

Nowe możliwości pomiarowe stenozy lędźwiowej z zastosowaniem cyfrowej tomografii komputerowej

Digital Computed Tomography Affords New Measurement Possibilities in Lumbar Stenosis

Kazimierz Rapała^{1,2(A,D,G)}, Sławomir Chaberek^{1(B,C)}, Aleksandra Truszczyńska^{1,2,3(A,D,F)}, Stanisław Łukawski^{1(B)}, Piotr Walczak^{1(B,E,F)}

¹ Samodzielny Publiczny Szpital Kliniczny im. prof. A. Grucy, Otwock

² Zamiejscowy Wydział Akademii Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego, Biała- Podlaska

³ Wyższa Szkoła Ekonomiczna Almamer, Warszawa

¹ Professor Adam Gruca Teaching Hospital, Otwock

² Józef Piłsudski University of Physical Education in Warsaw, Faculty of Physical Education, Biała Podlaska

³ Faculty of Physiotherapy, Almamer Higher School of Economics, Warsaw

STRESZCZENIE

Wstęp. W literaturze problemy stenozy lędźwiowej są przedmiotem szczególnych analiz. Wynika to ze stale powiększającej się liczby chorych z bólami krzyża o tej etiologii. Celem pracy było: 1. Podjęcie prospektywnych badań oceniających za pomocą TK wymiarów kanału kręgowego i porównaniu ich z grupą kontrolną. 2. Ustalenie czy wymiar strzałkowy i poprzeczny oraz pole powierzchni kanału kręgowego są dostatecznie czułe i silne w ocenie zwężenia kanału kręgowego na poziomach: L3, L4 i L5.

Materiał i metody. Grupa badana obejmowała 176 chorych (mężczyzn 93, kobiet 83). Zbadano i oceniono 528 poziomów, które porównano z 42 osobową grupą kontrolną. Badania przeprowadzono przy zastosowaniu cyfrowej TK z dokładnością 0,01 mm i 0,01 mm². Za pomocą algorytmu funkcji dyskryminacyjnej dokonano klasyfikacji przypadków ze względu na poziom występowania stenozy.

Wyniki. Na poziomie L3 średni wymiar strzałkowy wynosił 13,26 mm. Średni wymiar poprzeczny 23,36 mm. Pole powierzchni 244,39 mm². Na poziomie L4 średni wymiar strzałkowy wynosił 14,12 mm. Średni wymiar poprzeczny 24,60 mm. Pole powierzchni 267,70 mm². Na poziomie L5 średni wymiar strzałkowy wynosił 14,76 mm. Średni wymiar poprzeczny 31,38 mm. Pole powierzchni 303,99 mm². Największe znaczenie dla jakości klasyfikacji odgrywały: wysokość, szerokość oraz pole powierzchni. Za pomocą testu t-Studenta przy poziomie istotności p=0,05 stwierdzono znaczenie statystyczne. Dokładność klasyfikacji w analizie dyskryminacyjnej wynosiła 92,66%.

Wnioski. Zaproponowane wskaźniki dotyczące przekroju strzałkowego, poprzecznego i pola powierzchni przekroju kanału kręgowego były przydatne w ocenie zmian ilościowych w tej technice badawczej. Największą czułość w ocenie stenozy ma wymiar strzałkowy.

Slowa kluczowe: pomiary morfometryczne, cyfrowa tomografia komputerowa, stenoza lędźwiowa, kanał kręgowy

SUMMARY

Background. The problem of lumbar stenosis has been analysed at length in the literature as the number of patients with low back pain of this aetiology continues to increase. The aim of this study was: 1. to carry out a prospective study assessing the dimensions of spinal canal on the basis of CT data and to compare patient data with a control group. 2. to determine if the sagittal and transverse dimensions and surface area of the spinal canal are sufficiently sensitive and robust measures of spinal canal stenosis at L3, L4 and L5 levels.

Material and methods. The investigational group consisted of 176 patients (93 men, 83 women). A total of 528 vertebral levels were evaluated and compared with a control group consisting of 42 persons. Digital CT scans were obtained with a precision of 0.01 mm and 0.01 mm². A discriminative function algorithm was used to classify cases according to the level of stenosis.

Results. The mean sagittal dimension at L3 was 13.26 mm and the mean transverse dimension was 23.36 mm, with a surface area of 244.39 mm². At L4, the mean sagittal dimension was 14.12 mm, the mean transverse dimension was 24.60 mm, and the surface area was 267.70 mm². At L5, the mean sagittal dimension was 14.76 mm, the mean transverse dimension was 31.38 mm, and the surface area was 303.99 mm². The most important factors influencing the quality of classification were height, width and surface area. Student's t test with a significance level at p=0.05 revealed statistically significant differences. The accuracy of classification in discriminative analysis was 92.66%.

Conclusions. The proposed indicators of the sagittal and transverse dimensions and surface area of the spinal canal were useful in assessing quantitative changes with this investigational technique. The sagittal dimension had the greatest sensitivity in the evaluation of stenosis.

Key words: morphometric measurements, digital computed tomography, lumbar stenosis, spinal canal

Liczba słów/Word count: 6406

Tabele/Tables: 13

Ryciny/Figures: 1

Piśmiennictwo/References: 18

Adres do korespondencji / Address for correspondence

Prof. dr hab. med. Kazimierz Rapała

Samodzielny Publiczny Szpital Kliniczny im. prof. A. Grucy
05-400 Otwock, ul. Konarskiego 13

Otrzymano / Received
Zaakceptowano / Accepted

21.11.2008 r.
19.01.2009 r.

WSTĘP

W literaturze obcojęzycznej problemy stenozy lędźwiowej były przedmiotem różnych analiz. Dotyczy to szczególnie stenoz nabitych, rozwijających się z upływem lat, po pięćdziesiątym roku życia.

Wtórne zmiany w następstwie zwyrodnienia krążka międzykręgowego prowadzą do niestabilności międzykręgowej i zwiększenia obciążień poprzez wyrostki stawowe na stawy międzykręgowe. Dochodzi do osiadania kręgów oraz sfałdowania więzadeł żółtych i wtórnego rozwoju zmian zwyrodnieniowych w obrębie stawów międzykręgowych kręgosłupa i zmian przerostowych na obrzeżach trzonów kręgowych. Doprowadza to do zwężenia: światła kanału kręgowego, zackyłków bocznych i kanału korzeniowego.

CELE PRACY

1. Podjęcie prospektywnych badań za pomocą cyfrowej tomografii komputerowej oceniających wymiary kanału kręgowego. Badano trzy poziomy: L3, L4, L5.
2. Ustalenie czy wymiary wysokości (strzałkowy) i poprzeczny (międzynasadowy) oraz pole powierzchni kanału kręgowego są dostatecznie duże w ocenie zwężenia kanału kręgowego.

