

Ocena wpływu nieliniowości hydrodynamicznych na rezerwę autoregulacji mózgowego przepływu krwi

Adam Piechna¹, Krzysztof Cieslicki¹

¹Institute of Automatic Control and Robotics, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland
email: adam.piechna@gmail.com, k.cieslicki@mchtr.pw.edu.pl

Abstrakt. Celem pracy było zbudowanie modelu mózgowego przepływu krwi umożliwiającego symulację redystrybucji krwi mózgowej na część przednią, środkową i tylną, jaka może wystąpić u indywidualnego pacjenta, (którego stan i kaliber naczyń mózgowych i zasilających jest określony), w sytuacji krótkookresowego zaburzenia przepływu w tętnicach zasilających. W modelowaniu wykorzystano analogię układu naczyniowego do obwodu elektrycznego uwzględniając mechanizm autoregulacji oraz nieliniowe opory tętnic. Modele wykorzystano między innymi do oceny tzw. ciśnieniowej rezerwy autoregulacji (CRA) mózgowego przepływu krwi.

WPROWADZENIE

Zapewnienie stałego przepływu mózgowego krwi jest jednym z priorytetów dla organizmu człowieka ze względu na ciągle zapotrzebowanie neuronów w tlen. Ze względu na szereg odmian fizjologicznych koła tętniczego mózgu (KTM), możliwe stenozy tętnic wywołane miażdżycą czy różne patologie układu tętniczego, jako narzędzia poznawcze lub potencjalnie mające wspomóc decyzje kliniczne, stosuje się modele mózgowego przepływu krwi o różnym poziomie skomplikowania [1-5]. Aby model trafnie odwzorowywał rzeczywistość musi uwzględniać uwarunkowania anatomiczne, hydrodynamiczne oraz czynnościowe.

Uwarunkowania anatomiczne wyznacza topografia oraz geometria tętnic zasilających mózgowie, tj.: bilateralnego układu tętnic szyjnych wewnętrznych oraz układu kręgowo-podstawnego. W topografii układu zawiera się sposób zespolenia obydwu układów zasilających anastomozami koła tętniczego mózgu (KTM). Struktura geometryczna tętnic dostarcza informacji o ich kształcie i wymiarach.

Uwarunkowania hydrodynamiczne są pochodną krętości osi tętnic, oraz licznych podziałów i zespożeń naczyń prowadzących do zaburzeń przepływu i wpływających w istotny sposób na nieliniowość oporów hydrodynamicznych.

Uwarunkowania czynnościowe wyznacza fenomen autoregulacji mózgowego przepływu krwi zapewniający utrzymanie odpowiedniej perfuzji mózgowej niezależnie od bieżącej wartości średniego ciśnienia systemowego. Makroskopowym przejawem autoregulacji jest nieliniowa i niemonotoniczna zależność globalnego oporu naczyń obwodowych od wartości średniego ciśnienia tętniczego.

Nowość przedstawionego modelu symulacyjnego w stosunku do wielu modeli krążenia mózgowego, jakie ostatnio pojawiają się w literaturze fachowej, polega na jednoczesnym uwzględnieniu w nim uwarunkowań anatomicznych, hydrodynamicznych oraz czynnościowych jednocześnie zachowując niski wymiar modelu (1D) pozwalając na błyskawiczne uzyskanie wyników dla jego różnych parametrów.

METODYKA

Zbudowano liniowy model 18 elementowego KTM opartego na analogii przepływowo-elektrycznej wykorzystując metodę potencjałów węzłowych. Następnie zaimplementowano model autoregulacji oporów terminalnych oraz nieliniowości tętnic tworzących KTM wynikające z ich uwarunkowań hydrodynamicznych. Dla ich opisu wykorzystano pół-empiryczne formuły, w których efekty nieliniowe uwzględniono w addytywnych do członu liniowego poprawkach potęgowych. Ich weryfikacja z modelem fizycznym była przeprowadzona i opisana w pracy [6]. Mechanizm autoregulacji został zamodelowany za pomocą charakterystyki ciśnienie-opór.

WYNIKI I DYSKUSJA

Przeprowadzono symulacje dla różnych najczęściej spotykanych odmian fizjologicznych KTM oraz różnych poziomów stenozы tętnic zasilających. Jako przykład na rys. 1. zestawiono wyniki modelowania KTM z dwustronnym (50%) zmniejszeniem średnicy tętnic szyjnych (ICA) oraz KTM referencyjnym (symetrycznym – morfometria z [3]) dla modeli z liniowym i nieliniowym oporem tętnic.

