

ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

„Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - STL2FEM“

Аутори техничког решења

- Др Мирослав Живковић, ред. проф.
- Милан Благојевић, истраживач-сарадник
- Др Горан Станковић, доцент
- Александар Николић, истраживач-сарадник
- Милорад Живковић, истраживач-сарадник

Наручилац техничког решења

- Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

Корисник техничког решења

- Клинички центар Србије, Београд

Година када је техничко решење урађено

- 2011-2012

Техничко решење прихватили-користе

- Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
- Клинички центар Србије, Београд

Начин верификације резултата

- Резултати су верификовани провером квалитета мреже у другим софтверима (FEMAP, COMSOL) и поређењем нумеричких резултата добијених коришћењем модела генерисаних софтвером STL2FEM и модела генерисаних другима софтверима

Начин коришћења техничког решења

- Софтвер се примењује за брзо генерисање модела при прорачуну струјања методом коначних елемената за коронарне и каротидне артерије пацијената Клиничког центра Србије

Област технике на коју се техничко решење односи

- Биомеханика, Рачунска механика

1. Опис проблема који се решава техничким решењем

Техничко решење (софтвер STL2FEM) припада области научно-техничких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера (класа 42). Софтвер се односи на брзо генерисање модела коначних елемената за комплексне геометријске моделе крвних судова. На основу волуметријских модела (добијених на бази снимака са ЦТ скенера или магнетне резонанце), софтвер генерише мрежу коначних елемената која се састоји од 3Д осмочворних коначних елемената.

Генерисање модела коначних елемената за реалне геометрије крвних судова, представља сложен и дуготрајан задатак. Комерцијални софтвери за генерисање модела коначних елемената углавном су намењени за генерисање мрежа на основу правилних геометријских ентитета који дефинишу посматрани домен. Стога, они нису погодни за генерисање мреже на анатомским структурама, посебно кад треба да се генеришу 3Д осмочворни коначни елементи. Развијено техничко решење омогућава брзо генерисање модела коначних елемената за конкретне пацијенте, па резултати анализе струјања крви кроз крвне судове могу да буду део здравственог досијеа посматраних пацијената на основу кога лекари могу донети релевантне одлуке о начину лечења или одговарајућим интервенцијама.

2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења

Студије о дистрибуцији плака у кардиоваскуларном систему су показале да артеросклероза углавном настаје на гранањима у васкуларном стаблу, где артерије имају релативно сложену геометрију. Сложена геометрија условљава струјање које је јединствено за сваког појединачног пацијента. Већина прорачуна струјања до сада је вршена над такозваним просечним или идеализованим геометријама. Решења која се тако добијају могу знатно одступати од решења која би се добила неким прецизнијим моделирањем крвног суда. У данашње време тренд и потреба је генерисање модела који прецизно описују реалне геометрије артеријских бифуркација.

Велики изазов за истраживаче представља генерисање квалитетне мреже 3Д осмочворних коначних елемената за компликоване реалне геометрије (крвни систем човека, скелетни систем итд.) [1-3]. Познато је да квалитет мреже значајно утиче на тачност резултата у симулацијама методом коначних елемената [4]. Мрежа 3Д осмочворних коначних елемената даје знатно боље и тачније резултате од претежно коришћених тетраедарских елемената. Штавише, мали је број софтвера који генеришу 3Д осмочворну мрежу коначних елемената директно са волуметријског модела.

Преглед различитих техника за генерисање мрежа коначних елемената дат је у [5]. Бројни алгоритми за генерисање мрежа коначних елемената са одређеним степеном аутоматизације представљени су у [6-10]. Као најпогоднија метода за креирање мреже коначних елемената усвојена је композитна или мултиблок метода. Неки од светских софтвера који користе мултиблок методу за генерисање мреже су TrueGrid [11], ANSYS ICEM CFD [12]. Код ових софтвера, велики проблем представља креирање мреже блокова. Порет тога, овај поступак одузима много времена, а софтвери су осетљиви на сложеност топологије. У нашој земљи постоји софтвер MedCFD [13] који омогућава генерисање мреже коначних елемената артерија, али такви модели не описују прецизно стварну геометрију артерија.

3. Суштина техничког решења

Софтвер STL2FEM је намењен брзом генерисању модела коначних елемената крвних судова [14, 15]. Улаз у софтвер представља:

- Волуметријски модел,
- Пресеци који дефинишу границе домена и
- Конфигурациона датотека.

Излаз из софтвера је:

- Топологија блокова за генерисање мреже коначних елемената софтверима заснованим на мултиблок методи,
- Мрежа коначних елемената која се може користити за задавање граничних услова и прорачун другим софтверима,
- Улазна датотека за софтвер за прорачун струјања PAK-F.

Софтвер STL2FEM, заснован на мултиблок методи, омогућава брзо генерисање мреже коначних елемената на геометријским моделима бифуркација реалних артерија. Развијени алгоритам добро описује сложене конфигурације реалних артерија пацијената. Имплементирани метод изузетно убрзава процес генерисања модела коначних елемената за произвољно изабраног пацијента уз минимизирање грешке у нумеричком решењу. Развијени алат је веома ефикасан при креирању прорачунских мрежа за комплексне геометрије у биомеханици и инжењерингу уопште. Хардверски захтевни и дуготрајне процедуре реконструкције NURBS површина, а затим и CAD моделирања нису потребне, јер се модел коначних елемената креира директно на основу волуметријског модела без потребе за генерисањем тзв. *watertight* модела. Топологија блокова креирана овим софтвером може да буде коришћена у другим софтверима заснованим на мултиблок методи. Насупрот другим алгоритмима који користе мултиблок методу, софтвер STL2FEM није осетљив на величину блока.

