

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15-18 października 2024

Choroby naczyniowe mózgu, czyli co biomechanik powinien wiedzieć o krążeniu mózgowym?

Radosław Rzepliński¹, Michał Tomaszewski², Michał Kucewicz², Jerzy Małachowski², Bogdan Ciszek¹

¹Zakład Anatomii Prawidłowej i Klinicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny

²Zakład Inżynierii Obliczeniowej i Biomedycznej, Wojskowa Akademia Techniczna

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

STRESZCZENIE: Choroby naczyniowe mózgu stanowią drugą najczęstszą przyczynę zgonu, a ich częstość występowania wzrasta z uwagi na starzenie się społeczeństwa. Drobne tętnice wewnątrzczaszkowe – tętnice przesywające zaopatrujące wnętrze półkul mózgu i pień mózgu – nie są dobrze widoczne w rutynowo wykonywanych badaniach obrazowych, pomimo niepodważalnej istotności klinicznej. Interdyscyplinarny zespół zdołał opracować metodologię badań drobnych tętnic wewnątrzczaszkowych w oparciu o skanowanie odpowiednio przygotowanych preparatów anatomicznych ludzkich mózgów. Technikę zwalidowano wykonując bezpośrednie porównanie z badaniami morfologicznymi oraz klasyczną tomografią komputerową. Analizy zdjęć radiologicznych pozwoliły opisać nieznanego dotychczas mechanizm inicjacji i rozprzestrzeniania się udaru krwotocznego oraz obecność lokalnych zwężeń miejsc odejścia tętnic przesywających, które mogą brać udział w procesie starzenia się mózgu.

SŁOWA KLUCZOWE: krążenie mózgowie, udar mózgu, choroba małych naczyń, hemodynamika, mikrotomografia komputerowa

1. Podstawy anatomii krążenia mózgowego

Codzienne funkcjonowanie każdego człowieka zależy od nieprzerwanego i niezakłóconego działania mózgu. Zapotrzebowanie mózgu na tlen i składniki odżywcze jest ogromne, a jednocześnie nie posiada on istotnych rezerw metabolicznych, dlatego kluczowy jest stały dopływ krwi, a z nią tlenu i glukozy. Pomimo stosunkowo niewielkiej masy, w każdej minucie przez mózg przepływa około 20% krwi pompowanej przez serce [1].

Krew do mózgu doprowadzają 4 tętnice: prawa i lewa tętnica szyjna wewnętrzna (ang. internal carotid artery) oraz prawa i lewa tętnica kręgową (ang. vertebral artery). Łączą się one na powierzchni mózgu tworząc układ naczyń – koło tętnic mózgu zwane również kołem Willisa (ang. cerebral arterial circle, circle of Willis) – z którego biorą początek dwie, zupełnie różne populacje tętnic. Pierwsza składa się z tętnic dzielących się kolejno niczym gałęzie drzewa i zaopatruje powierzchnię półkul mózgu. Drugą stanowią drobne tętniczki o średnicy poniżej 1 mm odchodzące bezpośrednio od dużych tętnic wewnątrzczaszkowych dostarczające krew do wnętrza półkul mózgu i pnia mózgu.

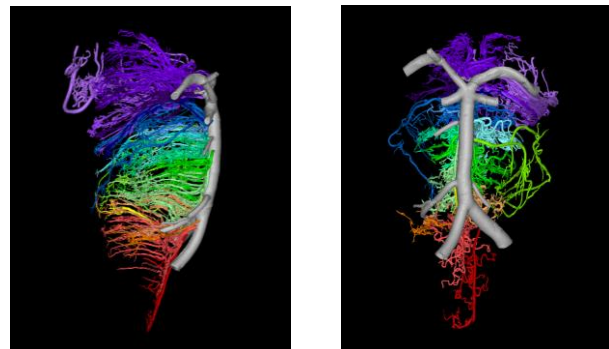
Podczas gdy badania hemodynamiczne skupiają się na dużych tętnicach tworzących koło Willisa, jedne z najczęstszych patologii naczyń układu nerwowego dotyczą właśnie tej drugiej populacji tętnic zwanych perforatorami. Przebudowa ściany i zatykanie, pęknięcie i krwawienie oraz stopniowe ograniczanie napływu krwi zwane jest chorobą małych naczyń i odpowiada za związaną z wiekiem utratę zdolności kognitywnych i motorycznych [2].

