

Związek dysfunkcji wzrokowych z wybranymi zaburzeniami postawy ciała



Mgr ZUZANNA KOSOBUCKA^{1,2,3}, mgr MARLENA BOBROWSKA^{1,2}, dr hab. JACEK PNIEWSKI¹

¹ Akademię Centrum Kształcenia Optometrystów, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, ul. Pasteura 5

² Gabinet optometryczno-ortoptyczny „Comfort Vision”, Warszawa, Aleja Wyzwolenia 13

³ Salon optyczny „Optyk Wojciech Sala”, Warszawa, ul. Mickiewicza 37

Wstęp

Nauki medyczne coraz częściej stosują holistyczne podejście do leczenia pacjenta. Zakłada ono, że organizm człowieka jest układem całościowym i należy leczyć cały organizm, nie ograniczając się do konkretnego narządu. Zgodnie z tym podejściem, przyczyny danego zaburzenia można szukać nawet w daleko oddalonych obszarach ciała. Mięśnie szkieletowe odgrywają w tym kluczową rolę ze względu na anatomiczny „łańcuch”, który tworzą, spajając szkielet człowieka. Powstanie napięcia w jednej części tego łańcucha prowadzi do mechanizmów kompensacyjnych reszty układu. Przykładem takiego mechanizmu jest wyrównawcze ustawienie głowy, powstające w wyniku kompensacji zeza, co sugeruje wpływ zaburzeń wzrokowych na jakość przyjmowanej postawy ciała [1].

Według badań przeprowadzonych na młodzieży z niedowidzeniem, ponad połowa osób niedowidzących przyjmuje nieprawidłową lub złą postawę ciała, a nieprawidłowości można spodziewać się głównie w obrębie wielkości fizjologicznych krzywizn kręgosłupa [2]. Z innych badań, w których porównano postawę ciała dzieci i młodzieży z niedowidzeniem w stosunku do postawy ich rówieśników z prawidłowym widzeniem, również wynika, że narząd wzroku pełni ważną rolę w kształtowaniu postawy ciała [3]. Autor pracy podaje, że zaburzenia widzenia negatywnie wpływają na niemal każdy element postawy ciała.

Zagadnienia teoretyczne

Postawa ciała

Przed badaniem istnienia korelacji zaburzeń wzrokowych z zaburzeniami postawy ciała, należy w pierwszej kolejności zastanowić się, czym jest postawa ciała. Istnieje wiele jej definicji. Według profesora

ra Kasperczyka postawa ciała to „indywidualne ukształtowanie ciała i położenie poszczególnych odcinków tułowia oraz nóg w pozycji stojącej”. Jest to nawyk ruchowy, który człowiek jest w stanie poprawić poprzez napięcie odpowiednich mięśni [4].



Ryc. 1. Fizjologiczne krzywizny kręgosłupa – widok boczny [5]

Prawidłowa postawa ciała to taka, która występuje wystarczająco często w wybranej grupie wiekowej o danej płci, która stanowi wzór charakterystyczny dla osób zdrowych o prawidłowym rozwoju psychofizycznym. Prawidłowa postawa ciała charakteryzuje się m.in. prostym ustawie-

niem głowy, fizjologicznym wygięciem kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej i prostym wygięciem kręgosłupa w płaszczyźnie czołowej, prostymi nogami oraz delikatnym wysunięciem klatki piersiowej do przodu [4] (patrz także ryc. 1).

Wady postawy ciała w płaszczyźnie strzałkowej polegają na pogłębieniu lub zmniejszeniu fizjologicznych wygięć kręgosłupa, natomiast wadą w płaszczyźnie czołowej jest boczne skrzywienie kręgosłupa, zwane inaczej skoliozą [4].

Czynniki mogące być źródłem wad postawy ciała można ogólnie podzielić na trzy grupy:

- czynniki środowiskowe – spowodowane głównie siedzącym trybem życia,
- czynniki morfologiczne – spowodowane zaburzeniem napięcia mięśni,
- czynniki fizjologiczne – spowodowane wadami słuchu, dysfunkcjami wzrokowymi lub zaburzeniami czucia głębokiego [4].

