

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

Modelowanie przepływu krwi w tętnicy podstawnej i środkowej z wykorzystaniem funkcji porowatości

Michał Tomaszewski¹, Michał Kucewicz¹, Łukasz Mazurkiewicz¹, Radosław Rzepliński²,
Jerzy Małachowski¹, Bogdan Ciszek²

¹Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna

²Zakład Anatomii Prawidłowej i Klinicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny

email: michal.tomaszewski@wat.edu.pl, michal.kucewicz@wat.edu.pl, lukasz.mazurkiewicz@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl, radoslaw.rzeplinski@wum.edu.pl, bogdan.ciszek@wum.edu.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wyniki analiz numerycznych przepływu krwi w dwóch różnych geometriach naczyń mózgowych: tętnicy podstawnej oraz tętnicy środkowej, uwzględniając obecność naczyń przesywających (perforatorów). Geometrie naczyń zostały oparte na przypadkach klinicznych uzyskanych za pomocą tomografii komputerowej, a modele opracowano w oprogramowaniu Altair Inspire oraz Geomagic Studio. Siatkę obliczeniową przygotowano w Ansys Fluent, bazując na elementach typu wielościennego (polyhedral). W pracy zastosowano warunki porowatości na wylotach perforatorów, aby uzyskać realistyczne wartości prędkości przepływu krwi, co stanowi ulepszenie w stosunku do wcześniejszych metod opartych na ciśnieniu 0.0 Pa na wylotach. Porównano wyniki dla obu analizowanych geometrii, badając wpływ warunków początkowo-brzegowych oraz odwzorowania krzywizny naczyń na rozkład naprężenia ścinającego TAWSS, gradientu naprężenia WSSG oraz rozkładu prędkości. Wyniki analiz wskazują, że zastosowanie warunku porowatości na końcach naczyń pozwala odwzorować charakterystyki prędkości zbliżone do fizjologicznych.

SŁOWA KLUCZOWE: CFD, naczynia mózgowie, drzewo naczyniowe, TAWSS, MCA

1. Wstęp

Choroby układu krążenia są główną przyczyną śmierci w Polsce oraz na świecie, przy czym około jedna trzecia zgonów wynika z chorób naczyń mózgowych [1]. Dzięki postępom interdyscyplinarnych badań łączących medycynę, fizykę i chemię, nasza wiedza na temat procesów zachodzących w organizmie ludzkim stale się poszerza. Jedną z najczęstszych patologii w obrębie układu krwionośnego jest tworzenie się tętniaków mózgu.

Z każdym rokiem opracowywane są nowe metody leczenia tętniaków. Najczęściej stosowaną techniką jest embolizacja z użyciem tzw. flow divertera – specjalnego stentu o gęstej siatce rozpórek, który umieszcza się w miejscu tętniaka. Konstrukcja ta ogranicza przepływ krwi do wnętrza worka tętniakowego, co prowadzi do jego stopniowego obumarcia. Jednakże, według niektórych badań, wprowadzenie stentu może niekorzystnie wpływać na przepływ krwi do naczyń przesywających (perforatorów), co z kolei może blokować przepływ w tych naczyniach i zwiększać ryzyko udaru niedokrwiennego.

W literaturze istnieje wiele prac poświęconych analizie przepływu przez drzewa naczyniowe, jednak rzadko kiedy uwzględnia się naczynia o średnicy mniejszej niż 0,5 mm [2, 3]. Wynika to z ograniczeń tomografii komputerowej, która nie jest w stanie precyzyjnie odwzorować takich małych naczyń. Nawet gdy te struktury są modelowane, często pomija się szczegółową analizę wpływu warunków brzegowych oraz krzywizny naczyń na wyniki przepływu.

