

## ХЕМОДИНАМИКА ФЕМОРО-ПОПЛИТЕАЛНЕ BY-PASS ХИРУРГИЈЕ МЕТОДОМ АНАЛИЗЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Драган Б. Секулић<sup>1</sup>, Александар П. Томић<sup>1</sup>, Данко З. Милашиновић<sup>2</sup>, Далибор Д. Николић<sup>3</sup>, Драгана С. Пауновић<sup>1</sup>,  
Урош М. Миладиновић<sup>4</sup>, Игор М. Секулић<sup>4</sup>, Маја Савић Секулић<sup>5</sup>, Бошко И. Милев<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Војномедицинска академија, Клиника за васкуларну и ендоваскуларну хирургију, Београд

<sup>2</sup>Универзитет у Крагујевцу, Факултет за хотелијерство и туризам, Врњачка Бања

<sup>3</sup>Институт ИТ, Крагујевац

<sup>4</sup>Војномедицинска академија, Институт за радиологију, Београд

<sup>5</sup>Војномедицински центар „Карабурма“, Београд

<sup>6</sup>Војномедицинска академија, Клиника за општу хирургију, Београд

## HAEMODYNAMICS OF FEMOROPLOPLITEAL BYPASS SURGERY USING FINITE ELEMENT ANALYSIS METHOD

Dragan B. Sekulic<sup>1</sup>, Aleksandar P. Tomic<sup>1</sup>, Danko Z. Milasinovic<sup>2</sup>, Dalibor D. Nikolic<sup>3</sup>, Dragana S. Paunovic<sup>1</sup>,

Uros M. Miladinovic<sup>4</sup>, Igor M. Sekulic<sup>4</sup>, Maja Savic Sekulic<sup>5</sup>, Bosko I. Milev<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Military Medical Academy, Clinic for Vascular and Endovascular Surgery, Belgrade, Serbia

<sup>2</sup>University of Kragujevac, Faculty of Hotel Management and Tourism, Vrnjачка Banja, Serbia

<sup>3</sup>Institute IT, Kragujevac, Serbia

<sup>4</sup>Military Medical Academy, Institute of Radiology, Belgrade, Serbia

<sup>5</sup>Military Medical Centre "Karaburma", Belgrade, Serbia

<sup>6</sup>Military Medical Academy, Clinic for General Surgery, Belgrade, Serbia

### САЖЕТАК

**Увод.** Феморо-поплитеални by-pass индикуван је у одмаклом стадијуму периферне артеријске оклузивне болести. Индикације за оперативно лечење постављају се на основу клиничке слике, ankle-brachial индекса и ангиографског налаза. Методом анализе коначних елемената могу се на основу скенерске ангиографије направити тродимензионални модели на којима се могу мерити различите физичке величине и израчунавати вредност ankle-brachial индекса. Циљ рада био је да се прикаже хемодинамика артерија методом анализе коначних елемената на основу преоперативне и постоперативне скенерске ангиографије, као и физичке величине које се на овај начин могу мерити.

**Метод.** У овом приказу представљена је хемодинамика феморо-поплитеалног by-pass-а на преоперативном и постоперативном моделу. На моделима добијеним анализом коначних елемената приказани су: притисак, смичући напон, брзине и струјнице. Притисак, односно ankle-brachial индекс поређени су с вредностима мереним на пацијенту, а остале три величине поређене су преоперативно и постоперативно.

**Резултати.** Постоперативно су измерене веће вредности притиска и ankle-brachial индекса на пацијенту и на моделима. Вредности приказане на моделима у значајној мери су у корелацији с вредностима мереним на пацијенту. Вредности смичућег напона и брзина се смањују на постоперативним моделима. Струјнице показују доминантну предњу тибикалну артерију.

**Закључак.** Вредности физичких величина мерених на пацијенту и на моделима добијеним методом анализе коначних елемената корелирају у значајној мери. Одређене физичке величине могле би указати на „слабе тачке“ одређеног модела.