Metody oceny postawy ciała

Pierwsze próby oceny postawy ciała przypadają na drugą połowę XIX wieku. Polegały one na klasyfikacji postawy ciała badanego do jednej z następujących sylwetek zaproponowanych w 1889 roku przez ortopedę Staffela: postawa normalna, plecy okrągłe, plecy płaskie, plecy wklęsłe, plecy okrągło-wklęsłe [6]. Typologia Staffela stała się inspiracją do powstania wielu innych, które jednak często bazowały jedynie na wzrokowym porównaniu sylwetki badanego z gotowym schematem [7,8]. Chcąc poddać bardziej wnikliwej ocenie postawę ciała badanego, zaproponowano wzrokową analizę poszczególnych elementów postawy w sposób opisowy i punktowy. Pierwszy z nich polegał na opisie poszczególnych elementów sylwetki, a jego przykładem jest opracowana przez Bernarda Klappa w XX wieku metoda, obejmująca opis 13 elementów sylwetki [9]. Metoda wydawała się bardzo dokładna, jednak wyniki uzyskane przez jednego badacza były mało spójne z opisami innych specjalistów [4]. Metoda punktowania polegała na przyznawaniu punktów elementom sylwetki w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej, a o jakości postawy świadczyła suma uzyskanych punktów. Kolejnym już nowocześniejszym sposobem oceny postawy ciała są metody fotograficzne lub fotogrametryczne. Zdjęcie sylwetki osoby badanej, wykonane na tle siatki, dostarcza informacji na temat symetrii i długości poszczególnych elementów ciała. Metoda szybko przestała wystarczać, ponieważ zdjęcie dostarczało informacji o postawie ciała tylko w momencie powstania fotografii i było płaskim obrazem. Dużym ułatwieniem dla posturologów stało się mierzenie elementów postawy ciała za pomocą specjalistycznych urządzeń pomiarowych, dających wyniki w jednostkach długości lub kątowych. Na uwagę zasługują m.in. wynalezione w 1956 roku sferodorsiometr i kifolordozometr Wolańskiego, które pozwalają na ilościową ocenę krzywizn kręgosłupa [10,11]. Najnowocześniejszymi technikami oceny postawy ciała są te pozwalające na otrzymanie trójwymiarowego modelu sylwetki ciała [4]. Jedną z nich jest bezdotykowa analiza postawy ciała za pomocą urządzenia Diers formetric III 4D, które wykorzystano do badań w dalszej części pracy.

Badania własne

Cel badań

Głównym celem przeprowadzonych badań było zbadanie, czy istnieje związek pomiędzy zaburzeniami wzrokowymi a wybranymi zaburzeniami postawy ciała i – jeśli taki związek istnieje – ustalenie, które parametry ze sobą korelują. Dodatkowo sprawdzono, czy zastosowanie właściwej korekcji wzroku wpływa na jakość przyjmowanej postawy. Postawiono następujące hipotezy badawcze:

1. Istnieje korelacja pomiędzy zaburzeniami wzrokowymi i zaburzeniami postawy ciała.
2. Zastosowanie korekcji wady wzroku poprawia parametry postawy ciała.

Charakterystyka grupy badawczej

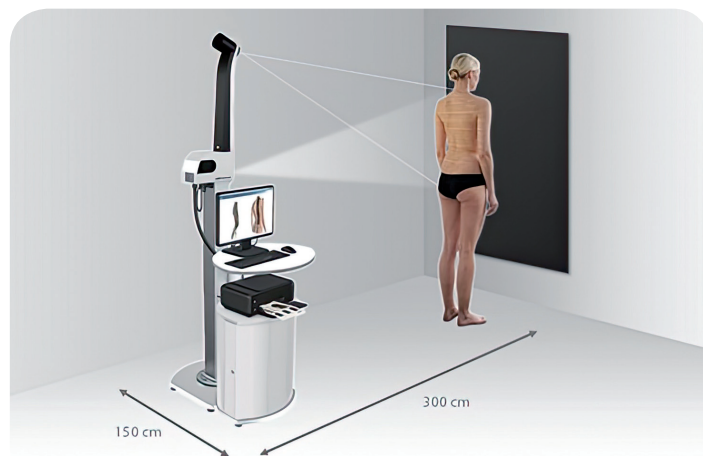
Badaniami objęto sześciu studentów i 15 studentek Uniwersytetu Warszawskiego oraz Akademii Wychowania Fizycznego im. Józefa Piłsudskiego w Warszawie, w wieku od 22 do 28 lat.