Софтвер STL2FEM је развијен у оквиру пројеката TP32036 и OI175082 Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Развијени софтвер ће бити присутан на домаћем и иностраном тржишту софтвера и моћи ће успешно да се примењује у клиничким истраживањима, као и у научноистраживачком раду и настави на техничким факултетима у земљи и иностранству. Развијени софтвер је једноставан за употребу и подржан пратећом документацијом, одржавањем и обуком, са могућношћу брзе доградње модула и функционалности по захтеву корисника за креирања прорачунских модела за друга биомеханичка истраживања.

4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)

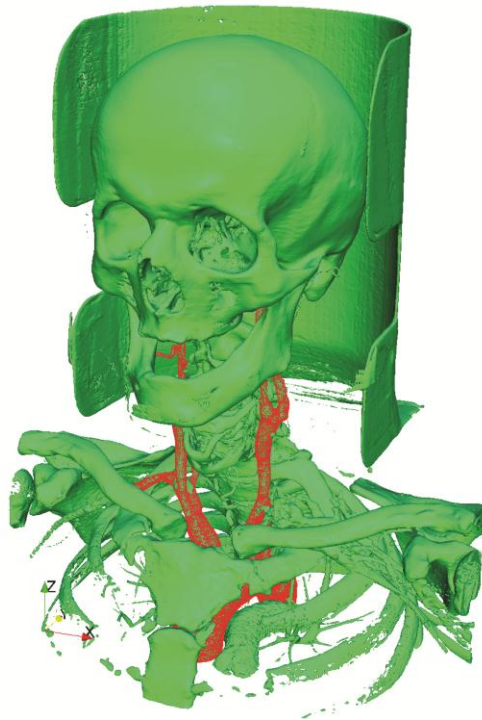
Софтвер STL2FEM користи као улаз волуметријски модел и пресеке који дефинишу границе домена. Ове ентитете је потребно припремити у екстерним софтверима отвореног кода (на пример Slicer и MeshLab). Прво наводимо начин припреме ових ентитета, а затим се дају детаљи алгоритма имплементираних у софтвер STL2FEM.

Припрема модела

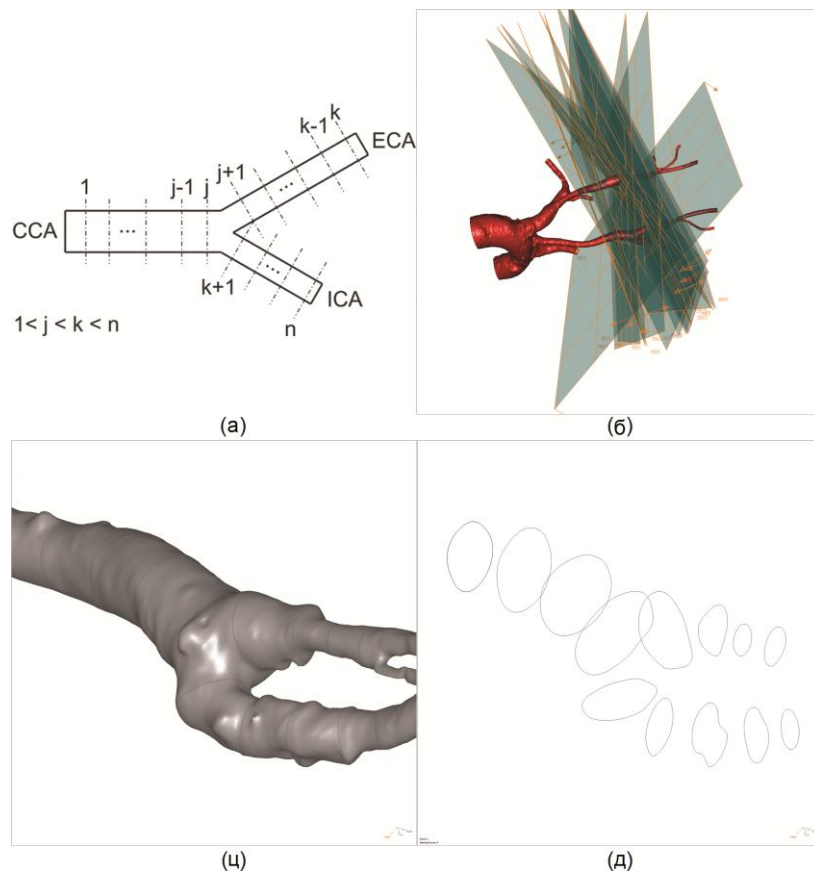
Идентификација геометрије артерија на основу снимака са ЦТ скенера или магнетне резонанце се врши софтверима за сегментацију медицинских слика (Mimics, Slicer,...) [4], [16]. Главни изазов у анализи медицинских снимака је да се из снимака ниске резолуције генеришу веома добре информације о границама домена минимизирајући ефекат шума, нехомогености и других фактора.

Волуметријски модел се обрађује у софтверу MeshLab [17] да би се уклониле тачке које леже ван посматраног домена крвног суда и поставили пресеци за генерисање блокова. На слици 1. приказан је волуметријски модел произвољно изабраног пацијента са означеним крвним судовима. Са три пресека дефинишу се границе домена артеријске бифуркације (пресеци 1, k и n) (слика 2a). Пресеци су постављени тако да стоје нормално у односу на централну линију артерије (слика 2б). На гранању артерије потребно је постављање три пресека, j, j+1 и k+1, према слици 2a. Остали пресеци су постављени на местима где постоји значајна промена правца артерије. Може се поставити произвољан број осталих пресека. Геометрија артерије произвољно изабраног пацијента и пресеци за

генерисање мреже приказани су на слици 2ц и 2д. Пресеци из програма MeshLab се екпортују као облак тачака у ASCII датотекама. Волуметријски модел се екпортује у ASCII STereoLithography (СТЛ) датотеку.