**Кључне речи:** периферна артеријска болест, процедуре васкуларне хирургије; анализа коначних елемената.

### ABSTRACT

**Objective.** Femoropopliteal bypass is indicated in the advanced stage of peripheral arterial occlusive disease. The indications for surgical treatment are determined on the basis of a clinical exam, "ankle-brachial index" and angiographic findings. Using the finite element analysis method, three-dimensional models can be made based on angiography, and these models can be used to measure different physical quantities and calculate the value of the "ankle-brachial index". The aim of this paper is to show the hemodynamics of arteries by using the finite element analysis method based on preoperative and postoperative angiography, as well as physical quantities that can be measured in this way.

**Methods.** This case shows the hemodynamics of femoropopliteal bypass in the preoperative and postoperative models. The models obtained by finite element analysis show: pressure, shear stress, velocities, and streamlines. The pressure, i.e. the "ankle-brachial index", was compared with the values measured on the patient, while the other three values were compared preoperatively and postoperatively.

**Results.** Postoperatively, higher values of pressure and "ankle-brachial index" were measured on the patient and on the models. Wall shear stress and velocity values were reduced in postoperative models. The streamlines showed a dominant anterior tibial artery.

**Conclusion.** The values of physical quantities measured on patient and on the models obtained by the finite element analysis method correlate significantly. Some physical quantities could indicate the "weak points" of a particular model.

**Key words:** peripheral arterial disease; vascular surgical procedures; finite element analysis.

## УВОД

Периферна артеријска оклузивна болест (ПАОБ) у својој еволуцији креће се од асимптоматске болести, преко клаудикационих тегоба са тенденцијом смањења дистанце, до критичне исхемије, атрофије ткива екстремитета и гангрене. Периферни васкуларни *by-pass* је индикуван код пацијената са изразитим смањењем клаудикационе дистанце и критичном исхемијом (1). Индикације за оперативно лечење постављају се на основу клиничке слике, физикалног прегледа и дијагностичких процедура: колор дуплекс скена (КДС), *ankle-brachial* индекса (АБИ), мултислајсне компјутеризоване ангиографије доњих екстремитета (МСКА ДЕ) (2). АБИ представља неинвазивну дијагностичку процедуру на основу које можемо одредити степен тежине ПАОБ (3). МСКА ДЕ је најзначајнија дијагностичка метода за морфолошки приказ ПАОБ, као и за тродимензионалну компјутерску реконструкцију помоћу анализе коначних елемената (АКЕ) (4-6). Оклузија феморо-поплитеалног графта током петогодишњег постоперативног праћења износи 50–90%, при чему код 20% оперисаних постоји ризик од натколоне ампуације (7). Разлоге за овај неуспех могуће је наћи у области васкуларне биологије, биомеханике и клиничког одлучивања (8).

Компјутеризована метода помоћу које крвни суд делимо на мање делове који се називају коначни елементи и од којих настаје тетраедарски артеријски модел кроз који можемо симулирати проток и мерити одређене физичке величине назива се анализа коначних елемената (АКЕ) (4, 9). У овој студији мерићемо: притисак (П), брзину протока (БП), смичући напон зида (СНЗ) (Wall shear stress), и пратити струјнице (С) (streamlines). СНЗ представља силу по јединици површине којом зид делује на течност у правцу протока крви. Физиолошка вредност у артеријском систему износи 10–15 дуп/см<sup>2</sup> или 1–1,5 Ра (10). Он има различиту вредност у односу на закривљеност артерије, величину плака и брзину протока крви. Да бисмо мерили смичући напон као и друге наведене физичке величине потребна је тродимензионална слика крвног суда како би се измерила брзина крви у контакту са зидом, а не само у центру лумена (11, 12). БП честица је такође величина која се може мерити на АКЕ моделима (13). С или Лагранжово праћење честица (Lagrangian particle tracking) користи се да би се приказала структура тока честица кроз одређену средину. (14)

Циљ рада био је приказати хемодинамику артерија методом АКЕ на основу преоперативне и постоперативне МСКА ДЕ, као и физичке величине које се на овај начин могу мерити и показати да се вредности могу довести у корелацију с вредностима измереним на пацијенту.

## МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

Пацијент мушког пола 60 година старости примљен је у Клинику за васкуларну и ендоваскуларну хирургију Војномедицинске академије у Београду са клаудикационим тегобама у листу десне ноге на око 30 м хода. Као придружене болести наводи артеријску хипертензију, а од ранијих операција аорто-феморални *by-pass* с леве стране. Престао са пушењем цигарета три године пре пријема, а до тада пушач 37 година. Клиничким прегледом констатовано је одсуство мањавости десне потколенице и блага атрофија ткива. Периферни пулсеви су били палпабилни над феморалном, док се нису палпирани над поплитеалном, задњом тибијалном и артеријом *dorsalis pedis*. Пре пријема учињена је МСКА ДЕ, где се описује десно: „Илијачни крвни судови без значајних стеноза. *Arteria femoralis superficialis* у проксималној трећини са значајним стенозама, субоклузијама и оклузијама на неколико нивоа. Преко колатерала се реконструише поплитеална артерија (ПА). У потколеници сви крвни судови се прате до стопала“ (слика 1). Преоперативно и постоперативно су измерени АБИ (табела 2). Вредности АБИ на пацијентима мерене су на брахијалним артеријама сфигмоманометарски, а на артеријама у пределу глежња помоћу ултразвучног апарата Esaote SN 4790.

У овом случају учињен је феморо-поплитеални *by-pass* с десне стране. Серумске вредности креатинина су постоперативно износиле 80  $\mu\text{mol/L}$  (реф. 62–115  $\mu\text{mol/L}$ ), тако да није било контраиндикација за контролном МСКА ДЕ. На постоперативној МСКА ДЕ описано је десно: „Илијачне артерије без значајних редукција циркулишућег лумена. Феморо-поплитеални графт десно проходан без знакова тромбозе. ПА десно без значајних редукција циркулишућег лумена. У десној потколеници се приказују сви крвни судови и прате до стопала“ (слика 2). На преоперативним и постоперативним моделима добијеним анализом коначних елемената приказани су: П, СНЗ, БП и С.

Вредности П на АКЕ моделима мерене су у најдисталнијим тачкама модела, што би анатомски одговарало артеријама у нивоу глежња, где се и поставља доплер сонда за мерење АБИ. Као улазна вредност П у заједничкој феморалној артерији на АКЕ моделу постављена је вредност брахијалног П пацијента. П односно АБИ доведени су у корелацију с вредностима мереним на пацијентима, а остале три величине су поређене преоперативно и постоперативно на моделима.

## РЕЗУЛТАТИ

На слици 3 приказана је дистрибуција П на преоперативном и постоперативном моделу методом АКЕ добијеним помоћу МСКА ДЕ.

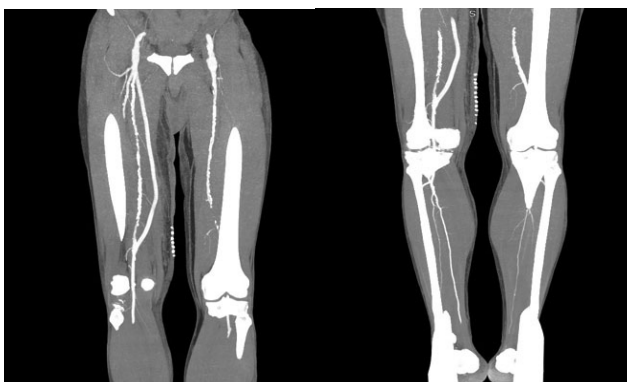
У табели 1 приказане су преоперативне и постоперативне вредности АБИ мерене на пацијенту и на моделу добијеном методом АКЕ помоћу МСКА ДЕ.

