

STUDIA I MONOGRAFIE
AKADEMII WYCHOWANIA FIZYCZNEGO WE WROCŁAWIU

NR 97

Małgorzata Sobera

CHARAKTERYSTYKA PROCESU
UTRZYMYWANIA RÓWNOWAGI CIAŁA
U DZIECI W WIEKU 2–7 LAT



Wrocław 2010

KOMITET WYDAWNICZY

Tadeusz Bober (przewodniczący), Bogusława Idzik (sekretarz), Artur Jaskólski
Lesław Kulmatycki, Zbigniew Naglak, Krystyna Rożek-Piechura
Alicja Rutkowska-Kucharska, Marek Woźniewski

RECENZENCI

Michał Kuczyński
Elżbieta Prętkiewicz-Abacjew

REDAKTOR

Anna Miecznikowska

PROJEKT OKŁADKI

Agnieszka Nyklas

KOREKTA

Dorota Sideropulu

REDAKTOR TECHNICZNY

Beata Irzykowska

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2009
jako projekt badawczy.

© Copyright by Wydawnictwo AWF Wrocław, 2010

ISSN 0239-6009

ISBN 978-83-89156-00-6

Wydawnictwo Akademii Wychowania Fizycznego we Wrocławiu
51-684 Wrocław, ul. Adama Mickiewicza 98
www.awf.wroc.pl/wydawnictwo
Wydanie I

Spis treści

Od Autora	5
Wykaz skrótów	7
1. Wprowadzenie	9
1.1. Pionizacja ciała dziecka	12
1.2. Rozwój kontroli posturalnej dziecka	16
1.3. Problemy techniczne związane z badaniami równowagi u dzieci	20
2. Cel badań, hipotezy i pytania badawcze	22
2.1. Uzasadnienie wyboru tematu	22
2.2. Cel badań	23
2.3. Hipotezy i pytania badawcze	23
3. Metody badania i analizy danych	26
3.1. Materiał badawczy	26
3.2. Organizacja i przebieg badania	27
3.3. Metoda badania i procedury statystyczne	28
3.3.1. Aparatura pomiarowa	28
3.3.2. Wskaźniki stabilności ciała	31
3.3.3. Sposoby wyznaczania wskaźników stabilności ciała	31
3.3.4. Metoda analizy powtarzalności procesu utrzymywania równowagi	34
3.3.5. Metoda określenia asymetryczności funkcji podparcia kończyn dolnych	37
3.3.6. Metody statystycznego opracowania wyników	37
3.3.7. Model statystyczny szacowania wieku stabilności posturalnej	38
4. Wyniki badań	40
4.1. Zmiany wskaźników stabilności ciała a wiek metrykalny dzieci	40
4.1.1. Zakres przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże	40
4.1.2. Zmienność przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże	42
4.1.3. Pole powierzchni oscylacji punktu nacisku stóp na podłoże	44
4.1.4. Prędkość przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże	45
4.1.5. Częstotliwość korekcyjnych przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże	47
4.2. Powtarzalność wyników badań utrzymywania równowagi ciała a wiek metrykalny dzieci	50
4.3. Asymetryczność funkcji podporowej kończyn dolnych	55
4.3.1. Asymetryczność funkcji stabilizacyjnej kończyn dolnych	55
4.3.2. Asymetryczność obciążenia kończyn dolnych	59
4.4. Rezultaty szacowania wieku stabilności posturalnej	61
5. Dyskusja	67
5.1. Stabilność pozycji stojącej a wiek metrykalny dzieci	67

5.2. Zmiany powtarzalności wyników charakteryzujących proces utrzymywania równowagi a wiek metrykalny dzieci	73
5.3. Asymetryczność funkcji podporowej kończyn dolnych	76
5.3.1. Asymetria funkcji stabilizacyjnej.....	76
5.3.2. Asymetria funkcji podparcia	81
5.4. Wiek stabilności posturalnej	83
6. Wnioski	86
Aneks	88
Bibliografia	106
Wykaz rycin i tabel	113
Summary	117

Od Autora

Prezentowana monografia zawiera wyniki badań równowagi ciała w pozycji stojącej populacji zdrowych dzieci w wieku 2–7 lat. Inspiracją do podjęcia charakterystyki równowagi dzieci w pozycji stojącej w okresie intensywnego rozwoju morfofunkcjonalnego było poszukiwanie odpowiedzi na pytania: Jak oceniać proces kontroli pionowej postawy ciała u dzieci z różnymi dysfunkcjami układu ruchu i/lub układu nerwowego? Jak uprościć diagnostykę stanu motoryki dziecka i postępu zaleconej terapii?

Istnieją różne testy sprawności motorycznej stosowane w praktyce lekarskiej i fizjoterapii do określenia stopnia rozwoju motorycznego niepełnosprawnych dzieci. Testy te są w większości oparte na subiektywnej ocenie badacza, co nie pomniejsza jednak ich wartości diagnostycznej w celach leczniczych. Obiektywne pomiary czynnościowe układu ruchu związane są z bardzo długą, jak dla dzieci, procedurą przygotowawczą do badań, a samo badanie wymaga od dziecka szczególnej cierpliwości, często wykraczającej poza możliwości najmłodszych pacjentów. Badania naukowe przyczyniają się do ulepszania metod diagnostycznych i tworzenia takich, które byłyby mniej stresujące dla małych dzieci. Obserwacja długotrwałych badań dzieci spowodowała, że pojawiło się pytanie: Czy można w ciągu kilku minut obiektywnie i trafnie ocenić ogólny stan motoryki dziecka przez oszacowanie jego aktualnego wieku stabilności posturalnej? Własne doświadczenie zdobyte w ciągu wielu lat badań równowagi ciała człowieka zachęcało do poszukiwań takich rozwiązań w zakresie kontroli stabilności pionowej pozycji ciała.

Podczas licznych badań równowagi u małych zdrowych i chorych dzieci powstała idea sformułowania modelu, który pozwalałby na określenie faktycznego poziomu rozwoju kontroli stabilności pozycji stojącej w odniesieniu do dzieci zdrowych w tym samym wieku kalendarzowym. Praktyka pediatrów wskazuje na słuszność porównywania aktualnego stanu psychomotorycznego badanego dziecka z ustalonymi normami dla populacji dzieci w podobnym wieku. Dostępność precyzyjnego sprzętu badawczego – platform sił – ułatwiła to zadanie. Wydaje się, że model wyznaczania wieku stabilności posturalnej, zaprezentowany w niniejszej pracy, może być przydatnym uzupełnieniem diagnostyki lekarskiej dzieci niepełnosprawnych, szczególnie w sytuacjach trudnych, w których badany nie poddaje się zbyt długiej procedurze, ale jest w stanie stać samodzielnie i spokojnie kilkadziesiąt sekund na platformie.

W pracy tej przedstawiono charakterystykę procesu utrzymywania równowagi ciała u dzieci w wieku od 2 do 7 lat (podzielonych na 6 grup wiekowych). Rozwój kontroli równowagi ciała dzieci opisano za pomocą wskaźników stabilności posturalnej – narzędzi najczęściej stosowanych przez innych badaczy. Dzięki temu wyniki zawarte w tej pracy są porównywalne z innymi. Ważną częścią monografii jest opis asymetrii obciążenia kończyn dolnych podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Idealnej symetrii w naturze nie ma, ale ustalenie norm asymetryczności obciążenia stóp w naturalnej pozycji stojącej w poszczególnych grupach wiekowych daje podstawy do wczesnego diagnozowania dysfunkcji związanych z przyjmowaniem niesymetrycznej postawy ciała u dzieci w wieku przedszkolnym.

Charakterystyka rozwoju procesu utrzymywania równowagi ciała u dzieci przedstawiona w tej pracy nie wyczerpuje tematu, a raczej stanowi jedynie szeroki wstęp do dalszych badań i poszukiwań narzędzi diagnostycznych, które oceniałyby jakość kontroli postawy ciała i, ewentualnie, tłumaczyłyby przyczyny pogorszenia lub poprawienia mechanizmów sterujących tą podstawową umiejętnością ruchową. W tej kwestii pozostało jeszcze wiele do odkrycia.

W tym miejscu chciałabym złożyć serdeczne podziękowania kilku osobom, które przyczyniły się do powstania tej monografii. Szczególne podziękowania składam mojemu mentorowi prof. Marianowi Golemie, który obudził we mnie pasję badacza równowagi ciała i zbudował solidne podstawy do rozwoju myśli naukowej. Dyskutowanie problemów i wątpliwości z dr. hab. Michałem Kuczyńskim, prof. AWF, przyczyniło się do lepszego opracowania wyników badań, niż miałyby to miejsce bez tych konsultacji. Serdecznie dziękuję mojej przyjaciółce, dr Bożenie Siedleckiej, za dźwiganie ciężaru organizacji badań w przedszkolach i żłobkach Wrocławia, bez czego praca ta w żaden sposób nie mogłaby zaistnieć. Dziękuję również wszystkim Koleżankom i Kolegom z Zakładu Gimnastyki, którzy swoją postawą sprawili, że mogłam skupić się na pracy naukowej. Jestem bardzo wdzięczna mojemu mężowi Aleksandrowi i trójce naszych dzieci, którzy wspierali mnie zawsze i dopingowali do napisania monografii, wybacząc zaniedbania w pielęgnowaniu ogniska domowego.

Będzie to moim sukcesem, jeśli wyniki pracy okażą się przydatne w praktyce lekarskiej, pedagogicznej i fizjoterapeutycznej.

Wykaz skrótów

- a* – odległość usytuowania czujników platformy
- APS – wiek stabilności posturalnej (ang. *age of postural stability*)
- b_i* – współczynnik parametru regresji wielokrotnej
- BMI – indeks masy ciała (ang. Body Mass Index) wyliczony wg formuły:
- $$\text{BMI} = \frac{\text{masa ciała [kg]}}{(\text{wysokość ciała [cm]})^2} \cdot 10\,000$$
- CCC – współczynnik konkordancji (zgodności) (ang. *concordance correlation coefficient*)
- COC – przebieg punktu korekcyjnego nacisku stóp na podłoże (ang. *center of corrective point*)
- COM – środek masy ciała (ang. *center of body mass*)
- COP – punkt przyłożenia wypadkowej siły reakcji (lub siły nacisku) na podłoże (ang. *center of pressure*)
- COPX – przebieg położenia punktu COP w płaszczyźnie czołowej
- COPY – przebieg położenia punktu COP w płaszczyźnie strzałkowej
- F – statystyka Fishera-Snedecora
- F_x* – chwilowa siła pozioma w płaszczyźnie czołowej ruchu
- f_x* – składowa czołowa wypadkowej siły reakcji podłoża
- F_y* – chwilowa siła pozioma w płaszczyźnie strzałkowej ruchu
- f_y* – składowa strzałkowa wypadkowej siły reakcji podłoża
- F_z* – chwilowa siła pionowa
- f_z* – składowa pionowa wypadkowej siły reakcji podłoża
- Fz_{le}* – chwilowa siła pionowa wywierana na podłoże lewą kończyną dolną
- Fz_{pr}* – chwilowa siła pionowa wywierana na podłoże prawą kończyną dolną
- ICC – współczynnik międzygrupowej korelacji wzajemnej (ang. *interclass correlation coefficient*)
- kd – kończyna dolna
- m_i* – parametr regresji wielokrotnej
- M_x* – moment siły poziomej w płaszczyźnie czołowej ruchu
- M_y* – moment siły poziomej w płaszczyźnie strzałkowej ruchu
- M_z* – moment siły pionowej
- n* – liczba prób
- N* – liczba badanych dzieci
- N Fz_{le}* – znormalizowana siła pionowa wywierana na podłoże lewą kończyną dolną
- N Fz_{pr}* – znormalizowana siła pionowa wywierana na podłoże prawą kończyną dolną
- p* – prawdopodobieństwo testowe (ang. *p-value*)

p_1, p_2	– parametry modelu autoregresji drugiego rzędu
PF	– częstotliwość główna (ang. <i>peak frequency</i>) przebiegu korekcyjnego nacisku stóp na podłoże (COC)
pl. czoł.	– płaszczyzna czołowa ruchu
pl. strz.	– płaszczyzna strzałkowa ruchu
r	– współczynnik korelacji wzajemnej Pearsona
R^2	– współczynnik korelacji wielokrotnej
r_k	– wartość krytyczna współczynnika korelacji Pearsona
r_x	– ramię siły składowej czołowej f_x
r_y	– ramię siły składowej strzałkowej f_y
r_z	– ramię siły składowej pionowej f_z
sd	– odchylenie standardowe
s_x	– odległość punktu przyłożenia chwilowej siły F_x od czujników platformy
s_y	– odległość punktu przyłożenia chwilowej siły F_y od czujników platformy
t_α	– wartość krytyczna testu t -Studenta przy $\alpha < 0,05$
x	– kierunek boczny działania siły poziomej
$\bar{x}$	– wartość średnia
y	– kierunek przednio-tylny działania siły poziomej
z	– kierunek działania siły pionowej
α	– próg istotności różnic

1

Wprowadzenie

Motoryczność podlega procesom rozwojowym od chwili narodzin człowieka. Podstawą aktywności fizycznej dziecka jest umiejętność utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Pionizacja ciała trwa od pierwszych tygodni życia, kiedy dziecko zaczyna podnosić głowę, dążąc do pionowego jej ustawienia. Przez pierwsze 6 miesięcy życia człowiek ma odruch postawy, charakteryzujący się specyficznymi reakcjami ułożenia ciała. W następnym półroczu pojawiają się odruchy prostowania, które dają początek etapowi dwunożności. Do końca 1. roku życia obserwuje się bardzo intensywny rozwój motoryczności człowieka. Z leżącego niemowlęcia staje się ruchliwym dzieckiem posiadającym często umiejętności lokomocyjne (Dega, 1983; Czochońska, 1985; Sutherland, 1997; Kubiszyn, 2003). Dziecko stale wykonuje ruchy poszczególnymi częściami ciała i tym samym wzmacnia mięśnie, które umożliwiają pokonywanie następnych etapów pionizacji. Postępy w procesach posturalnych wpływają na kształtowanie się krzywizn kręgosłupa (Malinowski, 2004), które są względnie stałe dopiero w 7. roku życia (Kasperczyk, 2004). Czynności związane z utrzymaniem pionowej pozycji ciała i lokomocją stanowią podstawę do nabywania kolejnych umiejętności ruchowych.

Do sprawnego funkcjonowania układu ruchu człowiek potrzebuje układu sterującego napięciem mięśni i położeniem poszczególnych części ciała (Golema, 2002; Kuczyński, 2003). Funkcję takiego sterownika pełni centralny układ nerwowy. W pierwszych latach życia dziecka obserwuje się szybki rozwój centralnego i obwodowego układu nerwowego, które pełną sprawność osiągają w wieku 16–18 lat. Najbardziej intensywny progres przypada na pierwsze 5–7 lat życia dziecka (Malinowski, 2004). Szczególnym aspektem dojrzewania układu nerwowego, ważnym z punktu widzenia transmisji impulsów nerwowych pomiędzy układem sterującym a wykonawczym, jest mielinizacja komórek nerwowych, które dopiero w osłonkach mielinowych przewodzą impulsy nerwowe odpowiednio szybko, tak by układ ruchu zareagował adekwatnie do aktualnej

potrzeby człowieka. Szybkość przewodzenia impulsów nerwowych osoby dorosłej dziecko osiąga w wieku 3–5 lat (Czochańska, 1985).

Najbardziej intensywny rozwój wszystkich układów i organów człowieka przebiega w ciągu pierwszych 7 lat życia. Auksołodzy przyjmują, że w wieku kalendarzowym (rzeczywistym, metrykalnym) 7 lat organizm ludzki staje się dojrzały, pod względem morfologicznym, do podjęcia wyższych czynności psychofizycznych (Malinowski, 2004).

Rozwój biologiczny dziecka można podzielić na okresy – etapy związane ze sprawnością motoryczną: noworodkowy, niemowlęcy (do 12. miesiąca życia), młodszego dzieciństwa (od 12. miesiąca życia do wieku 6–7 lat) i starszego dzieciństwa (od 7. do 16. roku życia). Po zakończeniu okresu niemowlęstwa, tzn. od końca 1. roku życia, dziecko wchodzi w okres młodszego dzieciństwa i podokres zwany poniemowlęcym, który trwa około 2 lat (do 3. roku życia) (Malinowski, 2004). Do tego czasu uczy się ono wielu podstawowych czynności motorycznych. Rozwój ruchowy sprowadza się do uporządkowania i ekonomiczacji ruchów, które są jeszcze dość chaotyczne i niezborne. Na ogół dziecko w tym wieku nie potrafi trwać w bezruchu dłużej niż kilka sekund. Po podokresie poniemowlęcym dziecko wchodzi w etap przedszkolny, który trwa od 3. do 6.–7. roku życia (wg Brocka, za: Malinowski, 2004). Dojrzewający ośrodkowy układ nerwowy pozwala mu coraz lepiej kontrolować ruchy własnego ciała, co przejawia się przez wykonywanie ruchów celowych i w miarę ekonomicznych. Uważa się, że dziecko w tym wieku jest gotowe do uczestniczenia w zajęciach przedszkolnych (Malinowski, 2004).

Okres młodszego dzieciństwa charakteryzuje się intensywnymi przemianami organizmu. Układ szkieletowy stale podlega „przebudowie”, przez co zmieniają się proporcje ciała, które wpływają na warunki statyki ciała (Iwanowski, 1982; Kasperczyk, 2000, 2004). Za wzrostem kości podąża układ mięśniowy i układ nerwowy, który często jest niewystarczająco dojrzały, by zapanować nad wzmożoną potrzebą ruchu. Intensywne procesy wzrostowe, tzw. skoki rozwojowe, stanowią zagrożenie powstawania wad postawy i skrzywień bocznych kręgosłupa, a także dysfunkcji i wad w obrębie kończyn dolnych. Przyrost wysokości ciała wynosi w tym okresie 26–27 cm (Malinowski, 2004). Wiek 7 lat jest uznawany za wiek „skoku szkolnego”, tzn. przyspieszenia przyrostu wysokości ciała, które powoduje zaburzenie statyki ciała (Iwanowski, 1982; Kasperczyk, 2000, 2004). Przewęda (1981) określa etap rozwoju dzieci w wieku 6–7 lat jako pierwsze apogeum motoryczności.

Rozwój motoryczny zdrowego dziecka w pierwszych latach życia ocenia się na podstawie jego ruchów lokomocyjnych, a te z kolei są możliwe do wykonania wtedy, kiedy utrzymywanie równowagi w dwunożnej pozycji stojącej jest stosunkowo dobrze opanowane. Dziecko 4-letnie wykazuje niektóre cechy chodu charakterystyczne dla osób dorosłych (Sutherland, 1997). Chwilowe stanie na

jednej kończynie dolnej jest również „trenowane” przez małe dziecko w czasie fazy zamachu drugiej kończyny dolnej podczas chodu. Pewne naturalne preferencje używania jednej strony ciała częściej niż drugiej także pojawiają się w wieku późnodziecięcym i determinują lateralizację człowieka. Może to prowadzić do nawyku obciążania jednej kończyny dolnej i tym samym nadmiernego obciążania drugiej (Bruyneel i wsp., 2008, 2009). Uważa się, że większość funkcjonalnych bocznych skrzywień kręgosłupa wynika ze złego nawyku postawy, potęgowanego przez niehigieniczny tryb życia i niedbałość o prawidłową postawę ciała (Krawański, 1990; Kasperczyk, 2004; Chamela-Bilińska i wsp., 2005).

Z punktu widzenia biomechaniki ruchu człowieka umiejętność stabilizacji pozycji pionowej polega na minimalizowaniu wychwiał ciała (tzw. kołysania postawy) w taki sposób, aby rzut pionowy środka masy ciała (*center of mass* – COM) nie przemieszczał się poza anatomiczne granice stabilności wyznaczone przez pole powierzchni podstawy stóp (Błaszczyk i wsp., 1993; Golema, 2002; Kuczyński, 2003). Takie kołysanie postawy wymaga ciągłej aktywności układu ruchu, zmienności w napięciu mięśni posturalnych. Szczególny udział w tym zadaniu mają mięśnie podudzi, które umożliwiają ruchy w stawie skokowym i nacisk stóp na podłoże (o adekwatnym do potrzeb kierunku i wielkości siły). U dorosłych ruchy te są prawie niezauważalne podczas spokojnego stania dwunożnego, ale u małych dzieci skutki czynności stabilizujących pozycję stojącą ciała są wyraźne. Pewna niezborność ruchowa, charakterystyczna dla młodego wieku, przejawia się m.in. w zmiennym nacisku stóp, korygującym wychylenia ciała w pozycji stojącej (Berger i wsp., 1995). Oznacza to, że małe dziecko może wykonywać zróżnicowane ruchy lewą i prawą kończyną dolną podczas utrzymywania równowagi ciała w naturalnej pozycji stojącej. Kształtująca się czynnościowa dominacja jednej kończyny dolnej może przejawiać się poprzez systematyczne przenoszenie ciężaru ciała na drugą – niedominującą. Asymetria funkcji aktywności stabilizacyjnej jednej z kończyn dolnych prawdopodobnie jest przyczyną nierównomiernego ich obciążania – asymetrii podparcia.

Utrzymanie stabilnej pionowej postawy ciała wymaga scalenia bodźców z trzech układów sensorycznych: wzrokowego, wstębularnego i proprioceptywnego (Czochońska, 1985; Golema, 2002; Kuczyński, 2003; Trew i Everett, 2005). Bodźce te są bowiem informacją dla centralnego układu nerwowego (układu sterującego) o odchyleniach przemieszczenia środka masy ciała od wartości zadanej. Układ nerwowy z kolei, poprzez informacje zwrotne, uaktywnia układ ruchu (układ wykonawczy) do realizowania zadania, tzn. ograniczenia kołysania postawy, by rzut pionowy COM znajdował się wewnątrz anatomicznej powierzchni podparcia stóp (Błaszczyk i wsp., 1993; Berger i wsp., 1995; Kuczyński, 2003). Jeśli układ wykonawczy nie zdąży odpowiednio szybko zareagować lub nacisk stóp „odpowie” ze zbyt małą lub zbyt dużą siłą, człowiek straci stabilność i przewróci się lub zastosuje strategię kroku w kierunku utraty równo-

wagi, by nie dopuścić do upadku (Trew i Everett, 2005). Tego typu zdarzenia zachodzą szczególnie często w początkowym etapie nauki chodu. Nie do końca wykształcone u małych dzieci odruchy postawy stale są doskonalone i poprzez wieloletni i codzienny trening dzieci dochodzą stopniowo do pełnej sprawności. Organizacja synergistyczna postawy i procesy przedsionkowe osiągają poziom charakterystyczny dla dorosłych u dzieci w wieku 7 lat (Grochmal, 1987; Riach i Starkes, 1993).

Analiza procesu utrzymywania równowagi i określenie prawidłowości rozwojowych związanych ze stabilizacją pionowej pozycji ciała u dzieci zdrowych może stanowić punkt wyjścia do ustalenia norm – wskaźników opisujących stan normalny dzieci w wieku 2–7 lat. Określenie tych norm pozwoli na zdiagnozowanie ewentualnych patologii na etapie początkowym, co może mieć zasadnicze znaczenie w przypadku małych dzieci, u których szybka interwencja lekarska jest sprawą kluczową, by nie dopuścić do poważniejszych ubytków zdrowia (Prętkiewicz-Abacjew, 2002). Dynamiczny rozwój organizmu dziecięcego skłania do podjęcia próby ustalenia tych norm w poszczególnych grupach wiekowych. Wnikliwe badanie procesu równowagi w aspekcie ruchów w obrębie każdej stopy osobno uzupełnia wiedzę o ich funkcjonowaniu podczas utrzymywania stabilnej pozycji stojącej.

1.1. Pionizacja ciała dziecka

Podstawą czynności ruchowych służących utrzymywaniu pionowej pozycji ciała są u człowieka reakcje odruchowe. Niektóre z nich, statyczne, zapewniające prawidłową pozycję (ułożenie) ciała, nazywane są odruchami postawy, inne – statokinetyczne – służące do uzyskania i utrzymania pozycji pionowej – odruchami prostowania. Odruchy statyczne, obecne od urodzenia, utrzymują się przez pierwsze 6 miesięcy życia, statokinetyczne rozwijają się po tym czasie, a ich aktywne działanie przypada na drugie półrocze 1. roku życia. Odruchy prostowania pozwalają przyjmować postawę na czterech kończynach we wstępnym etapie pionizacji, a następnie – postawę dwunożną. W okresie intensywnego rozwoju motorycznego dziecka szczególnego znaczenia nabierają złożone automatyzmy ruchowe określone jako odruchy równowagi, które pojawiają się w 6.–8. miesiącu życia, a w pełni rozwijają się między 18. a 24. miesiącem życia. W powstawaniu odruchów postawy i prostowania największe znaczenie ma monosynaptyczny odruch na rozciąganie. Układ przedsionkowy, proprioreceptory, receptory skórne i wzrokowe biorą udział w kształtowaniu się odruchów postawy. Integracja tych odruchów odbywa się na poziomie rdzenia kręgowego i przedłużonego, odruchy prostowania są scalane na poziomie mostu i śródmózgowia. Reakcje posturalne (równowagi) powstają na coraz wyższych piętrach układu nerwowego, ale stanowią tylko modyfikacje odruchów z niższych pięter.

Polegają na wykonaniu odpowiednich, korekcyjnych ruchów głowy, kończyn i tułowia w taki sposób, by zapobiec utracie równowagi. Reakcje równowagi, swoiste tylko dla człowieka, integrowane są na poziomie kory mózgowej, do której dochodzą też bodźce z jąder podkorowych i mózdzku. Odruchy postawy, prostowania i równowagi są niezienne i stereotypowe, ale człowiek potrafi z nich korzystać w sposób zmienny i dowolny, zależnie od chwilowej potrzeby (Czochańska, 1985).

Pionizacja u dzieci w ciągu 1. roku życia odbywa się według charakterystycznego wzorca, który różni się od wzorca ruchowego u osoby dorosłej. Z pozycji leżącej na plecach niemowlę 8–9-miesięczne obraca się na brzuch, następnie przyjmuje pozycję „na czworaka”, kolejno przechodzi do siadu i do pozycji klęczącej, a następnie za pomocą szczebli łóżka lub innego podparcia podnosi się do pozycji stojącej. W kolejnym etapie rozwoju reakcji równowagi dziecko uczy się stać samodzielnie obunóż, chodzić, stać na jednej kończynie dolnej (Czochańska, 1985).

Poszczególne etapy pionizacji postawy ciała warunkuje kształtowanie się krzywizn kręgosłupa. Noworodka charakteryzuje ogólna kifoza, przebiegająca na całej długości kręgosłupa. W 3.–4. miesiącu życia zaznacza się lordoza w odcinku szyjnym, związana z czynnością podnoszenia głowy w leżeniu przodem. Przyjmowanie pozycji siedzącej, a następnie stojącej w 9.–12. miesiącu życia, związane jest z początkiem kształtowania się lordozy w odcinku lędźwiowym kręgosłupa. Dziecko 12–14-miesięczne charakteryzuje się esowatym kształtem kręgosłupa z wykształconą lordozą szyjną i kifożą piersiową oraz wyraźnie zarysowaną lordozą lędźwiową. Wygięcie do przodu odcinka lędźwiowego kręgosłupa pogłębia się na skutek ciężenia narządów jamy brzusznej, co powoduje zwiększenie kąta przodopochylenia miednicy. Kąt ten wynosi około 22° u dzieci 4-letnich, a 25° u 7-latków obojga płci (Kasperczyk, 2000) i powiększa się jeszcze do wieku pokwitania. Typowy, esowaty kształt krzywizn kręgosłupa występuje około 3. roku życia, ale znaczny wzrost tułowia przy stosunkowo słabych mięśniach posturalnych jest powodem modyfikacji tych krzywizn. Przednio-tylne wygięcia kręgosłupa są ukształtowane na przełomie 6. i 7. roku życia i wtedy formuje się postawa habitualna – nawykowa dziecka (Prętkiewicz-Abacjew, 2002), chociaż typ postawy ciała podlega przemianom do zakończenia wieku pokwitania, tzn. do około 18. roku życia (Kasperczyk, 2000, 2004). Niektórzy autorzy twierdzą jednak, że krzywizny kręgosłupa są w pełni ukształtowane dopiero po zakończeniu procesów wzrostowych około 22. roku życia, co związane jest ze stabilizacją położenia ogólnego środka masy ciała (Trew i Everett, 2005).

Dla stabilizacji dwunożnej pozycji stojącej, charakterystycznej tylko dla gatunku ludzkiego, ważnym elementem rozwoju morfologicznego ciała jest

ukształtowanie kończyn dolnych i stóp (Prętkiewicz-Abacjew, 2002; Demczuk-Włodarczyk, 2003; Wicart i Maton, 2003). Szpotawość stawów kolanowych i skokowych uznaje się za normalną do około 3. roku życia, a między 4. i 5. rokiem życia pojawia się fizjologiczna koślawość kończyn dolnych. Dopiero dzieci 7-letnie wykazują proste ukształtowanie kończyn dolnych (Kasperczyk, 2000).

Początkowe próby pionizacji w młodszym dzieciństwie stanowią wyzwanie dla małego dziecka, gdyż stosunkowo duża górna część ciała (tułów i głowa) musi utrzymać się na małej powierzchni stóp. Utrzymywanie równowagi w pozycji stojącej i podczas chodu utrudnia tkanka tłuszczowa, która wypełnia podszewową część stopy (płaskostopie fizjologiczne). Architektura stóp kształtuje się do wieku 3–4 lat, kiedy to zaznacza się łuk podłużnego wysklepienia stopy. W 6. roku życia oba łuki: podłużny i poprzeczny są wyraźnie widoczne i podlegają dalszemu rozwojowi do około 8. roku życia. Przyrost długości stóp jest w tym okresie znacznie większy niż szerokości (Kasperczyk, 2000; Demczuk-Włodarczyk, 2003), co sprzyja doskonaleniu odruchów równowagi.

Małe dzieci (1,5–2 lat) przyjmują postawę na lekko ugiętych kończynach dolnych i charakteryzują się nieco zaokrągloną lub całkiem prostą pozycją tułowia, przy czym szczególnie wyrazne jest uwypuklenie brzucha do przodu oraz ustawienie w małym zgięciu stawów biodrowych i kolanowych (Dega, 1983; Kutzner-Kozińska, 1986; Prętkiewicz-Abacjew, 2002). Pionowa pozycja ciała w odróżnieniu od pozycji „na czworaka” jest niekorzystna statycznie i stanowi dodatkowe utrudnienie kontroli równowagi pozycji stojącej ze względu na wysokie położenie ogólnego środka masy ciała – w okolicy pępka (Assaiante i wsp., 1998; Malinowski, 2004). W kolejnych latach rozwoju morfologicznego, do 7.–8. roku życia, postawa dzieci staje się bardziej prężna. Intensywny przyrost długości kończyn powoduje obniżenie ogólnego środka masy ciała, a silniejsze mięśnie brzucha pozwalają na jego „spłaszczenie”, dzięki czemu sylwetka dziecka 7-letniego staje się zbliżona do postawy osoby dorosłej (Kasperczyk, 2000, 2004).

Dzieci w wieku poniemowlęcym i przedszkolnym wykazują niewielkie różnicowanie dymorficzne. Między 3. a 4. rokiem życia obserwuje się nieco szybszy rozwój motoryczny dziewczynek niż chłopców i różnica ta utrzymuje się jeszcze przez następne 2–3 lata. W miarę rozwoju morfologicznego dymorfizm płciowy przejawia się większym gromadzeniem tkanki tłuszczowej u dziewcząt niż u chłopców. U tych ostatnich wzrasta szerokość barków i spłaszczeniu ulega klatka piersiowa, a u dziewcząt – powiększa się szerokość bioder (Fugiel, 2002). Pomimo oczywistego różnicowania zewnętrznego pod względem płci u dzieci w wieku 5–12 lat nie stwierdzono związków pomiędzy płcią i wielkością kątowych ruchów poszczególnych części ciała podczas stania (McEvoy i Grimmer, 2005). Nie znaleziono również istotnych różnic pomiędzy chłopcami i dziewczę-

tami w wielkości parametrów opisujących chód u zdrowych dzieci w wieku od 5 do 18 lat (Lebiedowska i wsp., 1994). W wieku przedszkolnym zaznaczają się także różnice międzyosobnicze niezależnie od płci (Malinowski, 2004). W świetle przytoczonych badań można przyjąć, że dymorfizm płciowy nie odgrywa znaczącej roli w procesie utrzymywania równowagi u dzieci w wieku przedszkolnym. Późniejszy wiek rozwojowy – szczególnie wiek pokwitania – może mieć znaczenie dla procesów kontrolujących pionową postawę ciała (Nolan i wsp., 2005).

Sprawność układu ruchu i układu nerwowego u małego dziecka stale podlega doskonaleniu. W wielu pracach badawczych dotyczących rozwoju równowagi ciała próbowano zgłębić istotę tych procesów. Allum i wsp. (1998) twierdzą, że ruchy posturalne u dzieci w wieku 5–12 miesięcy są zorganizowane centralnie na dwóch poziomach: pierwszy dotyczy ogólnej podstawy specyficznych reakcji wzorcowych opartych głównie na bodźcach proprioceptywnych z okolic stawów biodrowych i tułowia, a drugi oparty jest na bodźcach przedsionkowych. Pierwszy wzorec wyznacza przestrzenno-czasową sekwencję aktywacji mięśni, drugi obejmuje kształtowanie centralnego zestawu wzorców aktywności mięśni na podstawie bodźców wstępujących ze wszystkich segmentów ciała i narządu przedsionkowego.

Wzorce zachowań posturalnych małych dzieci różnią się od wzorców stosowanych przez dzieci starsze i dorosłych, chociaż niektóre elementy są wspólne. Już w wieku 5–6 miesięcy dzieci wykazują specyficzne napięcia mięśni tułowia w odpowiedzi na zakłócenia równowagi w pozycji siedzącej (Hadders-Algra i wsp., 1996). W tym wieku dzieci dysponują pewnym zestawem kombinacji napięć mięśniowych, które przejawiają także dorośli. Zgadza się to z jedną z teorii mówiącą o generowaniu wzorców ruchowych przez genetycznie uwarunkowany centralny program ruchów (Forssberg, 1999). Starsze dzieci, 9–10-miesięczne, dokonują selekcji najpotrzebniejszych mięśni, zależnie od zewnętrznych warunków utrzymywania równowagi zarówno w stanie obunóż, jak i w siadzie. Dzieci w tym wieku wykazują kierunkową kolejność aktywacji mięśni od dystalnych do proksymalnych (Forssberg i Nashner, 1982). Specyficzna kolejność aktywacji pojawia się u małych dzieci najpierw w mięśniach okolicy stawu skokowego, a w dalszej kolejności – w okolicy stawu kolanowego i biodrowego. Odkąd dziecko zaczyna wykonywać różne czynności w pozycji stojącej, musi nauczyć się panować nad zbyt dużą podatnością na ruch głównych segmentów ciała – zbyt dużą liczbą stopni swobody – by zachować stabilną pozycję (Forssberg, 1999). Zatem, rozwój procesu utrzymywania równowagi ciała polega na kontroli ruchów poszczególnych segmentów ciała względem siebie w określonym zakresie.

Berger i wsp. (1995) podjęli próbę wyznaczenia prawidłowości ruchów

kompensacyjnych, charakterystycznych dla utrzymywania równowagi na ruchomym podłożu przez dzieci w wieku od 2 do 6 lat i osoby dorosłe. Stwierdzili największe napięcie mięśni zginaczy kończyn dolnych u dzieci najmłodszych, słabsze u 6-latków, a najsłabsze u dorosłych. Dzieci 2-letnie wykazały również aktywność mięśni antagonistycznych w większym stopniu niż dzieci starsze i dorośli, co dowodzi braku ekonomiczności ruchu na tym etapie kontroli postawy. W zadaniu utrzymywania pozycji stojącej na ruchomej platformie 2-latki przejawiały pasywne, spowolnione reakcje na zaburzenia równowagi, a ich reakcje posturalne różniły się od reakcji dzieci starszych i osób dorosłych. Zdaniem tych autorów, obserwowana niedojrzałość funkcji odruchu na rozciąganie mięśni (znaczne opóźnienie w stosunku do sytuacji) i nadmierne obciążenie receptorów zginaczy kończyn dolnych odgrywają znaczącą rolę w kontroli pionowej postawy ciała u małych dzieci. Badacze ci dowiedli, że przed 6. rokiem życia dzieci nie osiągają poziomu kontroli równowagi osób dorosłych. Do podobnych wniosków doszły Brenière i Bril (1998), podkreślając kluczowe znaczenie koordynacji napięcia mięśni kończyn dolnych dla zachowania równowagi w pozycji stojącej. Peterson i wsp. (2006) stwierdzili z kolei, że dzieci dopiero w wieku 12 lat osiągają sprawność wykorzystania bodźców wzrokowych i przedsionkowych do kontroli postawy, a zatem nie można mówić o pełnej dojrzałości procesu utrzymywania równowagi ciała u dzieci przed 12. rokiem życia. Podobnego zdania są Steindl i wsp. (2006), którzy przeprowadzili badania równowagi w ten sam, jak Peterson i wsp., sposób i podali, że dzieci w wieku 3–4 lat wykazują dojrzałość funkcji wykorzystania bodźców proprioceptywnych do kontroli równowagi ciała, ale odbieranie bodźców wzrokowych i przedsionkowych w celu kontroli postawy zachodzi w pełni dopiero u 15–16-latków.

1.2. Rozwój kontroli posturalnej dziecka

Kontrola postawy ciała wymaga zarówno ukształtowanych wzorców ruchów i napięć mięśni posturalnych, jak i dojrzałego systemu sensorycznego, który pozwala na adaptację wzorców ruchu do określonej, chwilowej potrzeby utrzymania pionowej pozycji ciała. Sprawna integracja wszystkich informacji niezbędnych do zachowania pozycji stojącej w określonych warunkach zewnętrznych przejawia się przez specyficzne ułożenie segmentów ciała względem siebie w taki sposób, by rzut pionowy ogólnego środka masy ciała mieścił się w obrębie anatomicznej podstawy ciała, którą wyznaczają stopy i powierzchnia pomiędzy nimi. Jeśli ten warunek nie zostaje spełniony, człowiek traci stabilność pozycji stojącej.

W rozwoju ontogenetycznym kontroli równowagi człowiek wykorzystuje różne schematy położenia segmentów ciała i zmienia je w zależności od układu

odniesienia. U małych dzieci (2–6 lat) położenie i ruchy tułowia stanowią układ odniesienia dla stabilizacji pozostałych części ciała, co nazwano „egocentryczną” strategią kontroli postawy. Tułów jest również tym segmentem, który inicjuje ruch i stabilizację całego ciała podczas chodu (Roncesvalles i wsp., 2005).