Слика 1. Волуметријски модел добијен на основу оригинални ЦТ снимка произвољно изабраног пацијента са означеним крвним судовима



Слика 2. Припрема модела артеријске бифуркације

Глобални алгоритам софтвера и генерисање блокова

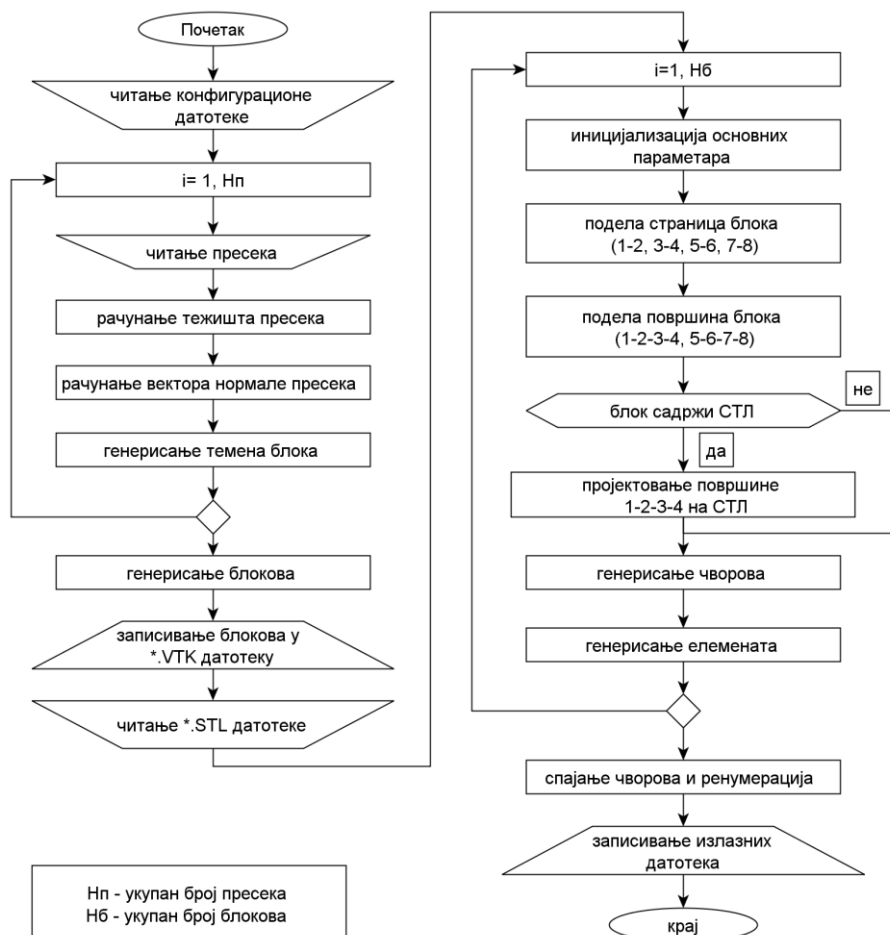
Софтвер STL2FEM је написан у програмском језику FORTRAN и омогућава покретање и компајлирање на различитим рачунарским платформама и архитектурама. Алгоритам софтвера за брзо генерисање мреже приказан је на слици 3.

Основни кораци за генерисање мреже коначних елемената су: (а) генерисање топологије блокова, (б) генерисање елемената и (ц) повезивање блокова [10, 14]. Над посматраним делом простора - доменом, софтвер генерише поддомене - блокове. Блокови су представљени као хексаедри дефинисани теменима и ивицама (слика 4). Сваки блок у физичком домену пресликава се у блок у рачунском домену. Целокупни домен у коме се решавају основне физичке једначине настаје спајањем појединачних блокова.

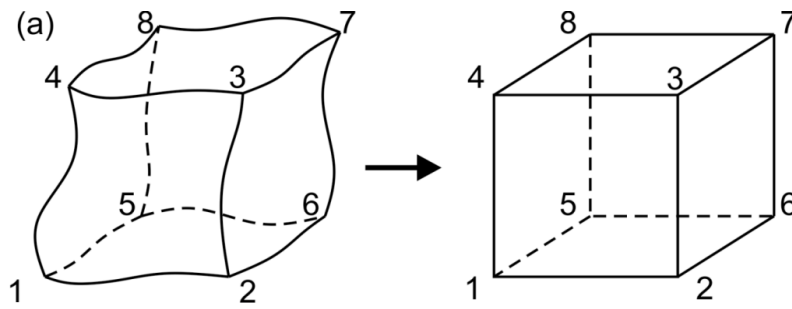
Укупан рачунски домен (у овом случају крвни суд) Ω је подељен на N_b поддомена који се називају блокови и означавају као $\Omega^b, (b=1,2,3,\dots,N_b)$. Топологија блокова је формирана спајањем свих блокова у једну целину.

Процес генерисања блокова се састоји од следећих корака: (а) петља по дефинисаним пресецима, (б) читање података о пресеку из датотеке, (ц) рачунање тежишта пресека, (д) рачунање вектора нормале пресека, (е) рачунање положаја темена блока и (ф) генерисање блокова.

Постоји неколико топологија блокова који дају погодан облик мреже. Софтвер STL2FEM, примењује иновативну топологију блокова приказану на слици 5 [18, 19]. Примењена топологија блокова је изабрана као најбоља зато што омогућава креирање блокова кад постоји гранање артерије и распоред блокова је исти у свим гранама [20-24].