Табела 1. Преоперативне и постоперативне вредности АБИ мерене на пацијенту и моделу добијеном АКЕ помоћу МСКА ДЕ.

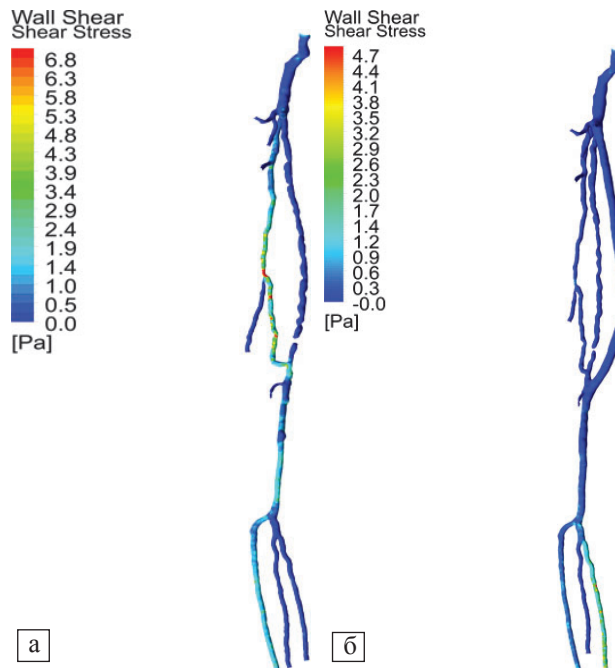
	Преоперативно		Постоперативно	
	Пацијент	АКЕ модел	Пацијент	АКЕ модел
„АТР“	0,50	0,51	0,93	0,92
„АДР“	0,46	0,45	1,00	1,00



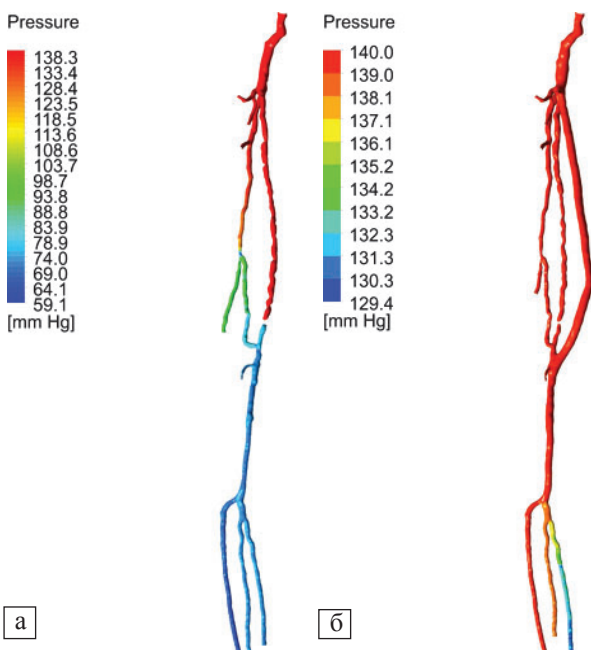
Слика 1. Преоперативна МСКА ДЕ.



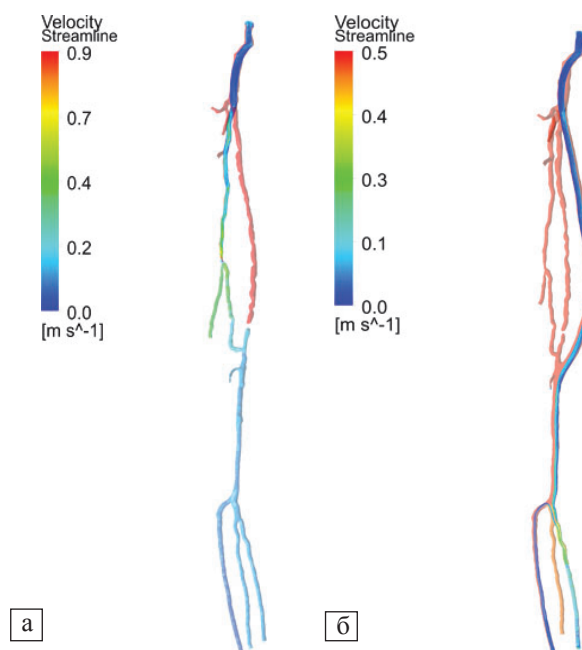
Слика 2. Постоперативна МСКА ДЕ.