Charakterystycznym sposobem orientacji ciała w przestrzeni u małych dzieci jest także położenie kończyn górnych w stosunku do powierzchni podłoża. Dzieci w wieku 2–6 lat postrzegają tułów, kończyny górne i głowę jako całość i dostosowują przemieszczenia całego segmentu: głowa–tułów–kończyny górne do bieżącej potrzeby utrzymywania równowagi, wykonując ruch głównie w stawach biodrowych (strategia tułowia). Dzieci od 7 do 10 lat, a także starsze oraz dorośli stosują strategię stabilizacji głowy w przestrzeni („egzocentryczna” strategia kontroli postawy) i ruchy kończyn górnych odnoszą do kierunku działania pola grawitacji, a nie do położenia tułowia (Assaiante i Amblard, 1993, 1995, Assaiante, 1998; Roncesvalles i wsp., 2005). Wymienieni badacze stwierdzili, że wiek 7–9 lat jest dla dzieci okresem krytycznym w kształtowaniu się wewnętrznego schematu ruchowego i pełnej kontroli pionowej pozycji ciała. Wtedy to obserwuje się zmianę strategii tułowia na strategię stabilizacji głowy w odniesieniu do całego ciała podczas stania i czynności lokomocyjnych. W tym krytycznym wieku dzieci zaczynają poruszać poszczególnymi częściami ciała bardziej niezależnie od tułowia, niż występuje to w młodszym wieku. Obserwuje się zstępujący kierunek orientacji poszczególnych części ciała od głowy do stóp. Assaiante i wsp. (2005) sformułowali twierdzenie, że u dzieci rozwój równowagi ciała polega przede wszystkim na tworzeniu zestawu różnych strategii posturalnych, a następnie – na uczeniu się selekcjonowania najbardziej przydatnej strategii ruchu, zależnie od umiejętności wykonania zadania utrzymywania równowagi lub zadania ruchowego.

Według Massion (1998) istotą kontroli pionowej pozycji ciała jest jednak położenie ogólnego środka masy ciała, a nie orientacja jego segmentów. Głowa, tułów i kończyny górne wykonują takie ruchy względem siebie, żeby pionowy rzut środka masy ciała zawsze znajdował się wewnątrz pola podstawy podparcia stóp. Kontrola postawy ciała właściwie sprowadza się do osiągnięcia tego celu. Jeśli taki warunek nie może być spełniony, równowaga ciała zostaje utracona lub mocno zachwiana. Massion (1998) uważa, że dla zachowania równowagi znaczenie ma nie tylko geometryczne położenie ciała, lecz także dystrybucja mas poszczególnych części ciała, gdyż to składa się na utrzymanie rzutu środka masy ciała wewnątrz pola powierzchni podparcia stóp. Wymieniła ona 4 główne aspekty „budowania” pozycji stojącej ciała w rozwoju ontogenetycznym:

1. Z punktu widzenia uwarunkowań genetycznych człowiek od urodzenia jest wyposażony we wzorce zachowań, które umożliwiają osiągnięcie pionowego ułożenia ciała i uwolnienie kończyn górnych od funkcji podporowej.

2. Głowa wraz z narządami odbierającymi wrażenia wzrokowe i przedsionkowe jest pierwszym segmentem, od którego zaczyna się rozwijać orientacja ciała w przestrzeni, dopiero w dalszym etapie organizacja posturalna przejawia trend zstępujący do niżej położonych części ciała – od głowy do stóp.
3. Wcześniej pojawiająca się stabilizacja głowy staje się punktem odniesienia względem grawitacji, a dopiero wtórnie rozwija się dostosowanie ułożenia i ruchów segmentów ciała do aktualnej potrzeby. Rozwój kontroli postawy zmierza do osiągnięcia dwóch celów: stabilizacji postawy w polu grawitacji oraz wzajemnego oddziaływania ciała z otoczeniem.
4. Ostatnim etapem rozwoju kontroli postawy jest umiejętność odpowiedniego ułożenia segmentów ciała i ich mas względem siebie w taki sposób, by ogólny środek masy ciała padał na powierzchnię podparcia stóp na podłożu.

Zasadniczo wszystkie czynności, które wykonuje człowiek – nawet małe dziecko – w pozycji stojącej sprowadzają się do czynności wymienionych w ostatnim punkcie. Ich przebieg stał się także podstawą analiz badawczych w wielu pracach na temat kontroli stabilności pionowej postawy ciała.

Ważnym zagadnieniem dotyczącym rozwoju procesu kontroli równowagi ciała w pozycji stojącej u małych dzieci jest powtarzalność procesu utrzymywania równowagi. Wyniki badań różnych autorów wykazują niski stopień zgodności kolejnych prób stania, wykonywanych przez tego samego badanego, nawet przy zastosowaniu tej samej metody i sprzętu badawczego. Zagadnienie powtarzalności procesu utrzymywania równowagi jest dość dobrze rozpoznane w przypadku osób dorosłych (Goldie i wsp., 1989; Birmingham, 2000; Hertel i wsp., 2006), ale niewystarczająco u dzieci w wieku intensywnego rozwoju biologicznego (Richardson, 1990; Zaino i McCoy, 2008).

Na proces kontroli równowagi w pozycji stojącej u dzieci wpływa zbyt wiele czynników zewnętrznych, np. otoczenie, dźwięki, ruch osoby towarzyszącej, które często nie mogą być wyeliminowane podczas badania. Nie bez znaczenia jest ogólne samopoczucie dziecka w danym dniu i jego gotowość do współpracy. Tego często nie można w ogóle przewidzieć. Prawdopodobnie z tych powodów problem powtarzalności kontroli równowagi ciała u małych dzieci jest w dostępnej literaturze stosunkowo słabo udokumentowany.

Z doniesień innych autorów wynika, że próby przeprowadzane dzień po dniu u tych samych badanych i w takich samych warunkach laboratoryjnych nie przynoszą oczekiwanych rezultatów powtarzalności procesu kontroli równowagi ciała u dorosłych, ze względu na wiele zmiennych czynników zewnętrznych (Samson i Crowe, 1996). Wydaje się, że najbardziej miarodajną metodą określe-

nia powtarzalności procesu kontroli równowagi ciała jest porównanie kilkakrotnie wykonywanych prób stania jedna po drugiej, bez długich przerw. Badacze najczęściej stosują trzykrotne powtórzenie próby (Hertel i wsp., 2006).

Określenie poziomu powtarzalności procesu utrzymywania równowagi stanowi podstawę stosowania stabilografii (metody oceny stabilności ciała) jako narzędzia diagnostyki układu ruchu i podnosi wiarygodność wyników. Jeśli kinematyczny obraz realizacji zadania utrzymywania pionowego ułożenia i ruchów segmentów ciała wykazuje podobieństwo w powtarzanych próbach u tej samej osoby (McEvoy i Grimmer, 2005), to określenie poziomu zgodności wyników procesu stabilizacji ciała otrzymanych w kolejnej próbie stania może być podstawą do oceny powtarzalności prób. Takie założenie jest zgodne z wynikami Zaino i McCoya (2008), którzy stwierdzili wysoki stopień rzetelności (wiarygodności) badań kinetycznych kontroli równowagi, w odróżnieniu od badań czynności mięśni (u dzieci w wieku 8–14 lat).

Asymetria w funkcjonowaniu i budowie organizmu człowieka jest (do pewnego stopnia) normalnym zjawiskiem, a doskonałej symetrii w układzie biologicznym nie ma. Wady postawy ciała u dzieci powstają najczęściej podczas ich intensywnego rozwoju biologicznego i przeważnie są diagnozowane we wczesnym wieku szkolnym. Szczególnie niebezpieczne są skrzywienia boczne kręgosłupa, które skutkują często poważnymi schorzeniami ustrojowymi. Przyczyny powstawania wad postawy są na ogół złożone i trudne do określenia. Jedną z takich przyczyn może być naturalna asymetria ciała człowieka, która wyraźnie zaznacza się podczas procesów wzrostowych (Malinowski, 2004). Wszelkie objawy asymetrii, które powodują nierównomierne obciążenie powierzchni nośnych układu ruchu w płaszczyźnie czołowej, mogą być w konsekwencji przyczyną powstawania skolioz u dzieci w intensywnym okresie rozwoju motorycznego (Dega, 1983; Prętkiewicz-Abacjew, 2002).

Przyrost wielkości stóp u dzieci także może mieć znaczenie dla symetryczności rozmieszczenia obciążenia kończyn dolnych. Najintensywniejszy przyrost długości stóp obserwuje się między 4. a 15. rokiem życia, a szerokości stóp i ich powierzchni – między 4. a 9. rokiem życia, przy czym u dzieci w tych przedziałach wiekowych zaznacza się asymetria wzrostu stóp na szerokość (Demczuk-Włodarczyk, 2003). Zdaniem tej autorki nierównomierne obciążenie obu kończyn dolnych jest przyczyną zaburzeń w architekturze stóp.

Zabjek i wsp. (2005) porównywali równowagę ciała dzieci ze skoliozą i zdrowych, symulujących skoliotyczną postawę ciała. Wyniki tej pracy wykazały, że ruchy w obrębie głównych segmentów ciała są podobne u dzieci zdrowych i dzieci ze skoliozą, a zasadnicza różnica w utrzymywaniu równowagi pojawia się w sposobie przemieszczania nacisku stóp na podłoże. Zdaniem Karlsson

i Frykberg (2000), badanie sił pionowych u dorosłych podczas stania może zawierać informacje o zdolności systemu kontroli posturalnej do tłumienia zakłóceń równowagi ciała. Badania równowagi ciała u otyłych chłopców wykazują wpływ wielkości sił pionowych na stabilność pozycji stojącej (McGraw i wsp., 2000).

Siła grawitacji, z jednej strony niezbędna do życia, z drugiej może być siłą destrukcyjną – powoduje szybszy postęp ewentualnych skrzywień kręgosłupa dziecka. Symetryczne lub niesymetryczne obciążenie kończyn dolnych u małych dzieci podczas naturalnego stania może być dobrym wyznacznikiem kształtowania się ich postawy ciała zarówno w kierunku prawidłowego rozwoju, jak i odchyleń od normy.

1.3. Problemy techniczne związane z badaniami równowagi u dzieci

Badania narządu ruchu dotyczące położenia segmentów ciała względem siebie i podłoża odbywają się przy użyciu systemu kamer i aparatury do pomiaru czynności mięśni. Na ogół są to długotrwałe procedury, jak wynika z własnych obserwacji autora, i zajmują od jednej do kilku godzin w zależności od gotowości dziecka do współpracy. W ich efekcie można otrzymać szczegółowy obraz stanu czynnościowego małego pacjenta, co stanowi często podstawę diagnostyki lekarskiej. W niektórych przypadkach jednak dziecko odmawia współdziałania i nie poddaje się procedurze przygotowawczej do badań (naklejanie i odklejanie elektrod oraz znaczników – 24–36 sztuk – które przy badaniach czynności mięśni należy precyzyjnie umieścić na ciele). Pewną alternatywą mogłyby stać się pomiary równowagi ciała przy wykorzystaniu jedynie platform sił. Badania kontroli posturalnej nie zastępują badań aktywności mięśni, ale mogą określić ogólny stan rozwoju motorycznego dziecka na podstawie wyników oceny równowagi w pozycji stojącej. Przemawia za nimi nie tylko znaczne skrócenie procedury badawczej – nawet do kilku minut – lecz także mniejszy koszt aparatury (w stosunku do kosztu systemu kamer i sprzętu do elektromiografii) oraz niższe wymogi dotyczące wielkości pomieszczenia do badań i liczby personelu obsługującego sprzęt. Wyniki badań stabilograficznych dają ogólny pogląd na funkcjonowanie układu ruchu i kontrolującego ruch układu nerwowego, mogą służyć jako dobre uzupełnienie diagnostyki lekarskiej, zwłaszcza w przypadku małych dzieci. Nowoczesne techniki modelowania procesu utrzymywania równowagi tylko na podstawie sygnałów z platformy sił, na której stoi badany (Kuczyński, 1997, 1999, 2001; Winter i wsp., 1998), oraz zastosowanie zaawansowanych metod statystycznych przenoszą główny ciężar procedury z badanego na badającego, co ma szczególne znaczenie w przypadku najmłodszych pacjentów. Równie ważnym aspektem stosowania techniki modelowania jest uproszczenie i skrócenie badań procesu utrzymywania równowagi, które pozwala na

rozszerzenie liczebności grup badawczych, a tym samym na uzyskanie lepszej reprezentatywności populacji i trafne wyniki.

W literaturze przedmiotu znajduje się wiele pozycji na temat chorób o różnym podłożu, zarówno somatycznym, jak i neurologicznym, których symptomem są zaburzenia procesu utrzymywania równowagi (Czochańska, 1985; Słonka, 2001; Norrlin i wsp., 2002; Galea i wsp., 2004; Gawron i wsp., 2004; Syczewska i wsp., 2008). Badania kontroli posturalnej u dzieci z mózgowym porażeniem dziecięcym dowodzą przydatności oceny procesu utrzymywania równowagi w uzupełnianiu diagnostyki medycznej (Burtner i wsp., 1998; Ferdjallah i wsp., 2002; Donker i wsp., 2007; Liu i wsp., 2007; Zaino i McCoy, 2008). Dysleksja u dzieci również powoduje problemy w kontroli stabilności pozycji stojącej (Pozzo i wsp., 2006).

Podczas analiz rezultatów badań równowagi dzieci chorych autorzy prac na ogół stosują odniesienie do grupy kontrolnej zdrowych dzieci. Zwykle jest to grupa o dużej rozbieżności wiekowej (Riach i Hayes, 1987; Lebedowska i Syczewska, 2000), co nie pomniejsza wartości tych doniesień. W przypadku małych dzieci, z powodu ich dynamicznego rozwoju biologicznego konieczne jest unormowanie grup kontrolnych pod względem wieku i jakości utrzymywania równowagi, aby można było porównywać z ich wynikami rezultaty badań dzieci chorych. Ustalenie norm opisujących proces stania w poszczególnych grupach wiekowych umożliwi wychwycenie niepokojących zmian patologicznych w utrzymywaniu równowagi, co może być decydujące w postępowaniu terapeutycznym w przypadku dzieci chorych. Sformułowanie modelu szacowania wieku stabilności posturalnej dzieci na podstawie przebiegu procesu kontroli równowagi ciała ułatwiłoby korzystanie z badań stabilograficznych w diagnostyce narządu ruchu u dzieci.

Porównanie wieku stabilności posturalnej z wiekiem rzeczywistym dziecka umożliwi ocenę kontroli równowagi ciała w pozycji stojącej w odniesieniu do populacji dzieci zdrowych.

2

Cel badań, hipotezy i pytania badawcze

2.1. Uzasadnienie wyboru tematu

Charakterystyka procesu utrzymywania równowagi dla populacji dzieci w przedziale wiekowym 2–7 lat stanowi punkt odniesienia pomocny w stwierdzeniu ewentualnych patologii w zakresie kontroli równowagi ciała. Trudności techniczne związane z badaniami tak małych dzieci są prawdopodobnie główną przyczyną stosunkowo niewielkiej liczby doniesień na ten temat. Duża rozbieżność wieku dzieci oraz połączenie ich w grupy badawcze o rozpiętości większej niż jeden rok życia (w okresie intensywnego rozwoju ruchowego) mogą być przyczyną problemów z interpretacją wyników.

Powtarzalność procesu kontroli równowagi stanowi trudny do rozwiązania problem dla autorów badań stabilności ciała człowieka w pozycji stojącej (Geurts i wsp., 1993; Kuczyński, 1997, 1999; Corriveau i wsp., 2001; Lafond, 2006), polegających na analizie przebiegu punktu nacisku stóp na podłoże. Niektórzy z nich dowodzą, że powtarzalność badań równowagi ciała jest zadowalająca, inni twierdzą, że jest ona słaba u zdrowych dorosłych (Samson i Crowe, 1996; Brouwer i wsp., 1998). W przypadku dzieci w przedziale wiekowym 2–7 lat zagadnienie powtarzalności procesu utrzymywania równowagi jest wciąż niewystarczająco rozpoznane.

Obecny zakres wiedzy o prawidłowościach rozwoju motorycznego człowieka stwarza szerokie możliwości testowania stanu morfofunkcjonalnego dziecka, a tym samym pozwala porównywać i oceniać dysfunkcje dzieci niepełnosprawnych. Na ogół są to sposoby, w których wyniki badań są obciążone sporą dozą subiektywności testującego. Sformułowanie modelu, na podstawie którego można obliczyć wiek stabilności posturalnej badanego dziecka w odniesieniu do norm rozwojowych określonych dla populacji zdrowych dzieci, pozwoli – w obiektywny sposób – porównać rozwój fizyczny dziecka (np. z dysfunkcją narządu ruchu i/lub układu nerwowego) z rozwojem dzieci zdrowych. Zastosowanie takiego modelu w praktyce lekarskiej mogłoby znacznie skrócić

i uprościć badanie poziomu rozwoju motorycznego dzieci. W praktyce sportowej zaś model ten może służyć do oceny predyspozycji dziecka na początkowym (bardzo wczesnym) etapie szkolenia sportowego większości dyscyplin, zwłaszcza tych, w których dobry poziom stabilności ciała warunkuje sukces sportowy.

2.2. Cel badań

Celem pracy jest określenie prawidłowości zmian rozwojowych charakteryzujących proces utrzymywania równowagi u zdrowych dzieci w wieku 2–7 lat, z uwzględnieniem lewej i prawej kończyny dolnej, oraz zbadanie powtarzalności miar opisujących proces utrzymywania równowagi w odniesieniu do wieku kalendarzowego dzieci. Charakterystyka normalnych trendów zmian rozwojowych procesu utrzymywania równowagi ciała w naturalnej pozycji stojącej stanowi podstawę do sformułowania modelu szacowania wieku stabilności posturalnej.

2.3. Hipotezy i pytania badawcze

Na początkowym etapie rozwoju motoryki dzieci nie mają jeszcze pełnej kontroli nad czynnościami związanymi z utrzymaniem pionowej postawy ciała (Shumway-Cook i Woollacott, 1985). Intensywne procesy dojrzewania układu ruchu i centralnego systemu nerwowego u dzieci w wieku od 2 do 7 lat pozwalają na doskonalenie kontroli swojego ciała, na poprawę ekonomizacji, celowości i zborności ruchów (Berger i wsp., 1995). Kontrola równowagi ciała u dzieci staje się coraz bardziej skuteczna wraz z wiekiem, ponieważ skraca się czas utajenia (latencji) skurczu mięśni i wzrasta prędkość przewodnictwa nerwowo-mięśniowego (Forssberg, 1999). Procesy te przejawiają się w stopniowej minimalizacji kołysania (odchyleń od pionu) postawy ciała w ciągu kolejnych lat życia dziecka (Riach i Starkes, 1993; Cherng i wsp., 2003; Sobera i Siedlecka, 2006, 2007a, 2008). W świetle obecnej wiedzy na temat rozwoju kontroli posturalnej wydaje się słuszne poszukiwanie odpowiedzi na pytania: Jak zmienia się proces utrzymywania równowagi ciała w intensywnym okresie rozwoju morfofunkcjonalnego dzieci, tzn. pomiędzy 2. i 7. rokiem życia? Na które lata życia dziecka w wymienionym okresie przypadają najbardziej radykalne zmiany w rozwoju stabilności ciała podczas stania?

HIPOTEZA 1:

Przejawem doskonalenia się stabilności ciała w pozycji stojącej u zdrowych dzieci jest zmniejszanie się wychwiał ciała wraz z przyrostem wieku metrykalnego.

Jednym z podstawowych problemów pojawiających się podczas badań stabilności ciała przy użyciu platform sił jest powtarzalność miar określających proces utrzymywania równowagi (Goldie i wsp., 1989; Geurts i wsp., 1993), ze względu na dużą zmienność wyników w kolejnych badaniach nawet przy zastosowaniu tej samej metody i sprzętu. Przebieg procesu utrzymywania równowagi raczej nie jest powtarzalny u tego samego dorosłego badanego w kolejnych próbach (Brouwer i wsp., 1998), a w przypadku dzieci zagadnienie to jest słabo udokumentowane (Richardson, 1990). Wysoka powtarzalność u małych dzieci byłaby szczególnie pożądana ze względu na trudności techniczne w przeprowadzaniu badań. Małe dzieci są na ogół bardzo ruchliwe i szybko odczuwają zmęczenie, nawet przy krótkotrwałych próbach. Ponadto wiele czynników subiektywnych wpływa na stan gotowości dziecka do współpracy z badającym. U dzieci w wieku od 2 do 6–7 lat pojawia się duże zróżnicowanie międzyosobnicze pod względem rozwoju motoryczności (Malinowski, 2004), ale codzienny „trening” równowagi umożliwia stałe doskonalenie kontroli stabilności ciała. Powyższe przesłanki pozwalają przypuszczać, że dziecko w początkowej fazie rozwoju przejawia większą zmienność w realizacji zadania ruchowego niż dziecko, które dłużej wykonuje czynności lokomocyjne. Powstaje pytanie: Jaka jest charakterystyka zmian powtarzalności procesu utrzymywania równowagi w miarę rozwoju motoryki dzieci w wieku 2–7 lat?

HIPOTEZA 2:

Powtarzalność miar stabilności ciała określających proces utrzymywania równowagi u dzieci w wieku od 2 do 7 lat ulega poprawie wraz z przyrostem wieku kalendarzowego.

Dzieci w wieku 2–3 lat nie mają jeszcze ustalonej lateralizacji ciała, chociaż mogą przejawiać preferencje wyboru jednej kończyny – górnej lub dolnej – do wykonywania określonej czynności ruchowej. U dzieci w wieku 3–4 lat obserwuje się zanikanie oburęczności i pojawia się preferowanie jednej strony ciała (Malinowski, 2004). Lateralizacja ciała posiada determinację genetyczną, związaną z lokalizacją w mózgu ośrodka mowy (Malinowski, 2004). Dominacja jednej strony ciała może mieć znaczenie dla stabilizacji pozycji stojącej i rozkładu obciążenia kończyn dolnych podczas stania (Önell, 2000). W konsekwencji można zadać pytanie o to, czy lateralizacja kończyn dolnych przejawia się podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Jeśli odpowiedź na nie będzie twierdząca, można z kolei sformułować następne pytanie – jak kształtuje się lateralizacja kończyn dolnych w funkcji podporowej podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej w okresie rozwoju dzieci pomiędzy 2. a 7. rokiem życia.

Większość dzieci „wybiera” prawą kończynę górną i dolną jako dominującą w wykonywaniu różnych czynności ruchowych. Można przypuszczać, że wrodzona dominacja czynnościowa na ogół prawej kończyny dolnej powoduje dominację lewej w funkcji podporowej ciała podczas stania naturalnego, by zachować gotowość prawej kończyny dolnej do wykonania ruchu. Określenie preferencji jednej z kończyn dolnych w funkcji podporowej może być podstawą do podjęcia kroków zaradczych w celu wyrównania ich aktywności podczas stania. Chociaż asymetrie: morfologiczna i czynnościowa są w pewnym stopniu normą (Malinowski, 2004), to mogą być niepożądane w przypadku procesu utrzymywania równowagi ciała w pozycji dwunożnej, szczególnie u małych dzieci.

HIPOTEZA 3:

U dzieci w wieku od 2 do 7 lat lateralizacja funkcji podporowej kończyn dolnych, związana z wiekiem metrykalnym, kształtuje się w kierunku dominacji lewej kończyny dolnej w funkcji podporowej ciała.

Badania równowagi ciała przy użyciu platform sił są stosunkowo proste do przeprowadzenia, nie angażują obiektu badań dłużej niż kilka minut, co nie pozostaje bez znaczenia w przypadku małych dzieci lub osób chorych. Nowoczesne programy komputerowe pozwalają także na wysoki stopień automatyzacji obliczeń wskaźników opisujących stabilność ciała. Badania kontroli postawy często jednak nie są stosowane nawet w placówkach specjalistycznych, gdzie rutynowo wykonuje się diagnostykę narządu ruchu. Wydaje się, że problem praktycznego wykorzystania rezultatów badań i wiedzy z zakresu stabilności ciała wynika z bardzo rozbudowanego „wachlarza” narzędzi – wskaźników, parametrów – oceniających proces kontroli równowagi. Określanie wskaźników stabilności pozycji stojącej często jest związane ze skomplikowaną procedurą obliczeniową, która wymaga wiedzy matematyczno-statystycznej, co może być przyczyną niechęci do jej stosowania. W przypadku niektórych wskaźników stabilności ciała pojawiają się problemy interpretacyjne. Uproszczenie procedury obliczeniowej i prognozowanie wieku stabilności posturalnej, szczególnie w przypadku dzieci, wydaje się niezbędnym elementem ułatwiającym praktyczne wykorzystanie tego typu badań. Porównanie szacowanego wieku stabilności posturalnej z wiekiem metrykalnym badanego dziecka umożliwi ocenę jego rozwoju motorycznego (opóźnionego, normalnego lub wyprzedzającego rozwój populacji dzieci zdrowych w tym samym wieku).

W pracy tej przyjęto założenie, że na podstawie szczegółowej oceny stabilności ciała w pozycji stojącej u dzieci w wieku od 2 do 7 lat sformułowanie modelu do szacowania wieku stabilności posturalnej jest możliwe.

3

Metody badania i analizy danych

3.1. Materiał badawczy

Badaniami objęto 272 zdrowych dzieci w wieku od 2 do 7 lat (129 dziewcząt i 143 chłopców), z dwóch wrocławskich przedszkoli (nr 50 i 13) oraz dwóch żłobków (nr 3 i 6), których dyrekcja wyraziła zgodę na przeprowadzenie badań równowagi w godzinach przedpołudniowych na terenie placówek opiekuńczych. Badania prowadzono w terminie od listopada 2007 do czerwca 2008 roku. Wymienione publiczne placówki opiekuńcze przeznaczone są wyłącznie dla dzieci zdrowych (nie są to przedszkola i żłobki integracyjne) i znajdują się w centralnej dzielnicy Wrocławia. Badane dzieci pochodzą głównie z rodzin inteligentnych o średnim statusie społecznym.

Osoby badane podzielono na 6 grup wiekowych. Szczegółowe charakterystyki każdej grupy wiekowej zamieszczono w tabeli 1 w aneksie.

Wiek badanych dzieci obliczono według sposobu uznanego przez antropo-

TABELA 3.1. Średnie wartości podstawowych wymiarów ciała badanych dzieci w poszczególnych przedziałach wiekowych

Grupa wiekowa	Przedział wieku [miesiące]	Masa ciała [kg]	Wysokość ciała [m]	Indeks masy ciała – BMI
2-latki ($N = 35$)	18–29	13,2 ($\pm 1,6$)	0,89 ($\pm 0,04$)	16,76 ($\pm 1,24$)
3-latki ($N = 50$)	30–41	14,8 ($\pm 1,8$)	0,97 ($\pm 0,05$)	15,58 ($\pm 1,88$)
4-latki ($N = 35$)	42–53	17,5 ($\pm 3,6$)	1,05 ($\pm 0,05$)	15,77 ($\pm 1,72$)
5-latki ($N = 59$)	54–65	20,1 ($\pm 3,9$)	1,11 ($\pm 0,06$)	15,91 ($\pm 2,55$)
6-latki ($N = 60$)	66–77	21,9 ($\pm 3,7$)	1,18 ($\pm 0,05$)	15,50 ($\pm 2,12$)
7-latki ($N = 33$)	78–89	22,2 ($\pm 3,2$)	1,20 ($\pm 0,06$)	16,35 ($\pm 2,37$)

N – liczba badanych

logów za prawidłowy¹, biorąc pod uwagę liczbę miesięcy życia od daty urodzenia. W tabeli 3.1 podano przedziały wieku dzieci wyrażone w miesiącach wraz przynależnością do odpowiedniej grupy wiekowej oraz przedstawiono podstawowe średnie wielkości masy i wysokości ciała, a także wartości indeksu masy ciała (*body mass index* – BMI).

Badane dzieci poddano weryfikacji pod względem norm wysokości i masy ciała w obrębie poszczególnych grup wiekowych. W tym celu zastosowano siatki centylowe dla chłopców i dziewcząt, uznane przez Instytut Matki i Dziecka w Warszawie w 1999 roku (www.siatkicentylowe.edziecko.pl). Większość badanych dzieci odpowiada normom rozwojowym masy i wysokości ciała. W pojedynczych przypadkach znacznego odstępstwa danego dziecka od normy, jego wyniki wyeliminowano z analizy. Podczas okresowych badań pediatrycznych u badanych dzieci nawet w przeszłości nie stwierdzono żadnych dysfunkcji ze strony układu nerwowego i układu ruchu (mogących wpływać na równowagę ciała).

Pozwolenie Komisji Etyki Akademii Wychowania Fizycznego we Wrocławiu na przeprowadzenie powyższych badań uzyskano w 2006 roku. Rodzice wszystkich dzieci wyrazili pisemną zgodę na ich udział w badaniach równowagi.

3.2. Organizacja i przebieg badania

Badane dziecko stało swobodnie, spokojnie, bez butów na dwóch platformach sił typu AccuSway (firmy AMTI), pod każdą stopą znajdowała się jedna platforma. Próbę powtarzano trzykrotnie – jedna po drugiej, bez zmiany ustawienia stóp, w dwunożnej pozycji stojącej (ryc. 3.1). Pojedyncza próba stania trwała 20 s. Stopy dziecka ustawione były prosto (bez rotacji w stawie skokowo-goleniowym) na szerokość stawów biodrowych, a kończyny górne – opuszczone swobodnie wzdłuż tułowia. Badania odbywały się w godzinach przedpołudniowych. Ze względów higienicznych dzieci stały na połączonych kartkach białego papieru położonych na platformach, zmienianych dla każdego badanego. Dzieci poproszono o niewykonywanie dodatkowych ruchów. Polecono im także, by podczas próby patrzyły na zabawkę umieszczoną na wysokości ich wzroku w odległości około 3 m. W przypadku wykonania ruchu kończyną górną lub głową dziecko powtarzało badanie kilkanaście minut później. W niektórych próbach, przy niechęci dziecka do współpracy, należało odrzucić dane w całości. Do opracowania zakwalifikowano wyniki 272 dzieci.

¹ Za dziecko 2-letnie uznano takie, które w dniu badania mieściło się w przedziale wiekowym powyżej 1 roku 6 miesięcy i 1 dnia, a poniżej 2 lat i 6 miesięcy (Wolański, 1975; Jopkiewicz i Suliga, 1995). Podobnie określono kolejne grupy wiekowe.



RYCINA 3.1. Stanowisko badawcze: 2 platformy AccuSway wraz z przetwornikiem analogowo-cyfrowym i komputer przenośny

Pomiar wysokości ciała dziecka wykonywano tuż po zakończeniu prób stania na platformach. Wysokość ciała mierzono przy ścianie, na której przyklejono taśmę krawiecką. Dziecko przyjmowało pozycję stojącą wyprostowaną, bez butów, tyłem do ściany, następnie przykładano ekierkę dłuższym ramieniem kąta prostego do najwyższego punktu na głowie dziecka, a krótszym – do ściany. Wierzchołek kąta prostego ekierki wyznaczał punkt na taśmie centymetrowej, który został odnotowany jako wysokość ciała dziecka.

Ciężar ciała odpowiadający masie wyliczono poprzez uśrednienie sumy chwilowych sił pionowych lewej i prawej kończyny dolnej, wyzwanych na obie platformy podczas prób stania, uwzględniając równanie jednostki siły 1 kgf (1 kilogram siły – dawniej „kG”) = 9,81 N.

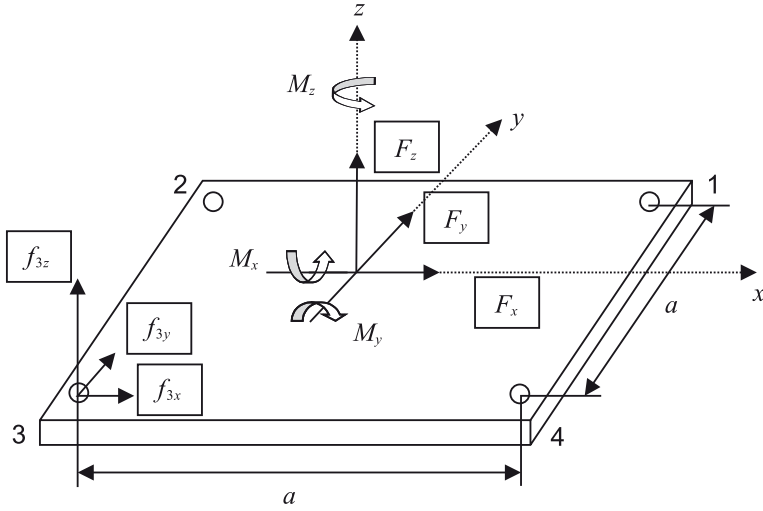
3.3. Metoda badania i procedury statystyczne

3.3.1. Aparatura pomiarowa

Główną aparaturę pomiarową stanowiły dwie platformy sił typu AccuSway firmy AMTI i komputer przenośny do archiwizacji danych.

Każda platforma działa w oparciu o 12 czujników tensometrycznych rozmieszczonych w czterech rogach platformy (po 3 sensory w każdym rogu). Schemat działania platformy przedstawiono na rycinie 3.2.

Czujniki rozmieszczone pod pokrywą górną platformy w równych odległościach (α) między sobą są miernikami sił w trzech głównych kierunkach:



RYCINA 3.2. Schemat działania platformy sił AccuSway (za: Hufschmidt i wsp., 1980).
Opis i wyjaśnienie oznaczeń w tekście

f_{ix} – siła pozioma w płaszczyźnie czołowej (kierunek boczny), f_{iy} – siła pozioma w płaszczyźnie strzałkowej (kierunek przednio-tylny), f_{iz} – siła pionowa. Sygnały z czujników są sumowane tak, by uzyskać chwilowe wartości sił (F) i momenty sił (M) działających na obciążoną platformę wzdłuż osi x , y , z , według formuły:

$$F_x = \sum_{i=1}^4 f_{ix}, \quad F_y = \sum_{i=1}^4 f_{iy}, \quad F_z = \sum_{i=1}^4 f_{iz},$$

$$M_x = \sum_{i=1}^4 r_{ix} \cdot f_{ix}, \quad M_y = \sum_{i=1}^4 r_{iy} \cdot f_{iy}, \quad M_z = \sum_{i=1}^4 r_{iz} \cdot f_{iz},$$

gdzie: $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ ($i = 1, \dots, 4$ – kolejne zestawy czujników) – wypadkowa przemieszczeń punktu przyłożenia sił f_i wzdłuż osi x (przemieszczenia COP w kierunku bocznym), y (przemieszczenia COP w kierunku przednio-tylnym) i z (przemieszczenia COP wzdłuż osi pionowej) (ryc. 3.2).

Przemieszczenia punktu przyłożenia wypadkowej siły reakcji podłoża, który jest jednocześnie punktem przyłożenia wypadkowej siły nacisku stóp na podłoże, tradycyjnie nazywanego punktem nacisku COP (*center of pressure*), są wyliczane według wzorów:

$$\text{COPX} = \left[\frac{M_y + (s_x \cdot F_x)}{F_z} \right] \cdot (-1)$$

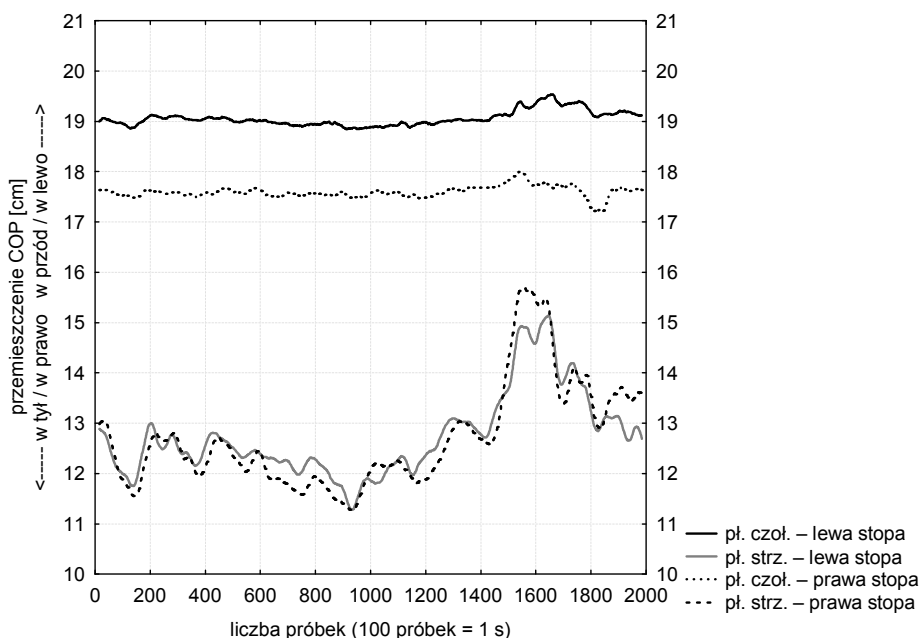
w kierunku bocznym, gdzie: s_x stanowi odległość punktu przyłożenia chwilowej siły wypadkowej nacisku stopy F_x w płaszczyźnie czołowej (bocznej) od czujników platformy, oraz

$$\text{COPY} = \left[\frac{M_x - (s_y \cdot F_y)}{F_z} \right]$$

przesunięcia punktu COP w kierunku przednio-tylnym, gdzie: s_y stanowi odległość punktu przyłożenia chwilowej siły wypadkowej nacisku stopy F_y w płaszczyźnie strzałkowej (przednio-tylnej) od czujników platformy.

W pracy analizowano przebieg punktu COP w dwóch płaszczyznach ruchu: czołowej (oscylacje boczne COPX) i strzałkowej (oscylacje przednio-tylne COPY) (ryc. 3.3). Częstotliwość próbkowania wynosiła 100 Hz.

Przebieg punktu nacisku COP w funkcji czasu w obu kierunkach ruchu dla kończyny dolnej lewej i prawej osobno stanowił podstawę do obliczeń miar – wskaźników stabilności ciała dzieci, charakteryzujących proces utrzymywania równowagi ciała.



RYCINA 3.3. Przebieg punktu COP lewej i prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej w funkcji czasu losowo wybranego 3-letniego dziecka

3.3.2. Wskaźniki stabilności ciała

Badacze równowagi ciała analizują zachowanie się układu ruchu, opierając swoje wnioski na powszechnie stosowanych miarach stabilności ciała, obliczonych z przebiegu COP w funkcji czasu, takich jak: zmienność, zakres przemieszczeń COP, miary związane z długością drogi oscylacji COP (Błaszczyk i wsp., 1994, 2008; Lebedowska, 1997; Lebedowska i Syczewska, 2000; Sobera i Siedlecka, 2008; Syczewska i wsp., 2008), prędkość przemieszczeń COP u dzieci w różnym wieku (Riach i Starkes, 1994), pole powierzchni, jakie zakreśla punkt nacisku stóp na podłoże podczas stania (Newell i wsp., 1997) czy indeksy stabilności zaproponowane przez Brenière i Bril (1998), a także Soberę i wsp. (2007a). Wskaźniki te są uznawane przez badaczy równowagi za ilościowe i jakkolwiek dają pogląd na stabilność pozycji badanego, to powinny być uzupełnione przez takie miary, które wnoszą informacje o jakości sterowania układem ruchu podczas stania, tzn. o centralnym układzie nerwowym (Winter i Eng, 1995; Winter i wsp. 1998; Kuczyński, 2001).