MATERIAŁ I METODY

Badania były prowadzone w latach 2005-2008. Materiał badany stanowiło 196 chorych z klinicznymi objawami stenozy lędźwiowej potwierdzonymi klasycznymi zdjęciami rentgenowskimi i tomografią komputerową (TK) kręgosłupa lędźwiowego. Tabela 1. przedstawia grupę badaną.

W dalszych analizach uwzględniono do oceny jedynie tych pacjentów, u których wstępna diagnostyka kliniczna i radiologiczna wykazała występowanie stenozy na jednym poziomie L3, L4 lub L5. Dzięki temu otrzymano grupę, w której nie występuje jednocześnie stenoza na kilku poziomach.

Po tej modyfikacji otrzymano grupę 176 osób poddaną dalszej analizie. Grupa składała z 93 kobiet i 83 mężczyzn.

Zbadano 528 poziomów (176 ze stenozą i 352 bez stenozy). Zależności te dla poszczególnych poziomów przedstawiają się następująco. Na poziomie:

- L3, stwierdzono stenozę w 27 przypadkach (K – 17, M 10), kanał prawidłowy na poziomie L3 w 149 przypadkach (K – 76, M – 73).
- L4, stwierdzono stenozę w 104 przypadkach (K – 56, M – 48), kanał prawidłowy na poziomie L4 w 72 przypadkach (K – 37, M – 35).

BACKGROUND

Foreign literature on lumbar stenosis consists of a variety of studies, with particular emphasis on acquired stenosis, which develops in patients over 50 years of age.

Changes secondary to intervertebral disc degeneration produce intervertebral instability and increased compression of the articular processes on the intervertebral joints. Intervertebral discs subside, the folding of yellow ligaments occurs along with secondary development of degenerative changes within the intervertebral joints of the spine and hypertrophic lesions at the rims of vertebral bodies, all of which contributes to the development of stenosis of the lumen of the spinal canal, lateral recesses and the root canal.

AIM OF STUDY

1. to carry out a prospective study assessing the dimensions of the spinal canal on the basis of CT data at the following three levels: L3, L4, L5.
2. to determine if the height (sagittal) and transverse (interepiphysal) dimensions and surface area of the spinal canal are sufficiently sensitive measures of spinal canal narrowing.

MATERIAL AND METHODS

The study was conducted between 2005 and 2008. The investigational group included 196 patients with clinical symptoms of lumbar stenosis confirmed by conventional radiographs and CT scans of the lumbar spine. The characteristics of the investigational group are presented in Table 1.

Data analysis included only those patients in whom preliminary clinical and radiographic work-up revealed stenosis at one of three levels (L3, L4 and L5). Thus, none of the patients in the group had stenosis at multiple levels.

As a result of the above modification a group of 176 patients emerged (93 men, 83 women – chyba pomyłka w oryginalu w stosunku do streszczenia), whose data were then subjected to further analysis.

A total of 528 vertebral levels were evaluated (176 with and 352 without stenosis). The following results were recorded at particular levels:

- L3: stenosis diagnosed in 27 patients (F – 17, M – 10), normal lumen of the spinal canal at L3 in 149 patients (F – 76, M – 73).
- L4: stenosis diagnosed in 104 patients (F – 56, M – 48), normal lumen of the spinal canal at L4 in 72 patients (F – 37, M – 35).

Tab. 1. Charakterystyka grupy badanej

Tab. 1. Description of the investigational group

	Płeć Sex	N	Średnia Mean	Odch std Standard deviation	Min	Max
Waga Weight	K Female	104	72.226	13.189	13.27	17.64
	M Male	92	84.819	15.419	13.94	17.36
	Cała grupa Total	196	78.165	15.575	13.27	17.64
Wzrost Height	K Female	104	162.88	5.80	22.21	30.13
	M Male	92	176.45	7.424	22.24	29.95
	Cała grupa Total	196	169.28	9.467	22.21	30.13
BMI	K Female	104	44.274	7.6106	211.4	318.9
	M Male	92	47.944	7.7164	239.6	317.8
	Cała grupa Total	196	46.005	7.8566	211.4	318.9
WIEK age	K Female	104	56.516	12.777	0.507	0.746
	M Male	92	52.843	11.737	0.488	0.721
	Cała grupa Total	196	54.784	12.400	0.488	0.746

- L5, stwierdzono stenozę w 45 przypadkach (K – 20, M – 25), kanał prawidłowy na poziomie L 5 w 131 przypadkach.

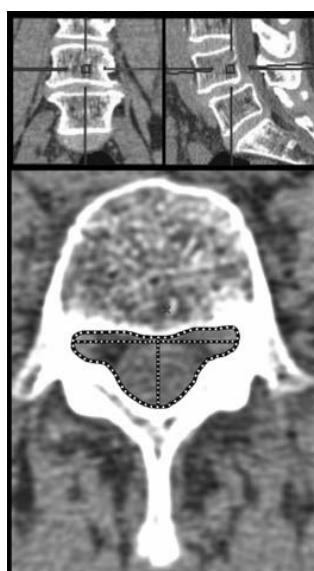
- L5: stenosis diagnosed in 45 patients (F – 20, M – 25), normal lumen of the spinal canal at L5 in 131 cases (F?, M?)

METODYKA POMIAROWA

Na podstawie analizy matematycznej badań TK dokonano pomiarów morfometrycznych kanału kręgowego.

MEASUREMENT METHOD

Morphometric measurements of the spinal canal were performed on the basis of a mathematical analysis of CT scans.



Ryc. 1. Obraz TK kręgosłupa lędźwiowo-krzyżowego na przekroju czołowym (A) i bocznym (B). Wykreślone tam linie przechodzą przez połowę szerokości trzonu kręgu L4 i na tym poziomie cięcia wykonywane były pomiary w rzucie poprzecznym (C)

Fig. 1. Frontal (A) and sagittal (B) CT scans of the lumbosacral spine. The lines go through half of the width of the L4 vertebra. Measurements in the transverse cut were performed at this level (C)

Pomiary wysokości (wymiar strzałkowy), szerokości (wymiar międzynasadowy) i pola powierzchni kanału kręgowego wykonywane były w obrębie L3, L4 i L5.

Analiza dyskryminacyjna – automatyczny sposób grupowania przypadków

Na bazie zmierzonych parametrów wyznaczono wektor (V) cech charakteryzujący badany obraz oraz umożliwiający jego klasyfikację. W Tabeli 2. przedstawiono wektor cech składający się z 9 elementów (Vi).

Za pomocą algorytmu analizy dyskryminacyjnej wyznaczono współczynniki funkcji klasyfikacyjnych. Następnie po obliczeniu wartości tych funkcji otrzymano współrzędne wyznaczające położenie badanego obrazu na płaszczyźnie przestrzeni dyskryminacyjnej.

W zależności od wartości wyznaczonych współrzędnych obraz można zaklasyfikować do odpowiedniej grupy: G1 – stenoza na poziomie L3; G2 – stenoza na poziomie L4; G3 – stenoza na poziomie L5; G4 – norma.

