

Numerička analiza preoperativnog i postoperativnog modela akutne aortne disekcije

Igor Saveljić, Nenad Filipović

Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu
Kragujevac, Srbija
isaveljic@kg.ac.rs, fica@kg.ac.rs

Lazar Velicki

Medicinski fakultet, Univerzitet u Novom Sadu
Novi Sad, Srbija
lazar.velicki@ikvbnv.ns.ac.rs

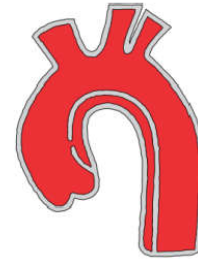
Sažetak—Aorta predstavlja najveći krvni sud u čoveku i neprekidno je izložena visokom krvnom pritisku i smičućim silama. Disekcija aorte predstavlja veoma ozbiljno stanje gde dolazi do cepanja unutrašnjeg sloja zida aorte i daljeg raslojavanja. Stopa smrtnosti kod netretiranih disekcija je čak 75% u prve dve sedmice. Hemodinamička svojstva protoka krvi kroz novonastali lažni lumen, kao i njegova dominacija nad pravim lumenom, ima značajan uticaj na ishod operacije i život pacijenta. Virtualna operacija, kao i numerički metod rešavanja polja fizičkih veličina dobijenog modela, daje jasnu sliku kako operacija utiče na protok kroz grane zahvaćene disekcijom. Kod pacijenta korišćenog u ovom radu, bila je zastupljena disekcija I po De Bakeju. Rezultati su prikazani za slučaj pre i posle virtualne operacije. Upporedno su prikazani smičući naponi, pritisci i brzine.

Ključne riječi-disekcija aorte; lažni lumen; numerička simulacija; smičući napon;

I. UVOD

Savremen način života, neredovna ishrana, izloženost stresu, gojaznost, kao i smanjena fizička aktivnost su samo neki od razloga nastanka hipertenzije, najznačajnijeg faktora rizika za nastanak kardiovaskularnih oboljenja [1]. Hipertenzija predstavlja akutnu ili hroničnu bolest povišenog arterijskog krvnog pritiska. Često nema prepoznatljive simptome, pa se zbog naziva i „tihim ubicom“. Kod većine bolesnika arterijska hipertenzija protiče bez simptoma, pa je tek aneurizma i disekcija aorte otkrivaju, usled čega je neophodno njeno rano otkrivanje i lečenje.

Disekcija aorte predstavlja ozbiljno i urgentno stanje, u kojem dolazi do cepanja unutrašnjeg sloja aortnog zida (endotela aorte), dok spoljni sloj ostaje netaknut (Sl. 1) [2]. Smrtnost je 1% na svakih sat vremena od nastanka disekcije, pa u prvih nekoliko dana umire čak oko 98% pacijenata. Disekcija aorte počinje malom pukotinom u sloju intime, ali kako krv koja protiče kroz aortu ima visok pritisak (preko 120 mmHg u toku srčanog ciklusa sistole), mala pukotina ubrzo postaje sve šira, pa krv kroz rasep prodire u drugi sloj aortnog zida - sloj medije, nastavlja dalje cepanje tog sloja i stvara novi kanal u zidu aorte čime nastaje još jedan lumen, lažni. Aortna disekcija je po život opasan događaj, jer može dovesti do razvoja moždanog udara, iznenadnog prestanka rada srca, do prekida dotoka krvi do glavnih organa, ili do potpunog rasepa aorte i smrtonosnog krvarenja [3].



