

Oldalfal aneurizmák kialakulásának CFD vizsgálata a középvonalon értelmezett Frenet-metszetek felhasználásával

Investigation of side-wall aneurysm initiation by utilizing the Frenet-frames along the vessel centerline

FRIEDRICH Péter¹, Dr. PAÁL György²

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék
H-1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3. Tel.: +361-463-1680. Fax: +361-463-3091.
E-mail: ¹friedrich.peti@gmail.com, ²gypaal@hds.bme.hu; Web: http://hds.bme.hu

Abstract

Intracranial sidewall aneurysms are cardiovascular diseases which develop on brain arteries and carry serious health risks. Their rupture can cause a brain haemorrhage or even a stroke. These diseases cause large economical stress for society, even if the patient survives. Therefore, it is important to better understand the formation and evolution of aneurysms to widen our knowledge of such diseases. Unfortunately, we do not entirely understand the causes. In our work we examined the features of the blood flow using patient-specific CFD simulations on pre-aneurysmal geometries with the help of digital reconstruction. We studied the velocity field, especially the secondary flow components. To achieve this, we used a program developed by our team, which calculates the secondary velocity components in a local coordinate system from the global one using the so-called Frenet-frames along the vessel centreline. We examined several geometries and tried to find similar patterns among them.

Keywords: Aneurysm formation, digital reconstruction, secondary flows, numeric simulation, hemodynamics

Kivonat

Az oldalfal aneurizmák agyi artériákon kialakuló, komoly egészségügyi kockázatot jelentő kardiovaszkuláris betegségek. Kiszakadásuk esetén agyvérzést és akár stroke-ot is okozhatnak. Mivel ezen betegségek túlélés után is nagy gazdasági terhet jelentenek a társadalomnak, ezért fontos megismerni a kialakulási folyamataikat, hogy megelőzhessük a káros kimenetelt. Ugyanakkor a keletkezésük okát nem ismerjük pontosan, hiszen sokáig tünetmentesen tudnak fejlődni. A munkánk során CFD szimulációkkal vizsgáltuk a vér áramlását való digitálisan rekonstruált betegspecifikus eseteken. Figyelmünket a kialakult sebességtérre fordítottuk, azon belül is a másodlagos áramlásokra, és azok komponenseire. Ehhez egy, a csoportunk által fejlesztett programot használtunk, amely a középvonalon értelmezett kísérő triéder segítségével bontja fel a globális sebességtérrel lokális koordináta rendszerekbe. Több geometriát vizsgálva próbáltunk hasonlóságokat keresni az áramlás jellegében.

Kulcsszavak: Aneurizma kialakulás, digitális rekonstrukció, másodlagos áramlások, numerikus szimuláció, hemodinamika

1. BEVEZETÉS

Az aneurizmák a kardiovaszkuláris betegségek csoportjába tartoznak. Az aneurizmák az érfal kóros elváltozásai, melyek komoly egészségügyi kockázatot jelentenek a páciensre nézve. Két fő fajtája létezik, vannak az orsó alakú tágulásként jelentkező aneurizmák, amelyek főként a hasi aortán fordulnak elő. A másik csoportba az artérián zsákszerűen jelentkező aneurizmák tartoznak, amelyek jellemzően az agyi artériákon alakulnak ki. Dolgozatunkban utóbbiak közül is az úgynevezett oldalfal aneurizmák kialakulását vizsgáltuk. Ehhez a geometriák objektív digitális rekonstrukción estek át [1][2], így a páciens-specifikus geometriák az aneurizma-kialakulás előtti állapotba kerültek. Az így kapott geometriákon tranziens numerikus áramlástani szimulációt futtatunk. Ennek eredményét felhasználva végeztük el a kiértékelést.

2. MÓDSZER

Az áramlás szimulálásához ANSYS CFX-et használtunk, amely a véges térfogatok módszerén alapuló numerikus megoldó. Tranziens szimulációval három virtuális szív ciklust modelleztünk le, amiből az utolsó eredményeit használtuk fel. Az eredmények kiértékeléséhez az utolsó szív ciklust időátlagolás után értékeltük ki. A bemeneten időfüggő sebesség peremfeltételt, a kimeneteken a térfogatáramot írtunk elő a területük arányában irodalmi adatok alapján [3][4]. A vizsgált artériákban kialakuló áramlást lokális ortogonális koordináta-rendszerekben az úgynevezett Frenet-metszetekben vizsgáltuk [5]. A geometriák középvonala mentén egyenlő távolságra szeleteket hoztunk létre. Ezekben bontottuk föl az áramlást elsődleges (középvonallal párhuzamos) és másodlagos (középvonalra merőleges) komponensekre. Ezután, a másodlagos áramlást tovább bontottuk radiális és cirkumferenciális komponensekre. A komponensek vektoregyenletekkel az alábbi módon számíthatóak.