Współczynniki klasyfikacji wyznaczone zostały dla każdej grupy klasyfikacyjnej. Decyzja klasyfikacyjna podejmowana była zgodnie z następującym algorytmem postępowania:

1. Wyznaczenie wartości wektora cech (V) dla badanego obrazu.
2. Wyznaczenie współczynników dla każdej z grup na podstawie określonej grupy badawczej.
3. Obliczenie wartości funkcji klasyfikacyjnej dla każdej z grup na podstawie wektora cech badanego obrazu.
4. Obraz był klasyfikowany do danej grupy, jeżeli funkcja klasyfikacyjna wyliczona w tej grupie posiadała największą wartość. W przypadku klasyfikacji – w oparciu o wartość odległości Mahalanobisa¹. Obraz klasyfikujemy do danej grupy, gdy odległość Mahalanobisa od centriodu grupy jest najmniejsza.

Stosując analizę dyskryminacyjną dokonano klasyfikacji przypadków ze względu na poziom występowania stenozy

Tab. 2. Parametry wektora cech

Tab. 2. Parameters of characteristics vector

Poziom stenozy Level of stenosis	Wysokość [mm] height	Szerokość [mm] width	Pole pow [mm ²] Surface area
L3	V ₁	V ₂	V ₃
L4	V ₄	V ₅	V ₆
L5	V ₇	V ₈	V ₉

¹ Odległość Mahalanobisa jest miarą informującą o odległości pomiędzy poszczególnymi grupami klasyfikacyjnymi oraz położeniu ich środków grup zwanych często centroidami. Na tej podstawie możemy zaklasyfikować przypadek do grupy, w której odległość Mahalanobisa jest najmniejsza

¹ The Mahalanobis distance reflects distances between particular classification groups and the location of the centers of these groups, often referred to as centroids. On this basis, one can classify a case to the group in which the Mahalanobis distance is smallest

The measurements of the height (sagittal dimension), width (interepiphysal dimension) and surface area of the spinal canal were performed at L3, L4 and L5.

Discriminative analysis – method of automatic classification of particular cases

A characteristics vector (V) was determined on the basis of the measured parameters to describe and classify the image being assessed. Table 2 demonstrates a characteristics vector composed of 9 elements (Vi).

A discriminative analysis algorithm was used to determine the indices of the classification functions. The values of these functions were then calculated and used to obtain the coordinates determining the location of the image within the discriminative plane.

Depending on the values of the coordinates, an image may be classified to one of the following groups: G1 – stenosis at L3; G2 – stenosis at L4; G3 – stenosis at L5; G4 – no stenosis.

Classification coordinates were determined for each group. The process of classification followed the below algorithm:

1. Determination of a characteristics vector (V) for the image.
2. Determination of coordinates for each group on the basis of the particular study group.
3. Calculating the value of the classification function for each group on the basis of the characteristics vector of the image.
4. An image was included in a particular group if the classification function calculated in this group reached a maximum there; in the case of classification the Mahalanobis distance was used as a basis. In other words, the image can be included in a particular group if the Mahalanobis distance¹ from the group's centroid is smallest there.

The discriminative analysis method was used to classify cases according to the level of stenosis.

WYNIKI

Przeprowadzone badania TK u 176 chorych na trzech badanych poziomach pozwoliły ocenić wysokość, szerokość oraz pole powierzchni kanału kręgowego. Wyniki porównano z grupą kontrolną składającą się z 42 osób.

Analiza kanału kręgowego na poziomie L3

Uzyskane szczegółowe wartości dla wysokości (wymiar strzałkowy), szerokości (wymiar międzynamadowy) i pola powierzchni kanału na poziomie L3 w grupie NS – stenoza niestwierdzona, S – stenoza stwierdzona przedstawia Tabela 3. Natomiast średni wymiar strzałkowy (wysokość) wynosił 13,26mm, średni wymiar poprzeczny (szerokość) 23,34mm, a pole powierzchni 244,39mm².

RESULTS

CT scans obtained in 176 patients at the three levels evaluated enabled the assessment of height, width and surface area of the spinal canal. The results were then compared with a control group consisting of 42 persons.

Analysis of the spinal canal at L3

Detailed results for the height (sagittal dimension), width (interepiphysal dimension) and surface area of the spinal canal at L3 in the NS (no stenosis at L3) and S (stenosis at L3) groups are presented in Table 3. The mean sagittal dimension (height) at L3 was 13.26 mm and the mean transverse dimension (width) was 23.36 mm, with a surface area of 244.39 mm².

A comparative analysis of the differences in parameter values was performed between the group

Tab. 3. Wymiary kanału na poziomie L3 dla grupy (S – stenoza stwierdzona na poziomie L3, NS – stenoza niestwierdzona na poziomie L3)

Tab. 3. Spinal canal dimensions at L3 level for the investigational group (S – stenosis at L3, NS – no stenosis at L3)

Parametr Parameter	Płeć Sex	Średnia Mean		Odch. Std Standard deviation	
		NS	S	NS	S
Wysokość [mm] Height	K Female	15.54	13.24	0.924	0.895
	M Male	15.44	13.24	0.804	0.759
	Razem Total	15.49	13.24	0.866	0.832
Szerokość [mm] Width	K Female	25.67	23.37	1.714	1.545
	M Male	25.58	23.34	1.732	2.497
	Razem Total	25.63	23.36	1.718	1.905
Pole pow. [mm ²] Surface Area	K Female	277.1	245.2	21.90	26.82
	M Male	280.0	243.1	18.20	29.08
	Razem Total	278.5	244.4	20.16	27.14

Tab. 4. Porównanie parametrów poziomu L3 dla grupy (S – stenoza stwierdzona na poziomie L3, NS – stenoza niestwierdzona na poziomie L3)

Tab. 4. Comparisons of parameters at L3 level for the investigational group (S- stenosis at L3, NS- no stenosis at L3)

	Średnia Mean		Wartość statystyki Value of statistic	Poziom Istotności Significance level	Liczliwość grupy Group size	
	S	NS			S	NS
Wysokość Height [mm]	13.26	15.49	-12.52	0.0000	27	149
Szerokość Width [mm]	23.36	25.63	-6.21	0.0000	27	149
Pole pow. Surface area [mm ²]	244.39	278.54	-7.65	0.0000	27	149

Przeprowadzono analizę porównawczą różnic uzyskanych wartości parametrów pomiędzy grupą, w której nie stwierdzono zmian stenotycznych, a grupą ze zmianami stenotycznymi na poziomie L3.

Za pomocą testu t-Studenta (Tabela 4), przy poziomie istotności $p=0,05$, stwierdzono znaczenie statystyczne dla: wysokości, szerokości oraz pola powierzchni na poziomie L3 pomiędzy grupami.