Slika 1. Disekcija aorte

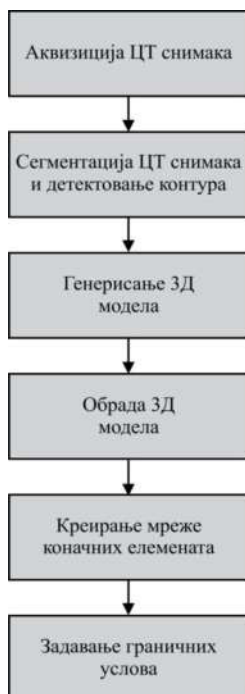
Razvoj računarske tehnike doprinosi tome da se sve veći broj različitih realnih problema rešava matematičkim modeliranjem. Metod konačnih elemenata (MKE) je dugi niz godina dominantan numerički metod rešavanja polja fizičkih veličina kako u klasičnom inženjerstvu tako i u bioinženjeru. Najveći doprinos numeričkih metoda se ogleda kod brojnih problema koji se ne mogu ili se vrlo teško rešavaju analitičkim putem, pa ove metode uz određene aproksimacije daju zadovoljavajuća rešenja. Primenom ovih metoda doktori preko virtualne operacije dobijaju odgovore kakav uticaj ima hirurški zahvat na rezoluciju malperfuzije, odnosno da li se protok kroz grane zahvaćene disekcijom stabilizuje ili i dalje postoji malperfuzija. Na ovaj način se može predvideti postoperativni oporavak pacijenta.

II. MATERIJALI I METODE

U postavljanju dijagnoze disekcije aorte koriste se razne direktne i indirektne, invazivne i neinvazivne tehnike. Izbor dijagnostike snimanja zavisi od stabilnosti pacijenta, lokalne ekspertize i same dostupnosti tehnike. Glavni ciljevi dijagnostičkih metoda su brza potvrda prisutnosti (ili odsustva) akutne aortne disekcije, klasifikacija tipa disekcije, identifikacija i lokacija intimalne suze, potvrda prisutnosti pravog/lažnog lumena i tromba (ukoliko je prisutan), procena uključenosti bilo koje grane aorte i otkrivanje bilo kakvog izlivanja u perikardijumu, medijastinumu (prostor između desnog i levog plućnog krila) ili u grudnom košu. U okviru ovog poglavlja, biće prikazane različite tehnike snimanja, uzimajući u obzir tehničke mogućnosti, specifične dijagnostičke metode i samu preciznost metode.

Kompjuterska tomografija predstavlja medicinsku proceduru slika kojom se h-zracima proizvode tomografske slike specifičnih površina tela. Ove slike poprečnih preseka se

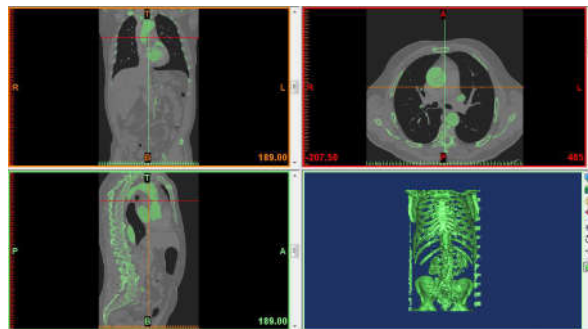
koriste za dijagnozu i u terapijske svrhe u različitim medicinskim disciplinama [4]. Digitalnom obradom ovih slika pruža se mogućnost generisanja trodimenzionalnih slika skeniranog objekta snimljenih oko jedne ose rotacije. 3D modeliranje disecirajućeg modela aorte korišćenog u ovoj studiji, svodi se na kreiranje zapreminskih modela korišćenjem 2D aksijalnih preseka dobijenih pomenutim CT postupkom skeniranja. Faze dobijanja 3D modela prikazane su na Sl. 2.



Slika 2. Faze rekonstrukcije modela disektovane aorte [5]

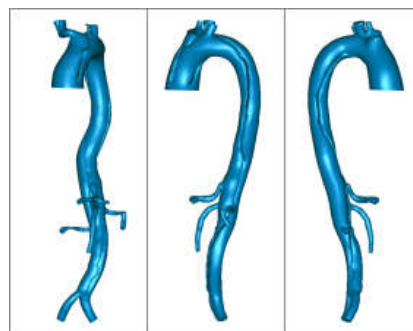
Prvu fazu čini primena poluautomatskog algoritma segmentacije CT slika kako bi se dobio aksijalni niz kontura, a potom i kreiranje 3D prikaza primenom programa Materialise Mimics 10.01. Sledeću fazu čini primena programa Geomagic Studio 10 kako bi se dobijeni zapreminski model, predstavljen kao mreža površina trouglova, očistio od šuma i nepotrebnih delova, a delovi od interesa što bolje pripremili za generisanje mreže konačnih elemenata. Kreiranje mreže konačnih elemenata vrši se korišćenjem programa Femap v10, što predstavlja pretposlednju fazu u pripremi modela za simulaciju. Poslednja faza podrazumeva prilagođavanje mreže konačnih elemenata, dobijenih prethodnim korakom, PAKSF solveru i zadavanje graničnih uslova.

