

**Edyta KAWLEWSKA¹, Nikola HEHNEL², Wojciech WOLAŃSKI¹,
Karolina ĆMIEL-SMORZYK³, Wojciech KASPERA³**

¹Katedra Biomechatroniki, Politechnika Śląska, Zabrze

²SKN „Biokreatywni”, Politechnika Śląska, Zabrze

³Katedra i Kliniczny Oddział Neurochirurgii, Śląski Uniwersytet Medyczny, Wojewódzki Szpital Specjalistyczny im. św. Barbary, Sosnowiec

OCENA MORFOMETRYCZNA PODZIAŁU ŚRODKOWYCH TĘTNIC MÓZGOWYCH PRAWIDŁOWYCH I Z TĘTNIAKIEM

Streszczenie: W artykule przeprowadzono analizę morfologiczną tętnic środkowych mózgu w miejscu podziału na tętnicę skroniową i czołową. Trójwymiarowe modele tętnic pacjentów zostały wygenerowane w środowisku Mimics na podstawie zdjęć angioTK. Analizowano tętnice 24 pacjentów z tętniakiem oraz 24 pacjentów zdrowych, u których badanie angioTK wykonano w ramach rutynowej diagnozy innych schorzeń. Uzyskaną bazę danych podsumowano metodami statystyki opisowej, porównywano m.in. średnie wartości pól przekrojów, obwodów i średnic poszczególnych naczyń, a także kąty pomiędzy tętnicami. Praca stanowi podstawę do dalszej wielowymiarowej analizy statystycznej.

Słowa kluczowe: koło Willisa, tętniaki, pomiary morfologiczne, indeksy

1. WSTĘP

Tętniak mózgu to patologiczne, występujące ogniskowo, rozszerzenie światła tętnicy. Może być to patologia nabyta lub wrodzona. Ze względu na wielkość i kształt wyróżnić można trzy rodzaje tętniaków: workowate, wrzecionowate oraz prosowate [1]. Etiologia tętniaków tętnic mózgowych wciąż nie jest całkowicie znana, jednak wyróżnia się wiele czynników zwiększających ryzyko inicjalizacji tętniaków, np.: osłabiona sztywność i struktura ścian, czynniki genetyczne, molekularne oraz hemodynamiczne a także płeć, wiek i czynniki zewnętrzne, jak palenie papierosów i picie alkoholu [2].

1.1 Morfometria tętnic mózgowych

Do cech morfologicznych naczyń tętniczych zalicza się m.in. ich długość, średnice, kształt oraz kąty bifurkacji. Geometria układu naczyniowego, również tętnic mózgowych, jest stworzona w taki sposób, aby zminimalizować pracę układu krążenia. Naczynia organizowane są w struktury hierarchiczne, w których ma miejsce wielostopniowy podział: średnice i długości odchodzących kolejnych naczyń maleją wraz z rozrostem struktury. Umożliwia to wykorzystanie przez organizm minimalnej energii w celu utrzymania krążenia, przy jednoczesnym zaopatrzeniu tkanek w tlen i inne substancje odżywcze.

Zależność między średnicami kolejnych rozwidlających się naczyń tętniczych została opisana przez Murray'a [7] zwane prawem trzecich potęg (1):

$$d_0^n = d_1^n + d_2^n \quad (1)$$

gdzie: d_0 - średnica macierzystego naczynia; d_1 i d_2 - średnica potomnych naczyń; n - zgodnie z prawem optymalnej pracy powinno być równe 3.