Analiza kanału kręgowego na poziomie L4

Uzyskane szczegółowe wartości dla wysokości (wymiar strzałkowy), szerokości (wymiar międzymiędzynasadowy) i pola powierzchni kanału na poziomie L4 w grupie NS – stenoza niestwierdzona, S – stenoza stwierdzona przedstawia Tabela 5. Średnie wartości na poziomie L4 w wymiarze strzałkowym (wysokość) wynosiły 12,13mm, szerokości (wymiar międzymiędzynasadowy) 24,60mm, a pole powierzchni 276,70 mm².

without stenosis at L3 (NS) and the one demonstrating spinal canal stenosis at L3 (S).

Student's t test (Table 4) with the level of statistical significance at $p=0.05$ demonstrated the following statistical correlations for height, width and surface area of the spinal canal at L3 between the groups.

Analysis of the spinal canal at L4

Detailed results for the height (sagittal dimension), width (interepiphysal dimension) and surface area of the spinal canal at L4 in the NS (no stenosis at L4) and S (stenosis at L4) groups are presented in Table 5. The mean sagittal dimension (height) at L4 was 14.12 mm, the mean transverse dimension (width) was 24.60 mm, and the surface area was 267.70 mm².

Tab. 5. Wymiary kanału na poziomie L4 dla grupy (S – stenoza stwierdzona na poziomie L4, NS – stenoza niestwierdzona na poziomie L4)

Tab. 5. Spinal canal dimensions at L4 level for the investigational group (S – stenosis at L4, NS – no stenosis at L4)

Parametr Parametr	Płeć Sex	Średnia Mean		Odch. std Standard deviation	
		NS	S	NS	S
Wysokość [mm] Height	K Female	15.77	14.22	1.087	1.115
	M Male	15.69	14.00	1.034	1.404
	Razem Total	15.73	14.12	1.055	1.255
Szerokość [mm] Width	K Female	26.44	24.55	1.853	2.218
	M Male	25.88	24.65	1.839	2.542
	Razem Total	26.17	24.60	1.855	2.362
Pole pow. [mm ²] Surface Area	K Female	290.3	262.8	32.56	44.48
	M Male	279.5	273.4	29.07	29.15
	Razem Total	285.1	267.7	31.17	38.37

Tab. 6. Porównanie parametrów poziomu L4 dla badanej grupy (S – stenoza stwierdzona na poziomie L4, NS – stenoza niestwierdzona na poziomie L4)

Tab. 6. Comparisons of parameters at L4 level for the investigational group (S – stenosis at L4, NS – no stenosis at L4)

	Średnia Mean		Wartość Statystyki Value of statistic	Poziom Istotności Significance level	Liczebność grupy Group size	
	S	NS			t-value	p
Wysokość Height [mm]	14.12	15.73	8.9422	0.0000		104
Szerokość Width [mm]	24.60	26.17	4.7155	0.0000		72
Pole pow. Surface area [mm ²]	267.67	285.07	3.1858	0.0017		104
						72

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że wszystkie parametry w kanale stenotycznym były mniejsze niż w grupie kontrolnej.

Przeprowadzono analizę porównawczą różnic uzyskanych parametrów pomiędzy grupą, w której nie stwierdzono zmian stenotycznych a grupą ze zmianami stenotycznymi na poziomie L4. Za pomocą testu t-Studenta (Tabela 6), przy poziomie istotności $p=0,05$, stwierdzono znaczenia statystyczne dla: wysokości, szerokości i pola powierzchni.

Analiza kanału kręgowego na poziomie L5

Uzyskane szczegółowe wartości dla wysokości (wymiar strzałkowy), szerokości (wymiar międzynasadowy) i pola powierzchni kanału na poziomie L5 w grupie NS – stenoza niestwierdzona, S – stenoza stwierdzona przedstawia Tabela 7. Średni wymiar strzałkowy (wysokość) wynosiła 14,76mm, wymiar międzynasadowy (szerokość) 31,38mm, a pole powierzchni 303,99mm².

Przeprowadzono analizę porównawczą różnic uzyskanych wartości parametrów pomiędzy grupą, w której nie stwierdzono zmian stenotycznych a grupą ze zmianami stenotycznymi na poziomie L5. Za pomocą testu t-Studenta (Tabela 8), przy poziomie istotności $p=0,05$, stwierdzono znaczenia statystyczne dla: wysokości, szerokości i pola powierzchni.

The results of the measurements showed that all parameters had lower values in patients with a stenotic canal than in the control group.

Comparative analysis of the differences in parameter values was performed between the group without stenosis at L4 (NS) and the one demonstrating spinal canal stenosis at L4 (S). Student's t test (Table 6.) with the level of statistical significance at $p=0.05$ demonstrated the following statistical correlations for the height, width and surface area of the spinal canal at L4 between the groups:

Analysis of the spinal canal at L5

Detailed results for the height (sagittal dimension), width (interepiphysal dimension) and surface area of the spinal canal at L5 in the NS (no stenosis at L5) and S (stenosis at L5) groups are presented in Table 7. The mean sagittal dimension (height) at L5 was 14.76 mm, the mean interepiphysal dimension (width) was 31.38 mm, and the surface area was 303.99 mm².

Comparative analysis of the differences in parameter values was performed between the group without stenosis at L5 (NS) and the one demonstrating spinal canal stenosis at L5 (S). Student's t test (Table 8.) with the level of statistical significance at $p=0.05$ demonstrated the following statistical correlations for the height, width and surface area of the spinal canal at L5 between the groups:

Tab. 7. Wymiary kanału na poziomie L5 dla grupy (S- stenoza stwierdzona na poziomie L5, NS – stenoza niestwierdzona na poziomie L5)

Tab. 7. Spinal canal dimensions at L5 level for the study group (S – stenosis at L5, NS – no stenosis at L5)

Parametr Parametr	Płeć Sex	Średnia Mean		Odch. Std Standard deviation	
		NS	S	NS	S
Wysokość [mm] Height	K Female	17.03	14.64	1.772	1.460
	M Male	17.26	14.86	2.269	1.606
	Razem Total	17.13	14.76	2.002	1.530
Szerokość [mm] Width	K Female	32.77	31.43	3.119	3.566
	M Male	33.71	31.35	3.197	3.631
	Razem Total	33.18	31.38	3.176	3.562
Pole pow. [mm ²] Surface Area	K Female	318.7	313.4	51.53	65.71
	M Male	332.4	296.4	60.21	48.50
	Razem Total	324.7	304.2	55.74	56.75

Tab. 8. Porównanie parametrów poziomu L5 dla badanej grupy (S – stenoza stwierdzona na poziomie L5, NS – stenoza niestwierdzona na poziomie L5)

Tab. 8. Comparisons of parameters at L5 level for the study group (S – stenosis at L5, NS – no stenosis at L5)

	Średnia Mean		Wartość Statystyki Value of statistic	Poziom Istotności Significance level	Liczебность grupy Group size	
	S	NS	t-value	p	S	NS
Wysokość Height [mm]	14.76	17.13	7.2332	0.0000	45	131
Szerokość Width [mm]	31.38	33.18	3.1803	0.0017	45	131
Pole pow Surface area [mm²]	303.99	324.72	2.1430	0.0335	45	131

Analiza wymiarów kanału kręgowego w grupie kontrolnej

W Tabeli 9. podano zbioremą informację dotyczącą wyników badanych pomiarów.