Badanie optometryczne

Podczas pierwszego spotkania z pacjentem wykonywano kompleksowe badanie optometryczne. Każde badanie rozpoczynał szczegółowy wywiad optometryczny. Po zebraniu wywiadzie mierzono ostrość wzroku w aktualnej korekcji i wykonywano przedmiotowy pomiar refrakcji za pomocą autorefraktometru Nidek ARK-510A. Następnie za foropterem, podmiotowo, wyznaczano najlepszą korekcję dla obojga oczu. Wyznaczano oko dominujące do dali i bliży za pomocą testu Milesa. Następnie analizie poddawano śledzące i sakkadowe ruchy oczu, posługując się testem okulomotorycznym NSUCO [12]. Kolejnym etapem badania była ocena akomodacji. Sprawność akomodacji wyznaczano za pomocą flippera z soczewkami o mocach $\pm 2,00$ dioptrie, jednoocznie oraz obuocznie. Amplitudę akomodacji wyznaczano, mierząc punkt bliski akomodacji metodą *push-up*. Odpowiedź akomodacji mierzono przedmiotowo metodą skiaskopii dynamicznej MEM. Forie: horyzontalną oraz wertykalną, do dali i bliży, mierzono za foropterem, natomiast zakresy wergencji fuzyjnej mierzone były za pomocą listew pryzmatycznych. Ostatnią częścią badania było sprawdzenie widzenia przestrzennego z bliska za pomocą stereotestu Muchy z użyciem okularów polaryzacyjnych.

Pomiar postawy ciała

Do pomiaru postawy ciała wykorzystano urządzenie Diers formetric III 4D (ryc. 2), które na podstawie rejestracji wideo pleców pacjenta tworzy trójwymiarowy model powierzchni pleców, wykorzystując metodę stereografii rastrowej [13]. Metoda ta oparta jest na zjawisku mory świetlnej. Zniekształcenia prążków wyświetlanych na plecach pacjenta służą do wyznaczenia profilu powierzchni. Urządzenie automatycznie wykrywa punkty orientacyjne, co umożliwia bezdotykową, precyzyjną, obiektywną analizę sylwetki ciała. Ponadto może być ono wykorzystywane do diagnostyki i kontroli progresji wad postawy.



Ryc. 2. Schemat badania z użyciem skanera Diers formetric III 4D [13]

Pacjentom normowzrocznym postawę mierzono trzy razy w 30-sekundowych odstępach. Osoby stosujące korekcję wzroku badane były sześć

razy – trzy pomiary wykonywane były w okularach i trzy bez nich. Każda rejestracja, której wynikiem był precyzyjny model kręgosłupa i wielkości liczbowe określające parametry postawy ciała, trwała sześć sekund.