$$\underline{v}_{ax} = (\underline{v} \cdot \underline{Fr}_t) \cdot \underline{Fr}_t$$

Ahol \underline{Fr}_t a Frenet tangens

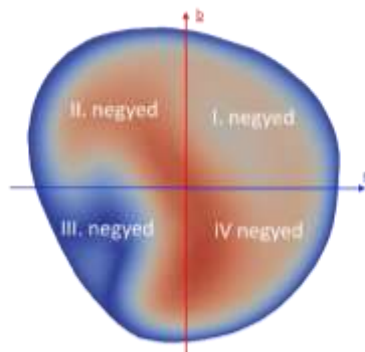
$$\underline{v}_{sec} = \underline{v} - \underline{v}_{ax}$$

Bevezetve \underline{n} vektort, ami az origóból mindig a vizsgált pontba mutat, számíthatóak a másodlagos komponensek:

$$\underline{v}_{rad} = (\underline{v} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{n}$$

$$\underline{v}_{circ} = \underline{v}_{sec} - \underline{v}_{rad}$$

Az így kapott eredmények a szeleten helyezkednek el. Az 1. ábrára tekintve láthatjuk, hogy a kiértékelés érdekében a keresztmetszetet négy síknegyedre bontottuk a Frenet-metszetek koordinátarendszere alapján. Mivel a Frenet-rendszer irányítottsága egyértelmű, így a negyedekre bontással a kanyarulatokban elkülöníthető a külső és belső ív.

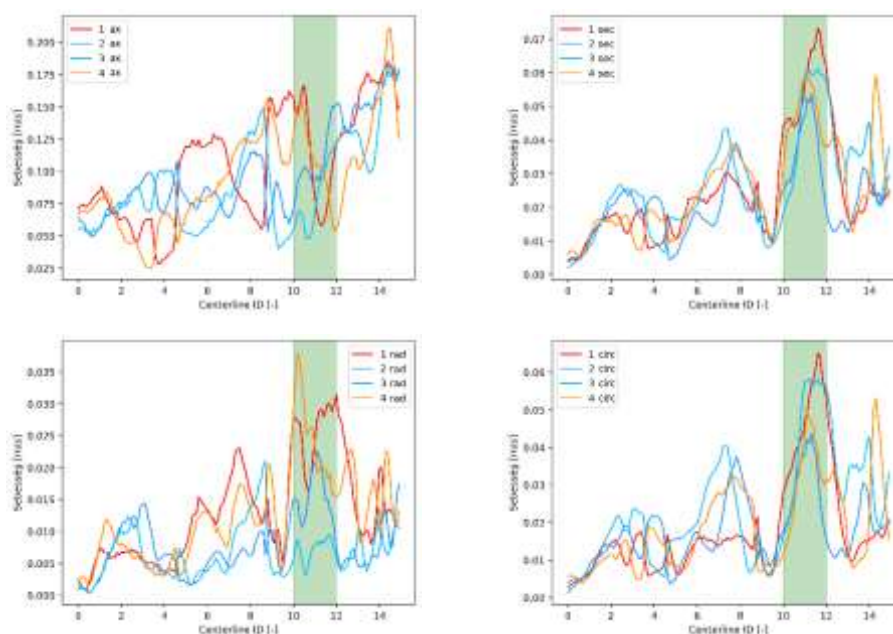


1. ábra Egy adott keresztmetszet síknegyedekre bontása

Így a felbontás alapján az I. és IV. negyed a belső íven található, míg a II. és a III. a külső íven. A geometria mentén képzett szeletek eredményeit, komponensenként negyedekre bontva és átlagolva ábráztuk grafikonok mentén (Lásd2. ábra). A grafikonokon zöld sáv jelzi a későbbi aneurizma kialakulásának helyét. A számolásokat egy Python script segítségével automatizáltuk.