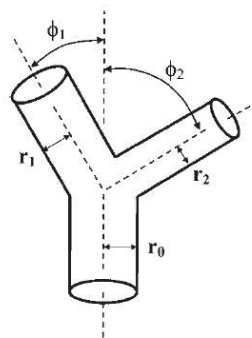
Murray ukazał także związek między kątem bifurkacji a średnicami tętnic, który musi być spełniony, aby zachować optymalną pracę układu krążenia:

$$\cos \Phi_1 = \frac{d_0^4 + d_1^4 - d_2^4}{2(d_0 d_1)^2} \quad (2)$$

$$\cos \Phi_2 = \frac{d_0^4 - d_1^4 + d_2^4}{2(d_0 d_2)^2} \quad \cos \alpha_1 = \frac{d_0^4 + d_1^4 - d_2^4}{2(d_0 d_2)^2} \quad (3)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{d_0^4 - d_1^4 + d_2^4}{2(d_0 d_2)^2}$$

Należy jednak zaznaczyć, że równania (1), (2), (3) są spełnione tylko jeśli tętnica macierzysta i tętnice po bifurkacji leżą w jednej płaszczyźnie [4].



Rys. 2. Schemat tętnicy macierzystej i tętnic potomnych wraz z analizowanymi parametrami [9]

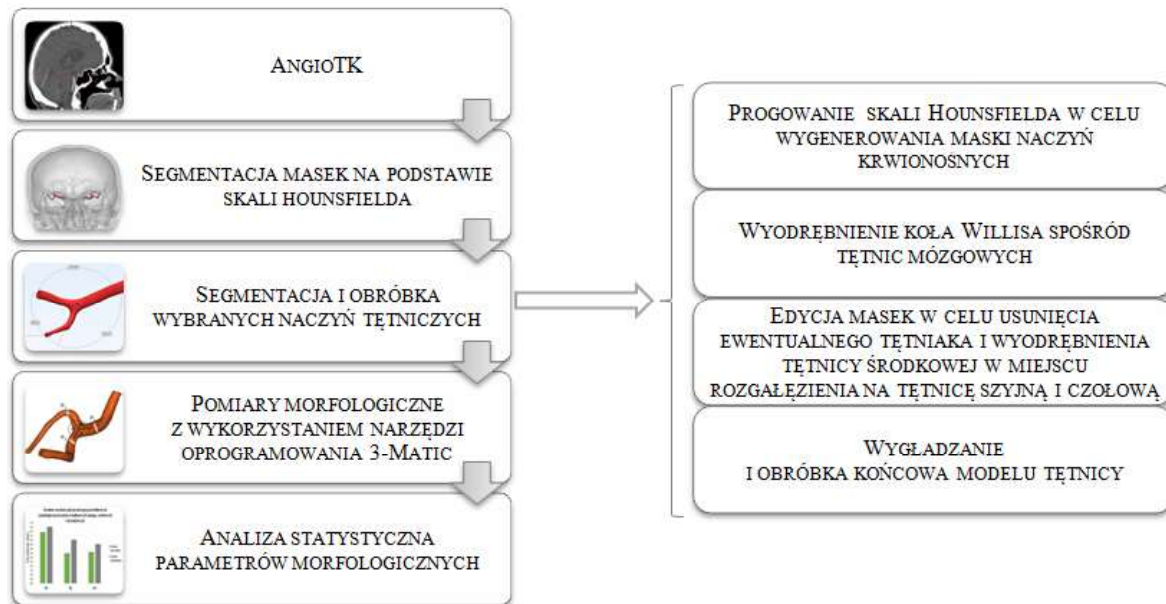
2. MATERIAŁ I METODA

W ramach badań przeprowadzono analizę geometrii naczyń tętniczych, wysegmentowanych na podstawie zdjęć angioTK. Grupę badawczą stanowiło 24 pacjentów bez tętniaka (zwana dalej grupą kontrolną), u których badanie angioTK przeprowadzono w ramach rutynowej diagnozy innych schorzeń oraz 24 pacjentów, u których stwierdzono tętniaka tętnicy środkowej mózgu (zwana dalej grupą badawczą). Obiektem przeprowadzonych badań były lewa i prawa tętnica środkowa mózgu w miejscu rozgałęzienia na tętnice czołową i skroniową. Łącznie wysegmentowano 96 tętnic, w tym 48 tętnic zdrowych, 24 tętnice z tętniakiem oraz 24 tętnice pacjentów znajdujące się po stronie nieobjętej tętniakiem.