Błaszczyk i Klonowski (2001) wprowadzili nową miarę oceny stabilności ciała człowieka – wymiar fraktalny, miarę chaotyczności obliczoną z przebiegu punktu COP i przebiegu przemieszczeń środka masy ciała. Flis i wsp. (2001) wykorzystali model autoregresyjny do opisanie utrzymywania równowagi u dorosłych. Kuczyński zaproponował zastosowanie modelu autoregresji drugiego rzędu (Kuczyński, 1997, 1999, 2001, 2003) do wyeksponowania z przebiegu COP ruchów stóp korygujących wychylenia ciała, po odjęciu z zarejestrowanego przebiegu zmian położenia środka masy ciała. Hertel i wsp. (2006) posługiwali się stosunkowo nowym wskaźnikiem – czasu dojścia do granic stabilności ciała, przy uwzględnieniu chwilowej wartości prędkości COP.

Małe dzieci, jakich dotyczy niniejsza praca, charakteryzują się nieco większymi wychwianiami ciała (Sobera, 2005a). Charakterystyka procesu utrzymywania równowagi ciała powinna zatem zawierać u nich informacje zarówno o zewnętrznych przejawach kołysania postawy, jak i o procesach przewodzenia bodźców ruchowych wewnątrz układu ruchu. Stwierdzono jednak, że miary ilościowo-amplitudowe dobrze różnicują dzieci pod względem stabilizacji postawy (Lebedowska, 1997), dlatego w niniejszej pracy posłużono się amplitudowymi (ilościowymi) i jakościowymi wskaźnikami stabilności.

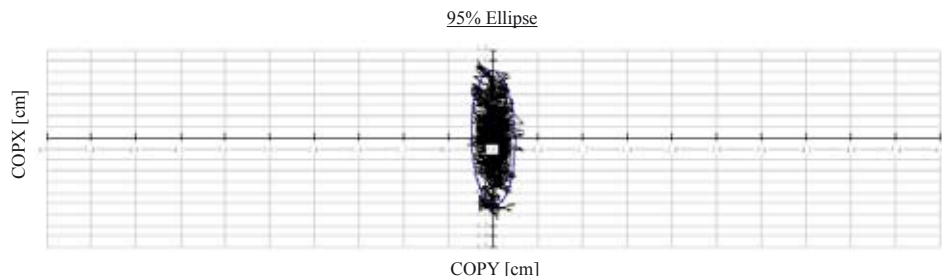
3.3.3. Sposoby wyznaczania wskaźników stabilności ciała

W niniejszej pracy zastosowano następujące wskaźniki (miary) stabilności ciała:

1. Maksymalny zakres przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej [cm] jest to odległość pomiędzy skrajnymi, maksymalnymi przemieszczeniami COP w kierunku bocznym i przednio-tylnym. Wskaźnik

ten pozwala ocenić, w jakim maksymalnym wymiarze dziecko „kołysze się” w pozycji stojącej w kierunku przednio-tylnym i bocznym (ryc. 3.3). Małe dzieci często tracą równowagę i upadają, więc wskaźnik ten może dawać pewne informacje o granicach stabilności ciała, tzn. o możliwościach maksymalnego wychylenia ciała w kierunku bocznym i przednio-tylnym. Zdrowy dorosły zwykle utrzymuje oscylacje COP z dala od tych granic, zostawiając sobie stosunkowo duży margines stabilności (Błaszczyk i wsp., 1993, 1994), swoiste pole bezpieczeństwa w celu zachowania równowagi w sytuacji zagrożenia destabilizacją ciała. Absolutną granicę stabilności ciała (anatomiczną) wyznacza obrys zewnętrznych krawędzi stóp, ale obszar stabilności jest znacznie mniejszy niż powierzchnia podparcia stóp. W normalnych warunkach człowiek nigdy nie wychyla ciała w takim zakresie, żeby osiągnąć granice obszaru stabilności, gdyż to grozi upadkiem (Trew i Everett, 2005). U małych dzieci zakres przemieszczeń punktu COP może zbliżać się do granic maksymalnego wychylenia ciała (stabilności) ze względu na niewielkie odczucia zagrożenia utratą równowagi.

2. Zmienność położenia COP [cm] w obu płaszczyznach ruchu: czołowej i strzałkowej. Wskaźnik zmienności jest odchyleniem standardowym od wielkości średniej przebiegu COP i świadczy o stopniu rozrzutu przemieszczeń tego punktu od średniej. Wskaźnik ten stanowi miarę zmienności oscylacji punktu nacisku stóp na podłoże, odzwierciedlającą zmienność wychyleń ciała w procesie realizacji zadania utrzymywania równowagi ciała w pozycji stojącej.
3. Pole elipsy oscylacji COP [cm²] jest to pole powierzchni elipsy wyznaczonej przez przemieszczający się punkt COP na powierzchni podstawy. Należy zaznaczyć, że opcja programu kompatybilnego z platformami sił, która pozwala na wyliczenie wielkości tego pola, automatycznie odrzuca 5% skrajnych wyników, a 95% danych uwzględnia w analizie (ryc. 3.4). Wskaźnik ten umożliwia ocenę wielkości powierzchni przemieszczania się punktu COP na płaszczyźnie podparcia stopy.



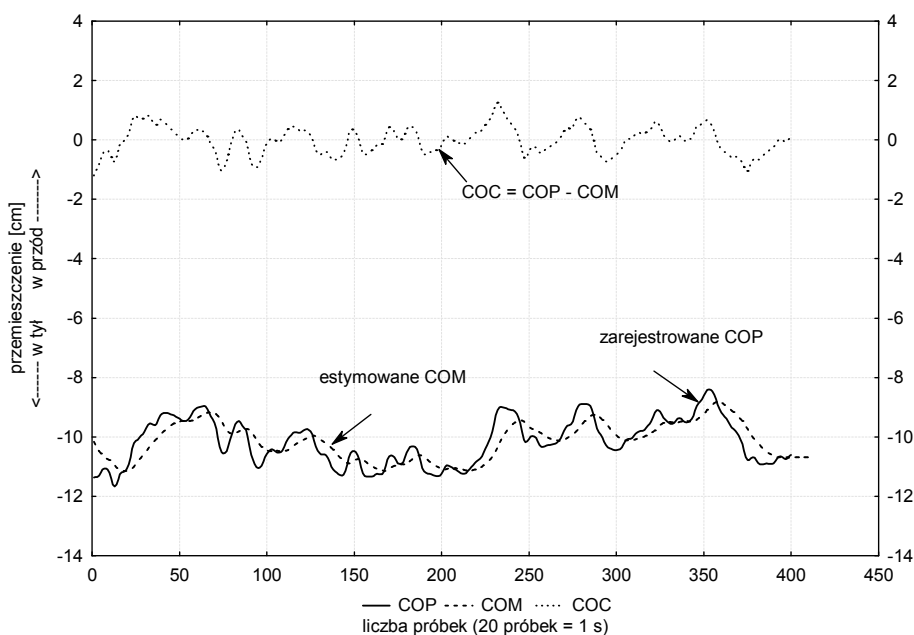
RYCINA 3.4. Zakreślone pole elipsy COP lewej kończyny dolnej 3-letniego dziecka

4. Średnia prędkość przemieszczeń COP [mm/s] jest to stosunek długości ścieżki przemieszczeń COP we wszystkich kierunkach do czasu (20 s). Długość ścieżki stanowi sumę odległości pomiędzy położeniem punktu COP w kolejnych próbkach przebiegu. Prędkość COP wskazuje na szybkość zmian położenia tego punktu, co odzwierciedla szybkość uruchamiania reakcji posturalnych podczas stania.

Pierwsze 4 wskaźniki stabilności ciała obliczono, korzystając z programu BIOANALYSIS, kompatybilnego z programem rejestrującym dane z platform AccuSway.

5. Częstotliwość pikowa (*peak frequency* – PF) korekcyjnego położenia punktu nacisku stopy lewej i prawej [Hz] w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej ruchu jest to liczba korekcyjnych zmian położenia punktu nacisku stopy lewej i prawej wokół szacowanego przebiegu położenia ogólnego środka masy ciała w czasie 1 s. Przebieg punktu COP stanowi sumę przemieszczeń rzutu pionowego ogólnego środka masy ciała i przebiegu korekcyjnych zmian położenia punktu nacisku stóp łącznie. Korekcyjne zmiany położenia punktu nacisku stóp na podłoże są odpowiedzią na wychylenia ciała i oscylują częściej i w większym zakresie niż zmiana położenia rzutu pionowego ogólnego środka masy COM na powierzchnię podstawy stóp (Zatsiorsky, 1999; Kuczyński, 2003). Warunek ten musi być zawsze spełniony, aby możliwe stało się utrzymanie równowagi w pionowej pozycji ciała. Dekompozycja tych dwóch przebiegów, tzn. COP–COM, obrazuje korygujące przemieszczenia punktu nacisku stóp (*center of corrective signal* – COC) wokół przebiegu rzutu pionowego ogólnego środka masy COM. Częstotliwość oscylacji punktu COC pośrednio świadczy o aktywności układu nerwowego, związanej z procesem stabilizacji pionowej postawy ciała (Kuczyński, 1997, 2001, 2003).

W niniejszej pracy zastosowano procedurę obliczeniową korekcyjnego przebiegu COC opartą na uproszczonym modelu wahadła odwróconego, do którego sprowadza się utrzymywanie równowagi w pozycji stojącej. Matematyczny model autoregresji drugiego rzędu opisuje model fizyczny wahadła o jednym przegubie w okolicy stawu skokowego, autorstwa Kuczyńskiego (1997, 1999, 2001, 2003). Ze względu na znaczną wrażliwość wyników parametrów modelu na częstotliwość próbkowania, na wstępie należało zmniejszyć liczbę próbek pojedynczego przebiegu COP z 2000 do 400 (ryc. 3.5) – zalecaną częstotliwością próbkowania autora modelu autoregresji drugiego rzędu jest 20 Hz. Model ten pozwala na estymację przebiegu środka masy ciała dzieci, przy zastosowaniu procedury wygładzania wykładniczego przebiegu punktu COP (automatyczna opcja dostępna w programie STATISTICA). Następnie przebieg COM należało



RYCINA 3.5. Przebiegi zarejestrowanego punktu nacisku COP lewej stopy dziecka 5-letniego w płaszczyźnie strzałkowej oraz przebiegi COM i COC

odjąć od przebiegu COP, a wartości reszt odejmowania w kolejnych próbkach utworzyły przebieg korekcyjnych przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże COC (ryc. 3.5).

Przebieg punktu COC opisuje model autoregresji drugiego rzędu (Kuczyński, 1997, 1999, 2001, 2003), którego parametry p_1 i p_2 są podstawą do obliczenia częstotliwości pikowej przebiegu COC według formuły:

$$PF = \arccos [(p_2 - 1) \cdot p_1 / (4 \cdot p_2)] / 2 \cdot \pi / \Delta,$$

gdzie: Δ [s] oznacza krok próbkowania, w tym przypadku 0,05 s.

3.3.4. Metoda analizy powtarzalności procesu utrzymywania równowagi

Powtarzalność procesu utrzymywania równowagi u dzieci w poszczególnych grupach wiekowych weryfikowano przez obliczenie współczynnika zgodności (konkordancji; *concordance correlation coefficient* – CCC) wartości wskaźników stabilności otrzymanych w kolejnych trzech próbach stania, z uwzględnieniem lewej i prawej kończyny dolnej. Współczynnik zgodności ww. wskaźników stabilności próby: pierwszej i drugiej, drugiej i trzeciej oraz pierwszej i trzeciej obliczono według wzoru:

$$CCC = \frac{2 \cdot r \cdot sd_1 \cdot sd_2}{sd_1^2 + sd_2^2 + (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2},$$

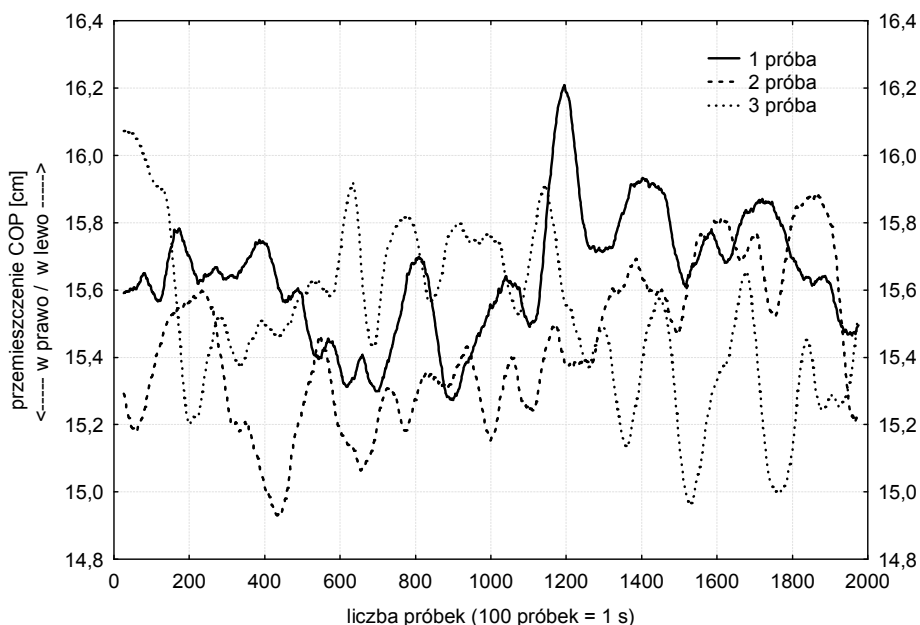
gdzie: r – współczynnik korelacji Pearsona między kolejnymi wskaźnikami stabilności tej samej kończyny dolnej i płaszczyzny ruchu w obrębie jednej grupy wiekowej w dwóch porównywanych próbach,

$\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$ oraz sd_1 i sd_2 – średnie i odchylenia standardowe dwóch zestawów wartości wskaźników stabilności porównywanych prób.

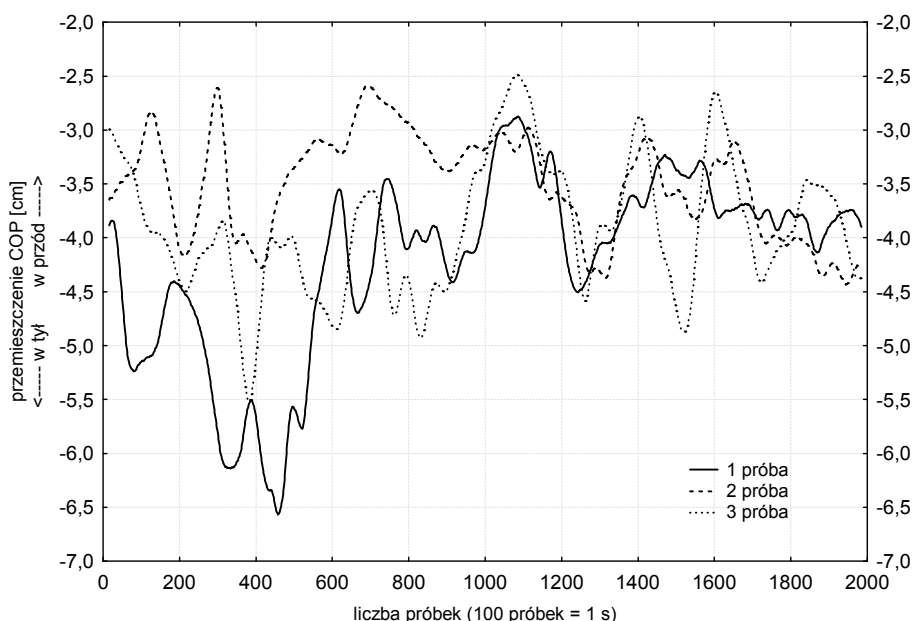
Przykładowe zapisy przebiegów COP w kolejnych próbach jednego dziecka przedstawiono na rycinie 3.6 i 3.7.

Ryciny: 3.6 i 3.7 pozwalają wizualnie porównać przebiegi COP w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej (zarejestrowane w kolejnych próbach) oraz wstępnie oszacować poziom ich wzajemnego podobieństwa. Przebiegi te na ogół różnią się znacznie od siebie.

Wartości współczynnika zgodności w grupach wiekowych stanowiły podstawę do analizy powtarzalności procesu kontroli stabilności ciała badanych w kolejnych trzech próbach stania. Wielkość współczynnika CCC zależy głównie od wartości współczynnika korelacji wzajemnej dwóch porównywanych



RYCINA 3.6. Przebiegi punktu COP prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej w kolejnych trzech próbach stania dziecka 3-letniego



RYCINA 3.7. Przebiegi punktu COP prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej w kolejnych trzech próbach stania dziecka 3-letniego

zestawów wyników, toteż progowy poziom zgodności wskaźników stabilności wyznaczono na podstawie wyliczonych wartości krytycznych r_k współczynników korelacji wzajemnej Pearsona dla wybranych prób z uwzględnieniem liczebności grup wiekowych, według formuły:

$$r_k = \sqrt{\frac{t_\alpha^2}{t_\alpha^2 - (n + 2)}},$$

gdzie: t_α – krytyczna wartość testu t -Studenta,

α – próg istotności współczynnika korelacji wzajemnej (równe 0,05),

n – liczba prób badawczych.

Wartości CCC równe wartości krytycznej dla danej grupy wiekowej i przekraczające ją uznano za istotne.

Ponadto, ocenę poziomu zgodności oparto na ogólnie przyjętej ocenie siły związku, wynikającej z wartości współczynnika korelacji wzajemnej pomiędzy wynikami z kolejnych prób, tzn. 0–0,2 – słaba zgodność, 0,3–0,4 – zgodność poniżej przeciętnej, 0,5 – przeciętna zgodność, 0,6–0,7 – zgodność powyżej przeciętnej, 0,8–1,0 – duża zgodność.

Różnice między współczynnikami zgodności CCC lewej i prawej kończyny dolnej oceniono przez określenie poziomu istotności różnic współczynników korelacji wzajemnej pomiędzy danym wskaźnikiem stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w tym samym porównaniu prób. Przyjęto, że poziom istotności różnic p zgodności lewej i prawej kończyny dolnej jest równy 0,05.

3.3.5. Metoda określenia asymetryczności funkcji podparcia kończyn dolnych

Omówione wskaźniki stabilności ciała obliczono i rozpatrywano oddzielnie dla lewej i prawej kończyny dolnej w każdej z grup wiekowych. Porównanie średnich wartości tych wskaźników i obliczenie istotności różnic pomiędzy wskaźnikami obu kończyn dolnych stanowi podstawę do określenia asymetrii funkcji stabilizacyjnej podczas stania naturalnego.

W czasie badania równowagi w pozycji stojącej rejestrowano chwilowe wartości pionowej siły nacisku kończyny dolnej lewej i prawej, jaką dziecko wywiera na platformę. Wielkość tej siły jest równa chwilowej sile reakcji podłoża, którą rejestrują czujniki platform. Obliczono średnią wartość pionowej siły nacisku (Fz [N]), generowanej przez lewą (Fz_{le}) i prawą kończynę dolną (Fz_{pr}) podczas każdej pojedynczej próby badanego dziecka. Następnie znormalizowano wielkość siły Fz połową ciężaru ciała badanego (wyrażoną w N). Otrzymano w ten sposób bezwymiarowy współczynnik obciążenia kończyny dolnej lewej i prawej:

$$N Fz_{le} = Fz_{le} \cdot \frac{1}{2} \text{ ciężaru ciała,}$$

$$N Fz_{pr} = Fz_{pr} \cdot \frac{1}{2} \text{ ciężaru ciała.}$$

Różnice średnich współczynników obciążenia kończyn dolnych w każdej z grup wiekowych stanowiły podstawę do wyznaczenia norm w zakresie asymetrii funkcji podporowej lewej i prawej kończyny dolnej podczas stania naturalnego.

3.3.6. Metody statystycznego opracowania wyników

W celu zweryfikowania normalności rozkładów, wyniki badań opracowano testem Shapiro-Wilka, uwzględniając grupy wiekowe i kolejne próby. W niektórych przypadkach wyniki poddano procedurze logarytmowania naturalnego, by uzyskać rozkład normalny. W związku z powyższym w pracy zastosowano statystyczne techniki parametryczne. Oceny różnic wskaźników stabilności pomiędzy sześcioma grupami badanych dokonano na podstawie analizy wariancji *post hoc* za pomocą testu Tukeya dla różnych liczebności grup.

Weryfikacji poddano także związki pomiędzy kolejnymi trzema próbami w obrębie każdej z grup wiekowych badanych dzieci. Wykonano analizę wa-

rianencji dla układów czynnikowych (ANOVA) w celu określenia interakcji pomiędzy danym wskaźnikiem stabilności, wiekiem i kolejną próbą.

Do oznaczenia różnicy wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej zastosowano test *t*-Studenta dla prób zależnych. Przyjęto próg istotności różnic na poziomie $\alpha < 0,05$. W przypadku różnic pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną poziom istotności zaznaczono na rysunkach rozkładu wyników.

3.3.7. Model statystyczny szacowania wieku stabilności posturalnej

Model szacowania wieku stabilności posturalnej oparto na metodzie predykcji zmiennej wynikowej – przewidywanego wieku rozwoju mechanizmów stabilizacyjnych ciała w pozycji stojącej – na podstawie rzeczywistych zmiennych zależnych, tak aby zmienna ta była obciążona jak najmniejszym błędem. Idea modelu polega na szacowaniu wieku stabilności posturalnej dzieci na podstawie wartości wybranych wskaźników stabilności ciała. Wybór tych wskaźników oparto na analizie regresji wielokrotnej, której poddano przedstawione wcześniej miary stabilności ciała dzieci. Przyjęto, że wiek kalendarzowy badanych jest zmienną, którą opisują wymienione wyżej wskaźniki stabilności. Sformułowano model regresji wielokrotnej, który pozwala analizować związki wieku rzeczywistego dzieci z całym zbiorem wskaźników stabilności ciała, według wzoru:

$$APS = b_0 + b_1m_1 + b_2m_2 + \dots + b_km_k,$$

gdzie: APS (*age of postural stability*) – przewidywana wartość wieku stabilności posturalnej dzieci, m_i dla $i = 1, \dots, k$ – i -ty wskaźnik stabilności o możliwie największym związku z wiekiem kalendarzowym, współczynniki b_i dla $i = 1, \dots, k$ – oceny parametrów regresji.

Współczynniki te po poddaniu standaryzacji szacowano metodą najmniejszych kwadratów za pomocą programu STATISTICA 8.0 w module „regresja wielokrotna”. Obliczono wartość współczynnika korelacji wielokrotnej (determinacji modelu) R^2 pomiędzy wiekiem kalendarzowym dzieci (zmienna zależna modelu) a wszystkimi wskaźnikami stabilności (zmienne niezależne). Oceny (selekcji) parametrów regresji – wskaźników stabilności, które wykazują najsilniejszy związek z wiekiem kalendarzowym, a najsłabszy względem siebie – dokonano na podstawie wartości współczynników korelacji wzajemnej Pearsona.

W celu weryfikacji założeń modelu:

- przeprowadzono analizę rozkładu przewidywanego wieku stabilności posturalnej (wyliczonego za pomocą modelu) w stosunku do wieku rzeczywistego badanego dziecka,

- wykonano analizę reszt – wyników różnicy pomiędzy wiekiem rzeczywistym i wyliczonym z modelu,
- sprawdzono współliniowość (nadmiarowość) wybranych do modelu wskaźników stabilności przez obliczenie tolerancji, korelacji cząstkowej i semicząstkowej.

Po ustaleniu współczynników b_i dla odpowiedniego parametru m_i przeprowadzono weryfikację modelu. Badaniu stabilności ciała poddano troje zdrowych dzieci w wieku 3 (jedno dziecko) i 7 lat (dwoje dzieci), a także sześcioro chorych (z zespołem Downa, Aspergera i autyzmem) w wieku 7–8 lat.

4

Wyniki badań

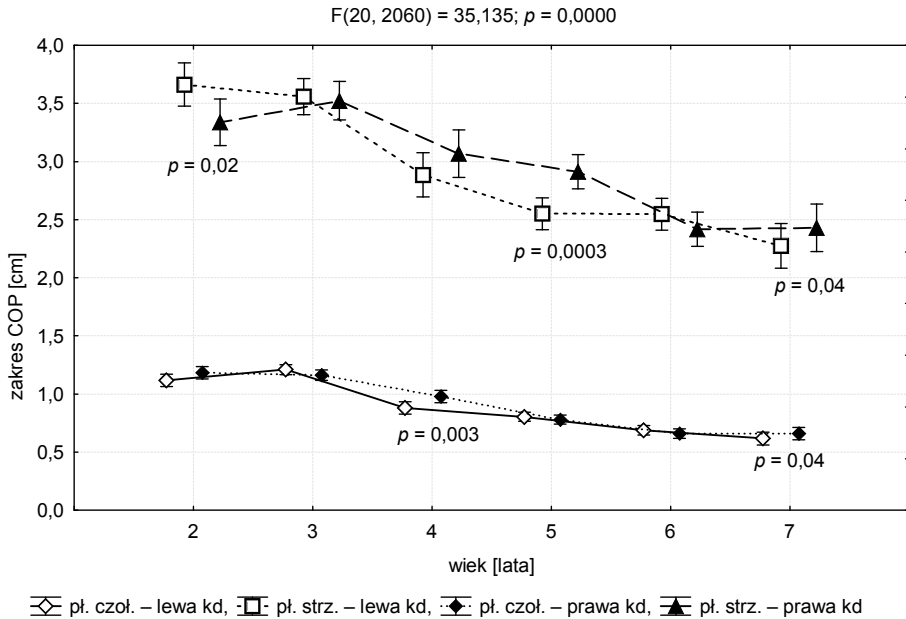
Wyniki badań równowagi ciała u dzieci w wieku od 2 do 7 lat przedstawiono w podrozdziałach według kolejności analizowanych wskaźników stabilności ciała, zgodnie z omówioną w rozdziale 3 metodologią badań. Ponadto analizie poddano wszystkie wyniki badań łącznie dla chłopców i dziewcząt bez podziału na płeć, sugerując się doniesieniami innych autorów, którzy wykazali, że różnice w stabilności ciała dziewcząt i chłopców – nawet w większych przedziałach wiekowych – są minimalne, mimo różnic morfologicznych płci (Riach i Hayes, 1987; Lebieadowska i wsp., 1994; Lebieadowska i Syczewska, 2000; Nolan i wsp., 2005; Peterson i wsp., 2006). Dlatego też w toku analizy dane dziewcząt i chłopców rozpatrywano razem w obrębie każdej grupy wiekowej.

W celu sprawdzenia związków pomiędzy wskaźnikiem stabilności a wiekiem kalendarzowym badanych i kolejną próbą stania zastosowano analizę wariancji układów czynnikowych ANOVA. Stwierdzono znaczące zależności między wiekiem kalendarzowym badanych a wielkością średnią poszczególnych wskaźników stabilności ciała, ale nie zanotowano efektu głównego pomiędzy wartością wskaźników stabilności a czynnikiem wieku i kolejnej próby stania. Niektóre dzieci nie wykonały trzech prób stania, zatem liczba obserwacji n podlegających analizie statystycznej, zamieszczona w tabelach od 2 do 17 w aneksie, różni się od trzykrotnej liczby badanych dzieci w danej grupie wiekowej. Rozkłady wartości średnich wskaźników stabilności ciała wykonano z uwzględnieniem grup wiekowych dzieci. Różnice pomiędzy wskaźnikami lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych grupach wiekowych przedstawiono w rozdziale 4.3.

4.1. Zmiany wskaźników stabilności ciała a wiek metrykalny dzieci

4.1.1. Zakres przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże

Wartości średnich zakresów przemieszczeń COP w obu płaszczyznach ruchu



RYCINA 4.1. Rozkład wartości średnich zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej (pł. strz.) i czołowej (pł. czoł.) lewej (lewa kd) i prawej (prawa kd) kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku. Pionowe odcinki oznaczają 95-proc. przedziały ufności. Istotną różnicę pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną zaznaczono wartością p

przedstawiono w postaci graficznej (ryc. 4.1), a tabele ze szczegółowymi wynikami zamieszczono w aneksie (tab. 2–5). Tabele te zawierają informacje o poziomie istotności różnic pomiędzy zakresem przemieszczeń COP w kolejnych grupach wiekowych dla lewej i prawej kończyny dolnej oddzielnie.

Zakres przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej u badanych dzieci zmniejsza się w miarę przyrostu wieku kalendarzowego.

Wartość zakresu COP w płaszczyźnie czołowej różnicuje prawie wszystkie grupy wiekowe (tab. 2 i 3 – aneks). Różnice te świadczą o niewielkich zmianach tego wskaźnika od wartości około 1,1–1,2 cm u dzieci od 2 do 3 lat, do 0,9–1,0 cm u 4-latków (ryc. 4.1, tab. 2 i 3 – aneks). Dzieci 5-letnie wykazują dalsze ograniczanie zakresu COP lewej i prawej stopy do około 0,8 cm. W kolejnej grupie wiekowej notuje się wartość 0,7 cm, po czym zakres COP w płaszczyźnie czołowej ruchu stabilizuje się na podobnym poziomie (0,6–0,7 cm) u 7-latków (tab. 2 i 3 – aneks). U dzieci 7-letnich nie zaobserwowano znacznego spadku wartości zakresu COP w płaszczyźnie czołowej w stosunku do 6-latków.

Średnie wartości zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej ruchu obniżają się wraz z wiekiem dzieci, podobnie jak w płaszczyźnie czołowej, zarówno w przy-

padku lewej, jak i prawej kończyny dolnej, od około 3,3–3,7 cm u 2- i 3-latków do 2,3–2,5 cm u 7-latków (ryc. 4.1, tab. 4 i 5 – aneks). Najbardziej intensywne zmiany w kierunku obniżania się wartości zakresu ruchu COP w płaszczyźnie strzałkowej obserwuje się pomiędzy 3. a 5. i 6. rokiem życia, po czym następuje pewna stabilizacja wartości tego wskaźnika u 7-latków (tab. 4 i 5 – aneks).

PODSUMOWANIE

Na podstawie zmian zakresu przemieszczeń COP u dzieci w wieku od 2 do 7 lat można stwierdzić następujące prawidłowości.

Dzieci 2-letnie przemieszczają punkt nacisku stopy lewej i prawej w podobnym zakresie ruchu jak 3-latki, tzn. około 1,2 cm w kierunku bocznym i około 3,6 cm w kierunku przednio-tylnym.

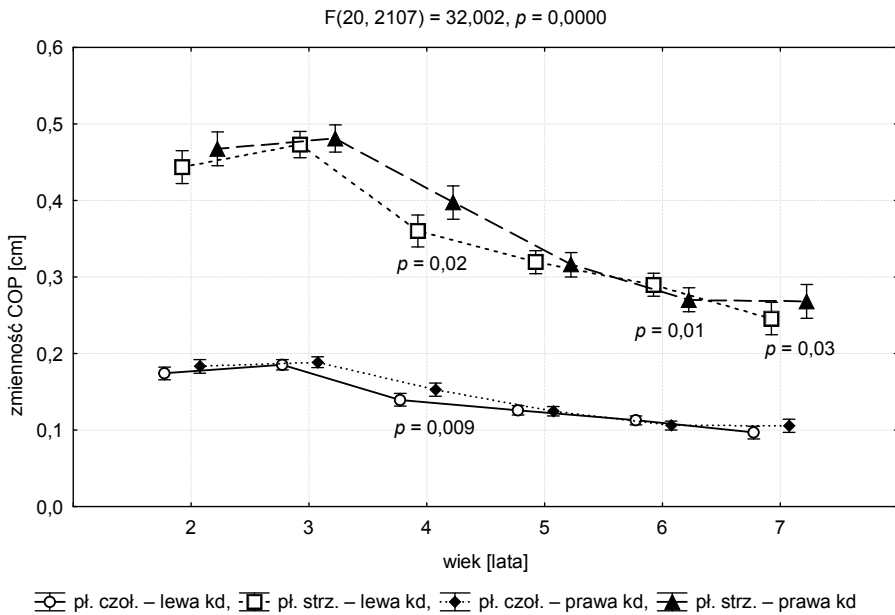
Pomiędzy 3. a 5. rokiem życia dzieci wykazują największe zróżnicowanie zakresu przemieszczania punktu nacisku obu kończyn dolnych zarówno w kierunku przednio-tylnym, jak i bocznym, znacząco zmniejszając wielkość przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże podczas stania do około 0,8 i 3,0 cm – odpowiednio w kierunku bocznym i przednio-tylnym. Istotne tendencje zmniejszania się zakresu przemieszczeń nacisku stóp obserwuje się do wieku 6 lat – szczególnie jeśli chodzi o ruchy boczne w obrębie obu stóp. Dzieci w tym wieku osiągają zakres przemieszczeń punktu nacisku około 0,7 cm w płaszczyźnie czołowej oraz około 2,5 cm w płaszczyźnie strzałkowej i stan ten nie zmienia się u 7-latków.

4.1.2. Zmienność przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże

Wskaźnik zmienności przemieszczeń COP jest miarą rozrzutu danych wewnątrz każdej grupy wiekowej. Wskaźnik ten określa poziom zmienności realizacji zadania utrzymywania równowagi w pozycji stojącej i podobnie jak zakres COP został poddany analizie wariancji układów czynnikowych, gdzie czynnikiem był wiek i kolejna próba. Stwierdzono efekt główny wskaźnika zmienności COP i czynnika wieku, kolejno wykonywane 3 próby nie wykazały związku z wartością wskaźnika zmienności COP w grupach wiekowych dzieci.

Rozkład wielkości średnich wskaźnika zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych grupach wiekowych przedstawiono na rycinie 4.2 i w tabelach od 6 do 9 w aneksie.

Wartości średnie wskaźnika zmienności COP lewej i prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej maleją wraz z wiekiem metrykalnym badanych dzieci. Wartości zmienności COP w płaszczyźnie strzałkowej ruchu są zasadniczo dwukrotnie wyższe od zmienności COP w płaszczyźnie czołowej.



RYCINA 4.2. Rozkład wartości średnich wskaźnika zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej (pł. strz.) i czołowej (pł. czoł.) lewej (lewa kd) i prawej (prawa kd) kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku. Pionowe odcinki oznaczają 95-proc. przedziały ufności. Istotną różnicę pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną zaznaczono wartością p

U dzieci 2- i 3-letnich nie zaobserwowano istotnych zmian międzygrupowych wskaźnika zmienności COP w obu płaszczyznach ruchu (ryc. 4.2, tab. 6–9 – aneks), co świadczy o pewnym zastoju dojrzewania zdolności koordynacyjnych dotyczących podstawowych czynności ruchowych, takich jak kontrola równowagi w pozycji stojącej, pomiędzy 2. i 3. rokiem życia. U dzieci w tym wieku wartość wskaźnika zmienności to około 0,2 cm w płaszczyźnie czołowej (tab. 6 i 7 – aneks) i około 0,5 cm w płaszczyźnie strzałkowej (tab. 8 i 9 – aneks). Najbardziej radykalne obniżanie się wartości zmienności COP stwierdzono u dzieci w wieku pomiędzy 3. a 6. rokiem życia: z około 0,2 cm do około 0,1 cm w płaszczyźnie czołowej (tab. 6 i 7 – aneks) oraz od wartości około 0,5 cm do około 0,3 cm – w płaszczyźnie strzałkowej (tab. 8 i 9 – aneks). Wartość zmienności COP u dzieci 7-letnich stabilizuje się na podobnym poziomie jak u 6-latków.

Skokowe zmniejszenie wskaźnika zmienności COP w obu płaszczyznach ruchu wykazują 4- i 5-latki, natomiast u dzieci 6- i 7-letnich nie obserwuje się istotnych różnic w zmienności COP zarówno lewej, jak i prawej kończyny dolnej.

PODSUMOWANIE

U dzieci w wieku 2 i 3 lat stwierdzono podobny – wysoki w stosunku do 7-latków – poziom zmienności, tzn. około 0,2 cm w płaszczyźnie czołowej i 0,4–0,5 cm w płaszczyźnie strzałkowej.

Najbardziej intensywne zmiany wartości wskaźnika zmienności przemieszczeń COP w obu kierunkach ruchu zachodzą u dzieci w wieku 4–6 lat i polegają na znaczącym obniżaniu się wielkości zmienności COP do wartości około 0,1 cm w płaszczyźnie czołowej i około 0,3 cm w płaszczyźnie strzałkowej ruchu. Najbardziej radykalne obniżanie się zmienności COP obserwuje się u 4- i 5-latków.

Dzieci 6- i 7-letnie wykazują zbliżony do siebie, a w odniesieniu do młodszych grup wiekowych najniższy poziom zmienności, tzn. około 0,1 cm w płaszczyźnie czołowej i 0,3 cm – w strzałkowej (podobny do wyników osób dorosłych).

4.1.3. Pole powierzchni oscylacji punktu nacisku stóp na podłoże

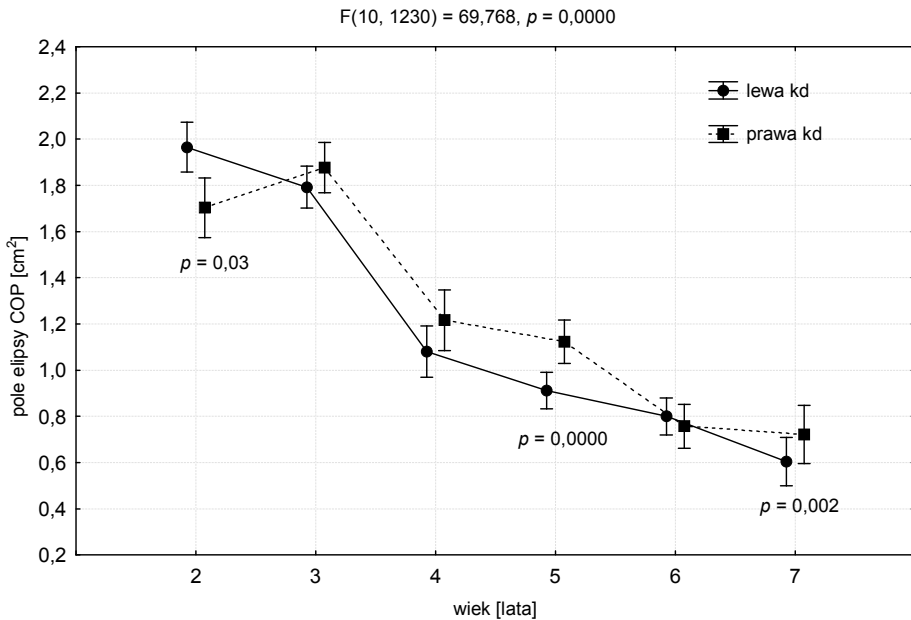
Pole elipsy oscylacji punktu nacisku obu stóp na podłoże jest miarą wielkości powierzchni, po której punkt COP przemieszcza się we wszystkich kierunkach na płaszczyźnie podparcia stóp. Po wykonaniu analizy wariancji układów czynnikowych, gdzie czynnikiem był wiek i kolejna próba, zanotowano znaczące zmiany wskaźnika pola elipsy oscylacji COP związane z wiekiem kalendarzowym badanych dzieci.