Przeprowadzono analizę porównawczą różniczą pomocą testu t-Studenta wartości uzyskanych parametrów pomiędzy grupą kontrolną a grupą badaną, w której zdiagnozowano występowanie stenozy na jednym z poziomów: L3, L4 lub L5. Wyniki przedstawiono w Tabelach 10, 11 i 12.

Z pomocą testu t-Studenta, przy poziomie istotności p=0,05, stwierdzono znamienności statystycz-

Analysis of the spinal canal dimensions in the control group

Table 9 below collates the measurement results in this group.

Comparative analysis of differences in parameters was conducted using Student's t test between the control group and the study group with stenosis diagnosed at L3, L4 or L5. The results are presented in Table 10, 11 and 12.

Student's t test with the level of statistical significance at p=0.05 demonstrated statistical correlations for the height, width and surface area of the spinal

Tab. 9. Wymiary kanału kręgowego na poziomie L3, L4 i L5 w grupie kontrolnej

Tab. 9. Spinal canal dimensions at L3, L4, L5 level in the control group

Parametr Parametr	Płeć Sex	L 3		L 4		L 5	
		Średnia Mean	Odch. Std Standard deviation	Średnia Mean	Odch. Std Standard deviation	Średnia Mean	Odch. Std Standard deviation
Wysokość Height [mm]	K/F	15.99	0.700	16.95	0.600	17.81	1.600
	M/M	15.69	0.924	16.41	0.927	17.33	1.634
	Razem Total	15.75	0.886	16.85	0.870	17.77	1.619
Szerokość Width [mm]	K/F	23.45	1.631	27.37	1.217	34.75	3.272
	M/M	24.86	2.267	28.95	1.273	34.41	3.394
	Razem Total	24.76	2.173	28.65	1.397	34.57	3.332
Pole pow Surface area [mm²]	K/F	277,9	34,66	295,9	11,16	375,5	23,32
	M/M	277,0	36,99	298,1	9,71	389,0	54,99
	Razem Total	277,2	36,15	297,7	9,90	386,5	50,55

Tab. 10. Porównanie parametrów poziomu L3 dla grupy o stwierdzonej stenozie na poziomie L3 (S) i grupy kontrolnej (K)

Tab. 10. Comparison of parameters for L3 level for patients with stenosis at L3 (S) and the control group (K)

	Średnia Mean		Wartość Statystyki Value of statistic	Poziom Istotności Significance level	Liczебность grupy Group size	
	S	K	t-value	p	S	K
Wysokość Height [mm]	13.35	15.75	-10.62	0.0000	27	42
Szerokość Width [mm]	23.62	24.76	-2.32	0.0235	27	42
Pole pow Surface area [mm²]	244,39	277,21	-4,04	0.0001	27	42

Tab. 11. Porównanie parametrów poziomu L4 dla grupy o stwierdzonej stenozie na poziomie L4 (S) i grupy kontrolnej (K). Poziom L4

Tab. 11. Comparison of parameters for L4 level for patients with stenosis at L4 and the control group (K)

	Średnia Mean		Wartość Statystyki Value of statistic	Poziom Istotności Significance level	Liczliwość grupy Group size	
	S	K			t-value	p
Wysokość Height [mm]	14.14	16.85	-12.97	0.0000	104	42
Szerokość Width [mm]	24.62	28.05	-9.08	0.0000	104	42
Pole pow. Surface area [mm ²]	267.67	297.71	-5.00	0.0000	104	42

Tab. 12. Porównanie parametrów poziomu L5 dla grupy o stwierdzonej stenozie na poziomie L5 (S) i grupy kontrolnej (K)

Tab. 12. Comparison of parameters for L5 level for patients with stenosis at L5 (S) and the control group (K)

	Średnia Mean		Wartość Statystyki Value of statistic	Poziom Istotności Significance level	Liczliwość grupy Group size	
	S	K			t-value	p
Wysokość Height [mm]	15.27	17.77	-6.745	0.0000	45	42
Szerokość Width [mm]	31.54	34.57	-4.343	0.0000	45	42
Pole pow. Surface area [mm ²]	301.32	386.46	-7.087	0.0000	45	42

ne dla: wysokości, szerokości oraz pola powierzchni na poziomach L3, L4 i L5 pomiędzy grupą o stwierdzonej stenozie (S) i grupą kontrolną (K).

Analiza dyskryminacyjna

Tabela 13 przedstawia dokładność klasyfikacji. Analizowane przypadki zebrane w tej grupie miały jednoznacznie zdefiniowaną przynależność do poszczególnych grup: Stenoza L3; Stenoza L4; Stenoza L5; Norma. Z prawidłową klasyfikacją mamy do czynienia w przypadku, gdy badany obiekt zostanie przyporządkowany do klasy zgodnej z klasą określona na podstawie klasyfikacji diagnostycznej. W przypadku zaklasyfikowania przypadku do innej grupy

canal at L3, L4 and L5 between the group with diagnosed stenosis (S) and the control group (K).

Discriminative analysis

Table 13. demonstrates the precision of classification. The cases collected in this group were unequivocally classified to the following groups: Stenosis at L3; Stenosis at L4; Stenosis at L5; No Stenosis. Classification is regarded as correct when a case is classified to a group corresponding with the one determined on the basis of diagnostic classification, otherwise the classification counts as incorrect. For the group of stenosis at L3 the percentage of correct

Tab. 13. Wyniki klasyfikacji

Tab. 13. Results of classification

	Odsetek poprawnych klasyfikacji Percentage of correct classifications	Liczba przypadków Number of cases			
		Stenoza L3 L3 stenosis	Stenoza L4 L4 stenosis	Stenoza L5 L5 stenosis	NORMA NORMAL
Stenoza L3 L3 stenosis	96.30	26	0	1	0
Stenoza L4 L4 stenosis	94.23	0	98	6	0
Stenoza L5 L5 stenosis	80.00	0	8	36	1
Norma Normal	100.00	0	0	0	42
RAZEM Total	92.66	26	106	43	43

mówimy o błędnej klasyfikacji. Dla grupy stenozy na poziomie L3 otrzymano 96,30% poprawnych klasyfikacji – 1 przypadek z grupy został zakwalifikowany jako stenoza L5. Na poziomie L4 – 94,23% – 6 przypadków z grupy zostało zakwalifikowanych jako stenoza L5. Na poziomie L5 – 80,00% poprawnych klasyfikacji – 8 przypadków zostało zakwalifikowanych jako stenoza L4, natomiast 1 przypadek jako norma. Łączna dokładność klasyfikacji wyniosła 92,66%. Klasyfikacje były istotne statystycznie przy $p<0,05$.