Jak do tej pory brak było wiarygodnego modelu badania tętnic przesywających, co wynika z braku odpowiedniego

modelu zwierzęcego oraz niedoskonałości klinicznych metod obrazowania. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie opracowanej metodologii badawczej i wyników analiz radiologicznych oraz nakreślenie planu dalszych badań.

2. Metodologia badania tętnic przesywających

W wyniku pracy interdyscyplinarnego zespołu opracowano metodologię opartą na pozyskiwaniu trójwymiarowych geometrii tętnic przesywających mózgu człowieka przy pomocy mikrotomografii komputerowej [3]. Odpowiednio przygotowane preparaty anatomiczne skanowano przy pomocy aparatu Nikon/Metris XT H 225 ST, a następnie wyniki analizowano w oprogramowaniu Mimics 23.0 (Ryc. 1).



Ryc. 1. Trójwymiarowy model tętnicy podstawnej o średnicy 3mm wraz z odchodzącymi licznymi tętnicami przesywającymi (widok od boku po lewej, od przodu po prawej).

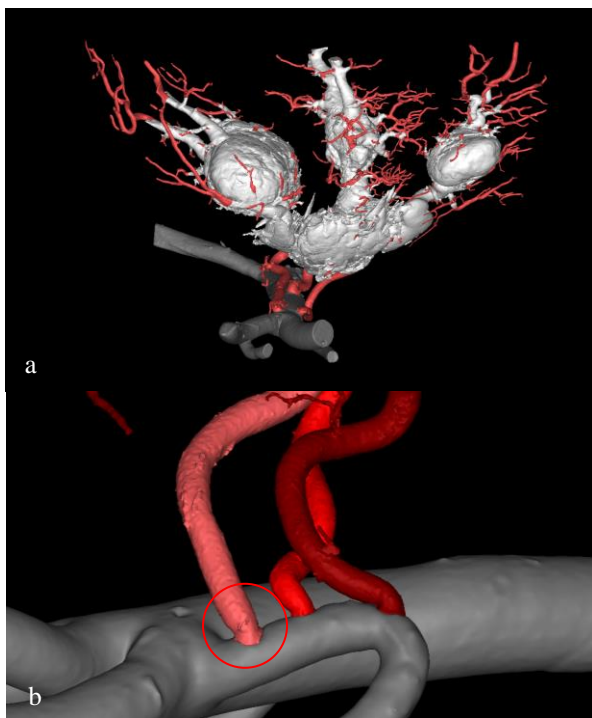
W celu walidacji wiarygodności metody porównano badania morfologiczne z obrazowaniem w klasycznej tomografii i mikrotomografii. Bezpośrednie zestawienie pokazało, że mikrotomografia wiernie odwzorowuje skomplikowaną geometrię tętnic przesywających, podczas gdy tomografia stosowana klinicznie nawet nie jest w stanie ich zobrazować [4, 5].

3. Wyniki analizy geometrii naczyń

W wyniku skanowania kolekcji preparatów anatomicznych uzyskano reprezentatywną grupę badawczą dwóch najistotniejszych klinicznie lokalizacji występowania tętnic przesywających: tętnicy środkowej mózgu i tętnicy podstawnej. Analizy doprowadziły do dwóch zasadniczych odkryć.

W toku wypełniania tętnic mieszaniną kontrastową część naczyń pękała, tak jak to się dzieje podczas udaru krwotocznego, uzyskując w ten sposób model krwawienia śródmózgowego (Ryc. 2a). Wyniki mikrotomografii pozwoliły opisać nieznanym dotychczas sposobem inicjacji i rozprzestrzeniania się krwotoku [6].