Średnie wartości pola oscylacji COP maleją w kolejnych grupach wiekowych (ryc. 4.3, tab. 10 i 11 – aneks), podobnie jak zakres i zmienność przemieszczeń punktu COP.

Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic wielkości pola elipsy COP pomiędzy grupą 2- i 3-latków (ryc. 4.3, tab. 10 i 11 – aneks). Wyraźną tendencję spadkową wielkości pola elipsy COP obu kończyn dolnych obserwuje się szczególnie pomiędzy 3. a 6. rokiem życia, od wartości 1,8–1,9 cm² u 3-latków do 0,8 cm² u 6-latków. Dzieci o rok starsze osiągnęły nieznacznie niższą wartość tego wskaźnika (0,6–0,7 cm²). Najbardziej radykalne obniżenie się wartości pola elipsy obu kończyn dolnych zanotowano u dzieci pomiędzy 3. i 4. rokiem życia. Pomiedzy grupą 6- i 7-latków nie obserwuje się istotnej różnicy w wielkości pola oscylacji COP (tab. 10 i 11 – aneks), co może oznaczać ustabilizowanie wielkości powierzchni przemieszczania się punktu nacisku obu stóp na podłoże podczas stania.

PODSUMOWANIE

Dzieci 2- i 3-letnie wykazują zbliżoną do siebie wielkość pola elipsy COP w przypadku zarówno lewej, jak i prawej kończyny dolnej. Wynosi ono 1,8–1,9 cm², chociaż w grupie 2-latków pole elipsy COP lewej kończyny dolnej (2,0 cm²) jest większe od pola elipsy COP prawej (1,7 cm²).



RYCINA 4.3. Rozkład średnich wartości pola elipsy oscylacji COP w obu płaszczyznach ruchu lewej (lewa kd) i prawej (prawa kd) kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku. Pionowe odcinki oznaczają 95-proc. przedziały ufności. Istotną różnicę pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną zaznaczono wartością p

Najbardziej gwałtowne obniżenie się wartości pola elipsy COP obu kończyn dolnych obserwuje się u dzieci pomiędzy 3. a 4. rokiem życia (do $1,1-1,2 \text{ cm}^2$), u 5-latków pole elipsy oscylacji COP nie zmienia się prawie wcale, a u 6-latków można zanotować spadek wartości tego wskaźnika do około $0,8 \text{ cm}^2$. Dzieci 7-letnie nie wykazują już istotnego obniżania się wartości wskaźnika pola elipsy oscylacji COP (wartość ta wynosi $0,6-0,7 \text{ cm}^2$).

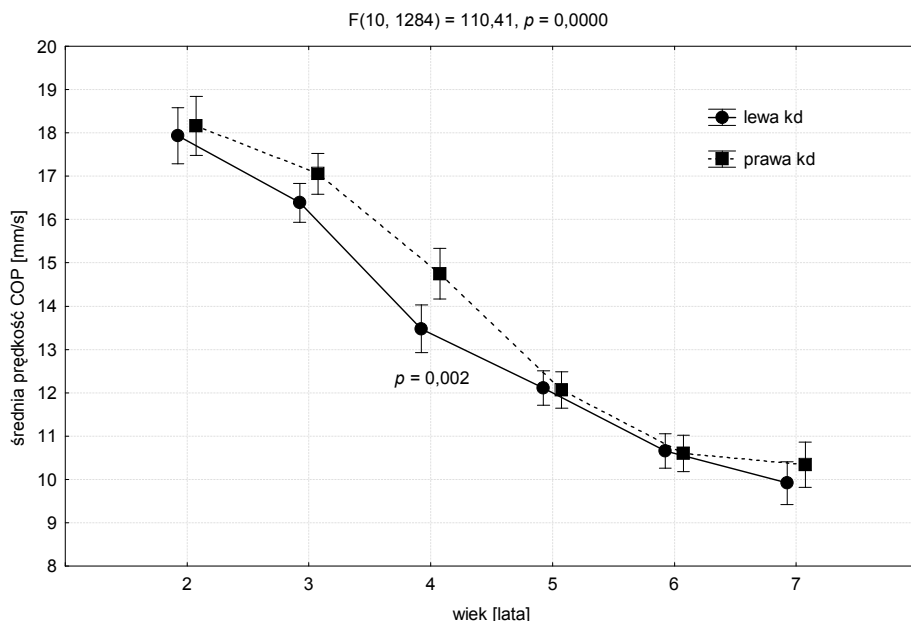
4.1.4. Prędkość przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże

Wskaźnik prędkości przemieszczeń COP zawiera informacje o szybkości zmiany położenia punktu nacisku stóp w różnych kierunkach ruchu.

Za pomocą analizy wariancji wskaźnika prędkości COP z uwzględnieniem czynnika wieku i kolejnych trzech prób stania wykazano znaczący związek tego wskaźnika z wiekiem kalendarzowym dzieci.

Średnia wielkość wskaźnika prędkości przemieszczeń COP zarówno lewej, jak i prawej kończyny dolnej wyraźnie spada w kolejnych grupach wiekowych (ryc. 4.4).

Prędkość zmian nacisku obu stóp w różnych kierunkach ruchu podczas stania



RYCINA 4.4. Rozkład średnich wartości prędkości oscylacji COP w obu płaszczyznach ruchu lewej (lewa kd) i prawej (prawa kd) kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku. Pionowe odcinki oznaczają 95-proc. przedziały ufności. Istotną różnicę pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną zaznaczono wartością p

gwałtownie obniża się wraz z wiekiem u dzieci od 2 do 6 lat (tab. 12 i 13 – aneks) od wartości 18,1–18,6 mm/s u 2-latków do 10,6–10,7 mm/s u 6-latków. U dzieci w wieku 6–7 lat wskaźnik ten stabilizuje się na poziomie około 10 mm/s. Największą różnicę międzygrupową notuje się pomiędzy dziećmi 3-, 4-, 5- i 6-letnimi (ryc. 4.4, tab. 12 i 13 – aneks). Zmniejszanie się wartości prędkości COP lewej i prawej kończyny dolnej wraz z wiekiem świadczy o ekonomizacji ruchów w obrębie stawu skokowego, czego przejawem jest spowolnienie zmian nacisku obu stóp w różnych kierunkach podczas naturalnego stania. Na tej podstawie można wnosić, że jednocześnie zmniejsza się wraz z wiekiem prędkość wychwiał ciała, gdyż zmiany położenia nacisku stóp na podłoże są efektem zmian położenia całego ciała.

PODSUMOWANIE

Prędkość zmian nacisku obu stóp na podłoże podczas stania istotnie zmniejsza się wraz z wiekiem w grupach dzieci od 2 do 6 lat, odpowiednio od ponad 18 mm/s do 10,6–10,7 mm/s. Między 6. i 7. rokiem życia wskaźnik ten ustala się na poziomie około 10 mm/s.

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że wraz z przyrostem wieku kalendarzowego dzieci spowalniają zmiany nacisku stóp na podłoże z powodu zmniejszania prędkości „kołysania się” pionowej postawy ciała, co prawdopodobnie jest przejawem ekonomizacji ruchów stabilizujących pozycję stojącą.

4.1.5. Częstotliwość korekcyjnych przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże

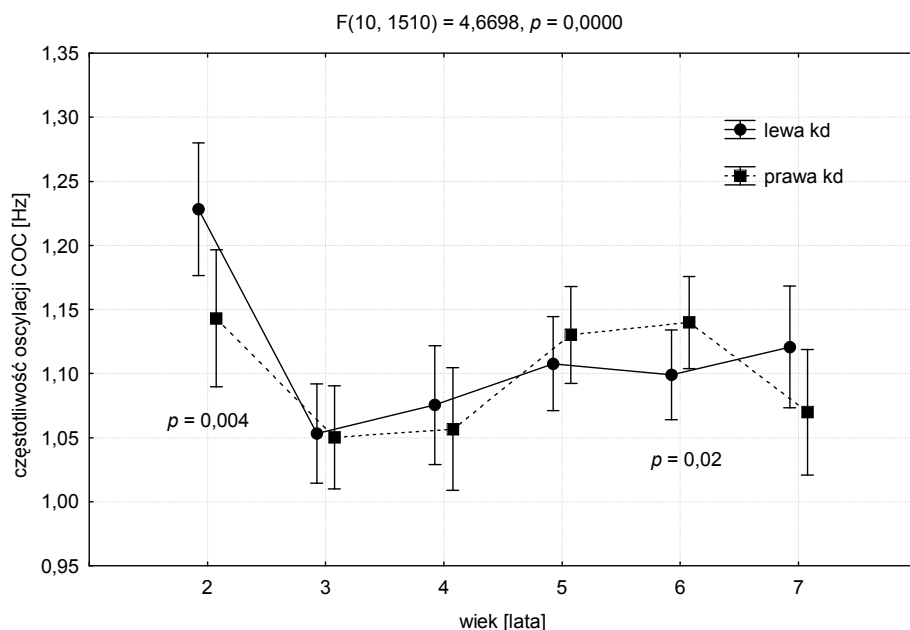
Wartości średnie częstotliwości korekcyjnych przemieszczeń nacisku stóp (COC) na podłoże poddano analizie wariancji dla układów czynnikowych, w której czynnikami były wiek badanych i kolejna próba stania. Wykazano, że jedynym czynnikiem istotnie różnicującym zmienną COC jest wiek metrykalny dzieci.

Częstotliwość korekcyjnych przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże wokół estymowanego przebiegu ogólnego środka masy ciała jest pośrednio odzwierciedleniem sprawności działania przewodzenia nerwowo-mięśniowego u człowieka podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej (Kuczyński, 1997, 1999, 2001, 2003).

Na rycinie 4.5 przedstawiono wyniki dotyczące częstotliwości oscylacji COC lewej i prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej ruchu. Wszystkie grupy wiekowe badanych wykazały częstotliwość zmian korekcyjnego nacisku obu stóp na podłoże w kierunku bocznym na poziomie około 1 Hz i nieco powyżej.

Różnice międzygrupowe wskaźnika częstotliwości oscylacji COC w płaszczyźnie czołowej zanotowano tylko, porównując 2- i 3-latków – w przypadku lewej kończyny dolnej (tab. 14 – aneks) nastąpiło u nich najbardziej radykalne obniżenie się wartości tego wskaźnika (z 1,23 Hz u 2-latków do 1,05 Hz u 3-latków). W kolejnych grupach wiekowych nie zaobserwowano istotnych zmian częstotliwości COC lewej stopy w płaszczyźnie czołowej (tab. 14 – aneks). Na tej podstawie można stwierdzić, że istotne obniżenie się wartości częstotliwości COC lewej stopy następuje tylko w przedziale wiekowym od 2 do 3 lat, a w kolejnych grupach wiekowych wskaźnik ten stabilizuje się na podobnym poziomie – nieco powyżej 1,0 Hz.

Wartości częstotliwości COC prawej stopy w płaszczyźnie czołowej układają się odmiennie niż lewej. Żadna z grup wiekowych nie wykazuje statystycznie istotnych zmian względem poprzedniej (ryc. 4.5, tab. 15 – aneks). Statystycznie istotną różnicę międzygrupową zanotowano jedynie pomiędzy 3- i 6-latkami. Częstotliwość COC prawej stopy waha się we wszystkich grupach wiekowych w granicach 1,05–1,14 Hz (tab. 15 – aneks). Podobnie jak w przypadku lewej kończyny dolnej, rozkład częstotliwości COC w płaszczyźnie czołowej prawej kończyny dolnej wykazuje tendencję do największego obniżania się pomiędzy

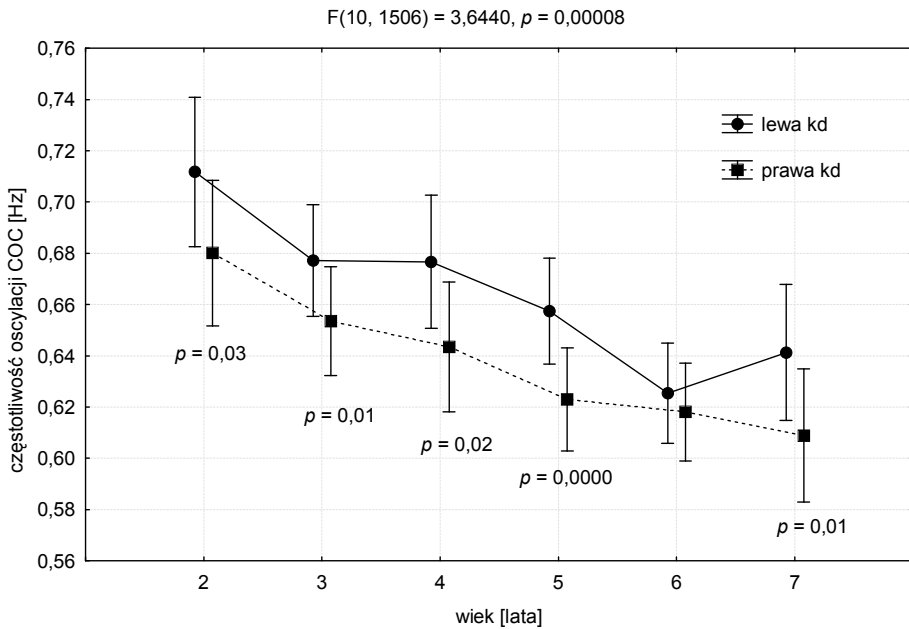


RYCINA 4.5. Rozkład średnich wartości częstotliwości oscylacji COC w płaszczyźnie czołowej ruchu lewej (lewa kd) i prawej (prawa kd) kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku. Pionowe odcinki oznaczają 95-proc. przedziały ufności. Istotną różnicę pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną zaznaczono wartością p

grupami 2- i 3-latków, a w następnych grupach wiekowych nie notuje się już znaczących zmian tych wartości.

Brak istotnych różnic między kolejnymi grupami wiekowymi dzieci w wartościach wskaźnika częstotliwości korekcyjnego nacisku lewej lub prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej ruchu (tab. 16 i 17 – aneks) jest nieco zaskakujący, w świetle rozkładów wcześniej opisanych wskaźników stabilności ciała. Wyraźnie (statystycznie istotnie) niższe częstotliwości COC w płaszczyźnie strzałkowej ruchu stwierdzono w przypadku prawej kończyny dolnej (w porównaniu z lewą), we wszystkich grupach wiekowych, z wyjątkiem 6-latków, co również świadczy o odmienności rozkładu wskaźnika częstotliwości od poprzednio przedstawionych (ryc. 4.6).

Rozkład wyników tego wskaźnika w płaszczyźnie strzałkowej ruchu pozwala jednak na zanotowanie stopniowego obniżania się wraz z wiekiem kalendarzowym dzieci częstotliwości korekcyjnego nacisku obu stóp (ryc. 4.6). Wyniki te wahają się w granicach od 0,7 Hz u 2-latków do 0,6 Hz u 6- i 7-latków w przypadku lewej i prawej kończyny dolnej. Wskazuje to na bardzo niewielkie u dzieci



RYCINA 4.6. Rozkład średnich wartości częstotliwości oscylacji COC w płaszczyźnie strzałkowej ruchu lewej (lewa kd) i prawej (prawa kd) kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku. Pionowe odcinki oznaczają 95-proc. przedziały ufności. Istotną różnicę pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną zaznaczono wartością p

w wieku 2–7 lat zmiany rozwojowe związane z szybkością reagowania naciskiem stóp na wychwiania ciała w kierunku przednio-tylnym.

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano tendencje do obniżania się wartości częstotliwości korekcyjnego nacisku obu stóp wraz z wiekiem w obu płaszczyznach. Największe – skokowe – zmniejszenie się wartości częstotliwości COC przejawiają 3-latki w stosunku do 2-latków, jeśli chodzi o boczne korekcyjne przemieszczenie punktu nacisku lewej stopy. Nie zanotowano natomiast istotnych różnic częstotliwości COC obu kończyn dolnych w płaszczyźnie strzałkowej ruchu pomiędzy kolejnymi grupami wiekowymi.

Wartości częstotliwości korekcyjnego nacisku stóp są większe w płaszczyźnie bocznej – nieco ponad 1,0 Hz (tylko najmłodsze dzieci wykazują większe wartości – około 1,2 Hz) – niż w płaszczyźnie strzałkowej, w której wahają się od mniej więcej 0,7 Hz (u najmłodszych dzieci) do około 0,6 Hz (u najstarszych badanych).

4.2. Powtarzalność wyników badań utrzymywania równowagi ciała a wiek metrykalny dzieci

Wartości współczynników zgodności wskaźników stabilności porównywanych prób stania w każdej grupie wiekowej przedstawiono w formie tabeli. Dla każdej grupy wiekowej obliczono wartość krytyczną współczynnika korelacji wzajemnej wskaźników stabilności otrzymanych w kolejnej próbie stania. Wartość współczynnika zgodności wskaźników stabilności dwóch porównywanych prób jest bardzo zbliżona do wartości współczynnika korelacji wzajemnej tych wskaźników, zatem w toku analizy założono, że wartość krytyczna r na poziomie istotności $\alpha < 0,05$ (zaznaczone w tab. 4.1 jako $r_{0,05}$) obliczona dla danej grupy badanych jest także wartością krytyczną współczynnika zgodności. Wartości współczynnika zgodności równe wartości krytycznej i wyższe od niej zaznaczono w tabeli 4.1 pismem półgrubym.

Na podstawie analizy wyników zawartych w tabeli 4.1 można stwierdzić, że wartość współczynników zgodności poszczególnych wskaźników stabilności ciała rośnie wraz z wiekiem kalendarzowym badanych dzieci.

U dzieci w wieku od 2 do 4 lat występuje bardzo słaba zgodność zakresu COP w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej obu kończyn dolnych. W tej grupie dzieci zanotowano znaczącą zgodność zakresu COP tylko w pojedynczych przypadkach prawej lub lewej kończyny dolnej (tab. 4.1) bez wyraźnych prawidłowości zmian. Oznacza to, że dzieci w wieku od 2 do 4 lat przemieszczają punkt nacisku obu stóp w kierunku przednio-tylnym i bocznym w sposób bardzo zmienny i słabo powtarzalny.

Rozkład wartości współczynnika zgodności zakresu COP w obu płaszczyznach ruchu świadczy o tendencji do zwiększania się jego zgodności u dzieci w wieku 5–7 lat, chociaż u 6-latków obserwuje się słabszą zgodność zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej niż u dzieci o rok młodszych. Dzieci 7-letnie wykazują najwyższy poziom zgodności wskaźnika zakresu COP w obu płaszczyznach ruchu.

Oceniając wartości współczynników zgodności zakresu COP lewej i prawej kończyny dolnej, nie stwierdzono znaczących różnic we wszystkich grupach wiekowych, co oznacza, że zarówno lewa, jak i prawa stopa przemieszcza punkt nacisku z podobną powtarzalnością podczas stania. U dzieci 5-letnich zaobserwowano istotną zgodność zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej w przypadku prawej kończyny dolnej, co wskazuje na lepszą powtarzalność w realizacji zadania przez tę kończynę (tab. 4.1). Jednak w płaszczyźnie czołowej obie kończyny dolne wykazały istotny poziom zgodności zakresu COP w tej grupie dzieci. W grupie 6-latków występuje statystycznie istotny poziom zgodności zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej tylko w przypadku lewej kończyny dolnej (tab. 4.1), ale brak istotnych różnic współczynników zgodności między

TABELA 4.1. Wartości współczynnika zgodności wyników lewej i prawej kończyny dolnej w kolejnych trzech próbach stania w poszczególnych grupach wiekowych

Grupa wiekowa	2-latki $N = 32$	3-latki $N = 52$	4-latki $N = 31$	5-latki $N = 54$	6-latki $N = 60$	7-latki $N = 30$
Kończyna dolna	lewa/prawa	lewa/prawa	lewa/prawa	lewa/prawa	lewa/prawa	lewa/prawa
Wartość krytyczna	$r_{0,05} = 0,35$	$r_{0,05} = 0,27$	$r_{0,05} = 0,35$	$r_{0,05} = 0,27$	$r_{0,05} = 0,25$	$r_{0,05} = 0,36$
CCC zakresu COP w płaszczyźnie czołowej						
1–2 próba	0,04 / 0,07	0,02 / 0,02	0,31 / 0,46	0,53 / 0,66	0,34 / 0,19	0,56 / 0,31
2–3 próba	0,09 / 0,34	0,31 / 0,12	0,39 / 0,20	0,46 / 0,45	0,62 / 0,68	0,49 / 0,49
1–3 próba	0,28 / 0,46	0,05 / 0,21	0,25 / 0,06	0,32 / 0,50	0,23 / 0,20	0,70 / 0,39
CCC zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej						
1–2 próba	0,15 / 0,31	0,19 / 0,02	0,03 / 0,28	0,47 / 0,54	0,32 / 0,20	0,44 / 0,41
2–3 próba	0,21 / 0,05	0,06 / 0,06	0,18 / 0,10	0,25 / 0,47	0,42 / 0,21	0,37 / 0,55
1–3 próba	0,20 / 0,07	0,28 / 0,09	0,16 / 0,24	0,18 / 0,39	0,16 / 0,07	0,28 / 0,32
CCC zmienności COP w płaszczyźnie czołowej						
1–2 próba	0,09 / 0,06	0,09 / 0,31	0,41 / 0,45	0,78 / 0,64	0,07 / 0,17	0,54 / 0,47
2–3 próba	0,05* / 0,57*	0,24 / 0,47	0,34 / 0,36	0,57 / 0,45	0,65 / 0,48	0,57 / 0,71
1–3 próba	0,53 / 0,54	0,29 / 0,27	0,01 / 0,21	0,48 / 0,53	0,25 / 0,14	0,69 / 0,48
CCC zmienności COP w płaszczyźnie strzałkowej						
1–2 próba	0,12 / 0,05	0,06 / 0,09	0,26 / 0,32	0,76 / 0,60	0,04 / 0,18	0,54 / 0,47
2–3 próba	0,10* / 0,57*	0,54 / 0,29	0,34 / 0,16	0,57 / 0,45	0,65 / 0,61	0,57 / 0,71
1–3 próba	0,54 / 0,47	0,29 / 0,34	0,00 / 0,25	0,49 / 0,50	0,18 / 0,29	0,69 / 0,48
CCC pola elipsy						
1–2 próba	0,10 / 0,31	0,16 / 0,05	0,13* / 0,51*	0,42 / 0,53	0,43* / 0,09*	0,32 / 0,30
2–3 próba	0,44 / 0,47	0,21 / 0,07	0,16 / 0,03	0,37 / 0,49	0,36 / 0,49	0,39 / 0,44
1–3 próba	0,49* / 0,09*	0,23 / 0,19	0,24 / 0,44	0,47 / 0,35	0,43* / 0,11*	0,50 / 0,20
CCC średniej prędkości COP						
1–2 próba	0,06 / 0,15	0,04 / 0,03	0,27 / 0,43	0,82 / 0,81	0,43 / 0,23	0,83 / 0,75
2–3 próba	0,23 / 0,26	0,29 / 0,14	0,05 / 0,32	0,35 / 0,51	0,91 / 0,89	0,95 / 0,88
1–3 próba	0,50 / 0,51	0,09* / 0,58*	0,20 / 0,30	0,44 / 0,49	0,27 / 0,43	0,82 / 0,73
CCC częstotliwości COC w płaszczyźnie czołowej						
1–2 próba	0,33 / 0,31	0,04 / 0,10	0,45 / 0,46	0,57 / 0,72	0,18 / 0,27	0,69 / 0,81
2–3 próba	0,22 / 0,32	0,13 / 0,23	0,69 / 0,50	0,49 / 0,52	0,70 / 0,61	0,74 / 0,77
1–3 próba	0,20 / 0,14	0,36 / 0,19	0,55 / 0,62	0,27 / 0,29	0,20 / 0,22	0,60 / 0,69
CCC częstotliwości COC w płaszczyźnie strzałkowej						
1–2 próba	0,24 / 0,33	0,25 / 0,00	0,36 / 0,54	0,45 / 0,36	0,17 / 0,34	0,46 / 0,54
2–3 próba	0,02 / 0,21	0,02 / 0,15	0,31 / 0,48	0,19 / 0,17	0,58 / 0,50	0,36 / 0,44
1–3 próba	0,21 / 0,07	0,00 / 0,25	0,38 / 0,37	0,27 / 0,18	0,27 / 0,22	0,20 / 0,32

N – liczba badanych

* różnice między CCC lewej i prawej kończyny dolnej istotne na poziomie $\alpha < 0,05$

Pismem półgrubym oznaczono współczynniki CCC powyżej wartości krytycznej.

lewą i prawą kończyną dolną, podobnie jak w przypadku pozostałych grup wiekowych. Siedmiolatki przejawiają natomiast znaczący poziom zgodności zakresu COP obu kończyn dolnych, również bez preferencji jednej z nich. U tych dzieci można zaobserwować pewną stabilizację współczynników zgodności zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej na poziomie 0,4–0,7 we wszystkich porównaniach prób, co stanowi istotną wartość CCC na poziomie przeciętnym i powyżej przeciętnego.

Współczynniki zgodności zmienności COP lewej i prawej kończyny dolnej w obu płaszczyznach ruchu częściej osiągają statystycznie istotną wartość w poszczególnych grupach wiekowych niż zgodność zakresu COP (tab. 4.1). Dzieci 2- i 3-letnie wykazują prawie zerową lub bardzo słabą zgodność zmienności COP w porównaniu próby 1 i 2, ale w kolejnych porównaniach zgodność ta się zwiększa, osiągając znaczący poziom. W grupie 2-latków zaznacza się istotnie wyższa zgodność zmienności COP prawej kończyny dolnej (0,57) niż lewej (0,05), co świadczy o lepszej powtarzalności zmienności nacisku prawej stopy niż lewej. Różnica ta zanika w grupie 3-latków, podobnie jak u dzieci starszych (tab. 4.1).

U dzieci 4-letnich obserwuje się słabą zgodność zmienności COP i brak wyraźnych preferencji jednej kończyny dolnej. Istotną wartość współczynników zgodności zmienności COP w płaszczyźnie czołowej obu kończyn dolnych zanotowano w porównaniu 1 i 2 próby. W płaszczyźnie strzałkowej zgodność zmienności COP obu kończyn dolnych jest słaba, poniżej wartości krytycznej.

Wzrost wartości wskaźnika zmienności COP obu kończyn dolnych jest szczególnie wyraźny u 5-latków (w stosunku do młodszych dzieci we wszystkich trzech porównaniach prób). Dzieci te osiągają ponadprzeciętny i wysoki poziom zgodności wskaźnika zmienności oscylacji COP. U dzieci 6-letnich wysoki poziom zgodności tego wskaźnika wystąpił tylko w porównaniu 2 i 3 próby, ale u 7-latków znów zanotowano znaczący, wysoki poziom zgodności zmienności COP obu kończyn dolnych w przypadku wszystkich wariantów porównań (tab. 4.1).

Współczynnik zgodności pola elipsy COP przyjmuje niskie wartości u dzieci w wieku od 2 do 4 lat. Dzieci w wieku od 5 do 7 lat osiągają przeciętny, ale istotny poziom zgodności tego wskaźnika. Zanotowano istotną zgodność pola elipsy COP u dzieci najmłodszych tylko w porównaniu 2 i 3 próby, w odróżnieniu od zgodności zakresu i zmienności COP u 2-latków. U 3-latków z kolei zaobserwowano gwałtowny spadek wartości współczynnika zgodności pola elipsy COP do bardzo niskiego poziomu, który poprawia się nieznacznie u 4-latków. Dzieci 5-letnie natomiast osiągają wysoki, statystycznie istotny poziom zgodności we wszystkich trzech porównaniach prób, który utrzymuje się również u 6- i 7-latków, szczególnie w porównaniu 2 i 3 próby (tab. 4.1).

Zgodność wielkości pola elipsy oscylacji COP w niektórych grupach wiekowych różni się znacznie w przypadku lewej i prawej kończyny dolnej. Dwulatki

przejawiają lepszą zgodność pola elipsy COP lewej niż prawej kończyny dolnej, szczególnie w ostatnim porównaniu prób. Dzieci 4-letnie wykazują wyższy poziom zgodności tego wskaźnika prawej kończyny dolnej (0,51) niż lewej (0,13) w porównaniu 1 i 2 próby (tab. 4.1), a u 6-latków jest odwrotnie – lewa kończyna dolna wykazuje większą zgodność wielkości pola elipsy COP niż prawa (odpowiednio – 0,43 i 0,09). U dzieci 3-letnich oraz 5- i 7-latków zanotowano zbliżoną zgodność pola elipsy COP obu kończyn dolnych we wszystkich porównaniach prób, przy czym u młodszych – na bardzo słabym poziomie, a u starszych – na poziomie nieco poniżej przeciętnego.

Analiza różnic zgodności wielkości pola elipsy obu kończyn dolnych pokazała, że najwyższą zgodność tego wskaźnika otrzymuje się po 20-sekundowym staniu, tzn. w porównaniu 2 i 3 próby, w prawie wszystkich grupach wiekowych dzieci.

Współczynniki zgodności prędkości COP przybierają wartości zgodności od 0,03 do 0,95 (tab. 4.1) – relatywnie najwyższe w porównaniu z innymi wskaźnikami stabilności ciała.

Współczynnik zgodności prędkości COP w 1 i 2 próbie u dzieci w wieku od 2 do 3 lat jest bliski zeru, ale w kolejnych porównaniach poprawia się (do 0,5 w przypadku obu kończyn dolnych w trzecim porównaniu). U 4-latków zgodność prędkości COP wykazuje niski poziom w przypadku obu kończyn dolnych, a istotną wartość CCC prawej kończyny dolnej w tej grupie dzieci zanotowano jedynie w porównaniu 1 i 2 próby. U dzieci w wieku 5 lat następuje gwałtowny wzrost wartości współczynnika zgodności prędkości COP obu kończyn dolnych od 0,35 do wartości 0,82 i we wszystkich wariantach porównań wartości te spełniają warunek istotności. Podobny stan utrzymuje się także u 6- i 7-latków, którzy osiągają wysoki poziom zgodności prędkości oscylacji COP (około 0,9). Dzieci 6- i 7-letnie wykazują wysoki poziom zgodności prędkości COP szczególnie w przypadku porównania 2 i 3 próby. Może być to wskazaniem do konieczności przygotowywania dzieci w podobnym wieku do rejestracji danych poprzez wstępne stanie na platformie tuż przed samą próbą (podobnie jak sugerują to wyniki powtarzalności wielkości pola elipsy COP).

Tylko w grupie 3-latków obserwuje się istotnie wyższy poziom zgodności prędkości COP prawej kończyny dolnej niż lewej w ostatnim porównaniu. W pozostałych grupach wiekowych zgodność prędkości COP obu kończyn dolnych jest zbliżona (tab. 4.1).

Wyniki analizy zgodności częstotliwości przemieszczeń korekcyjnego przebiegu punktu nacisku stóp na podłoże wykazują nieco inną prawidłowość rozkładu współczynników zgodności w grupach wiekowych dzieci niż zgodność omówionych już wskaźników stabilności.

U dzieci najmłodszych (2- i 3-latków) występują bardzo niskie wartości współczynnika zgodności częstotliwości COC w obu płaszczyznach ruchu we wszystkich porównaniach prób (tab. 4.1). U 4-latków z kolei obserwuje się is-

totny, przeciętny poziom zgodności tego wskaźnika. (Wyniki zgodności wcześniej opisanych wskaźników w grupie 4-latków przybierały bardzo niskie wartości, w odróżnieniu od zgodności częstotliwości COC). W kolejnych grupach wiekowych rozkład poziomu zgodności tego wskaźnika przypomina ich pozostałe rozkłady, tzn. zgodność częstotliwości COC poprawia się w kolejnych grupach wiekowych. Współczynnik zgodności częstotliwości przyjmuje wyższe wartości w płaszczyźnie czołowej (0,5–0,8) niż w strzałkowej (0,4–0,5) u dzieci w wieku od 4 do 7 lat. Regres w stosunku do dzieci 4-letnich zanotowano u 5-latków w przypadku częstotliwości COC w płaszczyźnie strzałkowej ruchu. Dzieci 6- i 7-letnie wykazują znaczący wzrost wartości współczynnika zgodności COC w tej płaszczyźnie ruchu do poziomu przeciętnego.

W zakresie zgodności częstotliwości oscylacji COC nie wykazano istotnych różnic pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną ani w płaszczyźnie czołowej ruchu, ani strzałkowej. Niewielkie różnice pomiędzy zgodnością częstotliwości COC kończyn dolnych w niektórych grupach wiekowych nie spełniają warunku istotności.

PODSUMOWANIE

Poziom zgodności wskaźników stabilności ciała: zakresu, zmienności, pola elipsy i prędkości COP jest niski, a nawet bliski zeru, u dzieci w wieku od 2 do 4 lat i poprawia się wraz z wiekiem kalendarzowym (od 5 do 7 lat). Zgodność częstotliwości korekcyjnego nacisku stóp na podłoże jest bardzo mała u dzieci 2- i 3-letnich, ale od 4. do 7. roku życia ulega znacznej poprawie. Najlepszą powtarzalność wszystkich opisanych w tej pracy wskaźników stabilności ciała uzyskuje się na ogół w porównaniu 2 i 3 próby, co sugeruje, by rejestracja danych z platform sił odbywała się po odczekaniu około 20 s od przyjęcia właściwej do badania równowagi ciała pozycji stojącej.

Słabe zróżnicowanie zgodności wyników lewej i prawej kończyny dolnej kolejnych trzech prób, u większości badanych dzieci, upoważnia do stwierdzenia, że powtarzalność procesu realizacji zadania utrzymywania równowagi w przypadku obu kończyn dolnych jest porównywalna i nie musi być rozpatrywana oddzielnie dla lewej i prawej kończyny dolnej.

Prędkość oscylacji punktu nacisku stóp na podłoże i częstotliwość korekcyjnego nacisku stóp są najbardziej miarodajnymi wskaźnikami stabilności ciała dzieci w wieku 4–7 lat ze względu na najwyższy osiągnięty poziom zgodności wyników.

Bardzo zbliżona zgodność zmienności COP obu stóp w czołowej i strzałkowej płaszczyźnie ruchu, w kolejnych porównaniach prób, stanowi uzasadnienie uproszczenia analizy zmienności COP do jednej płaszczyzny we wszystkich grupach wiekowych dzieci.

4.3. Asymetryczność funkcji podporowej kończyn dolnych

Analiza sił pionowych działających na ciało dziecka podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej oraz poziomych przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże umożliwia oddzielne rozpatrzenie funkcji stabilizacyjnej kończyn dolnych, związanej ze zróżnicowaniem wielkości wskaźników stabilności ciała lewej i prawej kończyny dolnej oraz funkcji obciążania kończyn podczas naturalnego stania. Funkcja stabilizacyjna i obciążenie pionowe składają się na funkcję podporową kończyn dolnych.

4.3.1. Asymetryczność funkcji stabilizacyjnej kończyn dolnych

Wskaźniki stabilności ciała badanych dzieci obliczone dla lewej i prawej kończyny dolnej różnią się statystycznie istotnie w niektórych grupach wiekowych. Fakt ten wskazuje na zróżnicowane działania kończyn dolnych podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej.

Wartości wskaźników stabilności obu kończyn dolnych w poszczególnych grupach wiekowych dzieci przedstawiono w tabeli 4.2.

U dzieci 2-letnich lewa kończyna dolna wykazuje wyższe wartości niż prawa w przypadku wskaźników: zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, pola elipsy COP oraz częstotliwości korekcyjnego nacisku stóp w obu płaszczyznach ruchu (tab. 4.2). Wyniki te sugerują, że małe dzieci zmieniają położenie punktu nacisku w większym zakresie i częściej lewą stopą niż prawą, by zachować stabilność pionowej pozycji ciała, czego na ogół nie obserwuje się u starszych dzieci, u których prawą kończyną dolną charakteryzują większe wartości wskaźników stabilności ciała niż lewą (tab. 4.2). Wskaźnik częstotliwości korekcyjnego nacisku stopy lewej w płaszczyźnie strzałkowej ruchu jest statystycznie istotnie wyższy niż prawej stopy prawie we wszystkich grupach wiekowych (tab. 4.2).

Wartości współczynników korelacji wzajemnej lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 2-latków świadczą o braku zależności między funkcjonowaniem obu kończyn podczas utrzymywania pozycji stojącej (tab. 18 – aneks), z wyjątkiem wskaźnika częstotliwości w płaszczyźnie strzałkowej. W przypadku tego ostatniego odnotowano wysoką zależność (współczynnik korelacji wzajemnej wynosi 0,7) częstości korekcyjnych przemieszczeń nacisku lewej i prawej stopy w kierunku przednio-tylnym, co oznacza podobną, zależną wzajemnie, aktywność obu kończyn dolnych w realizacji zadania utrzymania pionowej pozycji ciała.