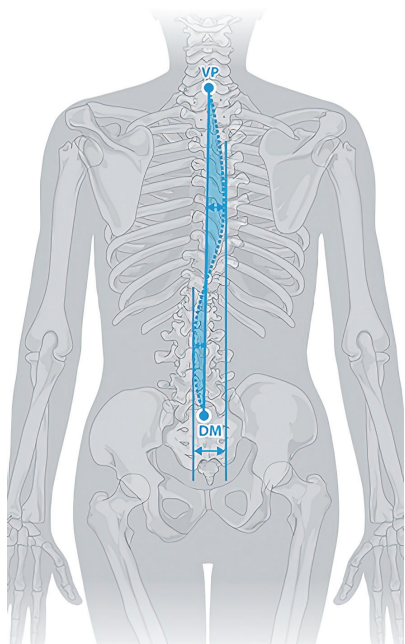
Wyniki

Otrzymane wartości liczbowe, opisujące funkcje wzrokowe, zestawiono z parametrami postawy ciała i zbadano korelacje z użyciem programu Statsoft Statistica. Tabela 1 przedstawia powiązane parametry, współczynniki korelacji Spearmana oraz poziomy istotności p w grupie liczącej 21 osób. Tabela zawiera tylko te korelacje, których poziom istotności p był mniejszy niż 0,05.

Skorelowane parametry	R Spearmana	t(N-2)	p
Szczyt kifozy KA (VPDM) [mm]	0,48	2,37	0,029
Zerwanie fuzji w kierunku BN do dali [Δ]			
Szczyt kifozy KA (VPDM) [mm]	0,5	2,54	0,02
Odtworzenie fuzji w kierunku BN do dali [Δ]			
Szczyt lordozy LA (VPDM) [mm]	-0,44	-2,15	0,045
Odtworzenie fuzji w kierunku BS do bliży [Δ]			
Punkt przegięcia ILS [mm]	0,45	2,17	0,043
Zerwanie fuzji w kierunku BN do dali [Δ]			
Kąt kifozy ICT-ITL (maks) [°]	-0,51	-2,58	0,018
Odtworzenie fuzji w kierunku BN do dali [Δ]			
Kąt lordozy ITL-ILS (maks) [°]	-0,56	-2,95	0,008
Foria horyzontalna do dali [Δ]			
Kąt lordozy ITL-ILS (maks) [°]	-0,49	-2,42	0,026
Zerwanie fuzji w kierunku BS do dali [Δ]			
Kąt lordozy ITL-ILS (maks) [°]	-0,49	-2,42	0,026
Odtworzenie fuzji w kierunku BS do dali [Δ]			
Szczyt lordozy LA (VPDM) [mm]	-0,51	-2,57	0,019
Wielkość astygmatyzmu w OP [dioptria]			
Odchylenie boczne VPDM (rms) [mm]	0,64	3,62	0,002
Wielkość astygmatyzmu w OP [dioptria]			
Odchylenie boczne VPDM (rms) [mm]	0,53	2,74	0,013
Wielkość astygmatyzmu w OL [dioptria]			
Punkt przegięcia ILS [mm]	-0,52	-2,66	0,015
Wielkość astygmatyzmu w OP [dioptria]			
Punkt przegięcia ILS [mm]	-0,53	-2,73	0,013
Wielkość astygmatyzmu w OL [dioptria]			

Tab. 1. Współczynniki korelacji Spearmana wybranych parametrów

Według przeprowadzonej analizy, wśród elementów postawy i cech wzrokowych najsilniejszy związek występuje pomiędzy wartością odchylenia bocznego a wielkością astygmatyzmu.



Ryc. 3. Parametry postawy ciała – odchylenie boczne [13]

Odchylenie boczne (ryc. 3) to średnie odchylenie kwadratowe linii środkowej kręgosłupa od linii łączącej kręgi siódmy (VP) z punktem środkowym między dołeczkami lędźwiowymi (DM) w płaszczyźnie czołowej. Wartość dodatnia parametru wskazuje na odchylenie boczne w prawo, a ujemna wartość wskaźnika świadczy o odchyleniu w lewą stronę. Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez

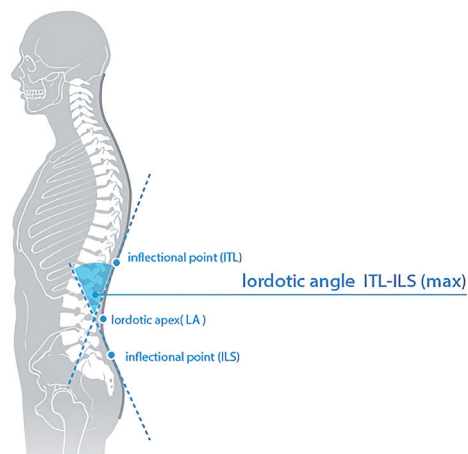
dr. Harzmann odchylenie boczne jest jednym z trzech parametrów różnicujących skoliozę i postawę skoliotyczną. O skoliozie mówimy, gdy odchylenie boczne ma wartość większą niż 5 mm, rotacja powierzchni (maksymalna rotacja powierzchni na linii symetrii) przekracza 5°, a skośność miednicy (różnica w wysokościach dołeczków lędźwiowych w przekroju poprzecznym) jest mniejsza niż 5 mm. Postawę skoliotyczną charakteryzuje odchylenie boczne mniejsze niż 5 mm, rotacja powierzchni mniejsza niż 5° i skośność miednicy przekraczająca 5 mm [14].

Wśród badanych z odchyleniem bocznym powyżej 5 mm 85,71% badanych ma astygmatyzm w jednym lub obu oczach. Z kolei u osób z odchyleniem bocznym mniejszym niż 5 mm, astygmatyzm występuje u 35,71% badanych. Podobna zależność występuje w grupie osób ze skośnością miednicy większą niż 5 mm, co również jest kryterium wady postawy. 75% osób ze skośnością miednicy powyżej 5 mm ma astygmatyzm w co najmniej jednym oku. W grupie osób ze skośnością miednicy poniżej 5 mm astygmatyzm występuje u 38,46% badanych. U wszystkich osób z rotacją powierzchni przekraczającą 5 mm występuje astygmatyzm w przynajmniej jednym oku. Powyższe dane zestawiono w tabeli 2.

		Liczba osób z astygmatyzmem w co najmniej jednym oku	Liczba osób bez astygmatyzmu
		11 (52%)	10 (48%)
Odchylenie boczne [mm]	< 5	5 (36%)	9 (64%)
	> 5	6 (86%)	1 (14%)
Skośność miednicy [mm]	< 5	5 (38%)	8 (62%)
	> 5	6 (75%)	2 (25%)
Rotacja powierzchni [°]	< 5	9 (47%)	10 (53%)
	> 5	2 (100%)	0 (0%)

Tab. 2. Kryteria wady postawy a występowanie astygmatyzmu

Innymi parametrami wzrokowymi, które wykazały istotne statystycznie korelacje z wielkościami opisującymi postawę ciała są forie i zakresy fuzyjne. Wzrostowi wartości egzoforii towarzyszy coraz większy kąt lordozy (ryc. 4). Kąt lordozy (ITL-ILS) jest to maksymalny kąt pomiędzy styczną do punktu najwyższego wychylenia powierzchni do tyłu pomiędzy szczytem kifozy a szczytem lordozy (ITL) a styczną do punktu najwyższego wychylenia powierzchni do przodu między szczytem lordozy a krzyżem (ILS). War-



Ryc. 4. Parametry postawy ciała – kąt lordozy [13]

tości normalywne kąta lordozy według dr. Harzmann kształtują się w zakresie od 38 do 42° [14]. Tabela 3 przedstawia podział badanych ze względu na kierunek forii horyzontalnej do dali i wielkość kąta lordozy.

	Kąt lordozy < 38°	Kąt lordozy > 42°
Liczba osób z ortoforią do dali	1 (20%)	1 (7,14%)
Liczba osób z esofoorią do dali	3 (60%)	3 (21,43%)
Liczba osób z exofoorią do dali	1 (20%)	10 (71,43%)

Tab. 3. Podział badanych ze względu na wielkość kąta lordozy i kierunek forii do dali

Wartościami silnie związanymi z wielkością forii są zakresy fuzyjne, które również powiązane są z wielkościami opisującymi fizjologiczne krzywizny kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej. U osób z szybszym zerwaniem i późniejszym odtworzeniem fuzji w dywergencji występuje na ogół większy kąt kifozy. Odwrotne wyniki otrzymano w przypadku zerwania i odtworzenia fuzji w kierunku konwergencji. Wraz ze wzrostem wielkości kąta lordozy oczekuje się coraz mniejszych wartości zerwania i odtworzenia fuzji w kierunku konwergencji.