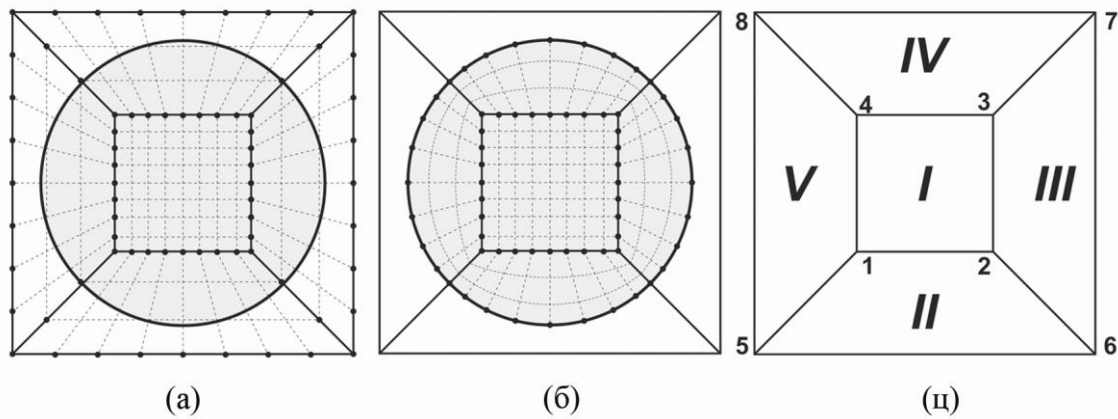


Слика 3. Алгоритам софтвера STL2FEM

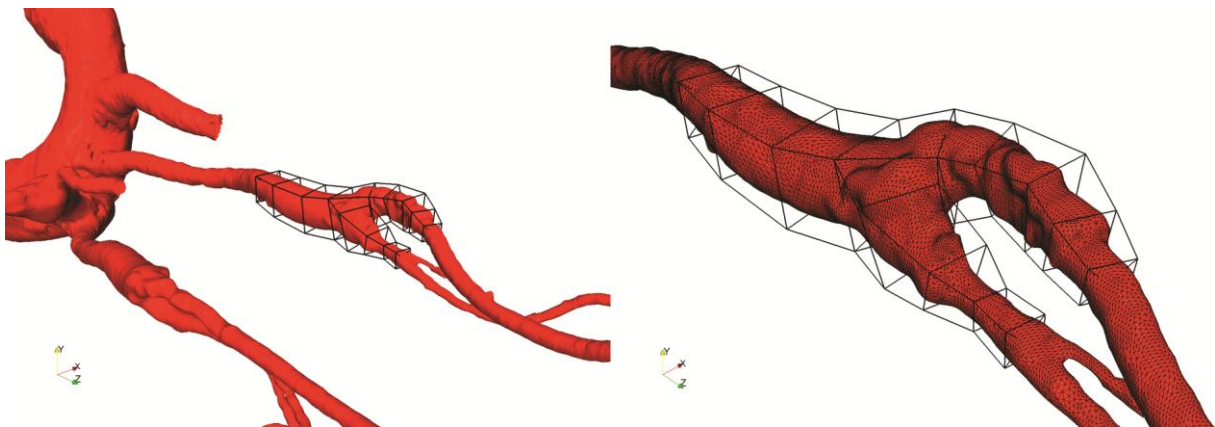


Слика 4. Блок - основни алат у мултиблок концепту при генерисању мреже коначних елемената

Мапирање из рачунског у физички домен за имплементирану топологију приказано је на слици 5а и 5б. На слици 5ц приказан је имплементиран начин означавања темена и блокова (локална нумерација) у пресецима који су дефинисани током припреме модела. Добијена топологија блокова екпортује се у *.vtk датотеку. Топологија блокова креирана за каротидну бифурацију произвољно изабраног пацијента приказана је на слици 6.



Слика 5. Мапирање из рачунског на физички домен и топологија блокова у дефинисаним пресецима



Слика 6. Топологија блокова артеријске бифурације произвољно изабраног пацијента

Генерисање мреже коначних елемената

Након тога по блоковима се генеришу коначни елементи. На нивоу блока мрежа је структурна, при чему постоји континуитет структурних мрежа на границама блокова. Процес се састоји од следећих корака (слика 3): (а) петља по блоковима, (б) спајање чворова и ренумерација и (ц) записивање резултата. Унутар петље по блоковима

извршавају се следећи кораци: (а) иницијализација основних параметара, (б) генерисање подеоних тачака у правцу ивице блока 1-2 (слика 7а), (ц) генерисање подеоних тачака у правцу ивице блока 1-4 (слика 7б), (д) пројекција подеоних тачака на волуметријски модел (слика 7д), (е) генерисање подеоних тачака у правцу ивице блока 1-5 (слика 7ц) и (ф) генерисање коначних елемената (слике 7е и 7ф).

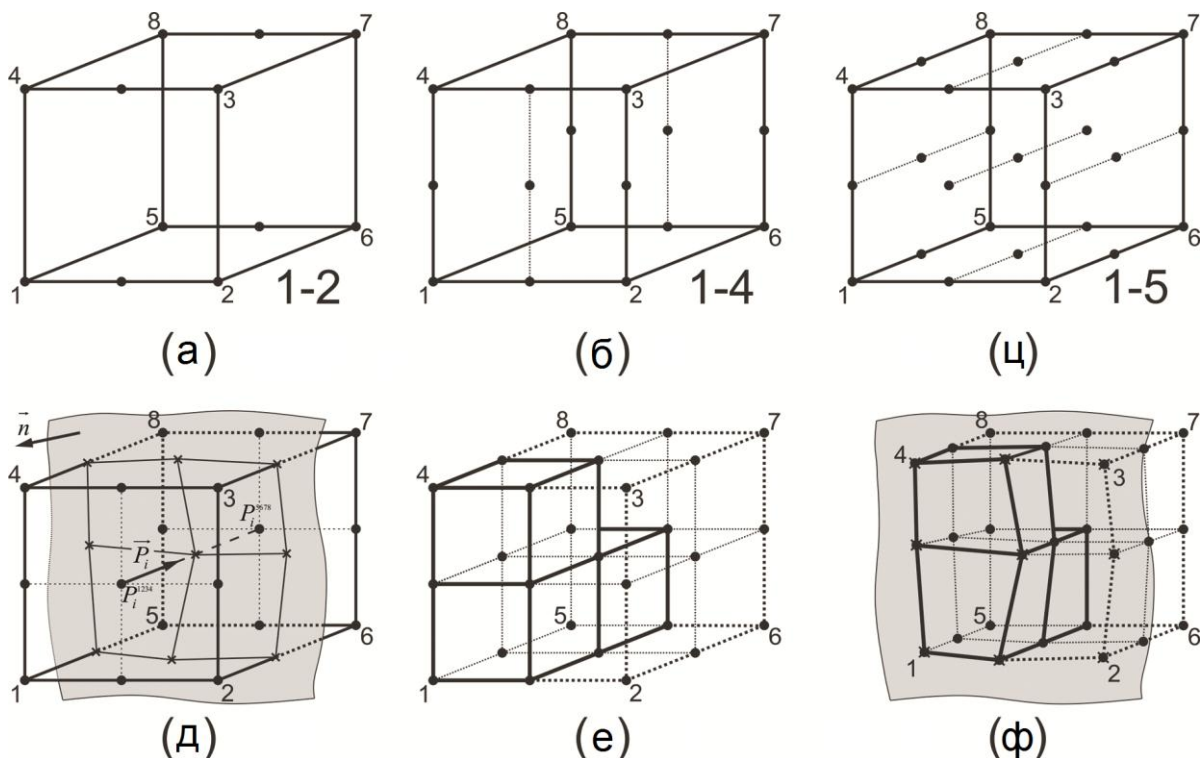
Могуће је креирати два типа елемената: 2Д четвороугаони коначни елементи и 3Д осмочворни коначни елементи. У петљи по блоковима, током иницијализације основних параметара, блокови се оријентишу тако да нема пресецања између површина 1-2-3-4 и волуметријског модела артерије. За сваки блок, рачунају се параметри IP12, IP14 и IP15 који представљају број елемената у правцима 1-2, 1-4 и 1-5 респективно. Расподела тачака унутар сваког блока се генерише на основу 3 једначине, по једна за сваку локалну осу блока:

$$\xi_i = \frac{(N-j) \cdot x_1 + j \cdot x_2}{N},$$

$$\eta_i = \frac{(N-j) \cdot y_1 + j \cdot y_2}{N}, \quad j = 0, \dots, N; \quad i = 1, \dots, M$$

$$\zeta_i = \frac{(N-j) \cdot z_1 + j \cdot z_2}{N},$$

при чему је N укупан број елемената у посматраном правцу у односу на тренутни блок. Параметар M има вредност 4 за генерисање подела у локалном правцу 1-2; M има вредност IP12 за генерисање подела у локалном правцу 1-4 и M има вредност IP12*IP14 за генерисање поделе у локалном правцу 1-5.



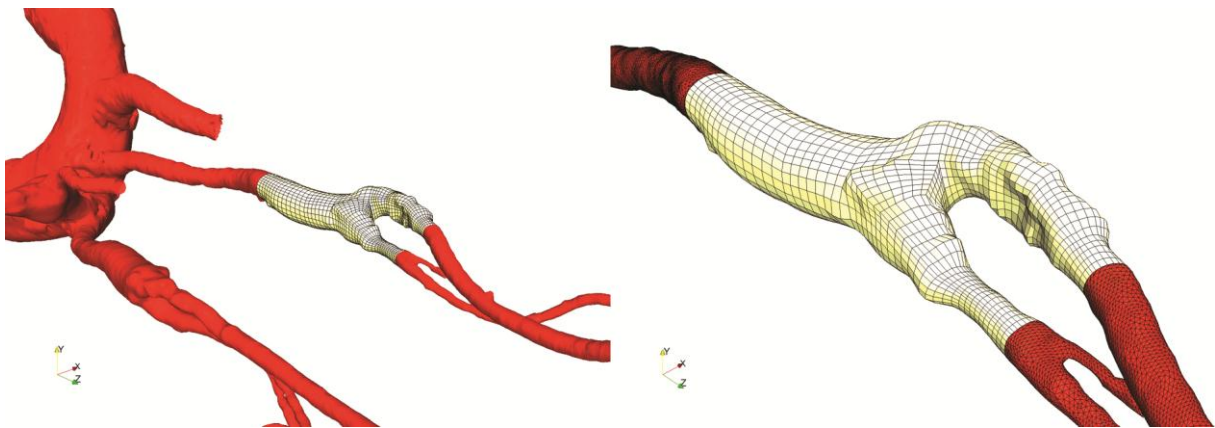
Слика 7. Принцип генерисања чворова и елемената

Трансформација подеоних тачака на површину 1-2-3-4

Подеоне тачке на површини 1-2-3-4 у свим блоковима осим централног (блок 1 на слици 5) се пројектују на полигону површину волуметријског модела (слика 5ц). За време

иницијализације основних параметара, блок је увек оријентисан тако да се трансформација подеоних тачака одвија на површини 1-2-3-4. Принцип трансформације је приказан на слици 7д. За сваку подеону тачку, одређена је пројекција у правцу вектора правца (\vec{P}_i) на геометријски модел зида артерије. \vec{P}_i је одређен као норма вектора формираног на основу координата одговарајућих подеоних тачака на површинама 1-2-3-4 и 5-6-7-8. Вектор правца је увек усмерен ка унутрашњости домена. Пројектовање подеоне тачке на полигони волуметријски модел своди се на одређивање тачке пресека вектора правца (\vec{P}_i) и одговарајућег троугла у волуметријском моделу.

Чворови унутар блока се генеришу када су корекције свих подеоних тачака на површини 1-2-3-4 завршене (слика 7е и 7ф). Процедура се понавља за све блокове у посматраном домену крвног суда. Генерисани модел коначних елемената врло прецизно дефинише реалну геометрију артеријске бифуркације произвољно изабраног пацијента (слика 8).