Слика 4. Вредности СНЗ на преоперативном (а) и постоперативном (б) моделу методом АКЕ добијеним помоћу МСКА ДЕ.



Слика 3. Преоперативна (а) и постоперативна (б) дистрибуција П добијена на основу МСКА ДЕ помоћу методе АКЕ.



Слика 5. Вредности БП и приказ С на преоперативном (а) и постоперативном (б) моделу методом АКЕ добијеним помоћу МСКА ДЕ.



На слици 4 приказане су вредности СНЗ на преоперативном и постоперативном моделу методом АКЕ добијеним помоћу МСКА ДЕ.

На слици 5. приказане су вредности БП и С на преоперативном и постоперативном моделу методом АКЕ добијеним помоћу МСКА ДЕ.

## ДИСКУСИЈА

У раном постоперативном току пацијент је негирао клаудикационе тегобе, а клиничким прегледом констатовано је да је палпабилан поплитеални пулс и артеријске пулсације на стопалу. Вредности П, односно АБИ можемо мерити на пацијентима и на моделима, што није случај за СМЗ и С, које можемо мерити само на моделима. БП можемо мерити на АКЕ моделима, а доплер апаратом и на пацијенту (15). Вредности П и АБИ приказане на моделима у значајној мери су у корелацији са вредностима мереним на пацијенту. Постоји разлика у вредностима П мереним на пацијенту и на моделима, што се у вредностима АБИ испољава разлика од  $\pm 0,01$ .

Промена клиничког статуса не мора увек да прати промене у клиничком статусу постоперативно (16). У нашем случају дошло је до побољшања како у клиничком статусу, тако и у вредностима АБИ. Према раније наведеном критеријуму, пацијент је преоперативно био у стадијуму умерене ПАОБ. Постоперативно може се класификовати асимптоматском болешћу, чему у прилог говори и одсуство клаудикационих тегоба.

Повећана стопа ампутације повезана је са мањим побољшањем АБИ постоперативно ( $< 0,15$ ) и може се схватити као прогностички фактор код пацијената који немају дијабетес (17). У нашем приказу пацијент не болује од дијабетеса и има значајно побољшање вредности АБИ ( $\square 0,15$ ). Ова промена вредности се доказује разликом од  $\pm 0,01$  на пацијенту и на моделу направљеном методом АКЕ.

Вредности СНЗ се постоперативно у поплитеалној артерији смањују, као и у предњој тибидјалној артерији, док се у задњој тибидјалној артерији повећавају. У фибуларној артерији остају непромењене. Такође вредности СНЗ у нивоу анастомоза феморо-поплитеалног *by-pass*-а идентичне су вредностима у феморалној артерији, где нема значајних стеноза.

Низак СНЗ у раној фази атеросклерозе индукује ендотел да ствара проинфламаторне факторе, што резултује задебљањем зида и прогресијом атеросклеротског плака (18). Међутим, у одмаклом стадијуму атеросклерозе и високи и ниски СНЗ могу бити узрок ендотелне ерозије која има тенденцију да се јавља на стабилним плаковима. На овим стабилним плаковима у одмаклим стадијумима атеросклерозе настају ендотелна апоптоза и губитак контакта

ендотела са екстрацелуларним матриксом, што су процеси одговорни за настанак ендотелијалне ерозије, а изазвани су високим нивоом СНЗ-а. Већи СНЗ у ремоделираним артеријама резултује лошијом ендотелизацијом (19). Већи степен стенозе резултира вишим вредностима СНЗ (20).