Opis przestrzeni dyskryminacyjnej

Dla każdego z badanych przypadków wyznaczamy wartości funkcji klasyfikacyjnych. Jeżeli wartości tych funkcji zaznaczymy w układzie współrzędnych XYZ to wyznaczymy w przestrzeni 3D położenie punktu będącego odpowiednikiem badanego przypadku. Umownie przestrzeń 3D nazywamy wtedy przestrzenią dyskryminacyjną.

Największe znaczenie dla jakości klasyfikacji odgrywały: wysokość kanału, szerokość kanału i pole powierzchni kanału. Wszystkie z wymienionych parametrów były istotne statystycznie ($p<0,05$).

DYSKUSJA

Pomiary morfologiczne kanału kręgowego w odcinku lędźwiowym były prowadzone od początku wprowadzenia do praktyki lekarskiej tej jednostki chorobowej jako strukturalnego zwężenia kanału kręgowego. Poznanie budowy kanału kręgowego miało istotne znaczenie dla zrozumienia mechanizmu powstawania stenozy. Trudności związane z oceną i etiopatogenezą wąskiego kanału kręgowego były przedmiotem badań grupy ekspertów zajmujących się chorobami kręgosłupa [1]. Pomiary kanału kręgowego początkowo były badane na preparatach anatomicznych [2,3] i zdjęciach rentgenowskich [4]. Konwencjonalne zdjęcia rentgenowskie nie dawały pełnego i właściwego obrazu kanału kręgowego. Informacje z tak przeprowadzonych pomiarów były niedokładne. Dopiero wprowadzenie tomografii komputerowej pozwoliło na dobry wgląd w kanał kręgowy, ponieważ obraz kanału kręgowego i jego wymiary w płaszczyźnie strzałkowej i poprzecznej można było dokładnie obliczyć [2,5,6,7,8,9]. Tomografia komputerowa w latach 80 dokładnie pokazywała strukturę kostną kanału kręgowego, natomiast widoczność tkanek miękkich w tym badaniu nie była dość wyraźna. Połączenia badania kontrastowego z TK (mielo-TK) dostarczyło więcej dokładnych informacji o kształcie worka oponowego i wymiarach jego powierzchni [5,7,10]. Bolender i Schonstrom [5] za-

classifications amounted to 96.30%, with 1 case classified as L5 stenosis. At L4, 94.23% of classifications were correct, with 6 cases classified as L5 stenosis. The percentage of correct classifications at L5 amounted to 80.00% with 8 cases classified as L4 stenosis and no stenosis diagnosed in 1 case. The total percentage of classification correctness amounted to 92.66% with the level of statistical significance at $p<0.05$.

Description of the discriminative space

Values of classification functions must be calculated for each case. Plotting these values in an XYZ coordinate system determines the location of the point corresponding with the case in a 3D space which is then conventionally referred to as the discriminative space.

The height, width and surface area of the spinal canal were most important for the quality of classification, with all of the above parameters demonstrating statistical significance ($p<0.05$).

DISCUSSION

Morphological measurements of the lumbar section of the spinal canal have been performed since the nosological entity of structural stenosis of the vertebral canal was introduced to medical practice. Understanding the structure of the vertebral canal was crucial for identification of the mechanisms of stenosis formation. Difficulties related to the assessment and etiopathogenesis of the stenotic spinal canal were studied by a group of experts in spinal diseases [1]. Measurements of the vertebral canal were initially conducted using anatomical specimens [2,3] and radiographs [4]. Conventional radiographic images, however, did not provide a complete and accurate image of the vertebral canal. Information obtained on the basis of such measurements was far from precise. It was the introduction of computed tomography that offered adequate insight into the spinal canal, as its dimensions in the sagittal and transverse plane could now be precisely calculated [2,5,6,7,8,9]. CT scans in the 1980s conveyed details of the bone structure of the spinal canal, but the visibility of soft tissues remained limited. The combination of myelography with the CT scan (myelo-CT) provided more detailed information concerning the shape of the dural sac and its surface dimensions [5,7,10]. Bolender and Schonstrom [5] used the diagnostic techniques of CT and myelo-CT in 24 patients under-

stosowali radiograficzne metody diagnostyczne TK i mielo-TK u 24 chorych, u których wykonywana była operacyjna dekomprezja centralnej stenozy. Wykonywane przez nich pomiary kanału kręgowego i kanału opony twardej za pomocą mielografii zwiększyły dokładność diagnostyczną. Oland i Hoff [10] przeprowadzili prospektywne badania komputerowe za pomocą mielo-TK uwzględniając kliniczne objawy bólowe. Poszukiwano związku pomiędzy wymiarami pola a nieoperowaną przepukliną jądra miażdżystego.

Pomiar powierzchni worka oponowego, chociaż możliwy do obliczenia, nie mógł być dokładny. Dopiero postępy w technice cyfrowej umożliwiającej automatyczne obliczenie zarówno pola powierzchni kanału kręgowego, jak i pola powierzchni worka oponowego pozwoliło na ustalenie ważnych szczegółów i zależności dotyczących patologii kostnego kanału kręgowego i struktur worka oponowego.

Autorzy niniejszej pracy skorzystali z osiągnięć techniki cyfrowej i mogli przeprowadzić dokładne pomiary w stosunku 1:1. Podobne badania retrospektywne opisał Zheng i wsp. [11] w 2006 r. Przeprowadzili oni pomiar dwuetapowo. W pierwszym etapie z otrzymanego cyfrowego filmu zeskanowywano znajdujące się na nim obrazy i w drugim etapie dokonywali cyfrowej analizy danych. Wykonano je u 50 chorych, u których wykonano mielografię komputerową celem lepszego uwidocznienia przekroju poprzecznego worka oponowego. Były to zatem badania inwazyjne. Natomiast nasza metoda wykorzystała postęp techniki cyfrowej. Na specjalnym stanowisku z nowoczesnym oprogramowaniem możliwe było uzyskanie dokładnych pomiarów kanału kręgowego, a przede wszystkim przekroju worka oponowego. Takich informacji w analizowanym piśmiennictwie nie było. Przeprowadzone przez nas badania były bardziej czułe i wiarygodne. Wykazały one, że w stenozie kanału wymiar strzałkowy jest zwężony ($<15\text{mm}$), natomiast wymiar międzynasadowy nie wykazuje znaczących odchyлеń. Przeprowadzone badania realizują praktycznie postęp, jaki się dokonał w badaniach naukowych za pomocą technologii cyfrowej.

Podobne badania stenozy kanału kręgowego przeprowadzili Sirvanci i wsp. [12]. Opublikowali w 2008 roku pracę dotyczącą stenozy lędźwiowej w obrazach rezonansu magnetycznego, które porównali ze stopniem niepełnosprawności. Zbadano 63 chorych dokonując pomiarów na 290 poziomach kręgosłupa. Według dostępnych programów komputerowych oceniali pole powierzchni opony twardej i pole powierzchni kanału kręgowego. Dodatkowo oceniano subiektywnie przez dwóch obserwatorów stenozę korenową i stenozę zuchyłkową. Pomiary pola opony twardej większe od 100mm^2 uznano za normę. Od

going surgical decompression of a central stenosis. Their myelographic measurements of the vertebral canal and the dural canal improved diagnostic accuracy. Oland and Hoff [10] conducted a prospective study based on computer myelo-CT data and taking into account clinical pain complaints. The researchers examined possible correlations between the surface area of the spinal canal and an untreated hernia of the nucleus pulposus.