Wpływ korekcji wzroku na postawę ciała

U osób stosujących korekcję wzroku (N = 8) obliczono różnicę w wielkości wybranych parametrów charakteryzujących postawę ciała w zależności od obecności okularów. Zastosowanie korekcji wzroku nie wprowadziło istotnych statystycznie zmian w postawie ciała badanych w czasie pięciominutowego badania. Dodatkowej analizie poddano wyniki pacjenta stosującego na stałe korekcję pryzmatyczną o wielkości 3 Δ BD OP, u którego bez okularów występuje wyrównawcze ustawienie głowy. W tym przypadku zaobserwowano duże zmiany w niemal każdym parametrze opisującym postawę ciała. Wyniki analizy danych tego pacjenta przedstawiono w tabeli 4.

Parametr opisujący postawę ciała	Pomiar w korekcji wady wzroku	Pomiar bez korekcji wady wzroku
Odchylenie od pionu VP-DM [mm]	-2,50	13,00
Skośność miednicy DL-DR [mm]	3,00	3,00
Skręcenie miednicy DL-DR [°]	-0,54	-2,85
Punkt przegięcia ICT [mm]	7,71	9,26
Szczyt kifozy KA (VPDM) [mm]	-184,66	-182,89
Punkt przegięcia ITL [mm]	-300,71	-300,48
Szczyt lordozy LA (VPDM) [mm]	-439,24	-436,94
Punkt przegięcia ILS [mm]	-509,06	-502,52
Kąt kifozy ICT-ITL (maks) [°]	57,22	63,95
Kąt lordozy ITL-ILS (maks) [°]	50,59	51,06
Rotacja powierzchni (rms) [°]	3,26	4,56
Odchylenie boczne VPDM (rms) [mm]	2,38	3,10

Tab. 4. Porównanie parametrów postawy ciała w zależności od stosowania korekcji wzroku u pacjenta noszącego na stałe korekcję pryzmatyczną

Wybrane wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że istnieją umiarkowane korelacje pomiędzy problemami wzrokowymi a zaburzeniami postawy ciała, głównie w sferze widzenia obuocznego. Istotny wpływ na postawę ciała ma sama wada wzroku, zaś nie wykazano istotnych statystycznie zależności między wielkościami opisującymi akomodację (sprawność akomodacji, punkt bliski akomodacji i odpowiedź akomodacji) a cechami postawy ciała. Wśród elementów postawy ciała, które w niniejszym badaniu wykazały związek między parametrami wzrokowymi, wyróżnia się głównie parametry opisujące fizjologiczne krzywizny w płaszczy-

nie strzałkowej kręgosłupa, ustawienie miednicy i odchylenie boczne. Wraz ze wzrostem kąta lordozy w grupie badanych obserwowane jest coraz bardziej rozbieżne ustawienie oczu i co za tym idzie – węższe zakresy fuzyjne w kierunku konwergencji. Z kolei zwiększony kąt kifozy wiąże się z późniejszym odtworzeniem fuzji w kierunku dywergencji, co obserwowane jest w przypadku ezoforii. Związek wielkości astygmatyzmu z odchyleniem bocznym jest najsilniejszą z zaobserwowanych korelacji. Im większy astygmatyzm, tym wyższa wartość odchylenia bocznego wśród badanych. W przypadku związku astygmatyzmu z parametrami postawy ciała, duże znaczenie ma również skośność miednicy, której wielkość powyżej 5 mm wiąże się z występowaniem astygmatyzmu u 75% badanych. Korzystając z wartości normatywnych opisanych przez Harzmana [14] i odnosząc je do wyników badania, można stwierdzić, że u osób z astygmatyzmem może częściej występować skolioza lub postawa skoliozytyczna.