Nakon učitavanja CT slika u Mimisc, potrebno je uraditi automatsku segmentaciju delova aorte od interesa, kao što je prikazano na Sl. 3.



Slika 3. Primena algoritma segmentacije i prikaz 3D modela

Nakon dobijenog 3D modela, pristupa se otklanjanju šumova i ispravljanju loših i oštih trouglića, kako bi se mreža što bolje pripremila za numeričku simulaciju.



Slika 4. Prikaz 3D modela disecirajuće aorte

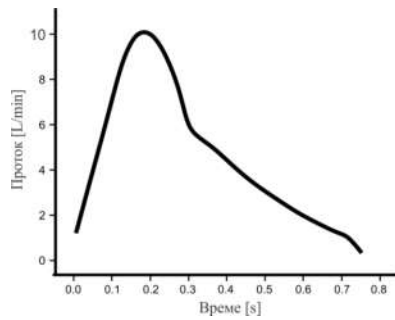
Kreiranje mreže konačnih elemenata, kao što je već rečeno, vrši se korišćenjem programa Femap v10, što predstavlja pretposlednju fazu u pripremi modela za simulaciju.

Navije-Stoksove jednačine se koriste za opisivanje kretanja čestica fluida. One predstavljaju matematičko opisivanje kretanja svih fluida. Protok je usvojen da je laminaran, Njutnovski i nestišljiv. Jednačina kontinuiteta i Navije-Stoksove jednačine imaju sledeći oblik [6]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$-\mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = 0 \quad (2)$$

gde je \mathbf{u} brzina krvi, ρ gustina, p pritisak i μ dinamička viskoznost krvi. Krv ima gustinu $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ i dinamičku viskoznost $\mu=0.0035 \text{ Pas}$ [7]. Srednja vrednost protoka u aorti iznosi 5 l/min. Na osnovu toga, poznavajući veličinu prečnika aorte i protok kroz posmatrani poprečni presek, moguće je izračunati srednju vrednost brzine koju je potrebno zadati na ulazu modela ovog pacijenta. Korišćena je pulzatorna funkcija promene brzine na ulazu (Sl. 5).

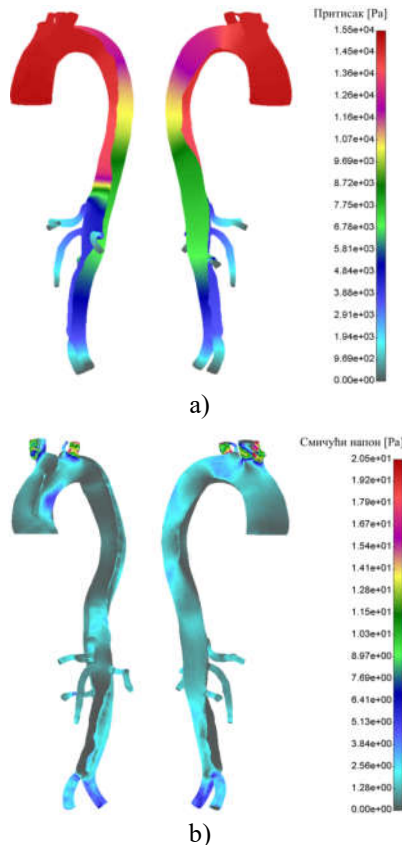


Slika 5. Vremenska funkcija brzine na ulazu uzlazne aorte

U ovom istraživanju korišćena je geometrija jednog pacijenta. Pacijent je starosti 61. godine, nepušač kome je dijagnostifikovana hipertenzija i akutna aortna disekcija tipa A po De Bakeju. Veličina ulaznog procepa je 4.25 cm^2 na udaljenosti 81 mm od vrha aortnog luka. Prisutan je povratni procep na rastojanju 9.1 mm od aortne bifurkacije površine 8.77 cm^2 . Zapremina pravog lumena je 389.64 cm^3 , a lažnog lumena 133.83 cm^3 .