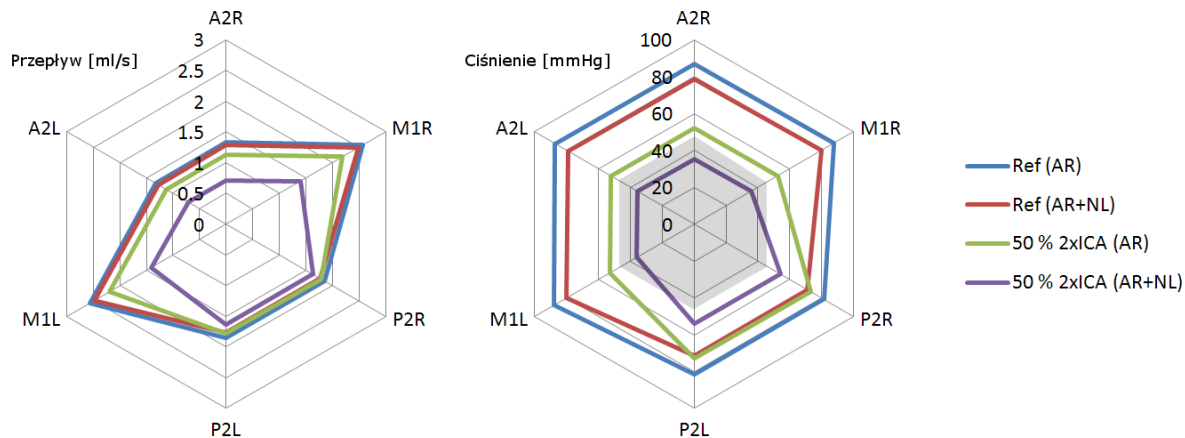


FIGURE 1. Rozkład przepływów oraz ciśnień w sześciu tętnicach rozprowadzających krew do mózgu dla modeli: AR – z autoregulacją, opory tętnic liniowe, AR+NL – z autoregulacją i nieliniowym oporem tętnic, dla dwóch wariantów: Ref – koło symetryczne wzorcowe, 50% 2xICA – koło z dwustronnym 50% zmniejszeniem średnic tętnic szyjnych wewnętrznych. A2 – tętnice przednie, M1 – tętnice środkowe, P2 – tętnice tylne, L – lewe, P – prawe.

Można zauważyć nieznaczne zmniejszenie przepływu w KTM referencyjnym dla modelu nieliniowego względem liniowego. W modelu nieliniowym występuje większy spadek ciśnienia ze względu na zwiększony opór jednak jest on skompensowany poprzez działanie mechanizmu autoregulacji. W przypadku stenozы ICA dla modelu liniowego przepływ mózgowy krwi jest utrzymany ale układ jest na granicy wyjścia z autoregulacji dla tętnic przednich i środkowych (szary obszar na rozkładzie ciśnień). Z kolei dla modelu nieliniowego następuje wyjście z zakresu dla jakiego mechanizm autoregulacji jest w stanie utrzymywać stały przepływ co skutkuje 35% zmniejszeniem całkowitego przepływu mózgowego krwi (46% dla tętnic przednich i 45% dla tętnic środkowych).

Bazując na zastosowanych modelach wykazano, że hydrodynamiczne i czynnościowo uwarunkowane nieliniowości oporów naczyń zasilających i obwodowych, istotnie zmniejszają ciśnieniową rezerwę autoregulacji. Zatem ocena tej rezerwy na podstawie modeli liniowych, jakie są często wykorzystywane, jest nieadekwatna. Uzyskane wyniki porównano z modelem 3D opartym na metodzie objętości skończonej opisanym w [4].

Wydaje się, że w warunkach coraz bardziej dostępnych i dokładnych technik obrazowania układu naczyniowego i możliwości odtworzenia morfometrii i topografii głównych tętnic zasilających mózgowie oraz dostępności ultradźwiękowych metod badania przepływu w tętnicach mózgowych podjęte badania mogą mieć znaczenie kliniczne.

Bibliografia

1. B. Hillen, et al. *Analysis of flow and vascular resistance in a model of the cricle of Willis*. Journal of Biomechanics, 21(10), 807-814 (1988).
2. F. Cassot, et al. *Hemodynamic role of the circle of Willis in stenoses of internal carotid arteries. An analytical solution of a linear model*. Journal of Biomechanics 33.4 (2000): 395-405.
3. D. Cieśla, (2004). *Nieliniowy model mózgowych przepływów krwi* (Doctoral dissertation, The Institute of Automatic Control and Robotics, 2004).
4. A. Piechna, M. Pieniak, *Numerical simulation of the effect of supplying arteries occlusion on cerebral blood flow*. In *Advanced Mechatronics Solutions* (pp. 181-186 2016). Springer, Cham.
5. A. Piechna, K. Cieslicki, *Reversed Robin Hood syndrome in the light of nonlinear model of cerebral circulation*. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 22(2) (2017), 459-464.
6. K. Cieslicki, D. Cieśla, *Investigations of flow and pressure distributions in physical model of the circle of Willis*. Journal of biomechanics, 38(11) (2005), 2302-2310.