šiame tyrime naudotas EndoArt. Šis dirbtinio intelekto algoritmas visiškai automatiškai identifikuoja aortą, geba atskirti trombinės mases ir aortos sieną nuo aplinkinių audinių bei iš karto pateikia tikslus matmenis (bendrą aortos tūrį bei pratekančio kraujo tūrį). Šis algoritmas taip pat geba lyginti to paties paciento skirtingo laikotarpio KTA vaizdus, pateikdamas spalvinį žemėlapi (angl. heat map), vaizduojantį, kuriose vietose aneurizma pakito labiausiai (15 paveikslas). Šio tyrimo metu atliktas laiko sąnaudų skaičiavimas ir lyginimas su rankiniu būdu atliktų skaičiavimų laiko sąnaudomis buvo vertingas pagrindžiant EndoArt algoritmo klinikinę naudą bei svarbus vystant šį modelį.



**15 paveikslas.** EndoArt sugeneruotas to paties paciento skirtingo laikotarpio dviejų KTA serijų palyginimas. A – EndoArt algoritmo sugeneruotas spalvinis žemėlapis (angl. heat map), rodantis, kuriose vietose aneurizma pakito labiausiai; B – mėlynai ir žaliai algoritmo pažymėtas to paties paciento aortos diametras skirtingais laikotarpiais (pradinėje KTA ir kontrolinio vizito metu).

Kitas literatūroje minimas automatinės aortos segmentacijos algoritmas yra ARVA (Incepto Medical) (angl. Augmented Radiology for Vascular Aneurysms) (14). Šis algoritmas automatiškai išmatuoja maksimalų aortos diametrą, skaičiuoja aortos tūrį bei pateikia 3D rekonstrukcijas. 2021 metais Adam et al. atliko tyrimą, kuriuo siekė įvertinti šio algoritmo gebėjimą automatiškai matuoti aortos diametrą lyginant su rankiniu būdu atliktais matavimais. Į tyrimą buvo įtraukti KTA vaizdai su sveikomis aortomis, aneurizmatiškomis aortomis bei aortomis po endovaskulinio gydymo. Norėdami palyginti automatinius ir rankinius matavimus, autoriai apskaičiavo Dice panašumo indeksą (angl. Dice Similarity Index), kuris parodo dviejų modelių persidengimą. Dice panašumo indeksas gali būti nuo 0 iki 1, kai 0 reiškia, kad modeliai visiškai nesutampa, o 1 reiškia visišką sutapimą (44). Lyginant automatinę aortos segmentavimą su rankiniu, Dice panašumo indeksai buvo 0.84 (sveikų aortų), 0.95 (aneurizmatinių aortų) ir 0.93 (gydytų aortų). Autoriai apibendrina, kad ARVA galėtų būti patikimas sprendimas klinikinėje praktikoje (14).

Dar vienas dirbtinio intelekto pagrindu sukurtas automatinio aortos tūrio skaičiavimo algoritmas yra PRAEVAorta (Nurea) (39). 2020 metais Caradu et al. tyrė PRAEVAorta algoritmo tikslumą aptikdami aortos spindį bei vertindami infrarenalinės aortos dalies morfologiją. Dice panašumo indeksas, tarp visiškai automatinų matavimų, atliktų naudojant PRAEVAorta ir dalinai automatinų, buvo  $0.95 \pm 0.01$ . Svarbu paminėti, kad autoriai taip pat fiksavo ir lygino laiko sąnaudas, reikalingas žymėjimams ir pastebėjo, kad visiškai automatinis aortos segmentavimas užėmė statistiškai mažiau laiko negu dalinai automatinis matavimas ( $p < 0.0001$ ). 2022 metais Caradu et al. vertino PRAEVAorta gebėjimą analizuoti pacientų, kuriems buvo taikytas aortos endovaskulinis gydymas, KTA vaizdus. Kaip ir prieš tai minėtoje studijoje, autoriai lygino visiškai automatinį matavimą su dalinai automatinium. Dice panašumo indeksas tarp matavimų buvo  $0.95 \pm 0.015$ . Apibendrindami autoriai teigė, kad PRAEVAorta yra potencialiai svarbus įrankis sekant pacientus po endovaskulinio aortos gydymo (13).

2023 metais Abdolmanafi et al. taip pat pristatė visiškai automatinį giliuoju mokymusi (angl. deep learning) pagrįstą aortos bei klubinių arterijų tūrio segmentavimo modelį, gebantį atskirti aortos sieną, spindį, prisieninius trombus bei kraujagyslių kalcinatus nuo aplinkinių audinių (45). Modelio tikslumui vertinti autoriai įtraukė 19 prieš tai su modeliu nesupažindintų KTA vaizdų. Šio modelio tikslumas fiksuojant aortos sieną buvo  $0.99 \pm 0.01$ . Toks tikslumas leidžia manyti, jog šių autorių pristatytas modelis yra dar vienas įrankis, galintis optimizuoti automatinio aortos tūrio skaičiavimo procesą.

## IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

- Aortos aneurizmos tūrio skaičiavimo tematika publikuotos literatūros duomenimis, tūrio skaičiavimas leidžia užfiksuoti mažus aneurizmos pokyčius ir yra tikslesnis negu diametro matavimas. Tai leidžia manyti, kad būtent tūrio skaičiavimas yra tinkamesnis pacientams po endovaskulinių aortos gydymo operacijų sekti, kadangi net ir maži aortos maišo pokyčiai kliniškai yra labai svarbūs.
- Automatinis aortos aneurizmų tūrio skaičiavimas klinikinėje praktikoje padėtų sutaupyti laiko bei sumažintų neatitikimą tarp darbo krūvio ir darbo jėgos.
- Šis tyrimas atskleidė, kad laiko sąnaudos skaičiuojant pilvo aortos aneurizmos tūrį automatiškai yra statistiškai reikšmingai mažesnės negu skaičiuojant tūrį rankiniu būdu.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Antoniou GA, Antoniou AI, Antoniou SA, Lazarides MK. A historical perspective of medical terminology of aortic aneurysm. *J Vasc Surg.* 2011 Nov;54(5):1527–8.
2. Aggarwal S, Qamar A, Sharma V, Sharma A. Abdominal aortic aneurysm: A comprehensive review. *Exp Clin Cardiol.* 2011;16(1):11–5.
3. Kuivaniemi H, Ryer EJ, Elmore JR, Tromp G. Understanding the pathogenesis of abdominal aortic aneurysms. *Expert Rev Cardiovasc Ther.* 2015 Sep 2;13(9):975–87.
4. Torres-Fonseca M, Galan M, Martinez-Lopez D, Cañes L, Roldan-Montero R, Alonso J, et al. Pathophysiology of abdominal aortic aneurysm: biomarkers and novel therapeutic targets. *Clínica E Investig En Arterioscler Engl Ed.* 2019 Jul;31(4):166–77.
5. Wise ES, Hocking KM, Brophy CM. Prediction of in-hospital mortality after ruptured abdominal aortic aneurysm repair using an artificial neural network. *J Vasc Surg.* 2015 Jul;62(1):8–15.
6. Long A, Rouet L, Lindholt JS, Allaire E. Measuring the Maximum Diameter of Native Abdominal Aortic Aneurysms: Review and Critical Analysis. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2012 May;43(5):515–24.
7. Wanhainen A, Van Herzele I, Bastos Goncalves F, Bellmunt Montoya S, Berard X, Boyle JR, et al. Editor's Choice -- European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2024 Clinical Practice Guidelines on the Management of Abdominal Aorto-Iliac Artery Aneurysms. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2024 Feb;67(2):192–331.
8. Ricco JB, Forbes TL. Trans-Atlantic debate: External diameter for abdominal aortic aneurysm (AAA) size versus volume. *Eur J Vasc Endovasc Surg Off J Eur Soc Vasc Surg.* 2013 Jul;46(1):9.
9. Kontopodis N, Metaxa E, Papaharilaou Y, Georgakarakos E, Tsetis D, Ioannou CV. Value of volume measurements in evaluating abdominal aortic aneurysms growth rate and need for surgical treatment. *Eur J Radiol.* 2014 Jul;83(7):1051–6.