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Numerička analiza ponašanja krvnog suda tokom jednog srčanog ciklusa sprovedena je korišćenjem PAKF solverom. Rezultati smičućeg napona, brzina i pritiska, pre operativnog modela, prikazani su na Sl. 6.

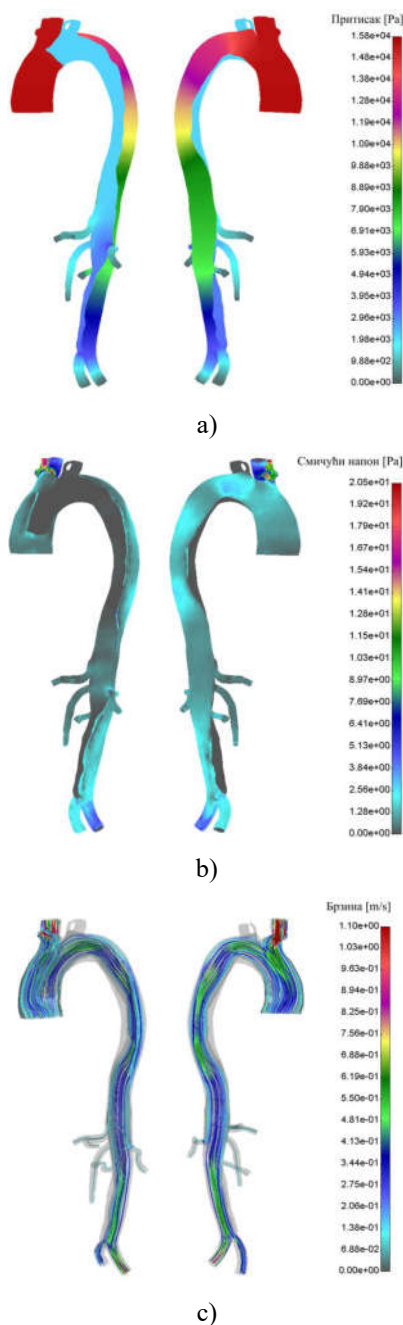


Slika 6. Rezultati numeričke analize preoperativnog modela; a) pritisak, b) smičući napon, c) brzina

Sl. 6 pokazuje da od ushodne aorte lažni lumen ima veći pritisak sve do dijafragme, tj. samog završetka grudne aorte. Istovremeno, vrednost smičućeg napona lažnog lumena u oblasti ushodne aorte ide i do 7.42 Pa . Najveće zabeležene vrednosti smičućeg napona registrovane su na grani brahiocefaličnog stabla, 20.50 Pa , i duž leve zajedničke subklavijalne arterije, takođe iste vrednosti. Kako još uvek nije jasno kako disecirajuće regije reaguju na smičuće vrednosti napona, razumno je očekivati da se ponašaju slično aneurizmima [8]. Takođe, literatura [9], [10], [11] pokazuje da su vrednosti smičućih napona u korelaciji za širenjem procepa, dodatnim procepima i formiranjem aneurizme. Kroz brahiocefaličnu arteriju koja je ostala u pravom lumenu, ostvaruje se protok od $15.77 \text{ cm}^3/\text{s}$ (18.79 % od ukupnog protoka). Lažni lumen, kroz koji ulazi 35.43 % protoka, preuzeo je protok kroz levu zajedničku karotidnu arteriju kroz koju protiče $2.61 \text{ cm}^3/\text{s}$ (3.12 %) fluida, dok protok kroz levu subklavijalnu arteriju iznosi $9.22 \text{ cm}^3/\text{s}$ (10.98 %). Celijačna grana, sa protokom od $10.27 \text{ cm}^3/\text{s}$ (12.31 %), i gornja mezentrična, protoka $7.81 \text{ cm}^3/\text{s}$ (9.29 %), pripojene su lažnom lumenu. Leva renalna arterija izložena je statičkoj opstrukciji jer se delom napaja iz pravog, a delom iz lažnog lumena. Brzina strujanja krvi u levoj renalnoj grani iznosi 0.16 m/s , što odgovara protoku od $7.58 \text{ cm}^3/\text{s}$ (9.03 %), a u desnoj renalnoj, koja se napaja iz pravog lumena, protok iznosi $8.41 \text{ cm}^3/\text{s}$ (10.02 %). Obe ilijačne grane pripadaju pravom lumenu, i u njima su zabeleženi protoci od $10.61 \text{ cm}^3/\text{s}$ (12.62 %), u desnoj, i $11.62 \text{ cm}^3/\text{s}$ (13.84 %), u levoj.