Слика 8. Генерисани модел коначних елемената реално описује волуметријски модел

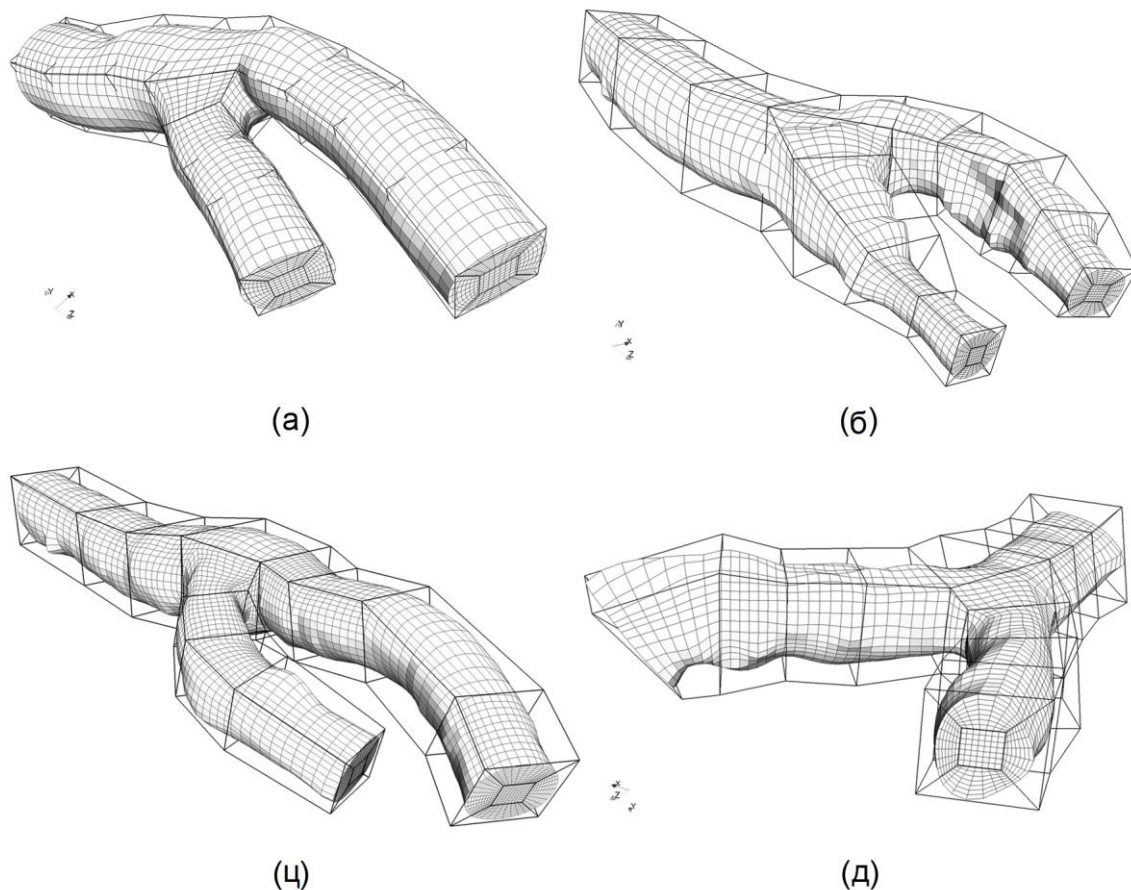
Повезивање појединачних блокова и ренумерација чворова и елемената

Након генерисања мреже унутар сваког блока, његови чворови су нумерисани независно. На додирним површинама два суседна блока постоје чворови који имају исте координате у простору, а припадају суседним елементима. Да би нумерација била јединствена потребно је да се уради спајање чворова и ренумерација чворова и елемената. Спајање чворова се остварује поређењем вредности координата чворова и додељивањем истог броја чворовима са идентичним координатама. Нумерисање чворова и елемената мора бити урађено према одређеној стратегији. Ангажована меморија и време прорачуна се значајно смањују правилним нумерисањем чворова. Приоритети ренумерације у правцу координантних оса дефинишу се у конфигурационој датотеци.

Примери генерисаних мрежа

Координате чворова, топологија елемената, материјал и особине елемената генерисане мреже коначних са почетним и граничним условима записују се у улазну датотеку за прорачун у софтверу PAK-F (*.dat) [25]. Добијени модел без граничних услова може да се изведе у датотеке са екстензијом *.vtk [26] и *.neu [27], преко којих је могуће модел генерисати у другим софтверима заснованим на мултиблок методи или у софтверу Fетар припремити га за прорачун другим солверима.

Примена софтвера STL2FEM приказана је на неколико примера из области кардиваскуларне биомеханике за произвољно изабране пацијенте (слика 9) [14, 15]. Мреже коначних елемената за каротидне бифуркације су приказане на сликама 9а, 9б и 9ц, док је на слици 9д приказана бифуркација коронарне артерије.



Слика 9. Мреже коначних елемената генерисане у софтверу STL2FEM

Практичне потешкоће, посебно дуго време развоја модела, ограничава применљивост рачунске динамике флуида у нумеричком моделирњу струјања крви за већи број пацијената. Главне предности овог софтвера су: (а) значајно скраћење времена потребног за генерисање модела и (б) модел верно описује артеријске бифуркације посматраних пацијената. Захваљујући томе, развијени софтвер омогућава брзе анализе струјања крви кроз реалне крвне судове пацијената.

Литература

- [1] Zhang Y, Bajaj C, "Adaptive and Quality Quadrilateral/Hexahedral Meshing from Volumetric Data", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 195, pp. 942-960, 2006.
- [2] Ruiz-Gironés E, "Structured and Semi-Structured Algorithms for Hexahedral Mesh Generation", Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, PhD Thesis 2009.
- [3] De Santis G et al., "Full-hexahedral structured meshing for image-based computational vascular modeling," *Medical Engineering & Physics*, vol. 33, no. 10, pp. 1318-1325, 2011.
- [4] Long Q, Xu XY, Collins MW, Bourne M, Griffith TM, "Magnetic resonance image processing and structured grid generation of a human abdominal bifurcation", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 56, pp. 249-259, 1998.
- [5] Löhner R, "Automatic unstructured grid generators", *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 25, pp. 111-134, 1997.
- [6] Thompson JF, Warsi ZUA, Mastin CW, *Numerical grid generation: Foundations and applications*. New York: North-Holland/Elsevier, 1985.
- [7] George PL, *Automatic mesh generation: application to finite element methods.*: Wiley, 1991.
- [8] Park S, Lee K, "Automatic multiblock decomposition using hypercube++ for grid generation", *Computers & Fluids*, vol. 27, no. 4, pp. 509-528, 1998.