Grupa 3-latków nie wykazuje żadnych znaczących różnic w funkcji stabilizacyjnej pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną. Jedyną statystycznie istotną różnicę zanotowano w wartościach wskaźnika częstotliwości COC w płaszczyźnie strzałkowej (tab. 4.2). Dzieci w tym wieku realizują zadanie utrzymywania równowagi, naciskając lewą i prawą stopą w podobny sposób. Fakt ten potwier-

TABELA 4.2. Średnie wartości wskaźników stabilności ciała dzieci w poszczególnych grupach wiekowych dla lewej i prawej kończyny dolnej

Wskaźnik stabilności	Kończyna dolna	2-latki $n = 85$	3-latki $n = 139$	4-latki $n = 92$	5-latki $n = 158$	6-latki $n = 168$	7-latki $n = 98$
Zakres COP pł. czołowa [cm]	lewa	1,13 ($\pm 0,26$)	1,25 ($\pm 0,41$)	0,88* ($\pm 0,21$)	0,81 ($\pm 0,23$)	0,69 ($\pm 1,14$)	0,62* ($\pm 0,13$)
	prawa	1,17 ($\pm 0,33$)	1,19 ($\pm 0,36$)	0,99* ($\pm 0,26$)	0,79 ($\pm 0,21$)	0,67 ($\pm 0,14$)	0,67* ($\pm 0,14$)
Zakres COP pł. strzałkowa [cm]	lewa	3,64* ($\pm 0,87$)	3,72 ($\pm 1,10$)	2,99 ($\pm 0,81$)	2,64** ($\pm 0,87$)	2,62 ($\pm 0,69$)	2,33* ($\pm 0,66$)
	prawa	3,32* ($\pm 0,90$)	3,63 ($\pm 1,09$)	3,17 ($\pm 1,04$)	2,99** ($\pm 1,00$)	2,50 ($\pm 0,77$)	2,46* ($\pm 0,69$)
Zmienność COP pł. czołowa [cm]	lewa	0,18 ($\pm 0,04$)	0,19 ($\pm 0,06$)	0,14* ($\pm 0,04$)	0,13 ($\pm 0,03$)	0,11 ($\pm 0,03$)	0,10 ($\pm 0,02$)
	prawa	0,18 ($\pm 0,05$)	0,20 ($\pm 0,07$)	0,16* ($\pm 0,05$)	0,13 ($\pm 0,03$)	0,11 ($\pm 0,02$)	0,11 ($\pm 0,02$)
Zmienność COP pł. strzałkowa [cm]	lewa	0,44 ($\pm 0,09$)	0,48 ($\pm 0,16$)	0,36* ($\pm 0,08$)	0,33 ($\pm 0,08$)	0,29* ($\pm 0,07$)	0,25* ($\pm 0,06$)
	prawa	0,47 ($\pm 0,12$)	0,49 ($\pm 0,15$)	0,40* ($\pm 0,11$)	0,33 ($\pm 0,08$)	0,27* ($\pm 0,06$)	0,27* ($\pm 0,06$)
Pole elipsy COP [cm ²]	lewa	1,96* ($\pm 0,70$)	1,80 ($\pm 0,80$)	1,12 ($\pm 0,34$)	0,91*** ($\pm 0,37$)	0,80 ($\pm 0,29$)	0,61* ($\pm 0,23$)
	prawa	1,73* ($\pm 0,69$)	1,92 ($\pm 1,00$)	1,22 ($\pm 0,50$)	1,13*** ($\pm 0,51$)	0,76 ($\pm 0,28$)	0,73* ($\pm 0,30$)
Średnia prędkość COP [mm/s]	lewa	18,63 ($\pm 3,50$)	16,40 ($\pm 2,97$)	13,48* ($\pm 2,16$)	12,11 ($\pm 2,40$)	10,67 ($\pm 2,14$)	9,91 ($\pm 2,60$)
	prawa	18,10 ($\pm 3,14$)	17,07 ($\pm 3,94$)	14,73* ($\pm 2,90$)	12,10 ($\pm 1,98$)	10,61 ($\pm 1,94$)	10,34 ($\pm 2,07$)
Częstotliwość COC pł. czołowa [Hz]	lewa	1,23* ($\pm 0,22$)	1,05 ($\pm 0,25$)	1,08 ($\pm 0,25$)	1,11 ($\pm 0,24$)	1,10* ($\pm 0,22$)	1,12 ($\pm 0,26$)
	prawa	1,14* ($\pm 0,20$)	1,05 ($\pm 0,26$)	1,06 ($\pm 0,26$)	1,13 ($\pm 0,25$)	1,14* ($\pm 0,24$)	1,07 ($\pm 0,25$)
Częstotliwość COC pł. strzałkowa [Hz]	lewa	0,71* ($\pm 0,14$)	0,68* ($\pm 0,12$)	0,68* ($\pm 0,16$)	0,66*** ($\pm 0,14$)	0,63 ($\pm 0,14$)	0,64* ($\pm 0,12$)
	prawa	0,68* ($\pm 0,14$)	0,65* ($\pm 0,11$)	0,64* ($\pm 0,14$)	0,62*** ($\pm 0,13$)	0,62 ($\pm 0,14$)	0,61* ($\pm 0,13$)

* różnice istotne na poziomie $\alpha < 0,05$ n – liczba prób** różnice istotne na poziomie $\alpha < 0,001$ *** różnice istotne na poziomie $\alpha < 0,0001$

Pismem półgrubym oznaczono te wartości wskaźników stabilności, które spełniają warunek istotności różnic pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną.

dzają istotne zależności (współczynniki korelacji wzajemnej wahają się od 0,2 do 0,6 i są statystycznie istotne) pomiędzy wskaźnikami stabilności lewej i prawej kończyny dolnej (tab. 19 – aneks). Jedynie zakres COP w płaszczyźnie strzałkowej lewej kończyny dolnej jest wielkością niezależną od zakresu COP kończyny prawej – w tej samej płaszczyźnie ruchu.

W grupie 4-latków obserwuje się istotne różnice pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną w funkcji stabilizacyjnej ciała. Wskaźniki zakresu i zmienności oraz prędkości COP mają wyższą wartość w przypadku prawej kończyny dolnej niż lewej (tab. 4.2). Wyższe wartości ilościowych wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej niż lewej odzwierciedlają prawdopodobnie dominację czynnościową prawej kończyny dolnej, a lewa kończyna dolna „zachowuje się” bardziej stabilnie. Mniejsza prędkość przemieszczeń COP lewej kończyny dolnej oznacza lepszą ekonomiczność zmian nacisku na podłoże lewą stopą, co może świadczyć o dominacji lewej kończyny dolnej w funkcji stabilizacyjnej kontroli równowagi ciała. Wyniki te wskazują na intensywny proces lateralizacji kończyn dolnych u dzieci w wieku 4 lat. Znikome zależności pomiędzy wskaźnikami stabilności w tej grupie wiekowej stanowią dowód na odmienne i niezależne działanie kończyn dolnych w ich funkcji stabilizacyjnej (tab. 20 – aneks).

Dominacja czynnościowa prawej kończyny dolnej nad lewą podczas stania występuje także w grupie 5-latków. Świadczy o tym wyższa wartość wskaźnika zakresu COP w płaszczyźnie strzałkowej ruchu oraz wielkości pola elipsy oscylacji COP prawej kończyny dolnej (tab. 4.2). Oznacza to, że prawa stopa przemieszcza punkt nacisku w większym stopniu niż lewa, stabilizując postawę pionową ciała. W tej grupie wiekowej dzieci obserwuje się także wyższą wartość wskaźnika częstotliwości COC w płaszczyźnie strzałkowej ruchu lewej stopy niż prawej, co potwierdza tezę o większej aktywności w czynnościach stabilizacyjnych lewej kończyny dolnej niż prawej (tab. 4.2).

Wartości współczynników korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej, w grupie dzieci 5-letnich, nie są wysokie (0,3–0,4), ale spełniają warunek istotności ($\alpha < 0,05$) (tab. 21 – aneks). Wartości te odzwierciedlają współdziałanie lewej i prawej kończyny dolnej podczas stania (u 5-latków już wyraźnie zaznaczone). Wyniki uzyskane w tej grupie dzieci wskazują na utrwalanie się lateralizacji kończyn dolnych w ich funkcji stabilizacyjnej.

U 6-latków nie notuje się wyraźnych dominacji kończyn dolnych w stabilizacji pionowej postawy ciała, ale zaznacza się większa aktywność prawej kończyny dolnej niż lewej. Wskaźnik częstotliwości COC lewej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej ruchu ma istotnie niższą wartość niż wskaźnik częstotliwości prawej kończyny dolnej (tab. 4.2). Fakt ten wskazuje na większą aktywność prawej stopy niż lewej podczas bocznych oscylacji punktu nacisku, zatem inaczej niż u dzieci młodszych. Jednocześnie obserwuje się istotną, chociaż nie-

wielką zależność (współczynnik korelacji 0,19) pomiędzy wskaźnikami zmienności oscylacji COP lewej i prawej kończyny dolnej (tab. 22 – aneks).

Odnotowano również istotne zależności pomiędzy prędkością COP oraz częstotliwością COC lewej i prawej kończyny dolnej (tab. 22 – aneks). Zależności te wskazują na „współpracę” obu kończyn dolnych w funkcji stabilizacji pozycji stojącej w grupie 6-latków.

U dzieci 7-letnich zaobserwowano znacząco większą wartość zakresu, zmienności i pola elipsy oscylacji COP prawej kończyny dolnej niż lewej (tab. 4.2), jednocześnie lewa kończyna dolna charakteryzuje się większą częstotliwością korekcyjnego nacisku na podłoże niż prawa, co może być dowodem ustalenia dominacji czynnościowej prawej kończyny dolnej nad lewą oraz dominacji lewej nad prawą w funkcji aktywności stabilizacyjnej ciała. U 7-latków proces lateralizacji czynnościowej kończyn górnych i dolnych jest już ukończony (Malinowski, 2004).

Dzieci 7-letnie wykazują duży stopień niezależności działania lewej i prawej kończyny dolnej (tab. 23 – aneks). Bardzo ważny jest zerowy współczynnik korelacji wzajemnej wskaźników zmienności COP obu kończyn dolnych, który oznacza, że jedna kończyna dolna przemieszcza punkt nacisku w zupełnie odmienny sposób niż druga. Brak zależności wskaźników zakresu, pola elipsy i prędkości COP obu kończyn dolnych jest także charakterystyczny dla tej grupy wiekowej, co może świadczyć o ustaleniu dominacji (i uniezależnieniu funkcji) jednej kończyny dolnej nad drugą w czynnościach stabilizacyjnych podczas stania. Istotny poziom wartości współczynnika korelacji wzajemnej obu kończyn dolnych odnotowano jedynie w przypadku częstotliwości korekcyjnych przemieszczeń nacisku stóp (tab. 23 – aneks). Istotna zależność częstotliwości COC obu kończyn dolnych świadczy o ich współdziałaniu co do częstości zmian nacisku stóp na podłoże, w odróżnieniu od amplitudowych wskaźników stabilności.

PODSUMOWANIE

Najmłodsze dzieci (2-, 3-latki) nie wykazują zdecydowanej asymetrii działania obu kończyn dolnych podczas stania. Rozwój lateralizacji funkcji stabilizacyjnej kończyn dolnych przejawiają 4-latki, u których obserwuje się istotnie niższe wartości wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej niż prawej. U dzieci w wieku od 5 do 7 lat dominacja lewej kończyny dolnej nad prawą w funkcji stabilizacyjnej utrwała się i przejawia mniejszymi wymiarami oscylacji COP lewej kończyny dolnej przy większej aktywności przemieszczeń korekcyjnego nacisku prawej stopy. Większe wartości wskaźników amplitudowych prawej niż lewej kończyny dolnej prawdopodobnie świadczą o dominacji czynnościowej prawej kończyny dolnej, która „jest gotowa” do wykonania zamierzonego ruchu,

a lewa kończyna dolna przejmując funkcję stabilizacji pozycji stojącej ciała. U dzieci 6-letnich obserwuje się pewien regres procesu lateralizacji kończyn dolnych w funkcji stabilizacyjnej.

Istotna zależność między częstotliwością korekcyjnych przemieszczeń punktu nacisku lewej i prawej stopy na podłoże we wszystkich grupach wiekowych dzieci wskazuje na ścisłe współdziałanie kończyn dolnych w stabilizacji ciała.

4.3.2. Asymetryczność obciążenia kończyn dolnych

W celu przeprowadzenia analizy symetryczności obciążenia stóp podczas stania obliczono wartości współczynnika obciążenia lewej ($N Fz_{le}$) i prawej kończyny dolnej ($N Fz_{pr}$), który jest znormalizowaną wielkością średniej siły pionowej wywieranej przez obie kończyny oddzielnie podczas utrzymywania równowagi. Normalizację przeprowadzono połową ciężaru ciała dziecka, wyrażoną w niutonach. Iloraz średniej wartości siły pionowej i połowy wartości ciężaru ciała jest wielkością bezwymiarową (por. rozdz. 3.3.5).

Rezultaty obciążenia stóp podczas stania u dzieci w wieku od 2 do 7 lat przedstawiono w tabeli 4.3 i w postaci graficznej (ryc. 4.7).

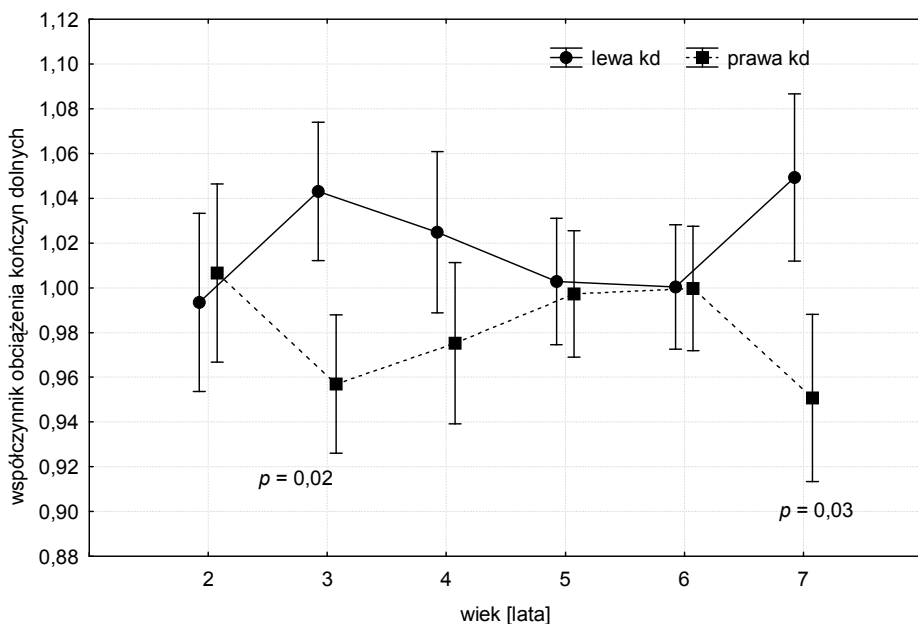
W większości grup wiekowych dzieci nie obserwuje się istotnej różnicy pomiędzy wielkością znormalizowanej siły pionowej wywieranej przez lewą ($N Fz_{le}$)

TABELA 4.3. Średnie wartości i odchylenia standardowe współczynnika obciążenia lewej i prawej stopy podczas naturalnego stania w poszczególnych grupach wiekowych

Grupy wiekowe	$N Fz_{le}$	$N Fz_{pr}$
2-latki $n = 85$	0,99 ($\pm 0,20$)	1,01 ($\pm 0,20$)
3-latki $n = 139$	1,04* ($\pm 0,21$)	0,96* ($\pm 0,21$)
4-latki $n = 92$	1,03 ($\pm 0,21$)	0,98 ($\pm 0,21$)
5-latki $n = 158$	1,00 ($\pm 0,15$)	1,00 ($\pm 0,15$)
6-latki $n = 168$	0,99 ($\pm 0,15$)	1,01 ($\pm 0,15$)
7-latki $n = 98$	1,03* ($\pm 0,15$)	0,97* ($\pm 0,15$)

* różnica istotna na poziomie $\alpha < 0,05$

n – liczba prób



RYCINA 4.7. Rozkład współczynnika obciążenia lewej (lewa kd) i prawej (prawa kd) kończyny dolnej w poszczególnych grupach wiekowych. Pionowe odcinki oznaczają 95-proc. przedziały ufności. Istotne różnice pomiędzy średnim współczynnikiem obciążenia lewej i prawej stopy zaznaczono wartością p

i prawą kończynę dolną ($N Fz_{pr}$). Znaczącą różnicę zanotowano w grupie 3- i 7-latków (tab. 4.3), co zostało zaznaczone na rycinie 4.7. W przypadku obu tych grup bardziej obciążona jest kończyna dolna lewa niż prawa.

U dzieci najmłodszych wielkość współczynnika obciążenia obu kończyn dolnych przyjmuje wartości zbliżone do jedności, co wskazuje na symetryczne obciążenie kończyn dolnych podczas spokojnego stania obunóż. U 3-latków występuje znacząca różnica ($p = 0,02$) w obciążeniu lewej i prawej kończyny dolnej, przy czym lewa przyjmuje większe obciążenie niż prawa (ryc. 4.7).

Nieistotna różnica pomiędzy obciążeniem obu kończyn dolnych podczas stania u 4-latków (choć nadal nieco większe obciążenie przyjmuje na siebie lewa kończyna dolna) świadczy o pojawieniu się tendencji do wyrównywania obciążenia kończyn dolnych u dzieci w tym wieku (ryc. 4.7). U dzieci 5-letnich obserwuje się już całkowitą symetryczność obciążenia obu kończyn dolnych (tab. 4.3), która utrzymuje się także u 6-latków. U dzieci w wieku 7 lat zanotowano znaczącą asymetryczność obciążenia obu kończyn dolnych ($p = 0,03$), przy czym, podobnie jak u 3-latków, większe obciążenie przyjmuje lewa kończyna dolna niż prawa (ryc. 4.7, tab. 4.3).

PODSUMOWANIE

Dzieci w wieku 2, 4, 5 i 6 lat nie wykazują wyraźnie większego obciążenia jednej kończyny dolnej w stosunku do drugiej podczas kontroli równowagi w staniu obunóż. Normą jest symetryczne obciążenie obu kończyn dolnych z tendencją do obciążania lewej kończyny dolnej w nieco większym stopniu niż prawej. Większe obciążenie kończyny dolnej lewej niż prawej podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej jest znaczące u 3-latków i 7-latków, tzn. w czasie kształtowania się lateralizacji ciała w wieku 3 lat oraz po ustaleniu preferencji jednej strony ciała w wieku 7 lat.

4.4. Rezultaty szacowania wieku stabilności posturalnej

Przedstawione wyniki badań stabilności ciała dzieci w wieku od 2 do 7 lat świadczą o wysokiej odwrotnej ich zależności od wieku kalendarzowego, masy i wysokości ciała (w granicach od $-0,53$ do $-0,81$) i prawie całkowitym braku związków pomiędzy wskaźnikami stabilności i indeksem masy ciała (BMI) (tab. 24 i 25 – aneks). Najslabsze, chociaż w niektórych przypadkach istotne, związki z wiekiem widoczne są w zakresie częstotliwości oscylacji COC zarówno dla prawej, jak i dla lewej kończyny dolnej (w granicach od $-0,12$ do $-0,35$), co sugeruje, że częstotliwość COC jest nośnikiem innych informacji o stabilności ciała niż pozostałe wskaźniki: zakresu, zmienności, pola elipsy i prędkości COP. Podstawowe wymiary ciała dzieci – wysokość i masa – zawsze wysoko korelują z wiekiem kalendarzowym, szczególnie w okresie ich intensywnego rozwoju biologicznego (McEvoy i Grimmer, 2005). Powyższe związki upoważniają do wyznaczenia wieku stabilności posturalnej dzieci jako zmiennej, która może być szacowana za pomocą wskaźników stabilności ciała.

W pracy tej podjęto próbę zbudowania modelu matematycznego, tak aby predykcja zmiennej wynikowej (przewidywanego wieku stabilności posturalnej dzieci) na podstawie rzeczywistych zmiennych zależnych od wieku kalendarzowego dzieci była obarczona jak najmniejszym błędem. W analizie wzięto pod uwagę 16 zmiennych zależnych (wskaźników stabilności dla lewej i prawej kończyny dolnej), z czego satysfakcjonujący model zbudowano na podstawie 5 z nich, mających istotny wkład w objaśnianie zmienności wieku badanych. Zmienną wynikową określono jako wiek stabilności posturalnej (APS).

Wybór parametrów regresji, tzn. wskaźników stabilności, oparty był na wartości współczynnika korelacji wzajemnej Pearsona każdego wskaźnika z wiekiem kalendarzowym dzieci. W tabeli 4.4 umieszczono wybrane do modelu wskaźniki mające najsilniejszy związek z wiekiem kalendarzowym, ale najslabszy względem siebie. Analizę ich współliniowości (nadmiarowości) przedstawiono w tabeli 4.5, na podstawie której można stwierdzić, że wybrane wskaźniki stabilności lewej i prawej kończyny dolnej (tab. 4.4–4.6) wpływają na wiek

TABELA 4.4. Ocena wskaźników stabilności wybranych do modelu

Parametry modelu m_i	Wiek [lata+m-ce] b_i	Wiek [lata+m-ce] bł. std. b_i	Wiek [lata+m-ce] t	Wiek [lata+m-ce] p	-95% Granice ufności	+95% Granice ufności	Wiek [lata+m-ce] bł. std. β	-95% Granice ufności	+95% Granice ufności
Wyraz wolny	9,90299	0,149062	66,4356	0,000000	9,610	10,196	–	–	–
Zmienność COPY lewa kd	-1,07718	0,423073	-2,5461	0,011174	-1,908	-0,246	0,034	-0,152	-0,020
Pole elipsy lewa kd	-0,29382	0,084199	-3,4896	0,000524	-0,459	-0,128	0,035	-0,192	-0,054
Prędkość COP lewa kd	-0,13543	0,014717	-9,2019	0,000000	-0,164	-0,107	0,033	-0,372	-0,241
Zakres COPX prawa kd	-0,69252	0,177013	-3,9122	0,000103	-1,040	-0,345	0,036	-0,213	-0,071
Prędkość COP prawa kd	-0,15467	0,013586	-11,3852	0,000000	-0,181	-0,128	0,034	-0,457	-0,323

kd – kończyna dolna, b_i – współczynnik parametru modelu, bł. std. – błąd standardowy, t – test t -Studenta, β – standaryzowane oceny parametrów

TABELA 4.5. Statystyki współliniowości (nadmiarowości) dla wskaźników wybranych do modelu

Parametry modelu m_i	Tolerancja $1 - R^2$	Czynnik inflacji wariancji $1/(1 - R^2)$	R^2	Wiek [lata+m-ce] β	Wiek [lata+m-ce] wsp. korelacji cząstkowej	Wiek [lata+m-ce] t	Wiek [lata+m-ce] p
Zmienność COPY lewa kd	0,3870	2,584	0,6130	-0,085545	-0,109721	-2,5461	0,01117
Pole elipsy COP lewa kd	0,3551	2,816	0,6449	-0,122396	-0,149591	-3,4896	0,00052
Prędkość COP lewa kd	0,3929	2,545	0,6071	-0,306823	-0,370551	-9,2019	0,00000
Zakres COPX prawa kd	0,3338	2,996	0,6663	-0,141541	-0,167229	-3,9122	0,00010
Prędkość COP prawa kd	0,3723	2,686	0,6277	-0,389987	-0,442623	-11,3852	0,00000

kd – kończyna dolna, R^2 – współczynnik determinacji parametrów modelu, β – standaryzowane oceny parametrów, t – test t -Studenta

TABELA 4.6. Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: wiek [lata+m-ce]
 $R = 0,87612616$; $R^2 = 0,76759705$; skorygowane $R^2 = 0,76541281$,
 $F(5,532) = 351,43$ $p < 0,0000$; błąd standardowy estymacji 0,76004

Parametry modelu m_i	Beta (β)	Bł. std. – β	b_i	Bł. std. – b_i	$t(532)$	Poziom p
Wyraz wolny	–	–	9,90299	0,149062	66,4356	0,000000
Zmienność COPY lewa kd	–0,085545	0,033598	–1,07718	0,423073	–2,5461	0,011174
Pole elipsy COP lewa kd	–0,122396	0,035075	–0,29382	0,084199	–3,4896	0,000524
Prędkość COP lewa kd	–0,306823	0,033344	–0,13543	0,014717	–9,2019	0,000000
Zakres COPX prawa kd	–0,141541	0,036179	–0,69252	0,177013	–3,9122	0,000103
Prędkość COP prawa kd	–0,389987	0,034254	–0,15467	0,013586	–11,3852	0,000000

kd – kończyna dolna, β – standaryzowane oceny parametrów, b_i – współczynnik parametru modelu

niezależnie od siebie. Błąd szacowania wieku wynosi 0,76 (tzn. ± 9 miesięcy, tab. 4.6) od wartości wyrazu wolnego, który określa górną granicę wieku, tzn. 9 lat i 9 miesięcy. Trafność dopasowania modelu to 77% (wartość współczynnika korelacji wielokrotnej $R^2 = 0,76759705$; tab. 4.6), co oznacza, że tylko 23% zmienności wieku nie jest tłumaczone parametrami ujętymi w modelu. Jednocześnie obserwuje się, że wzrost wartości zmiennych ujętych w modelu związany jest z młodszym wiekiem badanych.

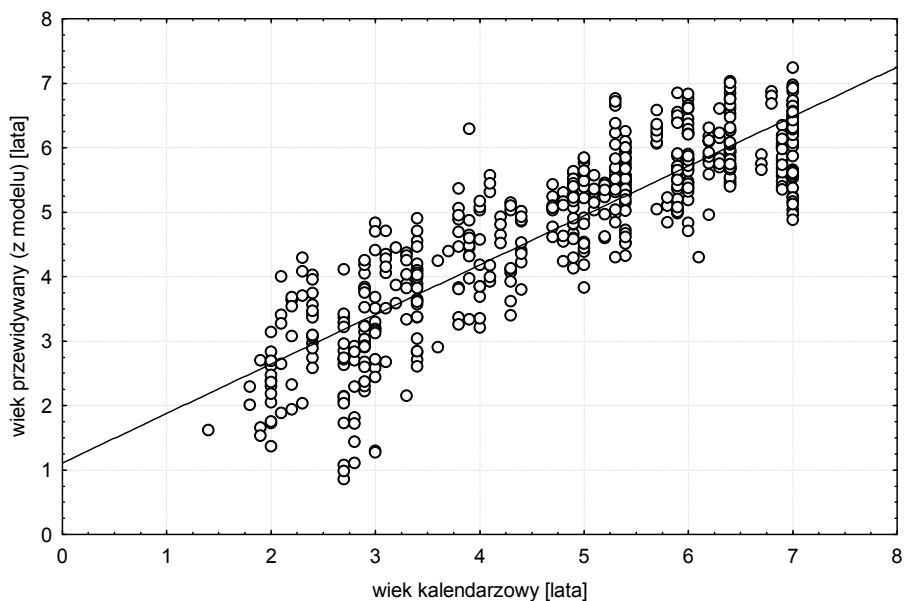
Dopasowanie modelu do wartości rzeczywistych potwierdza rozkład szacowanego wieku stabilności posturalnej (ryc. 4.8).

Model został zweryfikowany pod względem rozkładu reszt wynikających z różnicy pomiędzy wiekiem teoretycznym (wyliczonym za pomocą modelu) a kalendarzowym (rzeczywistym). Rozkład normalny reszt świadczy o wysokim stopniu wiarygodności modelu (ryc. 4.9).

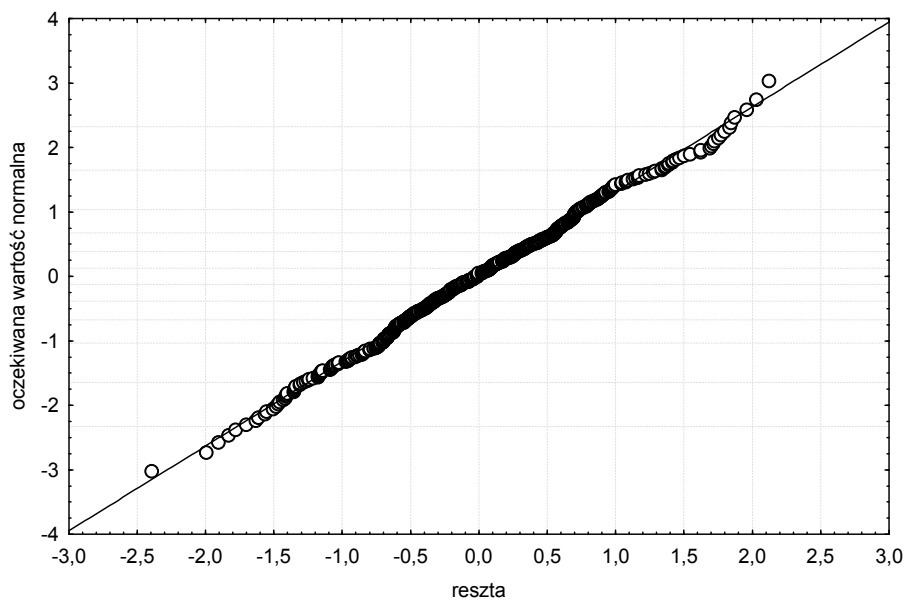
Powyższe statystyki upoważniają do sformułowania modelu szacowania wieku stabilności posturalnej. Uwzględniając dane przedstawione w tabelach: 4.4 i 4.6, można stwierdzić, że 5 wskaźników stabilności ciała: trzy wskaźniki lewej i dwa – prawej kończyny dolnej są parametrami modelu m_i dla $i = 1, \dots, 5$.

W wyniku oceny parametrów regresji ustalono, że:

- parametrem m_1 jest wskaźnik zmienności lewej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej COPY, a odpowiadający mu współczynnik $b_1 = (-1,07718)$ (tab. 4.4),



RYCINA 4.8. Rozkład wartości przewidywanych, tzn. wieku szacowanego za pomocą modelu względem wieku kalendarzowego. Położenie punktów wzdłuż linii prostej potwierdza dobre dopasowanie modelu (R^2 około 77%)



RYCINA 4.9. Rozkład reszt – różnic pomiędzy wiekiem przewidywanym (wyliczonym za pomocą modelu) i kalendarzowym

TABELA 4.7. Wyniki weryfikacji modelu szacowania wieku stabilności posturalnej.
Numery przy imieniu dziecka oznaczają kolejne próby stania

Imię dziecka	Charakterystyka	m_1 zmienność COPY lewa kd [cm]	m_2 pole elipsy COP lewa kd [cm ²]	m_3 prędkość COP lewa kd [mm/s]	m_4 zakres COPX prawa kd [cm]	m_5 prędkość COP prawa kd [mm/s]	Wiek z modelu [lata+m-ce] ± 9 m-cy	Wiek kalendarzowy [lata+m-ce]
Karina 1	zdrowa	0,337	0,463	8,668	0,868	11,005	5 + 9	6 + 8
Karina 2	zdrowa	0,266	0,433	10,033	1,003	14,582	5 + 2	6 + 8
Karina 3	ruchy głowy	0,439	0,729	8,507	1,245	14,375	5 lat	6 + 8
Weronika 1	zdrowa	0,314	0,439	9,959	0,492	9,422	6 + 3	7 + 3
Weronika 2	zdrowa	0,339	0,451	9,320	0,491	9,700	6 + 3	7 + 3
Weronika 3	zdrowa	0,391	0,578	9,488	0,509	9,628	6 + 2	7 + 3
Ola 1	zdrowa	0,726	1,953	17,028	0,822	16,398	3 + 1	3 + 3
Ola 2	zdrowa	0,598	1,984	20,919	0,739	14,619	3 + 1	3 + 3
Ola 3	zdrowa	0,447	1,317	19,176	1,063	19,199	2 + 7	3 + 3
Maciej 1	zespół Downa	0,560	0,843	9,495	0,836	13,420	5 + 1	7 + 5
Maciej 2	zespół Downa	0,695	1,149	10,172	1,333	12,377	4 + 6	7 + 5
Bartek 1	autyzm	1,144	2,103	10,030	1,559	9,694	4 + 1	6 + 10
Kasia 1	zespół Downa	0,321	0,519	9,153	0,714	15,028	5 + 4	7 + 10
Kasia 2	zespół Downa	0,445	0,705	9,686	0,824	13,995	5 + 2	7 + 10
Martyna 1	zespół Downa	0,880	1,152	9,467	0,557	10,806	5 + 3	7 lat
Martyna 2	zespół Downa	0,771	1,216	10,604	0,484	10,108	5 + 4	7 lat
Krzysztof 1	zespół Aspergera	0,634	1,340	8,213	0,687	9,018	5 + 8	7 + 9
Krzysztof 2	zespół Aspergera	0,804	1,635	8,167	1,051	8,703	5 + 4	7 + 9
Julia 1	zespół Downa	0,481	1,067	10,709	0,696	11,059	5 + 4	7 + 1
Julia 2	zespół Downa	0,483	0,880	8,548	0,721	13,639	5 + 4	7 + 1

kd – kończyna dolna

- parametrem m_2 jest wskaźnik pola elipsy oscylacji COP lewej kończyny dolnej, a odpowiadający mu współczynnik $b_2 = (-0,29382)$,
- parametrem m_3 jest wskaźnik prędkości przemieszczeń COP lewej kończyny dolnej, a odpowiadający mu współczynnik $b_3 = (-0,13543)$,
- parametrem m_4 jest wskaźnik zakresu w płaszczyźnie czołowej COPX prawej kończyny dolnej, a odpowiadający mu współczynnik $b_4 = (-0,69252)$,
- parametrem m_5 jest wskaźnik prędkości przemieszczeń COP prawej kończyny dolnej, a odpowiadający współczynnik $b_5 = (-0,15467)$,
- współczynnik $b_0 = 9,90299$ (wyraz wolny) ≈ 10 lat, oznacza górną granicę wieku, od którego należy odejmować parametry modelu po pomnożeniu przez odpowiadające im współczynniki.

Zatem przewidywany wiek dziecka (APS) można wyliczyć według formuły modelu:

$$\text{APS} = 9,90299 - 1,07718 m_1 - 0,29382 m_2 - 0,13543 m_3 - 0,69252 m_4 - 0,15467 m_5 \pm 9 \text{ miesięcy}$$

$$(0,423) \quad (0,084) \quad (0,015) \quad (0,177) \quad (0,014)$$

W nawiasach podano standardowe błędy ocen parametrów.

W celu uwzględnienia istotności dymorfizmu płciowego dla budowy modelu wzięto pierwotnie pod uwagę płeć badanych. Płeć nie objaśniała jednak istotnie zmienności wieku badanych. Poziom istotności różnicy pomiędzy modelem wspólnym dla obu płci i modelem dla chłopców i dziewcząt był równy 0,5, co upoważnia do stwierdzenia, że nie ma podstaw do stosowania odmiennego modelu dla dziewcząt i chłopców.

Opisany model poddano weryfikacji. Przeprowadzono badania trojga zdrowych dzieci w wieku 3 lat i 3 miesięcy, 6 lat i 8 miesięcy oraz 7 lat i 3 miesięcy, a także dzieci z zespołem Downa, Aspergera i autyzmem w wieku 7–8 lat, w taki sam sposób, jak to zostało opisane w rozdziale 3. Wartości pięciu wskaźników stabilności każdego dziecka, parametrów modelu, zostały podstawione do formuły modelu. Rezultaty weryfikacji modelu przedstawiono w tabeli 4.7. Zaprezentowane poniżej wyniki dowodzą, że proponowany model można stosować, z dużym prawdopodobieństwem trafności (około 77%), do szacowania wieku stabilności posturalnej dzieci na podstawie pięciu wybranych wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej.

Wyliczony wiek stabilności posturalnej zdrowych dzieci jest niższy od rzeczywistego o 12–13 miesięcy (tab. 4.7) w przypadku pierwszych dwóch dziewcząt. Dodatkowe, nawet niewielkie ruchy głową lub inną częścią ciała u zdrowego dziecka powodują znaczne obniżenie wieku stabilności posturalnej (próba „Karina 3”). Obniżenie wieku stabilności posturalnej dzieci chorych w stosunku do ich wieku kalendarzowego sięga od 21 do 32 miesięcy (tab. 4.7).

5

Dyskusja

Wyniki badań równowagi ciała dzieci w wieku od 2 do 7 lat przedstawiono w czterech podrozdziałach dotyczących następujących zagadnień:

- zmian wielkości wychwiał ciała związanych z wiekiem kalendarzowym badanych dzieci,
- zmian poziomu powtarzalności wskaźników stabilności ciała wraz z wiekiem dzieci,
- asymetryczności funkcji podporowej kończyn dolnych podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej,
- zastosowania w praktyce modelu szacowania wieku stabilności posturalnej.

5.1. Stabilność pozycji stojącej a wiek metrykalny dzieci

Przedstawione wyniki badań obrazują proces zmniejszania się wielkości wychwiał ciała wraz z wiekiem dzieci w przedziale od 2 do 7 lat, co świadczy o doskonaleniu stabilizacji dwunożnej pozycji stojącej.

Wartość maksymalnego zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie bocznej i przednio-tylnej odzwierciedla wielkość odchyłen ciała od pionu w obu kierunkach ruchu. Jest to wskaźnik stabilności ciała zależny od przemieszczeń środka masy ciała, który jest przyczyną zmiany położenia punktu nacisku stóp na podłoże. Zmiany położenia COP są wtórne, nadążne i zawsze większe w swojej amplitudzie od przemieszczeń środka masy ciała (Zatsiorsky, 1999; Golema, 2002; Kuczyński, 2003). Obniżanie się wartości wskaźników amplitudowych oznacza poprawienie stabilności ciała w odniesieniu do stanu wyjściowego i odwrotnie – zwiększone wartości tych wskaźników są dowodem pogorszenia się stabilności ciała w sensie fizycznym (Hufschmidt i wsp., 1980; Kuczyński, 2001).

Na podstawie wyników badań równowagi ciała u dzieci w wieku 3–10 lat

przeprowadzonych przez Hay i Redon (1999) można stwierdzić, że u dzieci w intensywnym okresie rozwoju biologicznego stabilizacja ciała powinna przejawiać się zmniejszaniem wielkości wychwiał ciała, a co za tym idzie, zmniejszaniem zakresu przemieszczeń COP w obu kierunkach ruchu. Wyniki niniejszej pracy potwierdzają powyższą tezę na temat doskonalenia funkcji kontroli równowagi ciała dziecka. Dzieci 2- i 3-letnie wykazują, relatywnie do starszych, największy zakres „kołysania się” ciała w pozycji stojącej w obu kierunkach ruchu, a brak różnicy pomiędzy tymi grupami wiekowymi świadczy, że 2- i 3-latkki znajdują się na podobnym etapie rozwoju kontroli równowagi pozycji pionowej ciała. Dzieci w tym wieku przeciętnie osiągają wartości zakresu przemieszczeń COP obu stóp w wymiarze około 1,2 i 3,6 cm odpowiednio w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej, co niewiele się różni od wartości zakresu COP u dzieci w wieku 2–14 lat, które były obiektem badań Riach i Hayesa (1987). Rezultaty ich badań są jednak nieco odmienne, ze względu na zastosowanie pojedynczej platformy sił typu AccuSway dla obu kończyn dolnych razem. Wyniki uzyskane przez tych autorów są efektem analizy przemieszczeń wypadkowego punktu nacisku obu stóp i wynoszą około 2 cm w kierunku bocznym i około 3 cm w kierunku przednio-tylnym, podczas spokojnego stania.

Najintensywniejsze obniżanie się wartości zakresu COP lewej i prawej kończyny dolnej w badaniach własnych zaobserwowano u dzieci od 4. do 6. roku życia. Później następowała pewna stabilizacja wartości tego wskaźnika na poziomie około 0,7 cm w płaszczyźnie czołowej ruchu i 2,5 cm w płaszczyźnie strzałkowej (pomiędzy 6. a 7. rokiem życia). Dzieci 7-letnie miały niewiele wyższe wartości zakresu oscylacji COP niż młodzi dorośli (także badani na dwóch platformach oddzielnie dla obu kończyn dolnych), którzy osiągalni około 0,5 cm w płaszczyźnie czołowej i 2,0 cm w płaszczyźnie strzałkowej (Sikora, 2001).