Do drugiego odkrycia doprowadziła intuicja nakazująca zająć się analizą miejsc obejścia drobnych tętnic przesywających od dużych tętnic wewnątrzczaszkowych jako lokalizacji połączenia wysokociśnieniowego układu głównych tętnic układu krążenia z niskociśnieniowym mikrokrążeniem. Wyniki radiologiczne pozwoliły zidentyfikować lokalne zwężenia w miejscach połączenia tętnic (Ryc. 2b), które mogą działać jako tłumiki redukujące ciśnienie. Przeprowadzone dodatkowe badania histologiczne pozwoliły przeanalizować strukturę zwężeń i rozpoznać przerost błony wewnętrznej ściany naczynia.



Ryc. 2. a. Model krwawienia śródmózgowego: gałęzie tętnicy środkowej mózgu otoczone wynaczynionym środkiem kontrastowym.

b. Zwężenia miejsc odejścia tętnic przesywających.

4. Podsumowanie

Interdyscyplinarne badania układu naczyń wewnątrzczaszkowych oparte na nowatorskim wykorzystaniu preparatów anatomicznych pozwalają zbadać niedostępne dotychczas aspekty chorób naczyniowych mózgu. Analizy doprowadziły do szeregu wniosków:

- 1) Badanie struktury geometrycznej tętnic przesywających jest możliwe w oparciu o skanowanie preparatów anatomicznych przy pomocy mikrotomografii komputerowej.
- 2) Wyniki analiz radiologicznych są wierne rzeczywistej morfologii naczyń.
- 3) Krwawienie śródmózgowe zaczyna się od pęknięcia perforatora, następnie krew przemieszcza się wzdłuż naczyń w przestrzeniach okołonaczyniowych i odrywa tętniczkę od tkanki prowadząc do nieodwracalnych uszkodzeń.
- 4) Miejsca odejścia tętnic przesywających są lokalnie zwężone przez przerost błony wewnętrznej.

Przedstawione wyniki wyraźnie wskazują na potrzebę analizy lokalnych warunków hemodynamicznych jako potencjalną przyczyną wystąpienia obserwowanych zmian.

Praca została wykonana w ramach projektu „Modelowanie hemodynamiki przepływu przez tętnice krążenia mózgowego o małej średnicy w warunkach fizjologicznych i po stentowaniu”, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (nr umowy UMO-2020/37/B/ST8/03430).

Literatura

1. Claassen J, Thijssen DHJ, Panerai RB, Faraci FM. Regulation of cerebral blood flow in humans: physiology and clinical implications of autoregulation. *Physiol Rev.* 2021;101(4):1487-559. DOI: 10.1152/physrev.00022.2020.
2. Cannistraro RJ, Badi M, Eidelman BH, Dickson DW, Middlebrooks EH, Meschia JF. CNS small vessel disease: A clinical review. *Neurology.* 2019;92(24):1146-56. DOI: 10.1212/WNL.0000000000007654.
3. Rzeplinski R, Tomaszewski M, Slugocki M, Karczewski K, Krajewski P, Skadorwa T, et al. Method of creating 3D models of small caliber cerebral arteries basing on anatomical specimens. *J Biomech.* 2021;125:110590. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110590.
4. Rzeplinski R, Slugocki M, Kwiatkowska M, Tarka S, Tomaszewski M, Kucwicz M, et al. Standard clinical computed tomography fails to precisely visualise presence, course and branching points of deep cerebral perforators. *Folia Morphol (Warsz).* 2023;82(1):37-41. DOI: 10.5603/FM.a2021.0133.
5. Rzeplinski R, Slugocki M, Tomaszewski M, Kucwicz M, Krajewski P, Malachowski J, et al. Basilar tip fenestration giving rise to Percheron's and mesencephalic arteries. *Folia Morphol (Warsz).* 2023;83(2):451-4. DOI: 10.5603/FM.a2023.0054.
6. Rzeplinski R, Slugocki M, Tarka S, Tomaszewski M, Kucwicz M, Karczewski K, et al. Mechanism of Spontaneous Intracerebral Hemorrhage Formation: An Anatomical Specimens-Based Study. *Stroke.* 2022;53(11):3474-80. DOI: 10.1161/STROKEAHA.122.040143.