3. EREDMÉNYEK

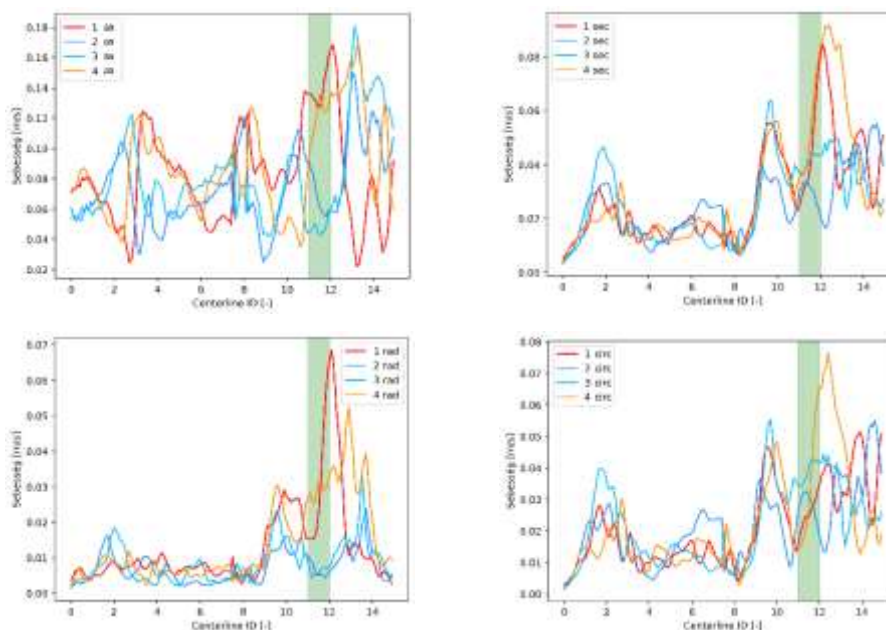
A kutatás során összesen 19 geometriát vizsgáltunk. Minden esetben négy grafikon készült. Így könnyen belátható, hogy ez jelentős adatmennyiség. Ezért hasonlóságokat kerestünk a különböző geometriák között, és azok szerint csoportosítottuk őket. Három ilyen csoportot állítottunk fel. Nem minden geometriát lehetett besorolni egy adott csoportba, és vannak, amelyeket több csoportba is be lehetett. A három csoport a következő: érkiágazás található az aneurizmánál, két aneurizma van ugyanazon a szakaszon és a másodlagos továbbá a cirkumferenciális sebességtér hasonló. Utóbbi csoportba összesen hat geometria tartozott. Ezeknél geometriai hasonlóságot nem véltünk felfedezni, viszont áramlási hasonlóságot igen.



2. ábra NAP256 eset sebességkomponenseinek grafikonjai a középvonal mentén

Ezen geometriák grafikonjait vizsgálva azt figyelhetjük meg, hogy a másodlagos és a cirkumferenciális komponensek grafikonja jellegre nagyon hasonló a későbbi aneurizma kialakulási helyénél. Ugyanakkor a másik két komponens esetén nem látunk hasonlóságot. A másodlagos és cirkumferenciális sebesség grafikonokat jobban megvizsgálva megfigyelhető az is, hogy a két komponens nagysága közel azonos. Ebből arra lehet következtetni, hogy ezekben az esetekben az aneurizmánál a másodlagos sebességtérben a cirkumferenciális komponens a meghatározó, így feltehetően az ér falát erősen súrolja az áramlás.

Az érkiágazással rendelkező geometriából összesen öt darab volt. Ezeknél az aneurizma nyakának közelében egy kis ér ágazott ki. A kis ereket a szimulációs peremfeltételeknél kimenetnek állítottuk be. Ilyen geometria volt NAP150615 is, grafikonjai a 3. ábrán láthatóak.