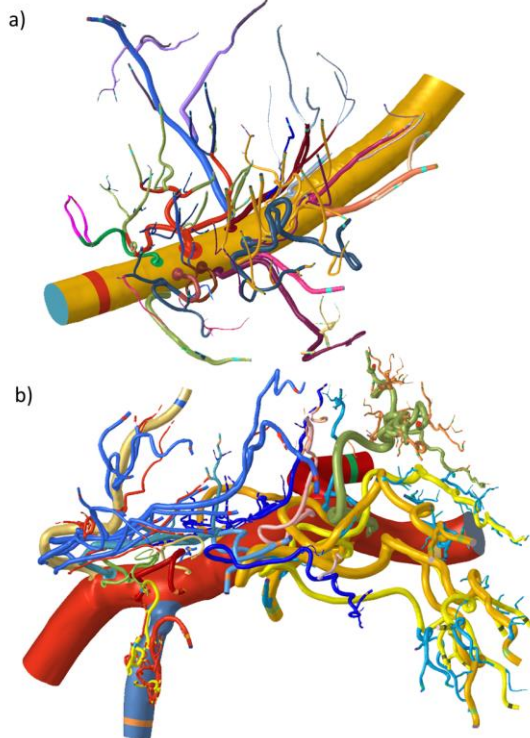
2. Opis przedmiotu badań

Przedmiotem badań była analiza przepływu płynu przez drzewo naczyniowe dla dwóch różnych geometrii: tętnicy podstawnej (BA, ang. Basilar Artery) oraz tętnicy środkowej (MCA, ang. Middle Cerebral Artery), z uwzględnieniem naczyń przesywających (perforatorów). Geometrie naczyń zostały uzyskane za pomocą tomografii przemysłowej, co pozwoliło na osiągnięcie precyzji voxela na poziomie 20 μm . Fragment mózgu zawierający analizowane naczynia został wyizolowany ze zwłok ludzkich. Mózg podzielono na mniejsze części, zamknięto końce naczyń, a do ich wnętrza wprowadzono środek kontrastujący będący mieszaniną żelatyny i siarczanu baru [4, 5]. Następnie próbkę prześwietlono w tomografie przemysłowym, co pozwoliło na uzyskanie danych w formacie DICOM.

Obrazy te zostały zaimportowane do programu Materialise Mimics, gdzie opracowano model stereolitograficzny. Model poddano dalszej obróbce w programach Geomagic Studio, Altair Inspire oraz Altair Hyper Mesh. W bieżących badaniach analizowano przepływ w dwóch wspomnianych geometriach naczyń, przy czym na wylotach naczyń przesywających zastosowano warunki porowatości, co umożliwiło uzyskanie realistycznych wyników prędkości przepływu.

3. Domena przepływu oraz warunki analizy

Domena przepływu została przygotowana na bazie dwóch geometrii (Rys.1) tj. tętnicy podstawnej oraz środkowej. Całkowita liczba objętości skończonych z których były zbudowane domeny wynosiła odpowiednio 12 oraz 16 milionów [6]. Najmniejsza średnica naczynia dochodziła do 0.2 mm. Jako warunek początkowy zostały zastosowane krzywe prędkości i ciśnienia zmienne w czasie dla naczyń głównych oraz warunek porowatości dla grup perforatorów. Wyodrębniono trzy grupy perforatorów w zależności od średnicy: I – poniżej 0.3 mm, II – pomiędzy 0.3 – 0.4 mm, III – pomiędzy 0.5 – 0.7 mm.



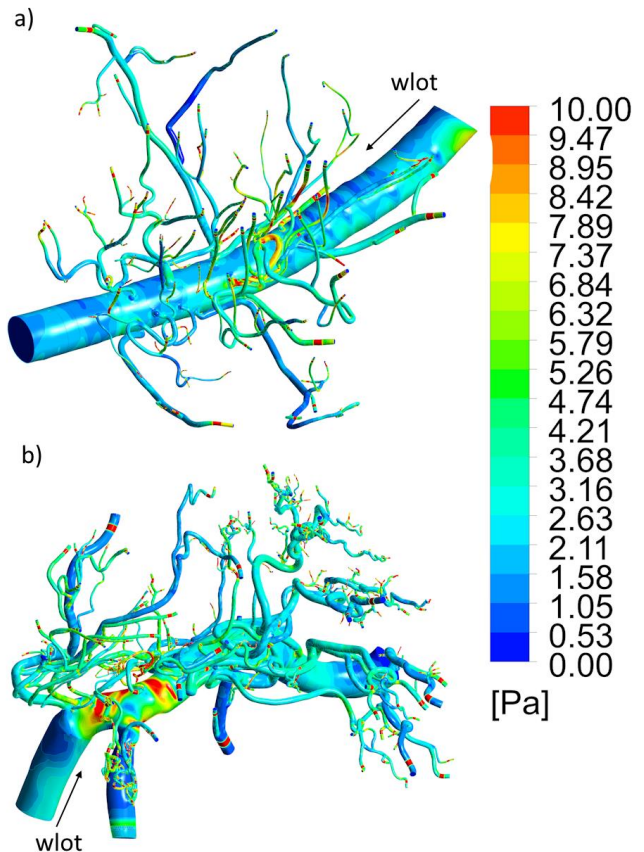
Rys. 1. Domeny analizowane w pracy: a) tętnica podstawna, b) tętnica środkowa