У нашем случају показало се да с обзиром на то да је пацијент у одмаклом стадијуму атеросклерозе феморо-поплитеална реконструкција доводи до смањења вредности СНЗ у ПА и предњој тибидјалној артерији као и у перфорантној грани дубоке феморалне артерије (колатералној артерији), што говори у прилог атеропротективног ефекта, односно смањењу могућности ендотелне ерозије у овим крвним судовима. У задњој тибидјалној артерији уочавамо проатрогени ефекат, односно пораст вредности СНЗ, а тиме и већу вероватноћу ендотелне ерозије. Иако се на преоперативном и постоперативном опису МСКА ДЕ наводи да су артерије потколеница „проходне до стопала“, постоји разлика у вредностима СНЗ с обзиром на то постоји разлика у даљем развоју атеросклеротског процеса.

Вредности БП добијене на АКЕ моделима у литератури у корелацији су с вредностима добијеним клиничким испитивањима (21). БП на преоперативним моделима знатно је већа у површинској феморалној артерији која је оклудирана, али се готово исте вредности одржавају и постоперативно. У ПА постоперативно долази до смањења БП. У колатералном крвном суду који одговара једној од перфорантних грана дубоке феморалне артерије преоперативно постоје релативно ниске БП, које се постоперативно повећавају. Постоперативно БП се повећавају дистално и вероватно више у артеријама нижег пречника као што је фибуларна артерија и у задњој тибидјалној артерији где постоји вероватно израженији степен стенозе, а који се не може учити на МСКА ДЕ. У предњој тибидјалној артерији постоперативно на АКЕ моделу долази до смањења БП протока, што говори у прилог томе да нема хемодинамски значајних сужења.

Струјницама можемо пратити честице или ћелије у свакој временској и просторној тачки. Из ових симулација могу се рачунати различите физичке величине (22). У нашем случају радили смо просторно праћење честица и уочили на постоперативном моделу да је предња тибидјална артерија доминантна потколена артерија. Ако ову констатацију упоредимо са АБИ, видимо да постоји израженије повећање вредности АБИ у „ADP“ него у „ATP“. Иако су АБИ у „ADP“ преоперативно имали ниже вредности, постоперативно су више него у „ATP“. С би требало испитати на већем броју модела и утврдити значај праћења честица на исход феморо-поплитеалне реконструкције.