Though calculable, the measurement of dural sac surface could not be precise. It was only due to advancements in digital technology that automatic calculation of both the surface area of the vertebral canal and the surface area of the dural sac enabled the identification of important details and correlations concerning pathologies of the bony vertebral canal and the structures of the dural sac.

The authors of this study took advantage of the achievements of digital technology to conduct precise one-to-one measurements. A similar retrospective study were described by Zheng et al. [11] in 2006. Their measurement procedure consisted of two stages: firstly, they scanned the images from a digital recording and subsequently conducted a digital analysis of the data. The study involved 50 patients in whom myelo-CT scans had been obtained to enhance the visibility of the transverse section of the dural sac. Thus, the technique used was invasive. The method used in the present study took advantage of the development of digital technology, using modern research equipment to obtain precise measurements of the vertebral canal and, even more importantly, the section of the dural sac. A review of the literature did not find comparable studies. Our study demonstrated a higher level of sensitivity and reliability, revealing that spinal canal stenosis is characterized by a narrowing of the sagittal dimension ($<15\text{mm}$), while the interepiphyseal dimension shows no significant deviations. This study actually reflects of the progress of scientific research that has been made possible thanks to the development of digital technology.

A similar study of spinal canal stenosis was performed by Sirvanci et al. [12] in 2008. They published a study of MR imaging in lumbar stenosis in relation to the degree of disability. A total of 290 measurements at different spine levels were obtained from 63 patients. The surface area of the dura mater and the spinal canal was assessed using available software. Moreover, subjective assessments of root stenosis and recess stenosis were carried out by two observers. Surface areas of the dura mater exceeding 100 mm^2 were classified as normal; moderate stenosis was diagnosed in cases between 76 and 100 mm^2 ; results below 76 mm^2 denoted severe stenosis. Our meas-

76-100mm² jako stenozę umiarkowaną, a mniejsze od 76mm² jako ciężką stenozę. Nasze pomiary stenozy lędźwiowej wykazały inne wartości. W naszych badaniach pole powierzchni kanału kręgowego w grupie kontrolnej wynosiło na poziomie: L3-277 mm²; L4-297mm², L5-386mm². Karamantas i wsp. [13] u 100 chorych z klinicznymi i potwierdzonymi w obrazach TK objawami stenozy lędźwiowej wykonywanych – tak jak w naszej pracy – na poziomach L3, L4, L5 podali, że najniższy wymiar strzałkowy wynosił poniżej 11,5mm i jest najbardziej stałym parametrem informującym o istniejącej stenozie. Korelował on ze wzrostem, wagą i wiekiem chorych. Piśmiennictwo z ostatnich lat dotyczących pomiarów morfometrycznych kręgosłupa nie jest zbyt obszerne i dotyczy różnych chorób i badań pomiarowych na innych poziomach kręgosłupa [14,15,16,17,18]. Alfonso i wsp. [14] opisując kształt trzonu kręgu L5 skupią się na szczegółowym poznaniu budowy nasady łuku. Badania te miały przybliżyć i ułatwić prawidłowe i zbieżne wkładanie śrub transpedicularnych. Santiago i wsp. [15] porównali dwie grupy pacjentów z bólami (119 osób) dolnego odcinka kręgosłupa i bez bółów (39 osób). Stwierdzili zależność dotyczącą kształtu kanału kręgowego i otworu korzeniowego. U pacjentów z bólami stwierdzono mniejszy wymiar przekroju poprzecznego kanału kręgowego i kanału korzeniowego. Zeng i wsp. [16] wykonywali badania pomiarowe nasad łuków kregów piersiowych u 120 dzieci pomiędzy 5 a 12 rokiem życia. Stwierdzili, że długość nasad łuków zmieniała się znacząco wraz z wiekiem. Badania te miały na celu lepsze poznanie jak wprowadzić śruby przeznasadowe podczas stabilizacji kręgosłupa. Jeong i wsp. [17] wykonywali rezonans magnetyczny u 15 chorych z achondroplazją celem morfometrycznej oceny stenozy. Badania wykazały, że jest różnica istotna statystycznie na różnych przekrojach lędźwiowego kanału kręgowego pomiędzy grupami pacjentów z bólami i bez bółów. Blackley i Plank [18] oceniali przekrój strzałkowy kręgosłupa szyjnego. Stwierdzili oni, że jest słaba korelacja pomiędzy wymiarem strzałkowym kanału kręgowego a stosunkiem wymiaru strzałkowego kanału do wymiaru strzałkowego trzonu kręgowego.

Opracowane programy stwarzają narzędzie badawcze za pomocą którego możemy odtworzyć anatomiczny kształt badanego odcinka kręgosłupa. Badania te wymagają doświadczenia i czasu i dlatego dalsze prace powinny być prowadzone w specjalnych centrach badawczych. Przyszłe analizy powinny się opierać na badaniach porównawczych, wielośrodkowych prowadzonych systematycznie w sposób ciągły jak również na obserwacjach długoterminnych obejmujących chorych leczonych zarówno operacyjnie, jak i nieoperacyjnie.

urements of lumbar stenosis revealed different results, with the surface area of the spinal canal in the control group amounting to 277 mm² at L3, 297 mm² at L4 and 386 mm² at L5. Karamantas et al. [13], in their study of 100 patients suffering from clinical symptoms of lumbar stenosis confirmed by CT scans obtained, as in our study, at L3, L4 and L5, reported that the minimum sagittal dimension was below 11.5 mm and constituted the most reliable parameter for diagnosing stenosis, correlating with the patients' height, weight and age. More recent works concerning morphometric measurements of the spine cannot be described as extensive and relates to various diseases and measurements at other spine levels [14,15, 16,17,18]. Alfonso et al. [14], describing the shape of the L5 vertebral body, focus on exploring the exact structure of the vertebral pedicle with the intention of explaining and facilitating correct and convergent application of transpedicular screws. Santiago et al. [15] compared two groups of patients (119 persons) suffering from lower back pain and those not reporting any pain (39 persons). They found a correlation between the shape of the vertebral canal and the root canal orifice, where patients suffering from low back pain had smaller transverse sections of the vertebral canal and the root canal orifice. Zeng et al. [16] measured thoracic vertebral pedicles in 120 children aged 5-12 and concluded that the length of pedicles changed significantly with age. Their study was aimed at better understanding optimal transpedicular screw application during spine stabilization procedures. Jeong et al. [17] conducted MRI studies in 15 patients suffering from achondroplasia for a morphometric assessment of stenosis. The results of their study revealed a statistically significant difference in various sections of the lumbar spinal canal between patients suffering from pain and those not reporting pain. Blackley and Plank [18] assessed sagittal sections of the cervical spine to conclude that there is a slight correlation between the sagittal dimension of the spinal canal and the ratio of the sagittal dimension of the canal and the sagittal dimension of the vertebral body.