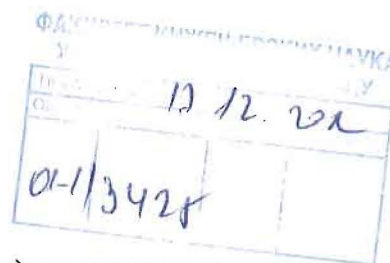
- [9] Guoy D, Erickson J, "Automatic Blocking Scheme for Structured Meshing in 2D Multiphase Flow Simulation", in *13th International Meshing Roundtable - Proceedings*, Williamsburg, VA, 2004, pp. 121-132.
- [10] Shirsat A, Gupta S, Shevare GR, "Generation of multi-block topology for discretisation of three-dimensional domains", *Computers & Graphics*, vol. 23, pp. 45-57, 1999.
- [11] Truegrid, <http://www.truegrid.com/INDEX.HTML>
- [12] ANSYS ICEM CFD, <http://www.ansys.com/Products/Other+Products/ANSYS+ICEM+CFD>
- [13] Филиповић Н, Којић М, Оташевић Л, Стојановић Б, Ранковић В, Ивановић М, "Софтвер за 3Д реконструкцију и струјање крви у артеријама - MedCFD", Техничко решење, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [14] Живковић М, Благојевић М, Станковић Г, Николић А, Живковић М, STL2FEM - Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, 2012.
- [15] Благојевић М, Николић А, Живковић М, Станковић Г, Живковић М, STL2FEM – Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова, Упутство за коришћење са примерима, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, 2012, <http://fempak.fink.rs/software/STL2FEM>.
- [16] Swain MV, Xue J, "State of the Art of Micro-CT Applications in Dental Research", *Int J Oral Sci*, vol. 1, no. 4, pp. 177-188, 2009.
- [17] MeshLab, <http://meshlab.sourceforge.net/>
- [18] Nikolić A, Blagojević M, Živković M, Aleksić A, Petrović R, "Influence of Mesh Quality on Fluid Flow Calculated with software Pak-F Explicit", 6th International Quality Conference, Center for Quality, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Kragujevac, 2012, June 8th 2012,, pp. 561-568.
- [19] Blagojević M, Nikolić A, Živković M, Živković M, Stanković G, "Influence of blocks' topologies on endothelial shear stress observed in CFD analysis of artery bifurcation", *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 15, No 1, ISSN 1509-409X, 2013.
- [20] Blagojević M, Nikolić A, Živković M, Živković M, Stanković G, "Remote Visualization of Finite Element Calculation Results in Vascular Interventions Decision Making", International Conference on Applied Internet and Information Technologies ICAIIT 2012, Zrenjanin, 2012, October 26, 2012, ISBN 978-86-7672-173-3.
- [21] Nikolić A, Blagojević M, Živković M, Aleksić A, Savić S, "Software technologies for the analysis of blood flow in the human body", *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEEM)*, Vol.3, No.2, pp. 99-104, ISSN 2217-2661, UDK 616.1:004, 2012.
- [22] Nikolić A, Blagojević M, Živković M, Živković M, Stanković G, "PAK-FS – Multiphysics Software Modul for Fluid-Structure Interaction Simulations", 12th International Conference Research and Development in Mechanical Industry, RaDMI 2012, Vrnjacka Banja, Serbia, 2012, 13- 17. September, pp. 804-809, ISBN 978-86-6075-037-4.
- [23] Blagojević M, Nikolić A, Živković M, "Prikaz polja strujanja izračunatog MKE programom PAK-F u programu za post-procesiranje Paraview", YU INFO 2012, konferencija o računarskim naukama i informacionim tehnologijama, Kopaonik, 2012, 29.2. - 3.3.2012., pp. 76.
- [24] Blagojević M, Nikolić A, Živković M, Živković M, Stanković G, "A Novel Framework for Fluid/Structure Interaction in Rapid Subject-specific Simulations of Blood Flow in Coronary Artery Bifurcations", *Vojnosanitetski pregled*, In press, ISSN 0042-8450, 2013.
- [25] Којић М, Филиповић Н, Живковић М, Славковић Р, Грујовић Н, "Софтвер за ламинарно струјање флуида и пренос топлоте – ПАК-Ф", Техничко решење, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [26] ParaView, <http://www.vtk.org/>
- [27] FEMAP, http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/velocity/femap/

Одлуком Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу бр. 01-1/3123-40 од 28.11.2012. године именовани смо за рецензенте техничког решења:

„Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - STL2FEM“

аутора: др Мирослава Живковића, ред. проф., Милана Благојевића, истраживач-сарадника, др Горана Станковића, доцента, Александра Николића, истраживач-сарадника, Милорада Живковића, истраживач-сарадника. На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ



Техничко решење „Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - STL2FEM“ аутора: др Мирослава Живковића, ред. проф., Милана Благојевића, истраживач-сарадника, др Горана Станковића, доцента, Александра Николића, истраживач-сарадника, Милорада Живковића, истраживач-сарадника, реализовано у току 2011. и 2012. године, приказано је на 10 страница формата А4, писаних фонтом 11, проредом 1 и садржи 9 слика. Састоји се од следећих поглавља:

1. Опис проблема који се решава техничким решењем
2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења
3. Суштина техничког решења
4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације)
5. Литература

Техничко решење припада области научно-технолошких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера (класа 42).

Наручилац техничког решења је **Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије**. Техничко решење је реализовано у оквиру рада на пројектима:

- *TR32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема,*
- *OИ175082 - Неинвазивна и инвазивна дијагностика и перкутано лечење сужења на рачвама крвних судова,*

које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, у периоду од 2011 до 2014.