4. Wyniki analiz oraz podsumowanie

W wyniku przeprowadzonej analizy zmiennej w czasie, z warunkami początkowo brzegowymi opisanymi powyżej, uzyskano rozkład uśrednionego w czasie naprężenia ścinającego. Analizując te rozkłady możliwe jest określenie miejsc niebezpiecznych, w których może dojść do zwężenia naczynia.

Analizy zostały przeprowadzone dla czasu 0.8 s, co pozwoliło na szczegółową ocenę przepływu krwi i rozkładu naprężenia ścinającego w badanych obszarach. Szczególnie interesujące są wyniki dla parametrów takich jak TAWSS, WSSD, WSSG dla tętnicy podstawnej oraz tętnicy środkowej. Regiony o zmiennych wartościach tych parametrów mogą być bardziej narażone na powstawanie zmian degeneracyjnych, co z kolei może prowadzić do zwężenia naczynia, a w konsekwencji do zaburzeń przepływu krwi. Na rys. 2 zaprezentowany został rozkład uśrednionego naprężenia ścinającego TAWSS (Time-Averaged Wall Shear Stress) dla domeny bazującej na tętnicy podstawnej oraz środkowej. Wyniki te ukazują różnice w rozkładzie naprężenia w zależności od specyficznych warunków anatomicznych tych naczyń, co

jest istotne dla lepszego zrozumienia ryzyka związanego z patologiami naczyniowymi w tych obszarach.



Rys. 1. Rozkład uśrednionego w czasie naprężenia ścinającego: a) tętnica podstawna, b) tętnica środkowa

Praca została zrealizowana w ramach projektu *OPUS* finansowanego przez *NCN*: *Modelowanie hemodynamiki przepływu przez tętnice krążenia mózgowego o małej średnicy w warunkach fizjologicznych i po stentowaniu*. Kierownik prac: prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski.

Literatura

- [1] J.S. Coogan, J.D. Humphrey, C.A. Figueroa, Computational simulations of hemodynamic changes within thoracic, coronary, and cerebral arteries following early wall remodeling in response to distal aortic coarctation, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. 12 (2013) 79–93. doi:10.1007/s10237-012-0383-x.
- [2] J.R. Cebral, S. Hendrickson, C.M. Putman, Hemodynamics in a lethal basilar artery aneurysm just before its rupture, *American Journal of Neuroradiology*. 30 (2009) 95–98. doi:10.3174/ajnr.A1312.
- [3] P. Berg, S. Saalfeld, S. Voß, O. Beuing, G. Janiga, A review on the reliability of hemodynamic modeling in intracranial aneurysms: Why computational fluid dynamics alone cannot solve the equation, *Neurosurgical Focus*. 47 (2019) 1–9. doi:10.3171/2019.4.FOCUS19181.
- [4] R. Rzepliński, M. Tomaszewski, M. Sługocki, K. Karczewski, P. Krajewski, T. Skadorwa, J. Małachowski, B. Ciszek, Method of creating 3D models of small caliber cerebral arteries basing on anatomical specimens, *Journal of Biomechanics*. 125 (2021) 0–4. doi:10.1016/j.jbiomech.2021.110590.
- [5] R. Rzepliński, M. Sługocki, M. Kwiatkowska, S. Tarka, M. Tomaszewski, M. Kuciewicz, K. Karczewski, P. Krajewski, J. Małachowski, B. Ciszek, Standard clinical computed tomography fails to precisely visualise presence, course and branching points of deep cerebral perforators, *Folia Morphologica*. (2021). doi:10.5603/fm.a2021.0133.
- [6] M. Tomaszewski, M. Kuciewicz, R. Rzepliński, J. Małachowski, B. Ciszek, Numerical aspects of modelling flow through the cerebral artery system with multiple small perforators, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. (2024). doi: 10.1016/j.bbe.2024.04.002.