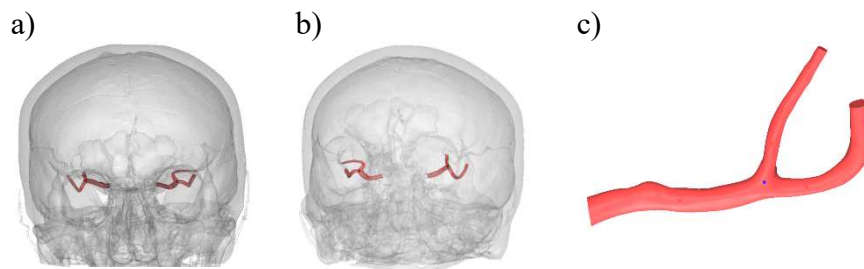
2.1. Segmentacja tętnic środkowych mózgu

W pierwszej kolejności konieczne było wygenerowanie modeli 3D tętnic wszystkich pacjentów na podstawie zdjęć diagnostyki medycznej, które importowano do programu Mimics Na podstawie skali Hounsfielda, wygenerowano maski naczyń krwionośnych, które

następnie poddano edycji, w celu usunięcia innych tętnic, które nie były obiektem badania oraz niepożądanych elementów (Rys. 3). Ostatecznie modele wygładzono i przygotowano do analizy morfologicznej (Rys. 4).



Rys. 3. Etapy tworzenia i obróbki modeli 3D tętnic mózgowych



Rys. 4. Wizualizacja wysegmentowanych tętnic w środowisku Mimics: a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) wyodrębniona tętnica środkowa mózgu w miejscu podziału na skroniową i czołową

2.2 Analizowane parametry morfologiczne

Wygenerowane modele tętnic poddano analizie morfometrycznej z wykorzystaniem narzędzi programu 3-Matic. Parametry do analizy zostały dobrane na podstawie konsultacji z lekarzami oddziału neurochirurgii Wojewódzkiego Szpitala Specjalistycznego w Sosnowcu, a także w oparciu o źródła literaturowe [1]. W tabeli 1 zestawiono wybrane parametry morfologiczne wraz z opisem. Uzyskana baza danych morfometrycznych została przeanalizowana za pomocą miar położenia, rozproszenia oraz kształtu rozkładu. Skoncentrowano się na analizie porównawczej wymiarów tętnic prawidłowych i patologicznych, rozważono także cechy uzyskanych zbiorów danych, takie jak:

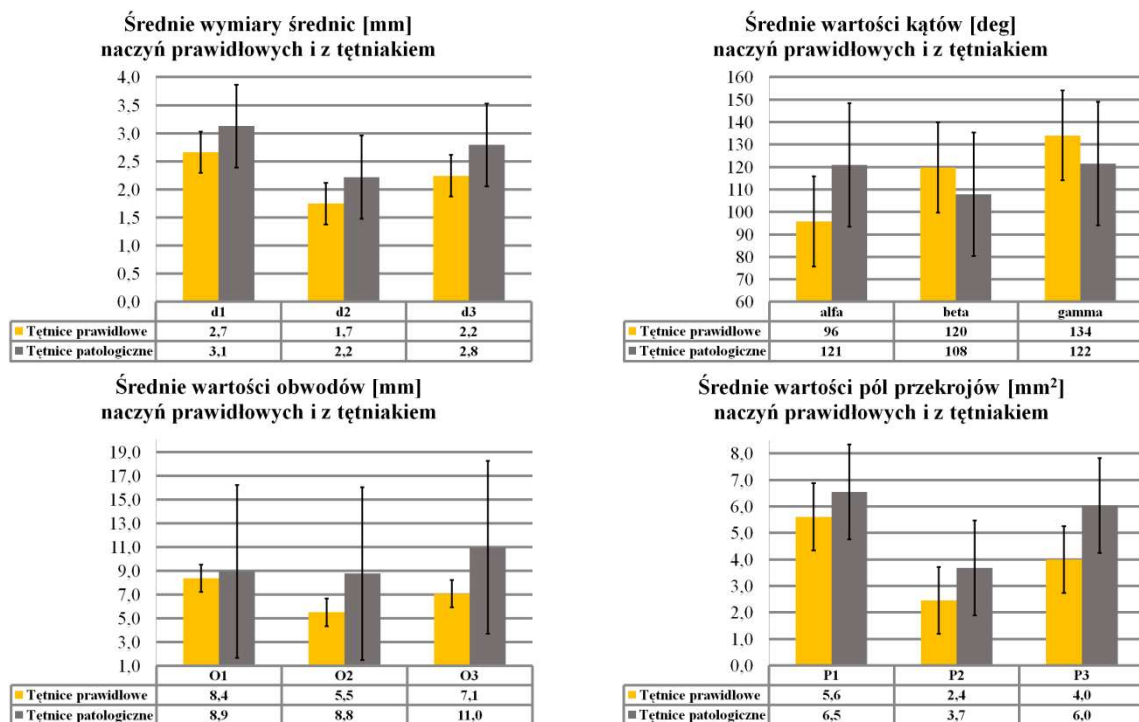
- wartości maksymalne i minimalne,
- średnie wraz z odchyleniem standardowym,
- kwartyle Q_1 , Q_2 i Q_3 ,
- kurtozy.

Tabela 1. Analizowane parametry morfologiczne

PARAMETR	OPIS
α	Kąt bifurkacji
β	Kąt pomiędzy tętnicą macierzystą i tętnicą potomną cieńszą
γ	Kąt pomiędzy tętnicą macierzystą i tętnicą potomną grubsza
P_1, P_2, P_3	Punkty wygenerowane za pomocą linii centralnej w programie Mimics, wyznaczające miejsca pomiarów pól przekrojów, obwodów oraz średnic poszczególnych naczyń: P_1 - tętnica macierzysta, P_2 - tętnica potomna cieńsza, P_3 - tętnica potomna grubsza.

3. WYNIKI

Analiza średnich wartości podstawowych parametrów morfometrycznych badanych tętnic wykazała dość znaczne zróżnicowanie (Rys. 5). Zauważono, że u pacjentów z tętniakiem średnice, a więc również pola przekrojów i obwody naczyń są większe (różnice wynoszą nawet 40%), natomiast w przypadku zmierzonych kątów – średni kąt α jest większy dla osób zdrowych, natomiast średnie kąty β i γ są większe u pacjentów.



Rys. 5. Porównanie średnich wartości parametrów morfologicznych tętnic prawidłowych oraz z tętniakiem

Na podstawie Tabela 2 zauważyć można, że mediana kąta α , a więc wartość środkowa, powyżej i poniżej której znajduje się tyle samo wartości, dla zdrowych tętnic wynosi 93 [deg] natomiast dla tętnic z tętniakiem: 120 [deg]. Wartość kwartyli Q_1 , która informuje, że 25% wszystkich wielkości znajduje się poniżej bądź są równe uzyskanej wartości, a 75% powyżej bądź są równe, dla zdrowych tętnic wynosi 82 [deg], a zatem 25% pomiarów jest niższe bądź równe od 82 [deg], a aż 75% badanych uzyskało wartość wyższą bądź równą. W przypadku tętnic patologicznych wartość kwartyli Q_1 jest niższa, równa 69. Wartość minimalna dla grupy kontrolnej wynosi 64 [deg], natomiast dla pacjentów: 69 [deg]. Jest to niewielka różnica. W przypadku maksimum zauważyć można różnicę wynoszącą 58 [deg], maksymalna wartość kąta alfa w przypadku tętnic zdrowych wynosi 146, patologicznych: 204. Nie można

jednak uznawać tych wartości za jakiegokolwiek progi, ponieważ są to dane otrzymane przez jednostki.