Podobną prawidłowość zmian wraz z przyrostem wieku kalendarzowego badanych zanotowano w przypadku wskaźnika zmienności oscylacji COP w obu płaszczyznach ruchu. Wskaźnik zmienności COP obu kończyn dolnych jest zbliżony u 2- i 3-latków (wynosi odpowiednio – około 0,2 cm i 0,5 cm w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej), następnie znacznie się obniża w wieku 4 i 5 lat, po czym stabilizuje się na poziomie około 0,1 cm w płaszczyźnie czołowej i 0,3 cm w płaszczyźnie strzałkowej ruchu u dzieci pomiędzy 6. a 7. rokiem życia, osiągając poziom osób dorosłych (Sikora, 2001). Zmienność oscylacji COP jest miarą rozrzutu przemieszczeń punktu nacisku stóp od wartości średniej i świadczy o poziomie zmienności w wykonywaniu zadania utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Nawet u bardzo małych dzieci 9–10-miesięcznych zanotowano obniżanie się wraz z wiekiem zmienności aktywności mięśni posturalnych ciała w czasie utrzymywania równowagi w pozycji siedzącej (Woollacott i wsp., 1998). Zmienność i zakres oscylacji COP wykazują wysoki poziom dodatniej korelacji wzajemnej u dorosłych (Sobera, 2003; Ku-

czyński i wsp., 2007). W przypadku dzieci, nie we wszystkich grupach notuje się istotny poziom wzajemnej zależności między zakresem i zmiennością (tab. 27, 30 i 36 – aneks). Fakt ten stanowi uzasadnienie dla stosowania obu wyżej wymienionych miar, pomimo ich wysokiej zależności u osób dorosłych.

Podczas analizy zmian wielkości pola powierzchni przemieszczeń COP zaobserwowano taką samą prawidłowość, jaką zanotowano w przypadku już opisywanych wskaźników stabilności. Najmłodsze badane dzieci – 2- i 3-latkowie – wykazują zbliżoną do siebie wielkość pola elipsy COP. Najbardziej gwałtowne obniżenie się wartości pola elipsy COP obu kończyn dolnych obserwuje się między 4-latkami a młodszymi badanymi. U dzieci 5- i 6-letnich tendencja do zmniejszania powierzchni oscylacji COP jest jeszcze widoczna, ale już w 7. roku życia znaczące obniżanie się wartości tego wskaźnika nie występuje. U dzieci pomiędzy 3. a 5. rokiem życia obserwuje się przyspieszenie tempa rozwoju długości stóp o 12–13 mm (Demczuk-Włodarczyk, 2003), co powoduje wzrost powierzchni płaszczyzny podparcia. Jednocześnie dzieci w tym wieku przejawiają znaczące zmniejszenie się pola oscylacji COP podczas stania. Pole powierzchni przemieszczeń COP jest miarą obszaru stabilności ciała, który ulega zmianie w zależności od warunków utrzymywania równowagi. Zmniejszanie się tego obszaru świadczy o zmniejszaniu się zakresu ruchów w obrębie stawów skokowych, związanych z przemieszczaniem punktu nacisku stopami na podłoże w odpowiedzi na wychylenia ciała. Oznacza to, że wraz z wiekiem reakcje posturalne stają się bardziej adekwatne do sytuacji i bardziej ekonomiczne, a przejawem tego jest zmniejszanie się pola przemieszczeń COP. Na ekonomiczność ruchu i poprawę koordynacji nerwowo-mięśniowej ma wpływ proces mielinizacji nerwów obwodowych, który trwa do 5. roku życia (Czochańska, 1985). Proces ten powoduje wzrost prędkości przepływu bodźców nerwowo-ruchowych w układzie biologicznym i ma decydujące znaczenie dla rozwoju koordynacji nerwowo-mięśniowej. Hay i Redon (1999) stwierdziły, że kontrola równowagi ciała podczas wychyleń w przód jest możliwa u dzieci przed 4. rokiem życia, gdyż nawet młodsze dzieci wykazują regulację posturalną wyprzedzającą zamierzony ruch. Jednocześnie te same autorki dowiodły, że największe zmiany rozwojowe w kontroli równowagi dotyczą dzieci w wieku 6–8 lat. Należy zwrócić uwagę, że badania Hay i Redon dotyczą kontroli równowagi ciała podczas zamierzonego, dowolnego ruchu kończynami górnymi, a nie podczas spokojnego stania, i stąd wynika rozbieżność rezultatów badań prezentowanych w niniejszej pracy z przytoczonymi powyżej.

Nie można pominąć także faktu istotnych wzajemnych zależności wskaźników pola powierzchni, zakresu i zmienności COP (tab. 26–37 – aneks) we wszystkich grupach wiekowych dzieci. Te trzy wskaźniki zawierają informacje o amplitudowych (ilościowych) miarach stabilności, opartych na wielkości wychyleń ciała podczas naturalnego stania. Komponentem pola przemieszczeń

COP jest zakres i zmienność w obu kierunkach ruchu i zmiany tych dwóch wskaźników są zróżnicowane na kolejnym etapie rozwoju dzieci. Vallis i McFadyen (2005) wykazali, że nawet 10-letnie dzieci charakteryzują się wyprzedzającymi ruchami głowy i tułowia, zanim zmieniają kierunek wychyleń całego ciała podczas stania. Takie ruchy są przyczyną powiększania zakresu i zmienności ruchów w stawach skokowych i przemieszczeń COP, a to uwydatnia efekt odchylenia ciała od pionowego ułożenia. Ontogenetyczny model kontroli równowagi u dzieci w wieku do 1. roku życia, oparty właśnie na współdziałaniu ruchów głowy i tułowia, opisali Assaiante i Amblard (1995). Zdaniem Roncesvalles i wsp. (2005) dzieci do 6. roku życia przejawiają strategię tułowia i powierzchni podparcia w kontroli położenia swojego ciała, co oznacza, że do ruchów tułowia odnoszone są ruchy i położenie innych części ciała, zatem przemieszczanie tułowia warunkuje ruchy w okolicy stawu skokowego podczas stania. Autorzy ci stwierdzili, że krytycznym okresem rozwoju kontroli równowagi ciała jest wiek od 7 do 9 lat. U dzieci w tym wieku zaobserwowano większą niezależność poruszania poszczególnymi segmentami ciała i odnoszenie położenia ciała do kierunku siły grawitacji. Zmniejszanie się zakresu, zmienności i pola powierzchni oscylacji COP wraz z wiekiem kalendarzowym, dowiedzione w niniejszej pracy, znajduje wytłumaczenie zgodne z wynikami innych autorów.

Biorąc pod uwagę zmniejszanie się amplitudowych wskaźników stabilności wraz z wiekiem kalendarzowym, można stwierdzić, że stabilność pozycji stojącej ciała ulega znaczącej poprawie w miarę rozwoju biologicznego dzieci w przedziale wiekowym 2–7 lat. Najbardziej intensywne zmiany w kierunku zmniejszania się kołysania postawy obserwuje się pomiędzy 3. i 6. rokiem życia. W 7. roku życia dzieci nie wykazują istotnego postępu w minimalizacji wychyleń ciała. Spostrzeżenia te są zgodne z wynikami badań innych autorów, którzy stwierdzili, że dzieci 7-letnie osiągają poziom stabilności ciała osób dorosłych, a największą zmienność we wskaźnikach stabilności ciała obserwuje się u dzieci w wieku od 3 do 5 lat (Riach i Hayes, 1987; Riach i Starkes, 1993).

Wskaźnik prędkości przemieszczeń COP można zaliczyć częściowo do miar jakościowych, a częściowo ilościowych stabilności ciała, gdyż świadczy o szybkości zmian nacisku stopami na podłoże w różnych kierunkach ruchu, spowodowanych przeciwdziałaniem nadmiernemu wychyleniu ciała. Prędkość tych zmian podczas stania wyraźnie zmniejsza się wraz z wiekiem w grupach dzieci od 2 do 6 lat, odpowiednio od około 18 mm/s do 10 mm/s, ale pomiędzy 6. i 7. rokiem życia wskaźnik ten nie zmienia się i ustala na poziomie około 10 mm/s. Rezultaty badań własnych świadczą o tym, że wraz z przyrostem wieku kalendarzowego dzieci spowalniają zmiany nacisku stóp na podłoże, co jest przejawem ekonomizacji odruchów postawnych. Raymarkers i wsp. (2005) stwierdzili, że wskaźnik prędkości COP jest najbardziej miarodajny wśród różnych miar stosowanych do oceny stabilności ciała, gdyż jest odbiciem transmisji informa-

cji wejściowych i wyjściowych w układzie sensomotorycznym. Wyniki badań wskaźników stabilności ciała u dzieci w wieku 2–4 lat i osób dorosłych dowiodły, że zakres i zmienność oscylacji COP nie różnią się istotnie nawet w tak zróżnicowanych wiekowo grupach badawczych, ale wskaźnik prędkości przemieszczeń COP jest znacznie niższy u dorosłych niż u dzieci, co świadczy o większej sprawności układu nerwowego dorosłych w kontroli równowagi pozycji stojącej (Sobera, 2005b). Porównując wartość tego wskaźnika z wynikami innych autorów, należy zwrócić uwagę, że wielu badaczy podaje wielkości prędkości COP oddzielnie w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej (Piestrak, 2001; Waszczak, 2001), co może być przyczyną dużych różnic w wynikach badań.

Dowiedziano również w badaniach Sobery i Siedleckiej (2008), że istnieje odwrotna zależność pomiędzy prędkością COP a wysokością i masą ciała dzieci oraz pomiędzy prędkością COP a szerokością i długością stóp. Wyniki te sugerują, że w miarę wzrostu dziecka, a tym samym przyrostu wieku kalendarzowego, zmniejsza się prędkość oscylacji COP. Fakt, że wskaźnik prędkości COP lewej i prawej kończyny dolnej znalazł się wśród pięciu wskaźników najlepiej opisujących wiek kalendarzowy dzieci, świadczy o niebagatelnej mocy determinacyjnej wskaźnika prędkości COP, związanej z rozwojem osobniczym dzieci.

Wskaźniki jakościowe – oparte na miarach czasowo-częstotliwościowych – są nośnikami informacji o szybkości przewodzenia bodźców w systemie nerwowym człowieka (Winter i Eng, 1995; Kuczyński, 1997, 2001; Hay i Redon, 1999; Golema, 2002; Hertel i wsp., 2006). Należą do nich: częstotliwość zmian położenia punktu COP (Hufschmidt i wsp., 1980; Sobera i Siedlecka, 2007a; Sobera i wsp., 2007a) oraz parametry lepko-sprężyste: sztywność, lepkość i tłumienie (Kuczyński, 1997, 1999, 2001; Sobera i Siedlecka, 2007a). W przypadku małych dzieci wskaźnik częstości zmian położenia punktu nacisku stóp na podłogę podczas stania może być wyznacznikiem rozwoju sprawności przewodzenia nerwowo-mięśniowego, a także integracji informacji ze środowiska zewnętrznego. Chociaż u dzieci od urodzenia obecne są fundamentalne mechanizmy korowo-rdzeniowe, istnieją różnice w prędkości przewodzenia nerwowego m.in. w monosynaptycznym odruchu na rozciąganie. Odruch ten jest podstawowym „filarem” procesu utrzymywania równowagi (Miller i Kuntz, 1986). Dzieci do 2 lat wykazują wzmogoną pobudliwość odruchu ścięgniętego i H-odruchów (pobudzenie nerwu piszczelowego powoduje zgięcie podeszwowe stopy), które stopniowo obniżają swoją aktywność w ciągu pierwszych czterech lat życia (Myklebust i wsp., 1986). Wrażliwość przedsionkowa na odruchy postawy jest największa w czasie pierwszych lat rozwoju motorycznego dziecka (Brandt i wsp., 1976). W świetle tych doniesień nie dziwi fakt, że najbardziej radykalne, gwałtowne zmniejszenie się wartości częstotliwości przemieszczeń korekcyjnego nacisku stóp (COC) przejawiają 3-latkowie w stosunku do 2-latków, jeśli chodzi o boczne oscylacje COC. W starszych grupach wiekowych dzieci nie zanoto-

wano istotnych zmian wskaźnika częstotliwości COC, a jedynie tendencję do obniżania się częstości przemieszczeń korekcyjnego punktu nacisku stóp. Wyniki badań Sobery i Siedleckiej (2007a) dowodzą jednak, że częstotliwość oscylacji COC obniża się znacząco pomiędzy 3. a 4. rokiem życia, a starsze dzieci przejawiają tylko tendencję do nieznacznej obniżenia się częstotliwości przemieszczeń korekcyjnego nacisku stóp. Różnica wieku, w którym u dzieci pojawiają się radykalne zmiany w częstotliwości COC, może być efektem użycia innego rodzaju platform do rejestracji sygnału COP (Sobera i Siedlecka, 2007a). Inni badacze równowagi ciała nie określają dokładnie wieku największych zmian w procesie rozwoju kontroli stabilności ciała. Bawa (1981) uznała, że dojrzałe funkcjonowanie pętli odruchu proprioceptywnego, przyczyniającej się do stabilizacji postawy ciała, nie pojawia się przed 7. rokiem życia. Peterson i wsp. (2006) uważają, że dzieci młodsze niż 12-letnie nie potrafią w pełni wykorzystać bodźców wzrokowych i przedsionkowych do kontroli postawy. Do podobnych wniosków doszli Steindl i wsp. (2006), którzy stwierdzili u dzieci 3–4-letnich dojrzałość funkcji wykorzystania bodźców proprioceptywnych, ale brak integracji bodźców z narządu wzroku i przedsionka podczas utrzymywania pionowej postawy ciała aż do wieku 15–16 lat. Przedstawione w tej pracy wyniki badań własnych zdają się potwierdzać spostrzeżenia neurologów dotyczące dojrzewania układu nerwowego. Odruchy postawy pojawiają się od pierwszych tygodni życia. Pionizacyjne wzorce ruchowe także są uwarunkowane genetycznie, ale dojrzewanie i rozwój sprawności układu sterującego ruchami człowieka odbywa się na poziomie integracji, kojarzenia i analizy bodźców zewnętrznych i wewnętrznych odbieranych przez dziecko w celu ustabilizowania swojego ciała w przestrzeni (Czochańska, 1985).

Na podstawie powyższych wyników można potwierdzić pierwszą hipotezę o zmniejszaniu się wielkości wychwiał ciała u dzieci w wieku pomiędzy 3. a 6. rokiem życia. Rozkład wartości wskaźników: zakresu, zmienności, pola elipsy i prędkości oscylacji COP w poszczególnych grupach wiekowych pozwala na stwierdzenie, że od 2. do 3. roku życia u dzieci nie obserwuje się znaczących zmian w stabilizacji pozycji stojącej. Najbardziej radykalne zmiany w kierunku zmniejszania się wielkości wychwiał ciała przejawiają dzieci w wieku między 3. a 6. rokiem życia. W 7. roku życia nie obserwuje się znaczącego zmniejszania się „kołysania” pozycji stojącej ciała, chociaż grupa dzieci 7-letnich różni się diametralnie od grupy 2–3-latków. Analiza częstotliwości oscylacji korekcyjnego przemieszczenia nacisku stóp w kolejnych grupach wiekowych dzieci od 2 do 7 lat pozwala natomiast stwierdzić istotne obniżenie się częstości zmian nacisku stóp podczas stania tylko między 2. i 3. rokiem życia, a w następnych latach życia częstość oscylacji nacisku stóp nie zmienia się znacząco. Fakt ten potwierdza wcześniejsze przypuszczenia, że wskaźnik częstotliwości korekcyjnego nacisku stóp jest nośnikiem innej informacji niż wskaźniki określające ze-

wewnętrzne przejawy wychwiał ciała. Wyniki przedstawionych badań własnych pozwalają przypuszczać, że obniżanie się częstotliwości korekcyjnego nacisku stóp na podłoże świadczy o doskonaleniu procesu utrzymywania równowagi pod względem sprawności przewodzenia nerwowo-mięśniowego.

5.2. Zmiany powtarzalności wyników charakteryzujących proces utrzymywania równowagi a wiek metrykalny dzieci

Dzięki analizie powtarzalności przebiegu przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże dowiedziono, że proces utrzymywania równowagi jest słabo powtarzalny w kolejnych próbach stania u młodych dorosłych (Hinman, 1997; Brouwer i wsp., 1998). Hufschmidt i wsp. (1980) stwierdzili, że kliniczne znaczenie badań równowagi ciała na podstawie danych z platformy sił jest ograniczone ze względu na duży stopień zmienności zarówno indywidualnej, jak i międzygrupowej. Corriveau i wsp. (2001), Geurts i wsp. (1993) i Lafond (2006) próbowali opisać problem powtarzalności wyników badań związanych z analizą przebiegu punktu nacisku stóp na podłoże i dowiedli, że powtarzalność ta jest zmienna – od przeciętnej do słabej – u osób zdrowych dorosłych.

Podczas badań stabilności posturalnej u dzieci w wieku 4–9 lat wykazano wysoką powtarzalność poczucia czasu w staniu na jednej kończynie dolnej, ale stwierdzono niską powtarzalność jakości tego stania (Richardson, 1990). Zaino i McCoy (2008) zbadali powtarzalność napięcia mięśni posturalnych i miar stabilności ciała opartych na przebiegu COP u dzieci w wieku 8–14 lat. Autorzy ci stwierdzili, że wyniki testu powtarzalności (*interclass correlation coefficient* – ICC, tzn. współczynnik międzygrupowej korelacji wzajemnej) wzorca koordynacji mięśni posturalnych były słabe (ICC od 0,16 do 0,21), ale jednocześnie zauważyli ponadprzeciętny i wysoki poziom powtarzalności dla pomiarów kinetycznych (ICC od 0,69 do 0,87).

Rezultaty prezentowanych w tej pracy badań zdają się potwierdzać zróżnicowane wyniki powtarzalności procesu utrzymywania równowagi otrzymane przez innych autorów, chociaż wiek badanych dzieci może mieć w tym przypadku duże znaczenie. W grupie dzieci od 2 do 4 lat trudno dostrzec wyraźne prawidłowości w zgodności wyników lewej i prawej kończyny dolnej. W tej grupie notuje się zarówno przeciętne, jak i bliskie zera zgodności wskaźników stabilności, chociaż zróżnicowane dla lewej i prawej kończyny dolnej. Jedynie wskaźnik częstotliwości wykazuje istotną zgodność wyników kolejnych prób u 4-latków. Steindl i wsp. (2006) stwierdzili u dzieci w wieku 3–4 lat dojrzewanie funkcji proprioceptywnej kontroli postawy, więc procesy rozwojowe dzieci w tym wieku mogą wpływać na zwiększenie zmienności, a tym samym na pogorszenie się powtarzalności wyników ściśle związanych z przewodnictwem tych bodźców.

Dzieci w wieku 5 lat przejawiają charakterystyczny dla tej grupy wiekowej znaczny wzrost zgodności wszystkich opisanych wskaźników stabilności do poziomu przeciętnego i wysokiego, szczególnie w porównaniu pierwszych dwóch prób. Tak wyraźna poprawa zgodności wyników procesu utrzymywania równowagi jest prawdopodobnie efektem końcowego etapu dojrzewania przewodnictwa nerwowo-mięśniowego w tej grupie dzieci. Proces mielinizacji włókien nerwowych, który przypada na okres od 3. do 5. roku życia, jest już zakończony u większości dzieci w tej grupie wiekowej (Czochańska, 1985), czego wyrazem może być znaczna poprawa powtarzalności procesu kontroli równowagi. U 5-latków nie notuje się znaczących różnic w poziomie zgodności pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną. Jest to dowód na podobną aktywność obu stóp w realizacji zadania utrzymania pionowej pozycji ciała. Można stwierdzić, że 5-latki wykazują przeciętny i wysoki poziom powtarzalności utrzymywania równowagi i proces ten jest realizowany w zbliżony sposób zarówno przez lewą, jak i prawą kończynę dolną.

U dzieci 6-letnich obserwuje się duże różnice w zgodności wielkości pola elipsy COP lewej i prawej kończyny dolnej. Lewa kończyna dolna przejawia znacznie wyższy poziom zgodności niż prawa w porównaniu trzech kolejnych prób stania. Fakt ten wskazuje na wybór lewej kończyny dolnej jako głównej w funkcji stabilizacyjnej. Możliwe, że przyczyna większej roli lewej kończyny dolnej niż prawej wynika z częstego używania kończyny dominującej czynnościowo – najczęściej prawej – do wykonania ruchu celowego. Jednak takiej prawidłowości nie obserwuje się w przypadku zgodności prędkości COP. Wartość współczynnika zgodności prędkości oscylacji COP jest bardzo zbliżona dla lewej i prawej kończyny, jednocześnie obie kończyny wykazują istotny, wysoki poziom zgodności prędkości COP w tej grupie wiekowej. Poziom zgodności pozostałych wskaźników stabilności jest podobny dla lewej i prawej kończyny dolnej, ale znacznie obniżony w stosunku do poziomu zgodności u dzieci 5-letnich. W trakcie badania napięcia mięśni posturalnych u dzieci w wieku od roku do 10 lat jako odruchu postawy ciała na przesunięcia platformy do przodu wykazano, że dzieci w wieku 4–6 lat przejawiają pogorszenie się kontroli posturalnej, tzn. mają większą amplitudę czynnościową mięśni i dłuższe opóźnienie ich pobudzenia niż dzieci młodsze lub starsze i dorośli (Trew i Everett, 2006). Stosunkowo słabsze u 6-latków niż u 5-latków rezultaty powtarzalności wskaźników stabilności ciała, zaprezentowane w tej pracy, zdają się potwierdzać okresowy regres kontroli stabilności pozycji stojącej. Prawdopodobnie jest to związane z tendencją 6-latków do przeciwnastawnego przemieszczania punktu nacisku stopy lewej i prawej w płaszczyźnie czołowej, a także brakiem wzajemnej zależności we współpracy lewej i prawej kończyny dolnej (Sobera i Siedlecka, 2003).

Wyniki badań powtarzalności procesu utrzymywania równowagi ciała w po-

zycji stojącej u dzieci 7-letnich wykazują zgodność wskaźników stabilności na poziomie przeciętnym i wysokim. Nie obserwuje się w tej grupie znaczących różnic pomiędzy zgodnością wyników lewej i prawej kończyny dolnej. Może oznaczać to zakończenie procesu lateralizacji kończyn dolnych w ich funkcji stabilizacyjnej. Dzieci 7-letnie przejawiają niższy niż przeciętny lub przeciętny poziom zgodności wskaźników ilościowych stabilności ciała, ale też najwyższy poziom zgodności prędkości COP we wszystkich trzech porównaniach prób w stosunku do pozostałych, młodszych, badanych. Prędkość zmian położenia punktu nacisku stóp na podłoże świadczy pośrednio o szybkości przewodzenia informacji nerwowo-mięśniowej, a tym samym, prędkość COP może być miernikiem tej transmisji bodźców w układzie biologicznym dziecka. Berger i wsp. (1995) uważają, że aktywność mięśni prostowników podczas stania obunóż u dzieci w wieku 6–7 lat jest taka jak u dorosłych. Mięśnie prostowniki głównych stawów umożliwiają utrzymywanie pionowej pozycji ciała. Jeśli aktywność mięśni posturalnych przekłada się na prędkość przemieszczeń COP, to wysoki poziom zgodności prędkości COP, wykazany w tej pracy, potwierdzałby zasadność zastosowania wskaźnika prędkości COP jako pośredniego miernika szybkości przewodzenia impulsów nerwowo-mięśniowych w układzie biologicznym człowieka.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że wskaźnik prędkości charakteryzuje się wysokim poziomem powtarzalności i bardzo małą zmiennością wewnątrzgrupową zgodności lewej i prawej kończyny dolnej we wszystkich grupach dzieci, co świadczy o lepszej miarodajności tego wskaźnika niż pozostałych. Wskaźniki zakresu, zmienności i pola elipsy oscylacji COP wykazują relatywnie słabszą niż w przypadku prędkości COP zgodność wewnątrzgrupową obu kończyn dolnych. Wskaźnik częstotliwości wydaje się miarodajny w grupach dzieci od 4 do 7 lat, ale w młodszych grupach badanych nie jest wystarczająco powtarzalny, by stosować go w ocenie kontroli stabilności ciała. Wyniki te są potwierdzeniem analizy innych autorów (Riach i Starkes, 1994), którzy również uznali prędkość przemieszczeń COP za najbardziej miarodajny wskaźnik stabilności ciała u dzieci. Zaino i McCoy (2008) zaobserwowali wysoki poziom powtarzalności wskaźnika prędkości COP w kolejnych próbach kontroli równowagi ciała podczas sięgania kończyną górną do przodu (ICC od 0,72 do 0,77), chociaż jeszcze wyższą powtarzalność miał u nich wskaźnik długości ścieżki COP (ICC = 0,84). Należy pamiętać, że długość ścieżki COP to inaczej droga COP, a prędkość jest pochodną drogi. Nie dziwi zatem fakt, że prędkość i droga COP osiągają podobny, wysoki poziom powtarzalności. Wskaźniki zakresu, zmienności i wielkości pola elipsy oscylacji COP opisane w rozdziale 4 są ilościowymi miarami przemieszczeń COP i zawierają informację o wielkości powierzchni pod stopą, po której punkt COP przemieszcza się podczas stania w odpowiedzi

na wychylenia ciała. Wskaźniki te zasadniczo charakteryzują się słabszą niż wskaźnik prędkości COP powtarzalnością w kolejnych próbach u wszystkich badanych dzieci.

Analiza powtarzalności wyników związanych ze stabilizacją ciała u dzieci w wieku od 2 do 7 lat pozwala potwierdzić drugą hipotezę o poprawie powtarzalności wyników charakteryzujących proces utrzymywania równowagi ciała w pozycji stojącej wraz z przyrostem wieku metrykalnego dzieci, jedynie dla dzieci od 4. do 7. roku życia. Wszystkie wskaźniki stabilności ciała podczas stania, uzyskane w kolejnych trzech próbach, wykazują znaczącą poprawę powtarzalności wraz z przyrostem wieku kalendarzowego dzieci w tym przedziale wiekowym, chociaż najbardziej miarodajnym pod względem powtarzalności wydaje się wskaźnik prędkości oscylacji COP. W przypadku najmłodszych dzieci (2- i 3-latków) hipoteza ta nie potwierdziła się, co świadczy o tym, że dzieci w tym wieku znajdują się na zbliżonym etapie rozwoju kontroli równowagi w pozycji stojącej.

Najbardziej wyraźną poprawę powtarzalności wszystkich opisanych wskaźników stabilności ciała obserwuje się w przypadku porównania 2 i 3 próby, co wskazuje na zasadność stosowania w przypadku badań dzieci w przedziale wiekowym 2–7 lat pewnego czasu adaptacji do warunków eksperymentu na platformach (około 20 s przed rozpoczęciem rejestracji danych z platform).

5.3. Asymetryczność funkcji podporowej kończyn dolnych

Jednym z efektów analizy wyników badań w niniejszej pracy jest propozycja rozgraniczenia dwóch funkcji związanych z podparciem kończyn dolnych podczas utrzymywania równowagi ciała w pozycji stojącej: funkcji stabilizacyjnej – związanej z preferencją czynnościową jednej kończyny dolnej do wykonywania różnych ruchów w celu zminimalizowania wychwiania ciała, oraz funkcji podparcia – związanej z wyborem drugiej kończyny dolnej do przyjmowania większego obciążenia podczas stania.

5.3.1. Asymetria funkcji stabilizacyjnej

Rozdzielenie analizy funkcjonowania kończyny dolnej lewej i prawej podczas naturalnego stania pozwala na wychwycenie różnic i podobieństw pomiędzy aktywnością obu kończyn w czasie wykonywania zadania utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Wartości wskaźników stabilności ciała otrzymane dla lewej i prawej kończyny dolnej znacząco różnią się wewnątrz niektórych grup wiekowych. Amplitudowe wskaźniki stabilności ciała nie potwierdzają jednoznacznie dominacji jednej kończyny dolnej nad drugą u dzieci najmłodszych (2-, 3-letnich). Inaczej u dzieci od 4. do 7. roku życia – obserwuje

się u nich dominację kończyny prawej nad lewą (z wyjątkiem 6-latków, u których wskaźniki stabilności ciała wskazują na prawie jednakowe zaangażowanie kończyn dolnych w utrzymywaniu równowagi). Podobne wyniki badań dzieci w wieku 3–6 lat przedstawiono w pracy Sobery i Siedleckiej (2003).

Przemieszczenia wypadkowego punktu nacisku stóp na podłoże wynikają z ruchów w obrębie stawów skokowych. Wskaźnik zakresu zmian położenia COP jest odzwierciedleniem tych ruchów w kierunku bocznym i przednio-tylnym. Zakres przemieszczeń COP różnicuje działanie kończyn dolnych jedynie w grupie 4-, 5- i 7-latków, u których lewa stopa wykonuje przemieszczenia COP w mniejszym wymiarze niż prawa, ale częstotliwość korekcyjnych przemieszczeń punktu nacisku lewej stopy jest wyższa niż prawej. Oznacza to, że lewa kończyna dolna wykazuje większą aktywność w czynnościach stabilizacyjnych pozycji stojącej niż prawa i u dziecka od 4. roku życia zaznacza się jej przewaga, pod tym względem, nad prawą. Istotnie mniejsze wartości amplitudowych wskaźników stabilności ciała lewej kończyny dolnej niż prawej oraz większa częstotliwość zmian położenia punktu nacisku na podłoże lewej stopy niż prawej zdają się potwierdzać tezę o dominacji stabilizacyjnej lewej kończyny dolnej nad prawą szczególnie widocznej u 7-latków. Proces kształtowania się tej dominacji ulega spowolnieniu u dzieci w wieku 6 lat, u których brak wyraźnej przewagi w funkcji stabilizacji ciała jednej z kończyn dolnych (tab. 4.2 – rozdz. 4.3.1). Dzieci w wieku 6 lat mają już prawie ukształtowane preferencje co do wykorzystania kończyn w codziennych naturalnych czynnościach ruchowych (Malinowski, 2004), ale prawdopodobnie nie dotyczy to dominacji jednej z kończyn dolnych w stabilizacji ciała w pozycji stojącej, jak to wynika z prezentowanych w tej pracy badań kontroli równowagi ciała.

U dzieci najmłodszych procesy lateralizacji są w fazie kształtowania się preferencji jednej kończyny górnej i dolnej w codziennej aktywności motorycznej (Malinowski, 2004) i różnice wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej najprawdopodobniej nie wynikają z ustalonych wzorców czynności stabilizacyjnych, ale raczej z pewnego etapu „poszukiwania” dominacji jednej ze stron ciała.

Rezultaty badań omówione w niniejszej pracy są spójne z wynikami przedstawionymi przez Ferdjallaha i wsp. (2002), którzy dowodzą, że prawa kończyna dolna wykazuje większy zakres oscylacji COP niż lewa u większości badanych dzieci. Wyniki powyższych autorów nie muszą jednak oznaczać dominacji prawej kończyny dolnej nad lewą w funkcji stabilizacyjnej ciała, jak to sugerują autorzy, ale raczej wskazują na dominację czynnościową prawej kończyny dolnej, związaną z większą obszernością (amplitudą) wykonywanych ruchów w obrębie prawego stawu skokowego niż lewego. Większa amplituda ruchów prawego stawu skokowego niż lewego podczas stania prawdopodobnie świadczy o gotowości prawej kończyny dolnej do wykonania zamierzonego ruchu

(np. kroku), a tym samym dowodzi dominacji czynnościowej (motorycznej) prawej kończyny dolnej, podczas gdy lewa kończyna dominuje w funkcji podporowej, utrzymując pozycję pionową ciała i zabezpieczając stabilność tej pozycji w czasie inicjacji ruchu prawą kończyną dolną.

Wskaźnik zmienności przemieszczeń punktu nacisku stopy prawej jest większy niż lewej, szczególnie w grupie 4-latków (w przypadku obu płaszczyzn ruchu) oraz u 6- i 7-latków. Dzieci młodsze (2-, 3-latki) oraz 5-latki nie przejawiają znaczących różnic pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną w zmienności realizacji zadania utrzymywania pozycji stojącej. Należy zauważyć, że zmienność i zakres przemieszczeń COP są na ogół od siebie zależne u osób dorosłych (Kuczyński i wsp., 2007). Zakres COP odzwierciedla wielkość przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże i stanowi ilościową miarę reakcji posturalnej na odchylenia ciała od pionu. Zmienność przemieszczeń COP pozwala natomiast ocenić stopień rozrzutu położenia punktu nacisku stóp (zmienność reakcji posturalnej) podczas realizacji zadania utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Przedstawiona w niniejszej pracy analiza związków tych dwóch wskaźników stabilności dla lewej i prawej kończyny dolnej przeczy zależności między nimi w przypadku 2-, 4-, 6- i 7-letnich dzieci, o czym świadczą tabele korelacyjne (tab. 18–23 – aneks). Można zatem stwierdzić, że 2-latki przemieszczają punkt nacisku stopą lewą i prawą w zbliżonym zakresie, ale wykonują to w odmienny sposób każdą z kończyn dolnych. U dzieci 3-letnich obserwuje się całkowity brak zróżnicowania amplitudowych wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej (tab. 4.2) i jednocześnie znaczące zależności między nimi (tab. 19 – aneks). Dzieci 4-letnie utrzymują równowagę ciała, naciskając stopą prawą w większym zakresie i z większą zmiennością niż lewą i obie kończyny dolne wykonują czynności stabilizacyjne niezależnie od siebie (tab. 20 – aneks). U dzieci 5-letnich charakterystyczne jest podobne wykonywanie zadania stania przez obie kończyny dolne, ale prawa stopa przesuwaa punkt nacisku w przód i w tył w większym zakresie niż lewa. W tej grupie dzieci obie kończyny dolne ściśle współpracują ze sobą (tab. 21 – aneks). Dzieci 6-letnie przemieszczają punkt nacisku obu stóp w podobnym zakresie, ale to lewa wykazuje większą zmienność bocznych przemieszczeń COP niż prawa. U 7-latków można zauważyć wyraźną przewagę prawej kończyny dolnej nad lewą, zarówno w wielkości przemieszczeń COP, jak i zmienności realizacji zadania. Całkowity brak zależności działania kończyn dolnych co do zakresu i zmienności przemieszczeń COP u dzieci 6- i 7-letnich (tab. 22, 23 – aneks) dowodzi kształtowania się lateralizacji funkcji kończyn dolnych, związanej z utrzymywaniem równowagi w pozycji stojącej. Podczas badań spokojnego stania obunóż osób dorosłych nie zaobserwowano znaczących różnic wskaźnika zmienności pomiędzy lewą i prawą kończyną dolną (Sikora, 2001), co oznacza, że dojrzały układ ruchu nie wymaga specjalnych funkcji, które angażowałyby dominującą kończynę dolną

w większym stopniu niż niedominującą. Zgadza się to z wynikami badań osób młodych, przeprowadzonych przez Hoffmana i wsp. (1998). U dzieci w wieku od 2 do 7 lat koordynacja nerwowo-mięśniowa i integracja bodźców zewnętrznych związanych z utrzymywaniem pozycji stojącej są jednak jeszcze w fazie rozwoju (Peterson i wsp., 2005; Steindl i wsp., 2006), co potwierdzają wyniki uzyskane w niniejszej pracy, ale dalszy rozwój kontroli równowagi ciała może prowadzić do równomiernego zaangażowania obu kończyn dolnych w stabilizację pozycji stojącej.

Wielkość pola powierzchni oscylacji punktu nacisku stopą lewą i prawą podczas stania zdaje się potwierdzać powyższe spostrzeżenia, zwłaszcza że istnieje istotna zależność między zakresem i zmiennością a polem powierzchni oscylacji COP tylko w grupie 3- i 5-latków. W pozostałych grupach wiekowych dzieci nie notuje się związków pomiędzy wskaźnikiem pola elipsy lewej i prawej kończyny dolnej, podobnie jak w przypadku zakresu i zmienności COP (tab. 18–23 – aneks). Pole elipsy, wewnątrz której punkt COP przemieszcza się w różnych kierunkach, jest większe w przypadku prawej kończyny dolnej niż lewej tylko u 5- i 7-latków. Wyniki te różnią się od wyników przedstawionych przez Hoffmana i wsp. (1998), którzy nie stwierdzili różnic w wielkości pola powierzchni przemieszczeń COP lewej i prawej stopy w badaniach młodych dorosłych. Prawdopodobnie pole powierzchni oscylacji COP lewej i prawej kończyny dolnej powyżej 7. roku ulega zmianie w kolejnych latach, aż do wyrównania się tych miar stabilności ciała. Zagadnienie to wymaga jeszcze dalszych badań i analiz.

Wyższa wartość wskaźnika pola elipsy oscylacji COP prawej kończyny dolnej niż lewej u 7-latków wskazuje jednak na efekt procesu lateralizacji kończyn dolnych pod względem czynności motorycznych. Pole oscylacji COP lewej i prawej kończyny dolnej nie przejawia znaczących różnic u dzieci 3-, 4- i 6-letnich, a u 2-latków pole oscylacji COP lewej kończyny dolnej jest większe od pola prawej (tab. 4.2). Na pole oscylacji COP szczególnie istotny wpływ ma zakres przemieszczeń nacisku stóp w obu kierunkach ruchu (tab. 26–37 – aneks), co oznacza, że te dwa wskaźniki można stosować zamiennie do oceny stabilności ciała dzieci. Wskaźnik pola przemieszczeń punktu nacisku stóp jest pewnym źródłem informacji o wielkości przemieszczeń punktu COP w obu kierunkach ruchu, a także o zmienności COP (tab. 26–37 – aneks). Wydaje się, że można byłoby zastąpić tym wskaźnikiem poprzednie, ale dokładna jego analiza w grupach wiekowych pozwala zanotować spójne wyniki z zakresem i zmiennością COP tylko u 7-latków. W przypadku dzieci młodszych należy jednak przeprowadzić szczegółową analizę amplitudowych wskaźników stabilności ciała.

Prędkość przemieszczeń punktu nacisku stóp na podłoże różnicuje kończyny dolne tylko w grupie 4-latków, u których zanotowano mniejszą prędkość COP

lewej kończyny dolnej niż prawej. W pozostałych grupach wiekowych nie zanotowano różnic pomiędzy prędkością COP lewej i prawej kończyny dolnej. Można zatem stwierdzić, że dzieci w wieku od 2 do 7 lat realizują zadanie utrzymywania równowagi, przemieszczając punkt nacisku stóp ze zbliżoną prędkością w przypadku lewej i prawej kończyny dolnej. Wyjątek stanowią 4-latki, które przemieszczają punkt nacisku prawą stopą szybciej niż lewą. Większa prędkość COP prawej kończyny dolnej, w tej grupie dzieci, świadczy o większej aktywności tej kończyny w procesie stabilizacji ciała. Ponadto, w grupie 4-latków zakres i zmienność punktu nacisku prawej kończyny dolnej wykazały także istotnie większą wartość niż lewej, czego nie obserwuje się u młodszych dzieci. Prawdopodobnie jest to skutek określania przez organizm dominacji czynnościowej prawej strony ciała nad lewą – jak ma to miejsce u zdecydowanej większości ludzi (Malinowski, 2004) – co przejawia się lepszą sprawnością utrzymywania równowagi na lewej kończynie dolnej jako tej, na której można się oprzeć, by wykonać ruch prawą kończyną dolną (Hoffman i wsp., 1998). Można więc wnioskować, że prawa kończyna dolna dominuje czynnościowo nad lewą podczas stania obunóż, co wykazały wyżej opisane wyniki porównań wskaźników stabilności ciała obu kończyn, a proces lateralizacji funkcji stabilizacyjnej kończyn dolnych w procesie utrzymywania równowagi kształtuje się u dzieci w wieku około 4 lat.