10. Spanos K, Nana P, Kouvelos G, Mpatzalexis K, Matsagkas M, Giannoukas AD. Anatomical Differences Between Intact and Ruptured Large Abdominal Aortic Aneurysms. *J Endovasc Ther.* 2020 Feb 1;27(1):117–23.
11. von Allmen RS, Powell JT. Part Two: Against the Motion. External Diameter for AAA Size. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2013 Jul;46(1):6–8.
12. van Keulen JW, van Prehn J, Prokop M, Moll FL, van Herwaarden JA. Potential value of aneurysm sac volume measurements in addition to diameter measurements after endovascular aneurysm repair. *J Endovasc Ther Off J Int Soc Endovasc Spec.* 2009 Aug;16(4):506–13.
13. Caradu C, Pouncey AL, Lakhlifi E, Brunet C, Bérard X, Ducasse E. Fully automatic volume segmentation using deep learning approaches to assess aneurysmal sac evolution after infrarenal endovascular aortic repair. *J Vasc Surg.* 2022 May 23;S0741-5214(22)01589-0.
14. Adam C, Fabre D, Mouglin J, Zins M, Azarine A, Ardon R, et al. Pre-surgical and Post-surgical Aortic Aneurysm Maximum Diameter Measurement: Full Automation by Artificial Intelligence. *Eur J Vasc Endovasc Surg Off J Eur Soc Vasc Surg.* 2021 Dec;62(6):869–77.
15. Bruls RJM, Kwee RM. Workload for radiologists during on-call hours: dramatic increase in the past 15 years. *Insights Imaging.* 2020 Dec;11(1):121.
16. Dan Lantsman C, Barash Y, Klang E, Guranda L, Konen E, Tau N. Trend in radiologist workload compared to number of admissions in the emergency department. *Eur J Radiol.* 2022 Apr;149:110195.
17. Harolds JA, Parikh JR, Bluth EI, Dutton SC, Recht MP. Burnout of Radiologists: Frequency, Risk Factors, and Remedies: A Report of the ACR Commission on Human Resources. *J Am Coll Radiol.* 2016 Apr;13(4):411–6.
18. Chetlen AL, Chan TL, Ballard DH, Frigini LA, Hildebrand A, Kim S, et al. Addressing Burnout in Radiologists. *Acad Radiol.* 2019 Apr;26(4):526–33.
19. Szilagyi DE. Clinical Fate of the Patient With Asymptomatic Abdominal Aortic Aneurysm and Unfit for Surgical Treatment. *Arch Surg.* 1972 Apr 1;104(4):600.



20. Brady AR, Fowkes FGR, Thompson SG, Powell JT. Aortic Aneurysm Diameter and Risk of Cardiovascular Mortality. *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2001 Jul;21(7):1203–7.
21. Norman P, Le M, Pearce C, Jamrozik K. Infrarenal Aortic Diameter Predicts All-Cause Mortality. *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* 2004 Jul;24(7):1278–82.
22. Vega De Céniga M, Gómez R, Estallo L, Rodríguez L, Baquer M, Barba A. Growth Rate and Associated Factors in Small Abdominal Aortic Aneurysms. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2006 Mar;31(3):231–6.
23. Freiberg MS, Arnold AM, Newman AB, Edwards MS, Kraemer KL, Kuller LH. Abdominal Aortic Aneurysms, Increasing Infrarenal Aortic Diameter, and Risk of Total Mortality and Incident Cardiovascular Disease Events: 10-Year Follow-Up Data From the Cardiovascular Health Study. *Circulation.* 2008 Feb 26;117(8):1010–7.
24. ACC/AHA 2005 Practice Guidelines for the Management of Patients With Peripheral Arterial Disease (Lower Extremity, Renal, Mesenteric, and Abdominal Aortic): Executive Summary: A Collaborative Report From the American Association for Vascular Surgery/Society for Vascular Surgery,\* Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, Society for Vascular Medicine and Biology, Society of Interventional Radiology, and the ACC/AHA Task Force on Practice Guidelines (Writing Committee to Develop Guidelines for the Management of Patients With Peripheral Arterial Disease): *Endorsed by the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation; National Heart, Lung, and Blood Institute; Society for Vascular Nursing; TransAtlantic Inter-Society Consensus; and Vascular Disease Foundation.* *Circulation.* 2006 Mar 21;113(11):1474–547.
25. Aarts NJM, Schurink GWH, Schultze Kool LJ, Bode PJ, Van Baalen JM, Hermans J, et al. Abdominal Aortic Aneurysm Measurements for Endovascular Repair: Intra- and Interobserver Variability of CT Measurements. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 1999 Dec;18(6):475–80.
26. Wever JJ, Blankensteijn JD, Th M Mali WP, Eikelboom BC. Maximal aneurysm diameter follow-up is inadequate after endovascular abdominal aortic aneurysm repair. *Eur J Vasc Endovasc Surg Off J Eur Soc Vasc Surg.* 2000 Aug;20(2):177–82.