Mediana kąta β dla zdrowych i patologicznych tętniaków to odpowiednio: 119 oraz 106 [deg], różnica wynosi więc 13 [deg]. Różnica w wartościach kątów maksymalnych wynosi 5 [deg]. W przypadku kąta gamma widać znaczne różnice w wartości kwartyli Q_1 (wartość dla osób zdrowych wynosi 118, a dla pacjentów 62 [deg]) mediany i kwartyli Q_3 dla obu grup są bardziej zbliżone do siebie, mediana uzyskana dla analizowanych zdrowych tętnic wynosi 135, dla patologicznych: 118, w przypadku kwartyli Q_3 odpowiednio 147 i 140.

Badanie kurtozy daje odpowiedź czy dany rozkład wartości jest normalny, dzieje się tak tylko w przypadku gdy kurtoza jest równa zero. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, normalność rozkładu dla wartości kąta β tętnic prawidłowych, natomiast dla tętnic patologicznych kurtoza jest bliska 0 i wynosi 0,07. Dla pozostałych kątów rozkład nie jest normalny.

Tabela 2. Porównanie wyznaczonych wartości kwartyli, minimalnej i maksymalnej oraz asymetrii i kurtozy kątów dla tętnic zdrowych i patologicznych

	α		β		γ	
	PRAWIDŁOWE	NIEPRAWIDŁOWE	PRAWIDŁOWE	NIEPRAWIDŁOWE	PRAWIDŁOWE	NIEPRAWIDŁOWE
KWARTYL Q_1	82	69	106	66	118	62
MEDIANA	93	120	119	106	135	118
KWARTYL Q_3	107	129	131	118	147	140
MINIMUM	64	69	66	66	74	62
MAKSIMUM	146	204	173	168	177	171
KURTOZA	-0,23	0,81	0,002	0,07	-0,52	-0,29

Tabela 3. Porównanie wyznaczonych wartości kwartyli, minimalnej i maksymalnej oraz kurtozy pól przekroju dla tętnic zdrowych i patologicznych

	P_1		P_2		P_3	
	PRAWIDŁOWE	NIEPRAWIDŁOWE	PRAWIDŁOWE	NIEPRAWIDŁOWE	PRAWIDŁOWE	NIEPRAWIDŁOWE
KWARTYL Q_1	4,6	3,1	1,9	1,8	3,1	3,4
MEDIANA	5,5	6,6	2,4	3,5	3,9	5,4
KWARTYL Q_3	6,6	7,4	3,0	4,5	4,8	6,4
MINIMUM	2,1	3,1	0,5	1,8	1,0	3,4
MAKSIMUM	11,3	10,0	6,4	7,5	7,6	13,4
KURTOZA	0,97	0,14	1,62	1,18	0,26	2,76

Analizując Tabela 3 w przypadku przekroju tętnicy środkowej P_1 , zauważyć można, że 75% przebadanych patologicznych tętnic uzyskało wartość pola powyżej 3,1 [mm²], natomiast w przypadku grupy kontrolnej: 4,6 [mm²]. Wartości maksymalne uzyskane przez porównywane grupy to odpowiednio dla zdrowych 11,3 [mm²], a dla chorych: 10,0 [mm²].

Na podstawie uzyskanych wartości kwartyli dla przekroju pola tętnicy czołowej P_2 stwierdzić można wyraźną różnicę mediany, która w przypadku tętnic zdrowych wynosi 2,4 [mm²], a dla patologicznych 3,5 [mm²]. Dla grupy badawczej 75% uzyskanych wartości pola jest niższe bądź równe 4,5 [mm²], a zarazem wyższe bądź równe od 1,8 [mm²], z kolei dla grupy kontrolnej: 3,0 i 0,5 [mm²]. Maksymalna wartość pola przekroju tętnic zdrowych to 6,4 [mm²], a minimalna 0,5 [mm²], dla tętnic patologicznych 7,5 oraz 1,8 [mm²].