Wielkość częstotliwości zmian korekcyjnego nacisku stóp (COC) odzwierciedla pośrednio sprawność transmisji impulsów nerwowych pomiędzy układem nerwowym i układem ruchu (Kuczyński, 1997, 1999, 2003). Współdziałanie tych układów podczas stania gwarantuje stabilność postawy. Częstotliwość zmian korekcyjnego nacisku stopą lewą i prawą w obu płaszczyznach ruchu, w badaniach własnych, różnicuje kończyny dolne jedynie w grupie 2-latków, które wykazują większą częstotliwość zmian COC lewej kończyny dolnej niż prawej. Podobne tendencje większej częstotliwości przemieszczania nacisku lewej stopy w stosunku do prawej podczas naturalnego stania zanotowano u dzieci w wieku 3–5 lat (Sobera i Siedlecka, 2006). U 2- i 3-latków nie jest jeszcze zakończony proces mielinizacji nerwów obwodowych i w związku z tym przewodnictwo w obwodowym układzie nerwowym podlega ciągłym przemianom. Proces ten trwa do około 5. roku życia (Czochańska, 1985), ale wydaje się, że układ nerwowy do utrzymywania równowagi w naturalnej pozycji stojącej jest wystarczająco przygotowany już u dzieci w wieku 2–3 lat. Świadczą o tym znaczące zależności wskaźników stabilności ciała obu kończyn dolnych (tab. 26–29 – aneks) oraz nieznaczne różnice między miarami stabilności lewej i prawej kończyny dolnej u najmłodszych badanych.

W pozostałych grupach wiekowych również utrzymuje się prawidłowość większej częstotliwości zmian nacisku stopy lewej niż prawej, ale tylko w płaszczyźnie strzałkowej ruchu, co wskazuje na dominację lewej kończyny dolnej

nad prawą w funkcji stabilizacyjnej w większości grup dzieci. Preferowanie lewej kończyny dolnej, jako bardziej aktywnej w zmianach położenia punktu nacisku na podłoże, jest obserwowane we wszystkich omawianych w tej pracy grupach wiekowych.

Na podstawie wyników przedstawionych badań własnych można stwierdzić, że wskaźnik częstotliwości korekcyjnego nacisku stóp wykazuje na ogół istotną i ujemną korelację wzajemną z miarami amplitudowymi stabilności ciała (tzn. z zakresem, zmiennością, polem powierzchni i prędkością oscylacji COP, tab. 26–37 – aneks), podobnie jak u osób starszych (Kuczyński i wsp., 2007). Jest to dowód odwrotnej, ale znaczącej zależności miar amplitudowych i częstotliwości przemieszczeń korekcyjnego punktu nacisku stóp u dzieci w wieku 2–7 lat.

Uogólniając, można powiedzieć, że u dzieci w wieku 2 i 3 lat proces lateralizacji funkcji stabilizacyjnej kończyn dolnych znajduje się w fazie „poszukiwania” dominacji jednej z kończyn dolnych jako głównej w procesie stabilizacji ciała podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Od 4. roku życia rozpoczyna się u dzieci dominacja lewej kończyny dolnej nad prawą, związana z wykonywaniem ruchów zapobiegających nadmiernym wychyleniom ciała w pionowej pozycji ciała. Ta tendencja utrzymuje się do 7. roku życia.

5.3.2. Asymetria funkcji podparcia

W analizie problemu asymetrii funkcji podporowej kończyn dolnych nie można pominąć rozkładu obciążenia lewej i prawej kończyny podczas stania. Zjawiskiem normalnym u dorosłych jest przenoszenie ciężaru ciała „z nogi na nogę” w sytuacji wydłużonego czasu utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Podczas takich zdarzeń można zaobserwować pewne nawykowe obciążanie jednej kończyny dolnej w większym stopniu niż drugiej, z różnych przyczyn. Określenie symetryczności obciążenia kończyn dolnych u dzieci w okresie intensywnego rozwoju może być dobrym narzędziem diagnostycznym do identyfikacji wad postawy, zanim staną się widoczne.

W dwóch grupach wiekowych dzieci, u 3- i 7-latków obserwuje się preferowanie obciążania lewej kończyny dolnej podczas stania. Świadczy to o tym, że u 3-latków kształtuje się dominacja lewej kończyny dolnej nad prawą w funkcji podparcia ciała (przyjmowania większego obciążenia) w odróżnieniu od funkcji stabilizacyjnych, w których nie obserwuje się wyraźnej przewagi jednej z kończyn dolnych w tej grupie wiekowej. Demczuk-Włodarczyk (2003) stwierdziła stałą i narastającą dominację przyrostu wymiarów lewej stopy nad prawą u zdrowych dzieci od 3. roku życia, co zdaje się potwierdzać wybór lewej kończyny dolnej jako tej, która „przyjmuje” większe obciążenie niż prawa kończyna dolna. Dzieci w wieku 3–4 lat mają tendencje do nieco większego obciążania

lewej kończyny dolnej niż prawej, ale dzieci w wieku 5 lat i starsze wykazują równomierne obciążenie obu kończyn dolnych, co jest charakterystyczne dla osób dorosłych. Hoffman i wsp. (1998) oraz Greve i wsp. (2007) nie zanotowali u młodych dorosłych różnicy pomiędzy kontrolą stabilności kończyny dolnej dominującej i niedominującej nawet podczas stania jedno nogą. Brenière i Bril (1998), badając siły pionowe działające na dziecko podczas ruchów lokomocyjnych, dowiodły, że czynność (napiecie) mięśni kończyn dolnych potrzebna do kontroli równowagi podczas stania nie jest osiągalna przed 4.–5. rokiem życia dziecka, co tłumaczyłoby równomierne obciążenie obu kończyn dolnych u badanych 5-latków.

U dzieci w wieku 7 lat lateralizacja ciała jest już ustabilizowana, a obciążenie lewej kończyny dolnej w znacznie większym stopniu niż prawej jest tego dowodem. Większość dzieci jednak przejawia dominację czynnościową prawej strony ciała nad lewą – częściej lewa półkula mózgu jest lepiej rozwinięta niż prawa (Czochańska, 1985; Malinowski, 2004). Większe obciążanie lewej kończyny dolnej (w stosunku do prawej) w celu utrzymania równowagi jest zatem zupełnie zrozumiałe. Większe przemieszczenia punktu nacisku kończyny dolnej prawej niż lewej podczas stania u dzieci 5- i 7-letnich w badaniach Sobery i Siedleckiej (2008) potwierdzają przypuszczenie autorki monografii o odciążaniu kończyny dominującej czynnościowo (najczęściej prawej) i obciążaniu kończyny niedominującej motorycznie (najczęściej lewej). Assaiante i wsp. (2005) badali adaptację strategii posturalnej u małych zdrowych dzieci w celu sprawdzenia krótko- i długoterminowej zdolności przystosowawczej centralnego układu nerwowego do pewnych zewnętrznych ograniczeń posturalnych. Stwierdzili oni, że w pierwszej kolejności dzieci tworzą zestaw (repertuar) strategii posturalnych, a dopiero później uczą się wybierać najbardziej przydatną strategię, zależnie od zadania. Ruchy tułowi, zdaniem tych autorów, są najbardziej istotne dla zainicjowania określonej strategii posturalnej. Można więc przypuszczać, że dzieci wybierają dominującą prawą stronę ciała (np. prawą kończynę górną) do wykonania zamierzonej czynności i jednocześnie przenoszą ciężar ciała na stronę przeciwną – lewą, zwiększając nacisk lewą kończyną dolną na podłoże podczas stania. Rezultaty prezentowanych badań własnych zdają się potwierdzać taką strategię postępowania tylko u dzieci 3- i 7-letnich. Prawdopodobnie są to dwa krytyczne okresy rozwoju dzieci w pojawianiu się i kształtowaniu się wad postawy. Asymetryczność obciążenia kończyn dolnych może być efektem kształtowania się lateralizacji w funkcji podparcia ciała u dzieci 3-letnich i już ukształtowanej dominacji lewej kończyny dolnej w funkcji podparcia – u 7-latków.

Podsumowując analizę wskaźników stabilności ciała lewej i prawej kończyny dolnej, można potwierdzić hipotezę trzecią o kształtowaniu się dominacji lewej kończyny dolnej nad prawą w funkcji podporowej ciała. Lateralizacja

funkcji podporowej kończyn dolnych kształtuje się u dzieci w wieku od 2 do 6 lat w bardzo zróżnicowany sposób. U dzieci 2-letnich występuje przewaga aktywności lewej kończyny dolnej nad prawą podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej i symetryczne obciążenie obu kończyn dolnych. Dzieci 3-letnie nie wykazują żadnych asymetrii działania kończyn dolnych, ale podczas stania przenoszą większe obciążenie na lewą kończynę dolną niż na prawą. U 4-latków stwierdza się dominację czynnościową prawej kończyny dolnej nad lewą i nieznacznie większe obciążenie podczas stania lewej kończyny dolnej niż prawej. Dzieci 5- i 6-letnie także wykazują czynnościową dominację prawej kończyny dolnej nad lewą, ale symetrycznie obciążają obie kończyny dolne. Dopiero u dzieci 7-letnich stwierdza się dominację czynnościową prawej kończyny dolnej nad lewą podobną jak u dzieci w wieku od 4 do 6 lat oraz wyraźną preferencję obciążania lewej kończyny dolnej podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej. Czynnościowa dominacja prawej kończyny dolnej podczas kontroli równowagi w pozycji stojącej u dzieci w wieku 4–7 lat wskazuje na wybór lewej kończyny dolnej jako dominującej w stabilizacji pionowej pozycji ciała.

5.4. Wiek stabilności posturalnej

Prawidłowości zmian wskaźników stabilności ciała podczas utrzymywania równowagi w naturalnej pozycji stojącej związane z wiekiem kalendarzowym dzieci zdrowych posłużyły do zbudowania modelu szacowania wieku stabilności posturalnej.

Podobne wyniki, jak te uzyskane w badaniach własnych, przedstawiły McEvoy i Grimmer (2005), które wykazały wysoki stopień zależności między wiekiem badanych a zakresem ruchów w głównych stawach ciała oraz stwierdziły brak zależności pomiędzy płcią badanych dzieci w wieku 5–12 lat a wielkością przemieszczeń kątowych w głównych stawach ciała podczas stania.

Nie wszystkie opisane w tej pracy wskaźniki okazały się ściśle związane z wiekiem metrykalnym badanych dzieci (tab. 24 i 25 – aneks). Słabo korelowały z wiekiem wskaźniki częstotliwości korekcyjnych przemieszczeń nacisku stóp w obu kierunkach ruchu (od $-0,01$ do $0,19$). Częstotliwość ta nie zmienia się znacząco od 2. do 7. roku życia, jednak pewne tendencje do obniżania się tego wskaźnika w tym okresie są widoczne. Istotne, ale stosunkowo niskie wartości współczynnika korelacji odnotowano pomiędzy zakresem COP w płaszczyźnie strzałkowej i wiekiem dzieci (około $-0,4$), chociaż można by się spodziewać, że przemieszczenia COP w kierunku przednio-tylnym są decydujące dla zachowania stabilnej postawy ciała. Najlepiej charakteryzującym wiek metrykalny dzieci wskaźnikiem okazała się prędkość przemieszczeń COP obu kończyn dolnych ($-0,71$) i wskaźnik ten (w przypadku obu kończyn dolnych) stał się

parametrem modelu, podobnie jak zmienność COP w płaszczyźnie strzałkowej i pole elipsy COP lewej kończyny dolnej oraz zakres COP w płaszczyźnie czołowej prawej kończyny dolnej. Z przedstawionych w tej pracy wskaźników stabilności ciała w pozycji stojącej tylko 5 zostało wyselekcjonowanych jako parametry modelu. Fakt ten wiąże się z dużym uproszczeniem analizy procesu utrzymywania równowagi u małych dzieci i przyspieszeniem całej procedury uzyskania wyników końcowych. Wyniki weryfikacji modelu szacowania wieku stabilności posturalnej wydają się potwierdzać subiektywną ocenę sprawności motorycznej dzieci chorych, co może być dowodem na słuszność założenia o zasadności stosowania analizy kontroli posturalnej w celach diagnostycznych. Badania ciągle podczas systematycznie prowadzonej terapii dzieci mogłyby dać pełniejszy obraz rozwoju ich stabilności posturalnej. Korzystanie z modelu może znacznie usprawnić takie badania i w rezultacie uściślić diagnostykę rozwoju motorycznego dzieci.

Szczegółowa analiza zmian wskaźników stabilności ciała związanych z kontrolą równowagi w pozycji stojącej u dzieci w wieku od 2 do 7 lat umożliwia szacowanie wieku stabilności posturalnej, który odzwierciedla wiek rozwoju motorycznego dziecka pod względem umiejętności stabilizacji pionowej postawy ciała. Sformułowanie modelu, wzoru matematycznego, którego zastosowanie stwarza możliwości szybkiej diagnostyki ogólnego stanu rozwoju motorycznego niepełnosprawnego dziecka (dzięki odniesieniu do wieku metrykalnego dzieci zdrowych) jest zamierzonym efektem tej pracy. Porównanie wieku kalendarzowego (rzeczywistego) z oszacowanym wiekiem stabilności posturalnej pozwala na kształtowanie ogólnego poglądu na temat aktualnego stanu rozwoju motorycznego danego dziecka. Prowadzenie badań ciągłych i okresowe oznaczanie wieku stabilności posturalnej może być podstawą monitorowania postępu terapeutycznego w różnych przewlekłych schorzeniach układu nerwowego i ruchowego dzieci.

Szacowanie wieku według opisanego modelu może mieć praktyczne zastosowanie w diagnostyce medycznej w przypadku dzieci z dysfunkcją układu ruchu i/lub układu nerwowego. Jeśli w trakcie badania za pomocą platform sił wiek stabilności posturalnej dziecka 10-letniego ocenia się na 4 lata, to z całą pewnością postępowanie terapeutyczne należy ukierunkować na poprawę kontroli równowagi, która leży u podstaw aktywności ruchowej. Proste odniesienie wieku stabilności posturalnej do wieku metrykalnego dziecka wydaje się cenną, uzupełniającą informacją o aktualnym stanie rozwoju motorycznego dzieci chorych. Jest to szczególnie ważne w przypadku dzieci z mózgowym porażeniem dziecięcym, w którym każde dziecko przejawia inną postać choroby, a diagnostyka nie jest łatwa (Cornahan i wsp., 2007). Krótkotrwała i nieinwazyjna próba stania na platformie jest niezaprzeczalnym atutem metody badań równowagi ciała. Stosunkowo krótki czas zajmują procedury obliczeniowe. Od rozpoczęcia

pomiaru do zakończenia obliczeń mija około 20 minut. Wykorzystanie takiej metody diagnostycznej jest możliwe przy stosunkowo niewielkim nakładzie finansowym, po przeszkoleniu personelu medycznego i zakupie dwóch platform sił do badania równowagi ciała. Koszt aparatury badawczej waha się od 66 do 70 tysięcy złotych za dwie platformy i komputer. W porównaniu z cenami sprzętu do diagnostyki medycznej nie jest to wygórowana kwota. Program komputerowy, kompatybilny z platformami, pozwala na automatyczne obliczenie wskaźników stabilności, które są podstawą modelu. Po wprowadzeniu (lub skopowaniu) tych zmiennych do wzoru (por. rozdz. 4.4) można oszacować wiek stabilności posturalnej dziecka z prawdopodobieństwem trafności około 77%, co w przypadku człowieka jest zadowalającym wynikiem. Wyliczony wiek stabilności posturalnej (± 9 miesięcy) w zestawieniu z wiekiem kalendarzowym badanego dziecka odzwierciedla jego opóźnienie lub wyprzedzenie rozwoju kontroli równowagi ciała.

Kolejna możliwość zastosowania szacowania wieku stabilności posturalnej pojawia się w sporcie kwalifikowanym. Niektóre dyscypliny sportowe wymagają szczególnej umiejętności zachowania stabilnej postawy, np. gimnastyka sportowa, artystyczna, akrobatyka sportowa (Sobera i Piestrak, 2000; Sobera, 2001; Sobera i wsp., 2001, 2007b; Sobera i Siedlecka, 2007b, 2009). Sprawdzenie wrodzonych szczególnych predyspozycji do stabilizacji swojego ciała w przestrzeni w warunkach bardzo zbliżonych do normalnego stania mogłoby stanowić element prognostyki rozwoju dziecka w określonej dziedzinie sportu. Dziecko, które charakteryzuje się wyższym wiekiem stabilności posturalnej niż jego wiek kalendarzowy, może być dobrym „materiałem” na mistrza sportowego w tych dyscyplinach, w których wysoki poziom panowania nad stabilnością pozycji stojącej warunkuje sukces.

Ograniczeniem prezentowanej metody szacowania wieku stabilności posturalnej może być konieczność wyegzekwowania od dziecka spokojnego stania przez mniej więcej 20 s, co w przypadku małych i/lub chorych dzieci nie jest łatwym zadaniem. Dodatkowe, zamierzone ruchy głową lub kończynami górnymi obniżają szacowany wiek stabilności posturalnej nawet u zdrowego dziecka, a tym samym mogą być powodem zafałszowania wyników. Jeśli dziecko potrafi samodzielnie zachować równowagę w pozycji stojącej, to zastosowanie modelu stabilności posturalnej umożliwia określenie w obiektywny sposób, jedną liczbą, jego aktualnego stanu rozwojowego motoryki ciała.

6

Wnioski

Dzięki przeprowadzonej analizie wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Postępujący wraz z przyrostem wieku metrykalnego rozwój stabilizacji ciała podczas utrzymywania równowagi w pozycji stojącej u dzieci od 2 do 7 lat ma następujący przebieg:
 - dzieci w wieku 2 lat wykazują niestabilność pionowej pozycji ciała, co przejawia się wysokim poziomem miar amplitudowych i częstotliwościowych stabilności ciała,
 - u dzieci 3-letnich stabilizacja ciała znacząco się nie zmienia w stosunku do 2-latków,
 - u dzieci w wieku 4 i 5 lat następuje najbardziej radykalna poprawa stabilności pozycji stojącej,
 - u dzieci w wieku 6–7 lat zmiany stabilności posturalnej zachodzą wolniej niż u dzieci młodszych, a 7-latki osiągają kontrolę równowagi ciała zbliżoną do osób dorosłych.
2. Powtarzalność wyników badań charakteryzujących stabilność ciała w pozycji stojącej u dzieci w wieku od 2 do 7 lat nie jest jednakowa w poszczególnych grupach wiekowych i cechuje się:
 - niskim poziomem u dzieci 2- i 3-letnich,
 - nieznaczną poprawą u 4-latków w stosunku do dzieci młodszych,
 - skokowym wzrostem u 5-latków,
 - obniżeniem się u dzieci 6-letnich w stosunku do 5-latków,
 - wysokim poziomem u 7-latków.
3. Wskaźnik prędkości przemieszczeń punktu nacisku obu stóp na podłoże można uznać za najbardziej miarodajny w ocenie stabilności pozycji stojącej u dzieci w wieku od 2 do 7 lat, ponieważ charakteryzuje się największą powtarzalnością wyników badań.
4. Proces kształtowania się dominacji jednej z kończyn dolnych w funkcji podporowej ciała u dzieci w wieku od 2 do 7 lat przebiega zmiennie, przy

czym na ogół stwierdza się dominację lewej kończyny dolnej. Uzyskane wyniki badań świadczą o tym, że warto wprowadzić do opisu procesu utrzymywania równowagi ciała w pozycji stojącej informację o lateralizacji kończyn dolnych w funkcji podporowej.

Kształtowanie się lateralizacji kończyn dolnych w funkcji podporowej ciała przebiega u dzieci według następującego porządku:

- dzieci w wieku 2–3 lat nie wykazują preferencji jednej z kończyn dolnych,
 - dzieci w wieku od 4 do 7 lat przejawiają dominację czynnościową prawej kończyny dolnej, co oznacza wybór lewej jako dominującej w pełnieniu funkcji stabilizacyjnej pozycji stojącej,
 - tylko dzieci 3- i 7-letnie wykazują większe obciążenie kończyny dolnej lewej niż prawej,
 - dzieci 2-, 4-, 5- i 6-letnie charakteryzują się symetrycznym obciążeniem w pozycji stojącej obu kończyn dolnych, z tendencją do nieco większego (statystycznie nieistotnego) obciążania lewej kończyny dolnej niż prawej.
5. Sformułowany model szacowania wieku stabilności posturalnej dziecka jest obiektywną metodą oceny poziomu rozwoju stabilności pozycji stojącej. Model ten może być przydatny w diagnostyce lekarskiej do określenia faktycznego wieku rozwoju motorycznego dzieci zdrowych oraz dzieci z różnymi dysfunkcjami narządu ruchu z 77-proc. trafnością, a także do monitorowania postępów zastosowanej terapii. Ponadto opracowany model stabilności posturalnej może być pomocny przy ocenie poziomu koordynacji ruchów dzieci podczas kwalifikowania ich do sportu.

Doświadczenia zdobyte w trakcie przeprowadzania badań oraz uzyskane rezultaty upoważniają do stwierdzenia, że procedura oceny rozwoju stabilności posturalnej małych dzieci podczas badań skriningowych powinna być uproszczona i ograniczać się do pięciu najważniejszych wskaźników określających stabilność ich ciała. W przypadku kończyny dolnej lewej proponuje się uwzględnić 3 wskaźniki: zmienność w płaszczyźnie strzałkowej, pole elipsy oscylacji i prędkość przemieszczeń, a w przypadku prawej kończyny dolnej: zakres w płaszczyźnie czołowej i prędkość oscylacji punktu nacisku stopy na podłoże.

Aneks

TABELA 1. Charakterystyka grup badawczych dzieci ($N = 272$)

Wiek [lata]	Płeć	Liczba dzieci	Wysokość ciała [cm]	Masa ciała [kg]	BMI
2	chłopcy	20	$90,4 \pm 4,4$	$14,1 \pm 1,9$	$17,3 \pm 1,8$
2	dziewczeta	15	$86,2 \pm 2,1$	$12,4 \pm 0,9$	$16,8 \pm 1,3$
3	chłopcy	30	$97,1 \pm 5,0$	$14,7 \pm 1,6$	$15,5 \pm 1,1$
3	dziewczeta	20	$95,4 \pm 5,0$	$14,5 \pm 1,7$	$16,0 \pm 1,7$
4	chłopcy	14	$105,4 \pm 4,0$	$16,8 \pm 2,6$	$15,1 \pm 1,8$
4	dziewczeta	21	$103,8 \pm 4,7$	$17,4 \pm 2,9$	$16,1 \pm 1,9$
5	chłopcy	23	$112,5 \pm 5,4$	$19,6 \pm 3,6$	$15,5 \pm 2,5$
5	dziewczeta	36	$111,0 \pm 6,9$	$20,0 \pm 3,8$	$16,2 \pm 2,3$
6	chłopcy	36	$120,1 \pm 5,9$	$22,8 \pm 3,7$	$15,7 \pm 1,6$
6	dziewczeta	24	$117,6 \pm 5,6$	$21,3 \pm 4,1$	$15,4 \pm 2,6$
7	chłopcy	20	$122,9 \pm 5,8$	$23,9 \pm 3,7$	$15,8 \pm 1,8$
7	dziewczeta	13	$121,2 \pm 5,9$	$24,8 \pm 5,0$	$16,8 \pm 2,7$

TABELA 1a. Wartości średnie wskaźników stabilności ciała w poszczególnych grupach wiekowych, podzielonych według płci

Wskaźniki stabilności	Płeć	2-latki ♂ $n = 50$ ♀ $n = 35$	3-latki ♂ $n = 88$ ♀ $n = 51$	4-latki ♂ $n = 38$ ♀ $n = 54$	5-latki ♂ $n = 59$ ♀ $n = 99$	6-latki ♂ $n = 93$ ♀ $n = 75$	7-latki ♂ $n = 55$ ♀ $n = 43$
Zakres COPX lewa kd [cm]	♂	$1,11 \pm 0,26$	$1,18^* \pm 0,42$	$0,91 \pm 0,18$	$0,85 \pm 0,19$	$0,68 \pm 0,15$	$0,63 \pm 0,15$
	♀	$1,17 \pm 0,26$	$1,37^* \pm 0,37$	$0,87 \pm 0,23$	$0,81 \pm 0,25$	$0,70 \pm 0,14$	$0,61 \pm 0,11$
Zakres COPX prawa kd [cm]	♂	$1,26 \pm 0,33$	$1,18 \pm 0,33$	$0,97 \pm 0,24$	$0,88^* \pm 0,21$	$0,69 \pm 0,15$	$0,69 \pm 0,13$
	♀	$1,12 \pm 0,31$	$1,24 \pm 0,42$	$1,03 \pm 0,28$	$0,74^* \pm 0,18$	$0,65 \pm 0,14$	$0,63 \pm 0,14$
Zakres COPY lewa kd [cm]	♂	$3,59 \pm 0,91$	$3,59 \pm 1,12$	$3,17 \pm 0,81$	$3,01^* \pm 0,80$	$2,82^* \pm 0,70$	$2,38 \pm 0,71$
	♀	$3,70 \pm 0,81$	$3,94 \pm 1,03$	$2,92 \pm 0,85$	$2,41^* \pm 0,84$	$2,48^* \pm 0,68$	$2,26 \pm 0,58$
Zakres COPY prawa kd [cm]	♂	$3,48 \pm 0,94$	$3,62 \pm 1,04$	$3,26 \pm 1,07$	$3,42^* \pm 1,05$	$2,60 \pm 0,77$	$2,45 \pm 0,72$
	♀	$3,29 \pm 0,85$	$3,65 \pm 1,19$	$3,13 \pm 0,99$	$2,74^* \pm 0,88$	$2,42 \pm 0,75$	$2,48 \pm 0,66$

Zmiennosc COPX lewa kd [cm]	♂	0,18 ± 0,04	0,18* ± 0,06	0,15 ± 0,04	0,13 ± 0,03	0,11 ± 0,03	0,10 ± 0,02
	♀	0,18 ± 0,04	0,21* ± 0,06	0,14 ± 0,04	0,12 ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,10 ± 0,02
Zmiennosc COPX prawa kd [cm]	♂	0,19 ± 0,05	0,19 ± 0,06	0,16 ± 0,05	0,14* ± 0,03	0,11 ± 0,02	0,11* ± 0,02
	♀	0,18 ± 0,05	0,22 ± 0,09	0,16 ± 0,04	0,12* ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,10* ± 0,02
Zmiennosc COPY lewa kd [cm]	♂	0,44 ± 0,10	0,46* ± 0,15	0,38 ± 0,09	0,33 ± 0,07	0,29 ± 0,08	0,24 ± 0,06
	♀	0,45 ± 0,09	0,54* ± 0,16	0,36 ± 0,11	0,32 ± 0,08	0,29 ± 0,06	0,25 ± 0,05
Zmiennosc COPY prawa kd [cm]	♂	0,49 ± 0,12	0,48 ± 0,13	0,39 ± 0,12	0,34* ± 0,07	0,28* ± 0,79	0,29* ± 0,06
	♀	0,45 ± 0,12	0,50 ± 0,18	0,41 ± 0,11	0,31* ± 0,08	0,26* ± 0,75	0,25* ± 0,06
Pole elipsy COP lewej kd [cm ²]	♂	1,81* ± 0,67	1,73* ± 0,76	1,16 ± 0,35	1,05* ± 0,36	0,83 ± 0,30	0,62 ± 0,23
	♀	2,13* ± 0,70	2,03* ± 0,75	1,10 ± 0,33	0,85* ± 0,36	0,80 ± 0,27	0,62 ± 0,22
Pole elipsy COP prawej kd [cm ²]	♂	1,78 ± 0,75	1,85 ± 0,76	1,28 ± 0,58	1,34* ± 0,51	0,79 ± 0,28	0,74 ± 0,29
	♀	1,71 ± 0,62	1,76 ± 0,75	1,17 ± 0,50	1,02* ± 0,47	0,75 ± 0,27	0,74 ± 0,33
Prędkosc COP lewej kd [mm/s]	♂	16,98 ± 3,08	16,09 ± 3,21	13,34 ± 2,23	11,53* ± 2,33	10,42 ± 2,14	9,68 ± 2,65
	♀	18,44 ± 2,99	16,01 ± 2,57	13,31 ± 2,12	12,50* ± 2,38	11,06 ± 2,10	10,19 ± 2,53
Prędkosc COP prawej kd [mm/s]	♂	17,18 ± 3,24	16,35 ± 3,94	14,17 ± 2,78	12,22 ± 1,90	10,70 ± 1,94	10,72* ± 2,29
	♀	18,35 ± 2,90	17,62 ± 3,85	14,18 ± 3,00	11,69 ± 2,02	10,57 ± 1,96	9,77* ± 1,55
Częstotli- wość COC w pł. czoł. lewej kd [Hz]	♂	1,17* ± 0,23	1,11* ± 0,23	0,98* ± 0,26	1,07 ± 0,24	1,07 ± 0,23	1,08 ± 0,25
	♀	1,30* ± 0,19	0,94* ± 0,26	1,15* ± 0,22	1,13 ± 0,23	1,14 ± 0,20	1,18 ± 0,26
Częstotli- wość COC w pł. czoł. prawej kd [Hz]	♂	1,05* ± 0,17	1,08 ± 0,25	1,12* ± 0,23	1,08 ± 0,27	1,09* ± 0,25	1,07 ± 0,22
	♀	1,26* ± 0,17	1,00 ± 0,27	1,00* ± 0,27	1,16 ± 0,23	1,20* ± 0,22	1,08 ± 0,28
Częstotli- wość COC w pł. strz. lewej kd [Hz]	♂	0,71 ± 0,14	0,69 ± 0,11	0,64 ± 0,17	0,65 ± 0,11	0,65* ± 0,15	0,62* ± 0,11
	♀	0,71 ± 0,14	0,66 ± 0,13	0,70 ± 0,14	0,66 ± 0,15	0,60* ± 0,12	0,68* ± 0,14
Częstotli- wość COC w pł. strz. prawej kd [Hz]	♂	0,66 ± 0,15	0,67* ± 0,12	0,64 ± 0,15	0,61 ± 0,12	0,65* ± 0,12	0,59 ± 0,12
	♀	0,71 ± 0,12	0,62* ± 0,10	0,65 ± 0,13	0,63 ± 0,13	0,58* ± 0,15	0,64 ± 0,15

* różnice pomiędzy wskaźnikami chłopców i dziewcząt istotne na poziomie $\alpha < 0,05$

n – liczba prób w danej grupie chłopców i dziewcząt

kd – kończyzna dolna

ZAKRES PRZEMIESZCZEŃ COP

TABELA 2. Wyniki testu istotności różnic międzygrupowych Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej lewej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 1,13 ± 0,26 cm	3-latki 1,25* ± 0,41 cm	4-latki 0,89*** ± 0,21 cm	5-latki 0,83 ± 0,23 cm	6-latki 0,69*** ± 0,14 cm	7-latki 0,62 ± 0,13 cm
2 (<i>n</i> = 85)		0,0324*	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (<i>n</i> = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (<i>n</i> = 92)				0,5534	0,0000***	0,0000***
5 (<i>n</i> = 158)					0,0000***	0,0000***
6 (<i>n</i> = 168)						0,4380
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; *** $\alpha < 0,0001$; *n* – liczba prób

TABELA 3. Wyniki testu Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej prawej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 1,17 ± 0,33 cm	3-latki 1,19 ± 0,36 cm	4-latki 0,99** ± 0,26 cm	5-latki 0,79*** ± 0,21 cm	6-latki 0,67** ± 0,14 cm	7-latki 0,67 ± 0,14 cm
2 (<i>n</i> = 85)		0,8178	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (<i>n</i> = 139)			0,0004**	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (<i>n</i> = 92)				0,0000***	0,0000***	0,0000***
5 (<i>n</i> = 158)					0,0006**	0,0321*
6 (<i>n</i> = 168)						0,9999
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; ** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; *n* – liczba prób

TABELA 4. Wyniki testu Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej lewej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 3,64 ± 0,87 cm	3-latki 3,72 ± 1,09 cm	4-latki 3,03* ± 0,84 cm	5-latki 2,64 ± 0,87 cm	6-latki 2,67 ± 0,71 cm	7-latki 2,33* ± 0,66 cm
2 (<i>n</i> = 85)		0,9997	0,004*	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (<i>n</i> = 139)			0,004*	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (<i>n</i> = 92)				0,1765	0,3291	0,0000***
5 (<i>n</i> = 158)					0,9971	0,0446*
6 (<i>n</i> = 168)						0,0146*
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; *** $\alpha < 0,0001$; *n* – liczba prób

TABELA 5. Wyniki testu Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej prawej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 3,32 ± 0,9 cm	3-latki 3,63 ± 1,09 cm	4-latki 3,18* ± 1,2 cm	5-latki 2,99 ± 1,0 cm	6-latki 2,52** ± 0,77 cm	7-latki 2,46 ± 0,69 cm
2 (<i>n</i> = 85)		0,9898	0,2774	0,0973	0,0000***	0,0000***
3 (<i>n</i> = 139)			0,0353*	0,0001**	0,0000***	0,0000***
4 (<i>n</i> = 92)				0,9954	0,007*	0,0012*
5 (<i>n</i> = 158)					0,0002**	0,0017*
6 (<i>n</i> = 168)						0,9947
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; ** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; *n* – liczba prób

ZMIENNOŚĆ PRZEMIESZCZEŃ COP

TABELA 6. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej lewej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 0,18 ± 0,04 cm	3-latki 0,19 ± 0,06 cm	4-latki 0,14*** ± 0,04 cm	5-latki 0,13 ± 0,03 cm	6-latki 0,11 ± 0,03 cm	7-latki 0,10 ± 0,02 cm
2 (<i>n</i> = 85)		0,349748	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (<i>n</i> = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (<i>n</i> = 92)				0,1716	0,0002**	0,0000***
5 (<i>n</i> = 158)					0,0562	0,0000***
6 (<i>n</i> = 168)						0,0948
7 (<i>n</i> = 98)						

** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; *n* – liczba prób

TABELA 7. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej prawej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 0,18 ± 0,05 cm	3-latki 0,20 ± 0,07 cm	4-latki 0,16*** ± 0,05 cm	5-latki 0,13*** ± 0,03 cm	6-latki 0,11* ± 0,02 cm	7-latki 0,11 ± 0,02 cm
2 (<i>n</i> = 85)		0,191579	0,0009**	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (<i>n</i> = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (<i>n</i> = 92)				0,0000***	0,0000***	0,0000***
5 (<i>n</i> = 158)					0,0024*	0,0552
6 (<i>n</i> = 168)						0,9999
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; ** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; *n* – liczba prób

TABELA 8. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej lewej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 0,44 ± 0,09 cm	3-latki 0,48 ± 0,16 cm	4-latki 0,37*** ± 0,08 cm	5-latki 0,33* ± 0,08 cm	6-latki 0,29 ± 0,07 cm	7-latki 0,25* ± 0,06 cm
2 (n = 85)		0,100027	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (n = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (n = 92)				0,0267*	0,0000***	0,0000***
5 (n = 158)					0,0562	0,0000***
6 (n = 168)						0,0175*
7 (n = 98)						

* $\alpha < 0,05$; *** $\alpha < 0,0001$; n – liczba prób

TABELA 9. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej prawej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 0,47 ± 0,12 cm	3-latki 0,49 ± 0,15 cm	4-latki 0,40*** ± 0,11 cm	5-latki 0,33*** ± 0,08 cm	6-latki 0,27** ± 0,06 cm	7-latki 0,27 ± 0,06 cm
2 (n = 85)		0,9532	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (n = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (n = 92)				0,0000***	0,0000***	0,0000***
5 (n = 158)					0,001**	0,0225*
6 (n = 168)						0,9997
7 (n = 98)						

* $\alpha < 0,05$; ** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; n – liczba prób

POLE ELIPSY OSCYLACJI COP

TABELA 10. Wyniki testu Tukeya dla pola elipsy oscylacji COP lewej kończyny dolnej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 1,96 ± 0,70 cm ²	3-latki 1,80 ± 0,80 cm ²	4-latki 1,12*** ± 0,34 cm ²	5-latki 0,91 ± 0,37 cm ²	6-latki 0,80 ± 0,29 cm ²	7-latki 0,61 ± 0,23 cm ²
2 (n = 85)		0,3637	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (n = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (n = 92)				0,2801	0,005*	0,0000***
5 (n = 158)					0,3527	0,0006**
6 (n = 168)						0,1051
7 (n = 98)						

* $\alpha < 0,05$; ** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; n – liczba prób

TABELA 11. Wyniki testu Tukeya dla pola elipsy oscylacji COP prawej kończyny dolnej.
W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności
i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 1,73 ± 0,69 cm ²	3-latki 1,92 ± 1,00 cm ²	4-latki 1,22*** ± 0,50 cm ²	5-latki 1,13 ± 0,51 cm ²	6-latki 0,76*** ± 0,28 cm ²	7-latki 0,73 ± 0,30 cm ²
2 (n = 85)		0,2549	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (n = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (n = 92)				0,9313	0,0000***	0,0000***
5 (n = 158)					0,0000***	0,0001**
6 (n = 168)						0,9992
7 (n = 98)						

** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; n – liczba prób

PRĘDKOŚĆ COP

TABELA 12. Wyniki testu Tukeya dla prędkości oscylacji COP lewej kończyny dolnej.
W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności
i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 18,63 ± 3,5 mm/s	3-latki 16,40*** ± 2,97 mm/s	4-latki 13,48*** ± 2,16 mm/s	5-latki 12,11* ± 2,4 mm/s	6-latki 10,67*** ± 2,14 mm/s	7-latki 9,91 ± 2,6 mm/s
2 (n = 85)		0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (n = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (n = 92)				0,009*	0,0000***	0,0000***
5 (n = 158)					0,0000***	0,0000***
6 (n = 168)						0,3068
7 (n = 98)						

* $\alpha < 0,05$; *** $\alpha < 0,0001$; n – liczba prób

TABELA 13. Wyniki testu Tukeya dla prędkości oscylacji COP prawej kończyny dolnej.
W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności
i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 18,10 ± 3,14 mm/s	3-latki 17,07 ± 3,94 mm/s	4-latki 14,73*** ± 2,9 mm/s	5-latki 12,10*** ± 1,98 mm/s	6-latki 10,61*** ± 1,94 mm/s	7-latki 10,34 ± 2,07 mm/s
2 (n = 85)		0,207464	0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
3 (n = 139)			0,0000***	0,0000***	0,0000***	0,0000***
4 (n = 92)				0,0000***	0,0000***	0,0000***
5 (n = 158)					0,0000***	0,0000***
6 (n = 168)						0,98
7 (n = 98)						

*** $\alpha < 0,0001$; n – liczba prób

CZĘSTOTLIWOŚĆ OSCYLACJI COC

TABELA 14. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC lewej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 1,23 ± 0,22 Hz	3-latki 1,05*** ± 0,25 Hz	4-latki 1,08 ± 0,25 Hz	5-latki 1,11 ± 0,24 Hz	6-latki 1,10 ± 0,22 Hz	7-latki 1,12 ± 0,26 Hz
2 (<i>n</i> = 85)		0,0000***	0,0006**	0,0165*	0,0075*	0,0510
3 (<i>n</i> = 139)			0,9852	0,3646	0,5625	0,3351
4 (<i>n</i> = 92)				0,9252	0,9797	0,7518
5 (<i>n</i> = 158)					0,9995	0,9986
6 (<i>n</i> = 168)						0,9864
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; ** $\alpha < 0,001$; *** $\alpha < 0,0001$; *n* – liczba prób

TABELA 15. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 1,14 ± 0,2 Hz	3-latki 1,05 ± 0,26 Hz	4-latki 1,06 ± 0,26 Hz	5-latki 1,13 ± 0,25 Hz	6-latki 1,14 ± 0,24 Hz	7-latki 1,07 ± 0,25 Hz
2 (<i>n</i> = 85)		0,1452	0,2033	0,9992	0,9999	0,3975
3 (<i>n</i> = 139)			0,9999	0,0631	0,0233*	0,9927
4 (<i>n</i> = 92)				0,2619	0,1441	0,9986
5 (<i>n</i> = 158)					0,9992	0,5369
6 (<i>n</i> = 168)						0,3590
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; *n* – liczba prób

TABELA 16. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC lewej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki 0,71 ± 0,14 Hz	3-latki 0,68 ± 0,12 Hz	4-latki 0,68 ± 0,16 Hz	5-latki 0,66 ± 0,14 Hz	6-latki 0,63 ± 0,14 Hz	7-latki 0,64 ± 0,12 Hz
2 (<i>n</i> = 85)		0,5605	0,5781	0,0895	0,0005**	0,0102*
3 (<i>n</i> = 139)			1,0000	0,7841	0,0120*	0,4272
4 (<i>n</i> = 92)				0,8720	0,0559	0,4091
5 (<i>n</i> = 158)					0,2727	0,9687
6 (<i>n</i> = 168)						0,9576
7 (<i>n</i> = 98)						

* $\alpha < 0,05$; ** $\alpha < 0,001$; *n* – liczba prób

TABELA 17. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej. W nagłówku kolumn podano wartości średnie wskaźnika stabilności i odchylenie standardowe w danej grupie wiekowej

Wiek [lata]	2-latki $0,68 \pm 0,14$ Hz	3-latki $0,65 \pm 0,11$ Hz	4-latki $0,64 \pm 0,14$ Hz	5-latki $0,62 \pm 0,13$ Hz	6-latki $0,62 \pm 0,14$ Hz	7-latki $0,61 \pm 0,13$ Hz
2 ($n = 85$)		0,7638	0,4895	0,0561	0,0271*	0,0067*
3 ($n = 139$)			0,9969	0,3646	0,1966	0,1795
4 ($n = 92$)				0,8509	0,6967	0,4202
5 ($n = 158$)					0,9993	0,9784
6 ($n = 168$)						0,9975
7 ($n = 98$)						

* $\alpha < 0,05$; n – liczba prób

WEWNĄTRZGRUPOWE KORELACJE WSKAŹNIKÓW STABILNOŚCI LEWEJ I PRAWEJ KOŃCZYNY DOLNEJ

TABELA 18. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 2-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX prawa	Zakres COPY prawa	Zmienność COPX prawa	Zmienność COPY prawa	Pole elipsy COP prawa	Prędkość COP prawa	Częstotliwość COC pł. czoł. prawa	Częstotliwość COC pł. strz. prawa
Zakres COPX lewa	-0,07	0,40*	-0,21	-0,21	0,30	-0,11	0,29	0,27
Zakres COPY lewa	-0,06	0,09	-0,20	-0,20	-0,04	-0,02	0,14	0,30
Zmienność COPX lewa	0,07	0,26	-0,04	-0,04	0,30	-0,06	0,22	0,30
Zmienność COPY lewa	0,07	0,26	-0,04	-0,04	0,30	-0,06	0,22	0,30
Pole elipsy COP lewa	-0,10	0,12	-0,27	-0,27	0,06	-0,09	0,11	0,34*
Prędkość COP lewa	-0,23	0,15	-0,29	-0,29	0,01	0,00	0,38*	0,22
Częstotliwość COC pł. czoł. lewa	-0,20	-0,11	-0,16	-0,16	-0,23	-0,11	-0,09	-0,10
Częstotliwość COC pł. strz. lewa	0,09	0,07	0,14	0,14	0,04	0,09	0,25	0,70*

* poziom istotności $p < 0,05$

Pismem półgrubym oznaczono współczynnik korelacji tego samego wskaźnika lewej i prawej kończyny dolnej.