Примена предложеног техничког решења реализована је у **Клиничком центру Србије**, Београд.

МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења „Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - STL2FEM“ су приказали стање решености проблема у свету и у нашој земљи, и детаљно описали развијени софтвер. Техничко решење поседује стручну компоненту, представља заокружени резултат и има оригинални научно-истраживачки допринос. Резултати техничког решења објављени су у међународним часописима и излагани на међународним научним скуповима.

Софтвер STL2FEM омогућава знатно брже генерисање мреже коначних елемената на геометријским моделима артеријских бифуркација (добијених на основу MSCT или магнетне резонанце) у односу на постојеће методе. На основу волуметријских модела, софтвер генерише квалитетни модел 3Д осмочворних коначних елемената. Излази из софтвера су:

- 1. Топологија блокова за генерисање мреже коначних елемената софтверима заснованим на мултиблок методи,*
- 2. Мрежа коначних елемената записана у формату који се може користити у другим софтверима,*
- 3. Улазна датотека за прорачун струјања крви софтвером PAK-F.*

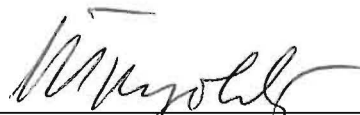
На основу описа техничког решења могу се донети следећи закључци:

- 1. Аутори техничког решења су дали оригиналан алгоритам за решавање проблема,*
- 2. Развијени софтвер STL2FEM веома добро описује сложене геометрије реалних артеријских бифуркација пацијената,*

3. Развијени софтвер *STL2FEM* изузетно убрзава процес генерисања модела коначних елемената за произвољно изабраног пацијента уз минимизирање грешке у нумеричком решењу,
4. Развијени софтвер *STL2FEM* представља користан алат за решавање описаног проблема и може се примењивати за брзо генерисање модела коначних елемената у области биомеханике,
5. Упутство за коришћење софтвера *STL2FEM* је урађено по узору на упутства познатих произвођача комерцијалних софтвера, а која подразумевају: теоријске поставке, упутства за коришћење софтвера, као и упутства са урађеним примерима.

Техничко решење „Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - *STL2FEM*“ има значајно место у области брзог генерисања модела коначних елемената реалних артеријских бифуркација. Са задовољством предлажемо да се „Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - *STL2FEM*“ прихвати као техничко решење – нови софтвер - *M85* према класификацији из Правилника о поступку и начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. гласник РС“, бр. 32/2008).

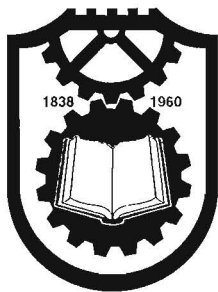
14.12.2012., у Крагујевцу



Др Ненад Грујовић, ред. проф.



Др Ненад Филиповић, ред. проф.



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет инжењерских наука
Број: ТР-71/2012
20. 12. 2012. године
Крагујевац

Наставно-научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу на својој седници од 20. 12. 2012. године на основу члана 205. Статута Факултета инжењерских наука, донело је

О Д Л У К У

Усвајају се позитивне рецензије техничког решења „Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - STL2FEM“, аутора др Мирослава Живковића, редовног професора, Милана Благојевића, истраживача сарадника, др Горана Станковића, доцента, Александра Николића, истраживача сарадника и Милорада Живковића, истраживача сарадника.

Решење припада класи М85, према класификацији из Правилника о поступку, начину вредновању, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. Гласник РС“ - бр. 38/2008).

Рецезенти су:

1. **Др Ненад Грујовић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Уже научне области: Примењена механика, Примењена информатика и рачунарско инжењерство
2. **Др Ненад Филиповић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Уже научне области: Примењена механика, Примењена информатика и рачунарско инжењерство

Достављено:

- Ауторима
- Архиви

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА



Др Мирослав Бабић, редовни професор

M.C.



**КЛИНИЧКИ ЦЕНТАР
СРБИЈЕ**
**11000 БЕОГРАД, ПАСТЕРОВА 2,
СРБИЈА**
КЛИНИКА ЗА КАРДИОЛОГИЈУ
Вишеградска 26, 11000 Београд
Тел: 011/361 36 53 , Факс: 011/362 90 56

ПРЕДМЕТ: Техничко решење – Софтвер:
Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова -
STL2FEM

Овим се потврђују следеће чињенице у вези предметног техничког решења:

Врста техничког решења:

Софтвер (M85)

Назив техничког решења:

Софтвер за брзо генерисање модела коначних елемената крвних судова - STL2FEM

Аутори техничког решења:

Др Мирослав Живковић, ред. проф.
Милан Благојевић, истраживач-сарадник
Др Горан Станковић, доцент
Александар Николић, истраживач-сарадник
Милорад Живковић, истраживач-сарадник

Корисник техничког решења:

Клинички центар Србије, Београд

Година израде:

2011. – 2012. година

Активности при чијој реализацији се техничко решење примењује:

Брзо генерисање модела и прорачун струјања методом коначних елемената за
коронарне и каротидне артерије пацијената Клиничког центра Србије

Напомена:

Софтвер STL2FEM је оригинални софтвер направљен за потребе брзог генерисања модела коначних елемената при прорачунима струјања крви, чије су главне предности: (а) значајно скраћење времена потребног за генерисање модела и (б) добијени модели верно описују артеријске бифуркације посматраних пацијената. Развијен је на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у сарадњи са Медицинским факултетом Универзитета у Београду у оквиру рада на пројектима ТР32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема и ОИ175082 - Неинвазивна и инвазивна дијагностика и перкутано лечење сужења на рачвама крвних судова које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја.

Доц. др Вукчевић Владан
Пројекат Министарства просвете, науке и
технолошког развоја ОИ175082
Клиника за кардиологију
Клинички центар Србије