Dla zmierzonych wartości pól przekroju tętnicy skroniowej P_3 można stwierdzić, że wartości kwartyli Q_1 tętnic prawidłowych i patologicznych są zbliżone i wynoszą 3,1 i 3,4 [mm²], natomiast dla kwartyli Q_2 i Q_3 różnice wynoszą ok. 1,5 [mm²]. Znaczne różnice można zauważyć dla wartości minimalnych i maksymalnych. Dla tętnic prawidłowych różnica wynosi 6,6 [mm²] a dla patologicznych 10 [mm²].

Na podstawie wartości kurtozy zauważyć można, że zbiór danych wszystkich trzech badanych parametrów P_1 , P_2 oraz P_3 nie jest rozkładem normalnym. Najmniejsze wartości kurtozy zanotowano dla pól P_1 i P_3 tętnic nieprawidłowych.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania stanowią podstawę do dalszej, wielowymiarowej analizy statystycznej. W celu weryfikacji uzyskanych wyników należy z pewnością zwiększyć liczebność grupy badawczej, ale także zastanowić się nad wprowadzeniem klasyfikacji m.in. ze względu na wiek lub płeć osób badanych.

LITERATURA

- [1] Bor A.S., Velthuis B.K., Majoie C.B., Rinkel G.J.: Configuration of intracranial arteries and development of aneurysms, *Neurology*, vol. 70(9), 2008, p. 700-705.
- [2] Caranci F., Briganti F., Cirillo L., Leonardi M., Muto M.: Epidemiology and genetic of intracranial aneurysms, *Eur J Radiol*, vol. 82(10), 2013, p. 1598-1605.
- [3] Cebal JR, Rashi M: Suggested connections between risk factors of intracranial aneurysms: A Review, *Ann Biomed Eng*, vol. 41(7), 2013, p. 1366-1383.
- [4] Gabryś E.: Modelowanie rozplywu krwi w sieciach naczyń człowieka, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Wroclawska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, 2005.
- [5] Kaspera W., Ładziński P., Larysz P., Hebda A., Ptaszkiewicz K., Kopera M., Larysz D.: Morphological, hemodynamic, and clinical independent risk factors for anterior communicating artery aneurysms, *Stroke*, vol. 45(10), 2014, p. 2906-2911.
- [6] Liberski P, Papierz W: *Neuropatologia Mosskowskiego*, Wyd. Czelej, Lublin, 2005.
- [7] Rossitti S., Lofrgen J.: Optimality principles and flow orderliness at the branching points of cerebral arteries, *Stroke*, vol. 24(7), 1993, p. 1029-1232.
- [8] Rossitti S., Lofrgen J.: Vascular dimensions of the cerebral arteries follow the principle of minimum work, *Stroke*, vol. 24(3), 1993, p. 371-377.
- [9] Sadasivan C., Fiorella D.J., Woo H.H., Lieber B.B.: Physical factors effecting cerebral aneurysm pathophysiology, *Ann Biomed Eng.*, vol. 41(7), 2013, p. 1347-1365.
- [10] Singh P.K., Marzo A., Howard B., Rufenacht D.A., Bijlenga P., Frangi A.F., Lawford P.V., Coley S.C., Hose D.R., Patel U.J.: Effects of smoking and hypertension on wall shear stress and oscillatory shear index at the site of intracranial aneurysm formation, *Clin Neurol Neurosurg*, vol. 112(4), 2010, p. 306-313.

MORPHOMETRY OF BIFURCATION OF MIDDLE CEREBRAL ARTERIES IN PATIENT WITH AND WITHOUT ANEURYSM

Abstract: In this paper it was performed the morphological analysis of bifurcation geometry in middle cerebral arteries. The three-dimensional models of arteries were obtained from angiography images from 24 healthy people and 24 patients with aneurysm. There were analyzed the mean values and quartiles of diameters, areas, circumferences and angles. It was also calculated kurtosis, to check whether the distribution is normal. The studies are the basis for further, multivariate statistical analysis.