Postoperativni model geometrije pacijenta #01 podrazumevao je zamenu ushodne aorte stent graftom i zatvaranje protoka kroz lažni lumen, što se sve izvodi kompjuterskom manipulacijom. Nakon hirurške intervencije, došlo je do porasta pritiska u pravom lumenu, i do pada u lažnom lumenu. Maksimalne vrednosti pritiska u zoni ushodne aorte pravog lumena se kreću do 15812 Pa . Nakon hirurške intervencije, protok kroz brahiocefaličnu arteriju se povećao sa $15.77 \text{ cm}^3/\text{s}$ na $19.39 \text{ cm}^3/\text{s}$. Protok kroz levu zajedničku karotidnu arteriju kroz koju je proticalo $2.61 \text{ cm}^3/\text{s}$ fluida, sada protiče $0.74 \text{ cm}^3/\text{s}$, dok kroz levu subklavijalnu arteriju protok sada iznosi $1.97 \text{ cm}^3/\text{s}$ (pad za 78.63 %). Celijačna arterija sada ima novu vrednost protoka od $7.17 \text{ cm}^3/\text{s}$ (pad za 30.18 %), a gornja mezentrična $4.21 \text{ cm}^3/\text{s}$ (pad za 46.02 %). Leva renalna

arterija novog protoka od $10.18 \text{ cm}^3/\text{s}$ beleži povećanje od 34.3 %, dok desna renalna, sa protoka $8.41 \text{ cm}^3/\text{s}$, ima skok na $11.30 \text{ cm}^3/\text{s}$. Ilijačne grane, zabeleženih protoka od $10.60 \text{ cm}^3/\text{s}$, u desnoj, i $11.62 \text{ cm}^3/\text{s}$, u levoj, u preoperativnom stanju, imaju nove vrednosti i to $14.13 \text{ cm}^3/\text{s}$, u desnoj (porast za 33.3 %), i $14.72 \text{ cm}^3/\text{s}$ (porast za 26.67 %), u levoj ilijačnoj arteriji.



Slika 7. Rezultati numeričke analize postoperativnog modela; a) pritisak, b) smičući napon, c) brzina

Predloženi postoperativni zahvat zamene ušodne aorte, i istovremeno zatvaranje lažnog lumena, daje relativno dobre rezultate u smislu konačnog ishoda operacije. Osim pada protoka u levoj subklavijalnoj grani, kao i u levoj zajedničkoj karotidnoj arteriji, beleži se porast protoka u gotovo svim

ostalim granama. Virtualnom manipulacijom preoperativnog modela ovog pacijenta, pruža se daleko jasnija slika o tome šta se dešava sa protocima grana aortnog luka, kao i distalnih grana, jer na taj način doktori mogu da predvide da li će dobijeni protok moći da zadovolji potrebe ostalih organa tela.

IV. ZAKLJUČAK

Kardiovaskularne bolesti su vodeći uzrok smrti u svim razvijenim zemljama. Naša zemlja se nalazi u grupi zemalja sa visokim rizikom umiranja od ovih bolesti. U toku ove studije sprovedene su trodimenzionalne simulacije u cilju određivanja hemodinamičkog ponašanja krvi u aortama sa prisutnom akutnom disekcijom. Cilj sprovedenih simulacija bio je da se numeričkim putem odredi odnos pravog i lažnog lumena akutne aortne disekcije. Od velikog je značaja predvideti ponašanje lažnog lumena i njegovu propagaciju u daljem toku razvoja bolesti, kao i određivanje potencijalnih mesta za nastanak povratnih procepa ili rupture. Na taj način moguće je predvideti na koji način će operacija imati uticaj na dalji rad organa. Tačno je moguće odrediti vrednosti pritiska, smičućih napona, i što je najbitnije protoka, jer je na taj način moguće predvideti postoperativni oporavak pacijenta i izbeći greške prilikom određenih zamisli pre izvođenja zahvata.