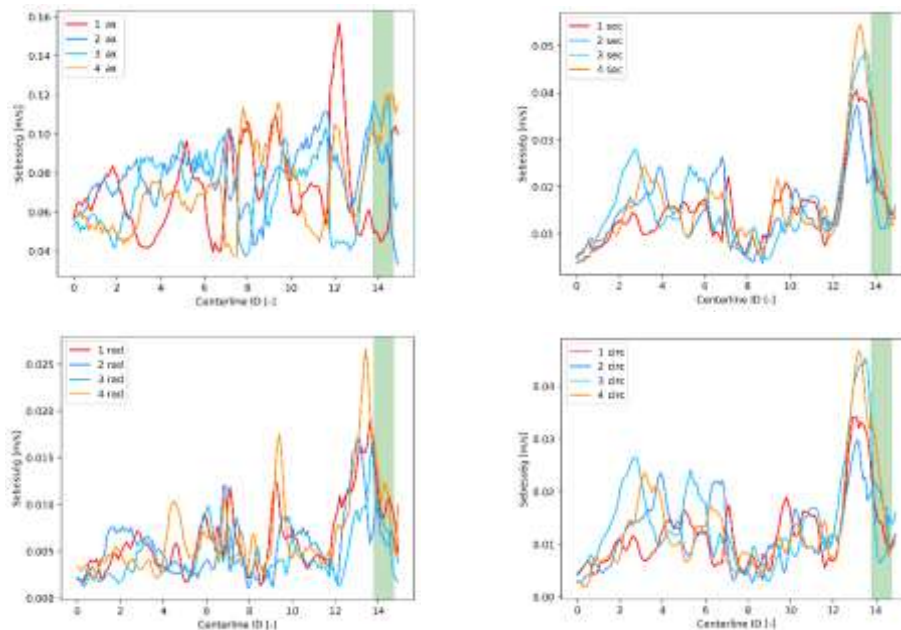


3. ábra NAP150615 eset, sebességkomponenseinek grafikonjai a középvonal mentén

Ennél a geometriánál megfigyelhető, hogy a másodlagos sebesség és komponensei is egy nagyságrendben vannak. Az aneurizma nyaka előtt megfigyelhető, hogy a másodlagos sebességnek lokális minimuma van mind a négy negyedben. Ez megjelenik a cirkumferenciális komponens grafikonján is, de a

radiálisán nem minden negyedben jelenik meg. Feltehetően az ott, radiálisan kiágazó kisérbe beáramlás okozza a cirkumferenciális komponensek csökkenését.

Az utolsó csoportba azok a geometriák tartoznak, amelyeknél két aneurizma is keletkezett ugyanazon a szakaszon, ide két geometria tartozik.



4. ábra NAP190722 eset, sebesség komponenseinek grafikonjai a közép vonal mentén

NAP190722 esetet vizsgálva megfigyelhető, hogy a főirányú sebesség kivételével az aneurizmánál és közvetlenül előtte mind a négy negyedben azonos alakúak a görbék. Ezen felül, közvetlenül az aneurizma előtt minden negyedben erős a cirkumferenciális áramlás. Ez eltér a legtöbb esettől, ahol csak kettő negyedben figyelhető ez meg. Itt feltehetően azért figyelhető meg mind a négy negyedben, mert két aneurizma alakult ki, nagyjából egymással szemben.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kapott eredmények több esetben is alátámasztják azt a hipotézist, miszerint az aneurizmák kialakulásában a másodlagos sebességek lokális erősödése szerepet játszik. A cirkumferenciális komponens növekedése több esetben is megfigyelhető volt. A probléma viszont továbbra is az, hogy nem született konzisztens eredmény mind a 19 geometria esetében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Agykutatási Program támogatta (témaszám: 2017-1.2.1-NAP-2017-00002).

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] M. D. Ford, Y. Hoi, M. Piccinelli, L. Antiga, and D. A. Steinman, "An objective approach to digital removal of saccular aneurysms: Technique and applications," *Br. J. Radiol.*, vol. 82, no. SPEC. ISSUE 1, pp. 55–61, 2009.
- [2] B. Csippa, G. Závodszy, G. Paál, and I. Szikora, "A new hypothesis on the role of vessel topology in cerebral aneurysm initiation," *Comput. Biol. Med.*, vol. 103, no. June, pp. 244–251, 2018.
- [3] C. Chnafa, O. Brina, V. M. Pereira, and D. A. Steinman, "Better Than Nothing: A Rational Approach for Minimizing the Impact of Outflow Strategy on Cerebrovascular Simulations," *Am. J. Neuroradiol.*, vol. 39, no. 2, pp. 337–343, 2018.
- [4] J. R. Cebra, M. A. Castro, C. M. Putman, and N. Alperin, "Flow-area relationship in internal carotid and vertebral arteries," *Physiol. Meas.*, vol. 29, no. 5, pp. 585–594, 2008.
- [5] M. Piccinelli, A. Veneziani, D. A. Steinman, A. Remuzzi, and L. Antiga, "A framework for geometric analysis of vascular structures: Application to cerebral aneurysms," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 28, no. 8, pp. 1141–1155, 2009.