Zastosowanie korekcji wzroku nie wprowadza istotnych zmian w postawie ciała w badanej grupie, choć trzeba wziąć pod uwagę, że zastosowanie korekcji może wymagać dłuższego czasu adaptacji niż możliwy w czasie pojedynczego badania. Wyjątek stanowi osoba stosująca na stałe korekcję pryzmatyczną, u której brak korekcji negatywnie wpływa na niemal każdy parametr postawy ciała.

Wśród badanych znalazła się tylko jedna osoba stosująca okulary z pryzmatem, więc ze względu na zbyt małą grupę badawczą nie można stwierdzić, że w przypadku zdekompensowanej heteroforii korekcja pryzmatyczna poprawia postawę ciała. Warto byłoby wykonać podobne badania na większej grupie osób z zaburzeniami widzenia obuocznego, żeby ocenić realny wpływ korekcji pryzmatycznej na przyjmowaną postawę ciała.

Podsumowanie

Poznanie i zrozumienie zależności pomiędzy układem wzrokowym i posturalnym może przynieść wartość w rozwiązywaniu problemów pacjentów zgłaszających się do gabinetów optometrycznych i rehabilitacyjnych. Można przypuszczać, że jeżeli zaburzenia postawy ciała badanego powstały na skutek problemów wzrokowych, zastosowanie odpowiedniej korekcji wzroku lub wprowadzenie terapii widzenia mogłoby zmniejszyć lub usunąć problem związany z postawą ciała i odwrotnie. Powyższe badania pokazują, że ważne jest holistyczne podejście do leczenia pacjenta i dobra współpraca interdyscyplinarna optometrystów z innymi specjalistami.

Piśmiennictwo

1. K. Krzystkova i in. *Choroba zezowa rozpoznawanie i leczenie*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 1997, s. 82–134
2. K. Barczyk, T. Skolimowski. Postawa ciała osób niedowidzących. *Fizjoterapia* 1999; 15–17
3. P. Żychowicz. Postawa ciała dzieci i młodzieży z uszkodzeniem narządu wzroku. *Problemy higieny epidemiologicznej* 2008; 89 (1): 67–70
4. T. Kasperczyk. *Wady postawy ciała, diagnostyka i leczenie*. Kraków 1994, s. 9–119
5. <https://falmed.pl/skolioza-nastepstwa-i-wady-wspolistniejace/> (dostęp: 13.01.2023)
6. F. Staffel. *Die menschlichen Haltungstypen und ihre Beziehungen zu den Rückgratverkrümmungen*. Wiesbaden 1889
7. K. Satoh i in. Clinical features of spinal osteoporosis: spinal deformity and pertinent back pain. *Contemporary Orthopaedics* 1988; 16: 23–30
8. I. Malicka i in. Body posture of women after breast cancer treatment. *Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja* 2010; 12(4): 353–361
9. B. Klapp. The crawling method according to Klapp (Das Klapp'sche Kriechverfahren). *Georg Thieme DM* 1974; 12, 80
10. N. Wolański. Sferodorsimetr – własnego pomysłu przyrząd do dokonywania przestrzennych pomiarów kręgosłupa. *Zeszyt Nauk UJ Zoologia* 1956; 1: 241–257
11. N. Wolański. Kifolordozometr – prosty przyrząd do pomiarów krzywizn kręgosłupa. *Kultura Fizyczna* 1957; 12: 947–953
12. W.C. Maples. *NSUCO oculomotor test*. Optometric Extension Program, Santa Ana, CA, 1995
13. DIERS, <https://diers.eu/en/products/integrated-solutions/diers-4d-posture-lab/> (dostęp: 13.01.2023)
14. H. Harzmann. Methode und Klinische Einsatzmöglichkeiten der dreidimensionalen Rückenoberflächenvermessung mit der Videorasterstereografie (VRS). *Individuelle Gesundheitsleistungen (IGEL) in der Orthopädie* 2001: 81–104

Opracowanie na podstawie pracy magisterskiej Zuzanny Kosobuckiej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, opiekun: mgr Marlena Bobrowska, promotor: dr hab. Jacek Pniowski.