Вредности физичких величина мерених на пацијенту и на моделима добијеним методом АКЕ корелирају у значајној мери. Мерењем ових вредности на моделима могао би се предвидети исход феморо-поплитеалне *by-pass* хирургије, а одређене физичке величине могле би указати на „слабе тачке“ одређеног модела. Потребна су испитивања на већем броју пацијената како би се ова повезаност потврдила.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang C, Chen J, Gu C, Qiao R, Li J. Impact of risk factors and surgical techniques in coronary endarterectomy: a network meta-analysis. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2019; 29: 355–64.
2. Phair J, Carnevale ML, Teveris VG, Koleilat I, Indes JE. Peripheral arterial occlusive disease operative case volume in the final years of 5+2 and 0+5 vascular training paradigms. *Surgery* 2019; 166: 198–202.
3. Rac-Albu M, Iliuta L, Guberna SM, Sinescu C. The role of ankle-brachial index for predicting peripheral arterial disease. *Maedica (Bucur)* 2014; 9: 295–302.
4. Dolgov VY, Klyshnikov KY, Ovcharenko EA, et al. Finite element analysis-based approach for prediction of aneurysm-prone arterial segments. *J Med Biol Eng* 2019; 39: 102–8.
5. Burbelko M, Augsten M, Kalinowski MO, Heverhagen JT. Comparison of contrast-enhanced multi-station MR angiography and digital subtraction angiography of the lower extremity arterial disease. *J Magn Reson Imaging* 2013; 37: 1427–35.
6. Shareghi S, Gopal A, Gul K, et al. Diagnostic accuracy of 64 multidetector computed tomographic angiography in peripheral vascular disease. *Catheter Cardiovasc Interv* 2010; 75: 23–31.
7. Collins TC, Nelson D, Ahluwalia JS. Mortality following operations for lower extremity peripheral arterial disease. *Vasc Health Risk Manag* 2010; 6: 287–96.
8. Garbey M, Casarin S, Berceci SA. A versatile hybrid agent-based, particle and partial differential equations method to analyze vascular adaptation. *Biomech Model Mechanobiol* 2019; 18: 29–44.
9. Bi Z. Finite element analysis applications. 1st ed. London: Elsevier, 2018.
10. Mongrain R, Rodes-Cabau J. Role of shear stress in atherosclerosis and restenosis after coronary stent implantation. *Rev Esp Cardiol* 2006; 59: 1–4.
11. Katritsis D, Kaiaktsis L, Chaniotis A, Pantos J, Efstathopoulos EP, Marmarelis V. Wall shear stress: theoretical considerations and methods of measurement. *Prog Cardiovasc Dis*. 2007; 49: 307–29.
12. Becker SM, Kuznetsov AV. Heat transfer and fluid flow in biological processes. 6th ed. London: Academic Press, Elsevier, 2015.
13. Rajashekhar C, Manjunatha G, Fabian B. Finite element simulation of blood flow through an artery bifurcation: a mathematical model. *Malaysian J Math Sci* 2017; 11: 165–79.
14. Shadden SC, Arzani A. Lagrangian postprocessing of computational hemodynamics. *Ann Biomed Eng* 2015; 43: 41–58.
15. Hwang JY. Doppler ultrasonography of the lower extremity arteries: anatomy and scanning guidelines. *Ultrasonography* 2017; 36: 111–9.
16. O'Donnell TFX, Deery SE, Schermerhorn ML, et al. The impact of perioperative ankle-brachial index and clinical status on outcomes following lower extremity bypass. *Ann Vasc Surg* 2018; 53: 139–47.
17. Bischoff MS, Meisenbacher K, Peters AS, et al. CRITISCH collaborators. Clinical significance of perioperative changes in ankle-brachial index with regard to extremity-related outcome in non-diabetic patients with critical limb ischemia. *Langenbeck Arch Surg* 2018; 403: 741–8.
18. Gijssen F, Katagiri Y, Barlis P, et al. Expert recommendations on the assessment of wall shear stress in human coronary arteries: existing methodologies, technical considerations, and clinical applications. *Eur Heart J* 2019; 40: 3421–33.
19. White SJ, Newby AC, Johnson TW. Endothelial erosion of plaques as a substrate for coronary thrombosis. *Thromb Haemost* 2016; 115: 509–19.
20. Kaewbumrung M, Orankitjaroen S, Boonkrong P, Nuntadilok B, Wiwatanapataphee B. Numerical simulation of dispersed particle-blood flow in the stenosed coronary arteries. *Int J Differ Equ* 2018; 2018: 2593425.
21. Sousa CL, Castro FC, Antonio CC. Finite element simulation of blood flow in a carotid artery bifurcation. congress on numerical methods in engineering 2011, Coimbra, 14 to 17 June, 2011. APMTAC, Portugal, 2011. Conference proceeding. ([https://paginas.fe.up.pt/~lcsousa/Artigos2011\\_files/2011\\_CMNE\\_Coimbra\\_ID195\\_p410.pdf](https://paginas.fe.up.pt/~lcsousa/Artigos2011_files/2011_CMNE_Coimbra_ID195_p410.pdf)).
22. Meijering E, Dzyubachyk O, Smal I. Methods for cell and particle tracking. chapter 12. In: Conn PM, ed. *Methods in enzymology*. Volume 504. Imaging and spectroscopic analysis of living cells. Amsterdam: Elsevier, 2012: 183–200.