27. Wever JJ, Blankensteijn JD, Van Rijn JC, Broeders IAMJ, Eikelboom BC, Mali WPTHM. Inter- and Intraobserver Variability of CT Measurements Obtained After Endovascular Repair of Abdominal Aortic Aneurysms. *Am J Roentgenol*. 2000 Nov;175(5):1279–82.
28. Ghulam QM, Bredahl KK, Lönn L, Rouet L, Sillesen HH, Eiberg JP. Follow-up on Small Abdominal Aortic Aneurysms Using Three Dimensional Ultrasound: Volume Versus Diameter. *Eur J Vasc Endovasc Surg Off J Eur Soc Vasc Surg*. 2017 Oct;54(4):439–45.
29. Vaitėnas G, Mosenko V, Račytė A, Medelis K, Skrebūnas A, Baltrūnas T. Abdominal Aortic Aneurysm Diameter versus Volume: A Systematic Review. *Biomedicines*. 2023 Mar 17;11(3):941.
30. Kritpracha B, Beebe HG, Comerota AJ. Aortic Diameter Is an Insensitive Measurement of Early Aneurysm Expansion After Endografting. *J Endovasc Ther*. 2004 Apr;11(2):184–90.
31. Bargellini I, Cioni R, Petruzzi P, Pratali A, Napoli V, Vignali C, et al. Endovascular Repair of Abdominal Aortic Aneurysms: Analysis of Aneurysm Volumetric Changes at Mid-Term Follow-Up. *Cardiovasc Intervent Radiol*. 2005 May;28(4):426–33.
32. Schnitzbauer M, Güntner O, Wohlgemuth WA, Zeman F, Haimerl M, Stroszczyński C, et al. CT after Endovascular Repair of Abdominal Aortic Aneurysms: Diagnostic Accuracy of Diameter Measurements for the Detection of Aneurysm Sac Enlargement. *J Vasc Interv Radiol*. 2018 Feb;29(2):178-187.e3.
33. Franchin M, Serafini M, Tadiello M, Fontana F, Rivolta N, Venturini M, et al. A morphovolumetric analysis of aneurysm sac evolution after elective endovascular abdominal aortic repair. *J Vasc Surg*. 2021 Oct;74(4):1222-1231.e2.
34. Kontopodis N, Lioudaki S, Pantidis D, Papadopoulos G, Georgakarakos E, Ioannou CV. Advances in determining abdominal aortic aneurysm size and growth. *World J Radiol*. 2016 Feb 28;8(2):148–58.
35. Singh TP, Moxon JV, Gasser TC, Jenkins J, Bourke M, Bourke B, et al. Association between aortic peak wall stress and rupture index with abdominal aortic aneurysm–related events. *Eur Radiol*. 2023 Mar 10;33(8):5698–706.

36. Raghavan ML, Vorp DA, Federle MP, Makaroun MS, Webster MW. Wall stress distribution on three-dimensionally reconstructed models of human abdominal aortic aneurysm. *J Vasc Surg.* 2000 Apr;31(4):760–9.
37. Lindquist Liljeqvist M, Hultgren R, Gasser TC, Roy J. Volume growth of abdominal aortic aneurysms correlates with baseline volume and increasing finite element analysis-derived rupture risk. *J Vasc Surg.* 2016 Jun;63(6):1434-1442.e3.
38. Lareyre F, Adam C, Carrier M, Dommerc C, Mialhe C, Raffort J. A fully automated pipeline for mining abdominal aortic aneurysm using image segmentation. *Sci Rep.* 2019 Sep 24;9(1):13750.
39. Caradu C, Spampinato B, Vrancianu AM, Bérard X, Ducasse E. Fully automatic volume segmentation of infrarenal abdominal aortic aneurysm computed tomography images with deep learning approaches versus physician controlled manual segmentation. *J Vasc Surg.* 2021 Jul;74(1):246-256.e6.
40. Kesävuori R, Kaseva T, Salli E, Raivio P, Savolainen S, Kangasniemi M. Deep learning-aided extraction of outer aortic surface from CT angiography scans of patients with Stanford type B aortic dissection. *Eur Radiol Exp.* 2023 Jun 29;7(1):35.
41. Subasic M, Loncaric S, Sorantin E. 3-D image analysis of abdominal aortic aneurysm. *Stud Health Technol Inform.* 2000;77:1195–200.
42. De Bruijne M, Van Ginneken B, Viergever MA, Niessen WJ. Adapting Active Shape Models for 3D Segmentation of Tubular Structures in Medical Images. In: Taylor C, Noble JA, editors. *Information Processing in Medical Imaging [Internet].* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2003 [cited 2024 May 7]. p. 136–47. (Goos G, Hartmanis J, Van Leeuwen J, editors. *Lecture Notes in Computer Science*; vol. 2732). Available from: [https://link.springer.com/10.1007/978-3-540-45087-0\\_12](https://link.springer.com/10.1007/978-3-540-45087-0_12)
43. Zhuge F, Rubin GD, Sun S, Napel S. An abdominal aortic aneurysm segmentation method: Level set with region and statistical information. *Med Phys.* 2006 May;33(5):1440–53.
44. Zou KH, Warfield SK, Bharatha A, Tempany CMC, Kaus MR, Haker SJ, et al. Statistical validation of image segmentation quality based on a spatial overlap index<sup>1</sup>. *Acad Radiol.* 2004 Feb;11(2):178–89.

45. Abdolmanafi A, Forneris A, Moore RD, Di Martino ES. Deep-learning method for fully automatic segmentation of the abdominal aortic aneurysm from computed tomography imaging. *Front Cardiovasc Med.* 2023 Jan 5;9:1040053.