LITERATURA

- [1] P.G. Hagan, C.A. Nienaber, E.M. Isselbacher, D. Bruckman, D. Karavite and P. Russman, "The International Registry of Acute Aortic Dissection (IRAD): new insights into an old disease," JAMA, vol. 283, pp. 897-903, 2000.
- [2] J. Golledge, K.A. Eagle, "Acute aortic dissection," The Lancet, vol. 372, no. 9632, pp. 55-66, 2008.
- [3] R.R. Baliga, C.A. Nienaber, E.M. Isselbacher, K.A. Eagle, "Aortic dissection and related syndromes," Springer, New York, USA, 2007.
- [4] R. Erbel, S. Mohr-Kahaly, H. Oelert, "Diagnostic strategies in suspected aortic dissection: comparison of computed tomography, aortography and transesophageal echocardiography," Am J Card Imaging, vol. 4, pp. 157-172, 1990.
- [5] I. Saveljic, "Numerical solving of relationship between true and false lumen in acute aortic dissection," Ph. D. Thesis, Faculty of engineering University of Kragujevac, Serbia, 2016.
- [6] N. Filipovic, "Numerical Analysis of Coupled Problems: Deformable Body and Fluid Flow," Ph.D. Thesis, Faculty of Mech. Engrg., University of Kragujevac, Serbia, 1999.
- [7] C. Karmonik, J. Bismuth, D.J. Shah, M.G. Davies, D. Purdy, A.B. Lumsden, "Computational study of haemodynamic effects of entry and exit-tear coverage in a DeBakey type III aortic dissection: technical report," Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg, vol. 42, pp. 172-177, 2011.
- [8] M. Shojima, "Magnitude and Role of Wall Shear Stress on Cerebral Aneurysm: Computational Fluid Dynamic Study of 20 Middle Cerebral Artery Aneurysms," Stroke vol.35, no.11, pp. 2500-2505, 2004.
- [9] S. Mohr-Kahaly, R. Erbel, H. Rennollet, N. Wittlich, M. Drexler, H. Oelert, J. Meyer, "Ambulatory follow-up of aortic dissection by transesophageal two-dimensional and color-coded Doppler echocardiography," Circulation, vol.80, no.1, pp. 24-33, 1989.
- [10] S. Kondo, N. Hashimoto, H. Kikuchi, F. Hazama, I. Nagata, H. Kataoka, "Cerebral aneurysms arising at nonbranching sites. An experimental study," Stroke, vol. 28, pp. 398-403, 1997.
- [11] N. Filipovic, D. Nikolic, I. Saveljic, T. Djukic, O. Adjic, P. Kovacevic, N. Cemerlic-Adjic, L. Velicki, "Computer simulation of thromboexclusion of the complete aorta in the treatment of chronic type B aneurysm," Computer Aided Surgery, vol. 18, no. 1-2, pp. 1-9, 2013.

ABSTRACT

The aorta is the largest blood vessel in the man and continuously exposed to high pressure and shear forces. Aortic dissection is a very serious condition where there is a splitting of the inner layers of the aortic wall and further stratification. The mortality rate in untreated dissection was 75% in the first two weeks. Hemodynamic properties of blood flow through the newly created false lumen, and his domination of the true lumen, has a significant impact on the outcome of the operation and life of the patient. Virtual operations, as well as numerical methods for solving fields of physical values obtained model, gives a clear picture of how the operation affects the flow

through the branches of the affected dissection. In patients used in this study, was represented type I of classification according De Bakey classification. Results are shown for the case before and after the virtual operation. Comparative shown shear stresses, pressures and velocity.

NUMERICAL ANALYSIS OF PREOPERATIVE AND POSTOPERATIVE MODEL OF ACUTE AORTIC DISSECTION

Igor Saveljic, Lazar Velicki, Nenad Filipovic