The programs developed by us constitute a research tool for reconstruction of the anatomical shape of the examined section of the spine. Such research requires experience and time; future studies, therefore, ought to be performed in specialist research centers. Analyses should be based on comparative multi-center studies conducted systematically and continuously as well as longitudinal observations of patients subjected to both surgical and medical treatment.

WNIOSKI

- Przeprowadzone badania TK wykorzystujące zdobycze nowoczesnej techniki cyfrowej znacznie poszerzają naszą wiedzę dotyczącą anatomii prawidłowej, jak i anatomii patologicznej kręgosłupa.
- W przeprowadzonych badaniach w przypadku stwierdzonej klinicznie stenozy średni wymiar strzałkowy wynosił na poziomie: L3-13,35mm, L4-14,14mm, L5-15,27mm. Średni wymiar międzynasadowy wynosił na poziomie: L3-23,62mm, L4-24,62mm, L5-31,54mm. Średnie pole powierzchni kanału kręgowego wynosiło na poziomie: L3-244,39mm², L4-267,67mm², L5-301,32mm².
- Analiza dyskryminacyjna pozwoliła na dokonanie klasyfikacji badanych przypadków ze względu na poziom wystąpienia stenozy. Dokładność klasyfikacji wynosiła 92,66%.
- Zaproponowane wskaźniki dotyczące przekroju strzałkowego, poprzecznego i pola powierzchni przekroju kanału kręgowego mogą być przydatne w ocenie zmian ilościowych w tej technice badawczej.

Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych nr 2 P05C 041 29 pt. „Ocena zmian w stawach międzykręgowych w obrazie TK 2D, TK 3D jako przyczyny stenozy lędźwiowej oraz odległe wyniki różnych sposobów operacyjnego leczenia stenozy”, który uzyskał pozytywną opinię Komisji Biotycznej C. M. K. P. w dniu 1.12.2005 r.

PIŚMIENIĘCTWO / REFERENCES

- Arnoldi CC, Brodsky AC, Cauchoux J, i wsp. Lumbar spinal stenosis and nerve root entrapment syndromes. Definition and classification. Clin. Orthop and Relat. Res. 1976;115:4-5
- Eisenstein S. Lumbar vertebral canal morphometry computerized tomography in spinal stenosis. Spine 1983;82:187-191
- Eisenstein S. The trefoil configuration of the lumbar vertebral canal. A study of south skeletal material. J. Bone Joint Surg Br. 1980;62-B(1):73-77
- Weisz GM, Lee P. Spinal canal stenosis. Concept of spinal reserve capacity; radiologic measurement and clinical applications. Clin. Orthop. 1983;179:134-139
- Bolender NF, Schonstrom M, Sprengel DM. Role of computed tomography and myelography in the diagnosis of central spinal stenosis. J. Bone Joint Surg. 1985;67(A):240-246
- Malawski S. Ciasnota kanału kręgosłupa lędźwiowego. Chir. Narz. Ruchu i Ortop. Pol. 1977;42:517-521
- Schonstrom NS, Bolender NF, Sprengel DM. The pathomorphology of spinal stenosis as seen on CT scans of the lumbar spine. Spine 1985;10:806-811
- Carrera GF, Haughton VM, Syverstsen A, Williams AL. Computed tomography of the lumbar facet joints. Radiology 1980;134:145-148
- Gouzien P, Cazalbou C, Boyer B, Darodes De Tilly P, Guenec Y, Senecail B. Measurements of the normal spinal canal by computed tomography. Surg. Radiol. Anat. 1990;12:143-148
- Oland G, Hoff TG. Intrapinal cross sectional area measured of myelography-computed tomography. Spine 1977;22:1805-1810
- Zheng F, Farmer JC, Sandhu HS, O'Leary PF. A novel method for the quantitative evaluation of lumbar spinal stenosis. Hospital for Special Surgery Journal 2006;2:136-140
- Sirvanci M, Bahtia M, Ganiyusufoglu KA, Duran C, Tezel T, Ozturk M, Aydogan M, Hanzanoglu A. Degenerative lumbar spine stenosis: correlation with Oswestry disability index and MR imaging. Eur. Spine J. 2008;17:679-685
- Karantanas AH, Zibis AH, Papaliaga M, Georgiou E, Rousogiannis S. Dimensions of the lumbar spine canal: variations and correlations with somatometric parameters using CT. Eur. Radiology 1998;8:1581-1586

CONCLUSIONS

- This CT-based study utilizing the potential of modern digital technology has considerably improved our knowledge concerning the normal and pathological anatomy of the spine.
- The mean sagittal dimension of stenotic spinal canals was 13.35 mm, 14.14 mm and 15.27 mm at L3, L4 and L5, respectively. The mean inter-epiphyseal dimension was 23.62 mm at L3, 24.62 mm at L4 and 31.54 mm at L5. The mean surface area of the spinal canal was 244.39 mm², 267.67 mm², and 301.32 mm² at L3, L4 and L5, respectively
- Discriminative analysis enabled a classification of the cases according to the level of stenosis. The accuracy of classification was 92.66%.
- The proposed indicators of the sagittal and transverse dimensions and surface area of the spinal canal may be useful in assessing quantitative changes with this investigational technique.

This study was carried out within Committee for Scientific Research Project No. 2 P05C 041 29, entitled "Assessment of changes in the intervertebral joints on 2D CT and 3D CT images as the cause of lumbar stenosis and long-term outcomes of different surgical approaches to the treatment of stenosis", which was approved by the Ethical Review Board of the Centre for Post-Graduate Medical Education on 1 Dec 2005.

14. Alfonso M, Palacio P, Bastarrika G, Villas C. Does the shape of the L5 vertebral body depend on the height of CT slices in the pedicle? Evaluation of the shape of the L5 vertebral body with a multicut CT scan. Spine 2008;33(1):1-5
15. Santiago FR, Milena GL, Herrera RO, Romero PG. Morphometry of the lower lumbar vertebrae in patients with and without low back pain. European Spine Journal 2001;10(3):228-233
16. Zheng C, Huang Q, Hu Y, Wang X, Chen W. Computed tomographic morphometry of thoracic pedicles: safety pedicle parameter measurement of the Chinese immature thoracic spine. International Orthopaedics 2008
17. Jeong ST, Song HR, Keny SM, Telang SS, Suh SW, Hong SJ. MRI study of the lumbar spine in achondroplasia. A morphometric analysis for the evaluation of stenosis of the canal. J Bone Joint Surg Br 2006;88(9):1192-1196
18. Blackley HR, Plank LD. The reliability of ratios of anatomical measurements. J Bone Joint Surg Br 1999;81:110-112