TABELA 19. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 3-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX prawa	Zakres COPY prawa	Zmienność COPX prawa	Zmienność COPY prawa	Pole elipsy COP prawa	Prędkość COP prawa	Częstotliwość COC pł. czół. prawa	Częstotliwość COC pł. strz. prawa
Zakres COPX lewa	0,18	0,38*	0,29*	0,28*	0,28*	-0,25*	-0,36*	-0,03
Zakres COPY lewa	0,27*	0,46*	0,31*	0,27*	0,46*	0,07	-0,13	-0,08
Zmienność COPX lewa	0,19	0,36*	0,33*	0,33*	0,28*	-0,24*	-0,39*	-0,06
Zmienność COPY lewa	0,21*	0,35*	0,36*	0,36*	0,28*	-0,23*	-0,40*	-0,06
Pole elipsy COP lewa	0,17	0,40*	0,27*	0,24	0,39*	-0,07	-0,21*	-0,09
Prędkość COP lewa	-0,01	0,11	0,10	0,08	0,06	-0,21*	-0,14	0,09
Częstotliwość COC pł. czół. lewa	-0,22*	-0,36*	-0,27*	-0,28*	-0,35*	0,07	0,35*	0,23
Częstotliwość COC pł. strz. lewa	-0,14	-0,03	-0,19	-0,19	-0,16	-0,20	0,04	0,63*

* poziom istotności $p < 0,05$

Pismem półgrubym oznaczono współczynnik korelacji tego samego wskaźnika lewej i prawej kończyny dolnej.

TABELA 20. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 4-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX prawa	Zakres COPY prawa	Zmienność COPX prawa	Zmienność COPY prawa	Pole elipsy COP prawa	Prędkość COP prawa	Częstotliwość COC pł. czół. prawa	Częstotliwość COC pł. strz. prawa
Zakres COPX lewa	0,31*	0,06	0,28	0,25	0,13	0,25	-0,19	0,11
Zakres COPY lewa	0,12	0,16	0,03	0,04	0,01	0,29*	0,13	0,20
Zmienność COPX lewa	0,23	0,16	0,16	0,13	0,19	0,21	-0,04	0,04
Zmienność COPY lewa	0,13	0,14	0,09	0,27	0,17	0,25	0,03	0,07
Pole elipsy COP lewa	0,12	0,14	0,13	0,10	0,14	0,21	-0,02	0,02
Prędkość COP lewa	-0,08	0,07	-0,09	0,02	0,16	0,18	0,10	-0,20
Częstotliwość COC pł. czół. lewa	-0,30*	-0,11	-0,18	-0,10	-0,05	-0,07	0,20	-0,22
Częstotliwość COC pł. strz. lewa	0,10	0,02	0,11	0,18	0,01	0,15	-0,04	0,54*

* poziom istotności $p < 0,05$

Pismem półgrubym oznaczono współczynnik korelacji tego samego wskaźnika lewej i prawej kończyny dolnej.

TABELA 21. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 5-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX prawa	Zakres COPY prawa	Zmienność COPX prawa	Zmienność COPY prawa	Pole elipsy COP prawa	Prędkość COP prawa	Częstotliwość COC pł. czoł. prawa	Częstotliwość COC pł. strz. prawa
Zakres COPX lewa	0,36*	0,34*	0,39*	0,39*	0,32*	0,07	-0,32*	-0,13
Zakres COPY lewa	0,33*	0,32*	0,25*	0,25*	0,36*	0,07	-0,20*	-0,07
Zmienność COPX lewa	0,31*	0,39*	0,35*	0,35*	0,32*	-0,04	-0,31*	-0,16
Zmienność COPY lewa	0,31*	0,39*	0,35*	0,35*	0,32*	-0,04	-0,31*	-0,16
Pole elipsy COP lewa	0,37*	0,34*	0,29*	0,29*	0,35*	0,06	-0,23*	-0,11
Prędkość COP lewa	-0,05	-0,03	0,00	0,00	-0,08	0,02	0,08	-0,04
Częstotliwość COC pł. czoł. lewa	-0,37*	-0,41*	-0,36*	-0,36*	-0,39*	0,01	0,39*	0,05
Częstotliwość COC pł. strz. lewa	-0,00	-0,21*	-0,01	-0,01	-0,19	0,06	0,13	0,22*

* poziom istotności $p < 0,05$

Pismem półgrubym oznaczono współczynnik korelacji tego samego wskaźnika lewej i prawej kończyny dolnej.

TABELA 22. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 6-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX prawa	Zakres COPY prawa	Zmienność COPX prawa	Zmienność COPY prawa	Pole elipsy COP prawa	Prędkość COP prawa	Częstotliwość COC pł. czoł. prawa	Częstotliwość COC pł. strz. prawa
Zakres COPX lewa	0,07	0,06	0,11	0,01	0,13	0,25*	0,14	-0,20*
Zakres COPY lewa	-0,05	0,02	-0,12	-0,16	-0,05	-0,09	0,03	0,01
Zmienność COPX lewa	0,06	0,01	0,11	0,02	0,08	0,23*	0,14	-0,22*
Zmienność COPY lewa	0,07	0,02	0,13	0,19*	0,08	0,23*	0,15	-0,18
Pole elipsy COP lewa	-0,02	0,08	-0,07	-0,13	0,11	0,02	0,19*	-0,19*
Prędkość COP lewa	-0,02	0,02	-0,04	-0,10	0,17	0,34*	0,39*	-0,09
Częstotliwość COC pł. czoł. lewa	-0,11	0,06	-0,17	-0,10	0,14	0,14	0,37*	0,24*
Częstotliwość COC pł. strz. lewa	0,18	-0,04	0,07	0,09	0,03	0,21*	0,09	0,75*

* poziom istotności $p < 0,05$

Pismem półgrubym oznaczono współczynnik korelacji tego samego wskaźnika lewej i prawej kończyny dolnej.

TABELA 23. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 7-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX prawa	Zakres COPY prawa	Zmienność COPX prawa	Zmienność COPY prawa	Pole elipsy COP prawa	Prędkość COP prawa	Częstotliwość COC pł. czoł. prawa	Częstotliwość COC pł. strz. prawa
Zakres COPX lewa	0,16	0,13	0,10	0,10	0,13	0,13	-0,03	-0,04
Zakres COPY lewa	0,02	0,20	0,01	0,01	0,19	-0,18	-0,17	-0,20
Zmienność COPX lewa	0,03	0,12	0,00	0,00	0,07	-0,04	-0,10	-0,09
Zmienność COPY lewa	0,03	0,12	0,00	0,00	0,07	-0,04	-0,10	-0,09
Pole elipsy COP lewa	-0,09	0,04	-0,03	-0,03	0,15	0,03	0,09	-0,27*
Prędkość COP lewa	-0,14	-0,11	-0,07	-0,07	-0,02	0,21	0,22	-0,02
Częstotliwość COC pł. czoł. lewa	-0,23	-0,26*	-0,13	-0,13	-0,12	0,20	0,36*	0,18
Częstotliwość COC pł. strz. lewa	0,17	-0,02	0,12	0,12	0,08	0,33*	0,31*	0,50*

* poziom istotności $p < 0,05$

Pismem półgrubym oznaczono współczynnik korelacji tego samego wskaźnika lewej i prawej kończyny dolnej.

KORELACJE POMIĘDZY WSKAŹNIKAMI A PODSTAWOWYMI WYMIARAMI CIAŁA

TABELA 24. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników lewej kończyny dolnej z wiekiem i podstawowymi wymiarami ciała dzieci

Wskaźniki stabilności	Wiek [lata]	Wiek [lata+m-ce]	Wysokość ciała [cm]	Masa ciała [kg]	BMI
Zakres COPX [cm]	-0,64*	-0,65*	-0,64*	-0,60*	-0,05
Zakres COPY [cm]	-0,54*	-0,54*	-0,48*	-0,40*	0,05
Zmienność COPX [cm]	-0,63*	-0,64*	-0,64*	-0,58*	-0,01
Zmienność COPY [cm]	-0,62*	-0,63*	-0,62*	-0,57*	-0,02
Pole elipsy COP [cm ²]	-0,69*	-0,69*	-0,66*	-0,58*	0,02
Prędkość COP [mm/s]	-0,71*	-0,71*	-0,77*	-0,81*	-0,25*
Częstotliwość COC pł. czoł. [Hz]	-0,01	-0,01	-0,04	-0,12*	-0,17*
Częstotliwość COC pł. strz. [Hz]	-0,18*	-0,19*	-0,17*	-0,21*	-0,12*

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 25. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników prawej kończyny dolnej z wiekiem i podstawowymi wymiarami ciała dzieci

Wskaźniki stabilności	Wiek [lata]	Wiek [lata+m-ce]	Wysokość ciała [cm]	Masa ciała [kg]	BMI
Zakres COPX [cm]	-0,66*	-0,68*	-0,64*	-0,55*	-0,02
Zakres COPY [cm]	-0,43*	-0,44*	-0,40*	-0,32*	0,05
Zmienność COPX [cm]	-0,64*	-0,66*	-0,62*	-0,53*	0,00
Zmienność COPY [cm]	-0,64*	-0,66*	-0,62*	-0,52*	0,00
Pole elipsy COP [cm ²]	-0,59*	-0,62*	-0,60*	-0,53*	-0,03
Prędkość COP [mm/s]	-0,71*	-0,74*	-0,75*	-0,77*	-0,26*
Częstotliwość COC pł. czoł. [Hz]	0,04	0,03	-0,03	-0,21*	-0,35*
Częstotliwość COC pł. strz. [Hz]	-0,17*	-0,17*	-0,15*	-0,19*	-0,14*

* poziom istotności $p < 0,05$

WEWNĄTRZGRUPOWE KORELACJE WSKAŹNIKÓW STABILNOŚCI

TABELA 26. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 2-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,38*	0,84*	0,84*	0,52*	0,47*	-0,53*	0,17
Zakres COPY		1,00	0,28*	0,28*	0,74*	0,37*	-0,09	0,13
Zmienność COPX			1,00	1,00*	0,50*	0,41*	-0,61*	0,15
Zmienność COPY				1,00	0,50*	0,41*	-0,61*	0,15
Pole elipsy COP					1,00	0,66*	-0,08	-0,09
Prędkość COP						1,00	0,15	-0,08
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	-0,17
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 27. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 2-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,33*	0,85*	0,85*	0,58*	0,61*	-0,46*	-0,05
Zakres COPY		1,00	0,17	0,17	0,83*	0,21	0,03	-0,09
Zmienność COPX			1,00	1,00*	0,43*	0,57*	-0,50*	-0,06
Zmienność COPY				1,00	0,43*	0,57*	-0,50*	-0,06
Pole elipsy COP					1,00	0,46*	-0,09	-0,12
Prędkość COP						1,00	0,18	0,01
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,21
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 28. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 3-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,47*	0,93*	0,92*	0,59*	0,50*	-0,59*	-0,05
Zakres COPY		1,00	0,41*	0,42*	0,83*	0,19*	-0,31*	-0,06
Zmienność COPX			1,00	0,99*	0,54*	0,39*	-0,66*	-0,11
Zmienność COPY				1,00	0,54*	0,39*	-0,66*	-0,13
Pole elipsy COP					1,00	0,46*	-0,24*	-0,05
Prędkość COP						1,00	0,20*	0,01
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,18*
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 29. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 3-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,42*	0,92*	0,89*	0,60*	0,45*	-0,43*	-0,21*
Zakres COPY		1,00	0,42*	0,41*	0,76*	0,14	-0,17	-0,15
Zmienność COPX			1,00	0,97*	0,59*	0,29*	-0,55*	-0,17
Zmienność COPY				1,00	0,60*	0,29*	-0,53*	-0,19
Pole elipsy COP					1,00	0,42*	-0,17	-0,25*
Prędkość COP						1,00	0,39*	-0,22*
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,02
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 30. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 4-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,20	0,85*	0,80*	0,50*	0,37*	-0,44*	-0,15
Zakres COPY		1,00	0,23	0,22	0,74*	0,01	-0,20	0,00
Zmienność COPX			1,00	0,94*	0,52*	0,29*	-0,57*	-0,32*
Zmienność COPY				1,00	0,48*	0,30*	-0,51*	-0,28*
Pole elipsy COP					1,00	0,26*	-0,26*	-0,15
Prędkość COP						1,00	0,24*	0,09
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,17
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 31. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 4-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,48*	0,87*	0,76*	0,54*	0,42*	-0,39*	0,10
Zakres COPY		1,00	0,42*	0,42*	0,83*	0,13	-0,22	-0,13
Zmienność COPX			1,00	0,88*	0,55*	0,26*	-0,56*	0,01
Zmienność COPY				1,00	0,52*	0,31*	-0,48*	0,05
Pole elipsy COP					1,00	0,41*	-0,09	-0,11
Prędkość COP						1,00	0,45*	0,27*
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,26*
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 32. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 5-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,31*	0,87*	0,82*	0,54*	0,38*	-0,52*	0,05
Zakres COPY		1,00	0,27*	0,25*	0,85*	-0,18	-0,42*	-0,27*
Zmienność COPX			1,00	0,95*	0,54*	0,38*	-0,58*	-0,07
Zmienność COPY				1,00	0,51*	0,37*	-0,54*	-0,11
Pole elipsy COP					1,00	0,02	-0,48*	-0,27*
Prędkość COP						1,00	0,33*	0,29*
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,26*
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 33. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 5-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,40*	0,89*	0,89*	0,54*	0,30*	-0,62*	-0,04
Zakres COPY		1,00	0,37*	0,37*	0,87*	0,01	-0,40*	-0,31*
Zmienność COPX			1,00	1,00*	0,49*	0,23*	-0,72*	-0,13
Zmienność COPY				1,00	0,49*	0,23*	-0,72*	-0,13
Pole elipsy COP					1,00	0,26*	-0,38*	-0,30*
Prędkość COP						1,00	0,27*	0,10
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,30*
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 34. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 6-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,25*	0,90*	0,81*	0,48*	0,55*	-0,42*	-0,21*
Zakres COPY		1,00	0,18*	0,13	0,73*	0,01	-0,20*	-0,10
Zmienność COPX			1,00	0,92*	0,47*	0,54*	-0,43*	-0,18
Zmienność COPY				1,00	0,41*	0,49*	-0,38*	-0,16
Pole elipsy COP					1,00	0,40*	-0,08	-0,27*
Prędkość COP						1,00	0,31*	-0,07
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,25*
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 35. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 6-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,43*	0,89*	0,83*	0,62*	0,51*	-0,33*	0,09
Zakres COPY		1,00	0,38*	0,36*	0,79*	0,16	-0,24*	-0,22*
Zmienność COPX			1,00	0,94*	0,58*	0,47*	-0,39*	-0,01
Zmienność COPY				1,00	0,53*	0,44*	-0,36*	0,02
Pole elipsy COP					1,00	0,50*	-0,11	-0,14
Prędkość COP						1,00	0,40*	0,22*
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,27*
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 36. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 7-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY lewa	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,25*	0,88*	0,88*	0,46*	0,44*	-0,28*	0,05
Zakres COPY		1,00	0,19	0,19	0,74*	-0,12	-0,21	-0,04
Zmienność COPX			1,00	1,00*	0,44*	0,41*	-0,36*	-0,09
Zmienność COPY				1,00	0,44*	0,41*	-0,36*	-0,09
Pole elipsy COP					1,00	0,32*	-0,02	-0,14
Prędkość COP						1,00	0,54*	0,17
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,18
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

TABELA 37. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 7-latków

Wskaźniki stabilności	Zakres COPX	Zakres COPY	Zmienność COPX	Zmienność COPY	Pole elipsy COP	Prędkość COP	Częstotliwość COC pł. czoł.	Częstotliwość COC pł. strz.
Zakres COPX	1,00	0,39*	0,84*	0,84*	0,56*	0,34*	-0,43*	-0,10
Zakres COPY		1,00	0,36*	0,36*	0,75*	-0,10	-0,39*	-0,10
Zmienność COPX			1,00	1,00*	0,65*	0,41*	-0,48*	-0,20
Zmienność COPY				1,00	0,65*	0,41*	-0,48*	-0,20
Pole elipsy COP					1,00	0,25*	-0,29*	-0,22
Prędkość COP						1,00	0,44*	-0,01
Częstotliwość COC pł. czoł.							1,00	0,27*
Częstotliwość COC pł. strz.								1,00

* poziom istotności $p < 0,05$

Bibliografia

- Allum J.H.J., Bloem B.R., Carpenter M.G., Hulliger M., Hadders-Algra M. (1998) Proprioceptive control of posture: a review of new concepts. *Gait & Posture*, 8, 214–242.
- Assaiante C. (1998) Development of locomotor balance control in healthy children. *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, 22, 527–532.
- Assaiante C., Amblard B. (1993) Ontogenesis of head stabilization in space during locomotion in children: influence of visual cues. *Experimental Brain Research*, 93, 499–515.
- Assaiante C., Amblard B. (1995) An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Human Movement Science*, 14, 13–43.
- Assaiante C., Mallau S., Viel S., Jover M., Schmitz C. (2005) Development of postural control in healthy children: a functional approach. *Neural Plasticity*, 12, 109–118.
- Assaiante C., Thomachot B., Aurenty R., Amblard B. (1998) Organization of lateral balance control in toddlers during the first year of autonomous walking. *Journal of Motor Behavior*, 30, 114–129.
- Bawa P. (1981) Neural development in children – a neurophysiological study. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 52, 249–256.
- Berger W., Trippel M., Assaiante C., Zijlstra W., Dietz V. (1995) Developmental aspects of equilibrium control during stance: a kinematic and EMG study. *Gait & Posture*, 3, 149–155.
- Birmingham T.B. (2000) Test-retest reliability of lower extremity functional instability measures. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 10, 264–268.
- Błaszczyk J.W., Hansen P.D., Lowe D.L. (1993) Postural sway and perception of the upright stance stability borders. *Perception*, 22, 1333–1341.
- Błaszczyk J., Klonowski W. (2001) Postural stability and fractal dynamics. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 61, 105–112.
- Błaszczyk J.W., Lowe D.L., Hansen P.D. (1994) Ranges of postural stability and their changes in the elderly. *Gait & Posture*, 2, 11–17.
- Błaszczyk J., Orawiec R., Cieślińska-Świder J., Fredyk A. (2008) Determinants of postural stability: effects of body mass and body balance training/Wyznaczniki stabilności posturalnej: wpływ masy ciała oraz treningu równowagi. [W:] T. Bober, A. Siemieński (red.) Contemporary biomechanics: selected topics/Wybrane zagadnienia współczesnej biomechaniki. AWF, Wrocław, 38–48.
- Brandt T., Wentzel D., Dichgans J. (1976) Eentwicklung der visuellen stabilization des aufrechten Standes beim Kind: Ein Reifezeichen in der Kinderneurologie. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten*, 223, 1–13.
- Brenière Y., Bril B. (1998) Development of postural control of gravity forces in children during the first 5 years of walking. *Experimental Brain Research*, 121, 255–262.
- Brouwer B., Culham E.G., Liston R.A., Grant T. (1998) Normal variability of postural measures: Implication for the reliability of relative balance performance outcomes. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 30, 131–137.
- Bruyneel A.V., Chavet P., Bollini G., Allard P., Berton E., Mesure S. (2009) Dynamical

- asymmetries in idiopathic scoliosis during forward and lateral initiation step. *European Spine Journal*, 18, 188–195.
- Bruyneel A.V., Chavet P., Bollini G., Allard P., Mesure S. (2008) The influence of adolescent idiopathic scoliosis on the dynamic adaptive behavior. *Neuroscience Letters*, 447, 158–163.
- Burtner P.A., Qualls C., Woollacott M.H. (1998) Muscle activation characteristics of stance balance control in children with spastic cerebral palsy. *Gait & Posture*, 8, 163–174.
- Carnahan K.D., Arner M., Hägglund G. (2007) Association between gross motor function (GMFCS) and manual ability (MACS) in children with cerebral palsy. A population-based study of 359 children. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 8, 50–55.
- Chamela-Bilińska D., Zawadzka D., Sobera M., Mraz M. (2005) Stabilność ciała w pozycji stojącej dzieci z bocznym idiopatycznym skrzywieniem kręgosłupa. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio D: Medicina*, 60 (suppl. 16), 5, 218–221.
- Cherng R.J., Lee H.J., Su F.C. (2003) Frequency spectral characteristics of standing balance in children and young adults. *Medical Engineering & Physics*, 25, 509–515.
- Corriveau H., Hebert R., Prince F., Raiche M. (2001) Postural control in the elderly: on analysis of test-retest and interrater reliability of the COP-COM variable. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 82, 80–85.
- Czochońska J. (1985) *Neurologia dziecięca*. PZWL, Warszawa.
- Dega W. (1983) *Ortopedia i rehabilitacja*. PZWL, Warszawa.
- Demczuk-Włodarczyk E. (2003) Budowa stopy w okresie rozwoju progresywnego człowieka. *Studia i Monografie AWF we Wrocławiu*, 66.
- Donker S.F., Ledebt A., Roerdink M., Savelsbergh G.J.P., Beek P. (2008) Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children. *Experimental Brain Research*, 184, 363–370.
- Ferdjallah M., Harris G.F., Smith P., Wertsch J.J. (2002) Analysis of postural control synergies during quiet standing in healthy children and children with cerebral palsy. *Clinical Biomechanics*, 17, 203–210.
- Flis K., Peplowski P., Kalejta M., Kowalczyk A., Błaszczyk J. (2001) Posturografia statyczna i parametry oceny stabilności posturalnej. [W:] III Sympozjum Modelowanie i Pomiary w Medycynie, Krynica. AGH, Kraków, 197–204.
- Forssberg H. (1999) Neural control of human motor development. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 676–682.
- Forssberg H., Nashner L.M. (1982) Ontogenetic development of postural control in man: adaptation to altered support and visual conditions during stance. *Neuroscience*, 2, 545–552.
- Fugiel J. (2002) Dynamika rozwoju wybranych cech morfofunkcjonalnych tułowia dzieci i młodzieży. *Studia i Monografie AWF we Wrocławiu*, 60.
- Galea V., Wright M.J., Bar R.D. (2004) Measurement of balance in survivors of acute lymphoblastic leukemia in childhood. *Gait & Posture*, 19, 1–10.
- Gawron W., Pośpiech L., Orendorz-Frączkowska K. (2004) An evaluation of postural stability and the effects of middle-ear drainage on vestibule-spinal reflex of chil-

- dren with chronic otitis media with effusion. *International Journal Pediatric Otorhinolaryngology*, 68, 1175–1179.
- Geurts A.C., Nienhuis B., Eng M., Mulder T.M. (1993) Intrasubject variability of selected force-platform parameters in the quantification of postural control. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 74, 1144–1150.
- Goldie P.A., Bach T.M., Evans O.M. (1989) Force platform measures for evaluation postural control: reliability and validity. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 70, 510–517.
- Golema M. (2002) Charakterystyka procesu utrzymywania równowagi ciała człowieka w obrazie stabilograficznym. *Studia i Monografie AWF we Wrocławiu*, 64.
- Greve J., Alonso A., Bordini A.C., Camanho G.L. (2007) Correlation between body mass index and postural balance. *Clinics*, 62, 717–720.
- Grochmal S. (1987) Zaufaj sobie. PZWL, Warszawa.
- Hadders-Algra M., Brogren E., Forssberg H. (1996) Ontogeny of postural adjustments during sitting in infancy: variation selection and modulation. *Journal of Physiology*, 493, 273–288.
- Hay L., Redon C. (1999) Feedforward versus feedback control in children and adults subjected to a postural disturbance. *Experimental Brain Research*, 125, 153–162.
- Hertel J., Olmsted-Kramer L.C., Challis J.H. (2006) Time-to boundary measures of postural control during single leg quiet standing. *Journal of Applied Biomechanics*, 22, 67–73.
- Hinman M.R. (1997) Validity and reliability of measures obtained from the balance performance monitor during quiet standing. *Physiotherapy*, 83, 579–581.
- Hoffman M., Schrader J., Applegate T., Koceja D. (1998) Unilateral postural control of the functionally dominant and nondominant extremities of healthy subjects. *Journal of Athletic Training*, 33, 319–322.
- Hufschmidt A., Dichgans J., Mauritz K.H., Hufschmidt M. (1980) Some methods and parameters of body sway quantification and their neurological applications. *Archives Psychiatry and Neurological Science*, 228, 135–150.
- Iwanowski W. (1982) Kształtowanie się fizjologicznych krzywizn kręgosłupa człowieka. *Studia i Monografie AWF we Wrocławiu*, 3.
- Jopkiewicz A., Suliga E. (1995) Biologiczne podstawy rozwoju człowieka. Wydział Pedagogiczny WSP w Kielcach, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom.
- Karlsson A., Frykberg G. (2000) Correlations between force plate measures for assessment of balance. *Clinical Biomechanics*, 15, 365–369.
- Kasperczyk T. (2000) Metody oceny postawy ciała. Wydawnictwo Skryptowe nr 65, AWF, Kraków.
- Kasperczyk T. (2004) Wady postawy ciała. Diagnostyka i leczenie. Kasper, Kraków.
- Krawański A. (1990) Ontogenetyczny proces formowania się postawy ciała człowieka. AWF, Poznań.
- Kubiszyn S. (2003) Chód dziecka w ontogenezie – przegląd wiedzy. [W:] W. Erdmann (red.) Lokomocja 2003. II Ogólnopolska Konferencja „Lokomocja człowieka”. Gdańsk, 119–123.
- Kuczyński M. (1997) The stability of postural sway. *Biology of Sport*, 14, suppl. 7, 75–79.

- Kuczyński M. (1999) The second order autoregressive model in the evaluation of postural stability. *Gait & Posture*, 9, 50–56.
- Kuczyński M. (2001) Sterowanie lepko-sprężyste w układzie równowagi człowieka. *Człowiek i Ruch/Human Movement*, 2, 33–37.
- Kuczyński M. (2003) Model lepko-sprężysty w badaniach stabilności postawy człowieka. *Studia i Monografie AWF we Wrocławiu*, 65.
- Kuczyński M., Sobera M., Serafin R. (2007) Postural control in the elderly: relation between traditional chaotic and viscoelastic measures of postural stability. *Polish Journal of Environmental Studies*, 16, 5C, 306–310.
- Kutzner-Kozińska M. (1986) Korekcja wad postawy. WSiP, Warszawa.
- Lafond D. (2006) Reliability of Center of Pressure Measures of Postural Steadiness. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 87, 308–315.
- Lebiedowska M. (1997) Metody oceny wybranych parametrów narządu ruchu oparte na biomechanicznych modelach procesu rozwojowego dzieci w wieku od 6 do 18 lat. Cz. 3: Wskaźniki funkcji utrzymywania równowagi. *Postępy Rehabilitacji*, 11(1), 21–27.
- Lebiedowska M.K., Graff K., Syczewska M., Kalinowska M. (1994) Biomechanical parameters normalization in children. *Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej*, 75.
- Lebiedowska M., Syczewska M. (2000) Invariant sway properties in children. *Gait & Posture*, 12, 200–204.
- Liu W.Y., Zaino C.A., McCoy S.W. (2007) Anticipatory postural adjustments in children with cerebral palsy and children with typical development. *Pediatric Physical Therapy*, 19, 188–195.
- Malinowski A. (2004) Auksologia. Rozwój osobniczy człowieka w ujęciu biomedycznym. Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.
- Mallau S., Mesure S., Viehweger E., Jaquemier M., Bollini G., Assaiante C. (2008) Locomotor skills and balance strategies in children with internal rotations of the lower limbs. *Journal of Orthopaedic Research*, 26, 117–125.
- Massion J. (1998) Postural control system in developmental perspective. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22, 465–472.
- McEvoy M.P., Grimmer K. (2005) Reliability of upright posture measurements in primary school children. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 6, 35.
- McGraw B., McClenaghan B.A., Williams H.G., Dickerson J., Ward D.S. (2000) Gait and postural stability in obese and nonobese prepubertal boys. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 81, 484–489.
- Miller R.G., Kuntz N.L. (1986) Nerve conduction studies in infants and children. *Journal of Child Neurology*, 1, 19–26.
- Myklebust B.M., Gottlieb G.L., Agarwal G.C. (1986) Stretch reflexes of the normal infant. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 28, 440–449.
- Newell K.M., Slobounov S.M., Slobounova B.S., Molenaar P.C.M. (1997) Short-term non-stationarity and the development of postural control. *Gait & Posture*, 6, 56–62.
- Nolan L., Grigorenko A., Thorstensson A. (2005) Balance control: sex and age differences in 9- to 16-year-olds. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47, 449–454.
- Norrin S., Karlsson A., Gunnar A., Lanshammar H., Silander H.C., Dahl M. (2002)

- Force measurements of postural sway and rapid arm lift in seated children with and without MMC. *Clinical Biomechanics*, 17, 197–202.
- Önell A. (2000) The vertical ground reaction force for analysis of balance? *Gait & Posture*, 12, 7–13.
- Peterson M.L., Christou E., Rosengren K.S. (2006) Children achieve adult-like sensory integration during stance at 12 years old. *Gait & Posture*, 23, 455–463.
- Piastak P. (2001) Zmiana wielkości powierzchni podparcia a utrzymywanie równowagi przez człowieka. *Człowiek i Ruch/Human Movement*, 2, 87–93.
- Pozzo T., Vernet P., Creuzot-Garcher C., Robichon F., Bron A., Quercia P. (2006) Static postural control in children with developmental dyslexia. *Neuroscience Letters*, 403, 211–215.
- Prętkiewicz-Abacjew E. (2002) Kinematyka chodu a postawa ciała dzieci sześciolletnich. AWFis, Gdańsk.
- Przewęda R. (1981) Rozwój somatyczny i motoryczny. WSiP, Warszawa.
- Raymarkers J.A., Samson M.M., Verhaar H.J.J. (2005) The assessment of body sway and the choice of the stability parameter(s). *Gait & Posture*, 21, 48–58.
- Riach C.L., Hayes K.C. (1987) Maturation of postural sway in young children. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 29, 650–655.
- Riach C.L., Starkes J.L. (1993) Stability limits of quiet standing postural control in children and adults. *Gait & Posture*, 1, 105–112.
- Riach C.L., Starkes J.L. (1994) Velocity of center of pressure excursions as a indicator of postural control systems in children. *Gait & Posture*, 2, 167–172.
- Richardson P.K. (1990) Interrater and test-retest reliability of two pediatric balance tests. www.thefreelibrary.com
- Roncesvalles M.N., Schmitz C., Zedka M., Assaiante C., Woollacott M. (2005) From egocentric to exocentric spatial orientation: development of posture control in bimanual and trunk inclination task. *Journal of Motor Behavior*, 37, 404–416.
- Samson M., Crowe A. (1996) Intra-subject inconsistencies in quantitative assessments of body sway. *Gait & Posture*, 4, 252–257.
- Shumway-Cook A., Woollacott M. (1985) The growth of stability: postural control from a developmental perspective. *Journal of Motor Behavior*, 17, 130–147.
- Sikora A. (2001) Analiza przebiegu stabilogramów różnicujących udział kończyn dolnych w procesie utrzymywania równowagi. *Człowiek i Ruch/Human Movement*, 2, 51–54.
- Słonka K. (2001) Zastosowanie stabilografii w ocenie równowagi dzieci dotkniętych mózgowym porażeniem dziecięcym. *Człowiek i Ruch/Human Movement*, 2, 73–81.
- Sobera M. (2001) Utrzymywanie równowagi podczas postawy stojącej i stania na rękach. *Człowiek i Ruch/Human Movement*, 2, 61–64.
- Sobera M. (2003) Wpływ wielkości powierzchni podparcia stóp na wskaźniki stabilności pozycji stojącej jednonóż. [W:] Cz. Urbanik (red.) Zagadnienia biomechaniki sportu – technika ruchu. AWF, Warszawa, 152–158.
- Sobera M. (2004) Współzależność prawej i lewej stopy podczas utrzymywania równowagi ciała w postawie dwunożnej u małych dzieci. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 6 (suppl. 1), 438–444.

- Sobera M. (2005a) Równowaga ciała w naturalnej pozycji stojącej u małych dzieci i osób dorosłych. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio D: Medicina*, 60 (suppl. 16), 5, 153–156.
- Sobera M. (2005b) Współdziałanie prawej i lewej stopy w procesie utrzymywania równowagi u dzieci i osób dorosłych. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio D: Medicina*, 60 (suppl. 16), 5, 157–160.
- Sobera M., Piestrak P. (2000) Utrzymywanie równowagi podczas stania na rękach. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 2 (suppl. 1), 501–506.
- Sobera M., Piestrak P., Sojka-Krawiec K. (2001) Badania stabilograficzne w testach motorycznych. [W:] Cz. Urbanik (red.) Wybrane zagadnienia biomechaniki sportu. AWF, Warszawa, 143–150.
- Sobera M., Siedlecka B. (2003) Badania rozwoju równowagi u dzieci w wieku 3–6 lat. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 5 (suppl. 1), 448–454.
- Sobera M., Siedlecka B. (2007a) Stability of stance position in children age 2–7 years old. *Polish Journal of Environmental Studies*, 16, 578–583.
- Sobera M., Siedlecka B. (2007b) Stabilność pionowej pozycji ciała dzieci w wieku 2–4 lat i gimnastyczek sportowych. *Rozprawy Naukowe AWF we Wrocławiu*, 25, 76–82.
- Sobera M., Siedlecka B. (2006) Stabilność pozycji stojącej u dzieci w wieku 3–5 lat. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio D: Medicina*, 60 (suppl. 16), 7, 160–163.
- Sobera M., Siedlecka B. (2008) The influence of foot largeness and body size on the body stability in children aged 2–7 years old. *Polish Journal of Environmental Studies*, 17, 380–384.
- Sobera M., Siedlecka B. (2009) Wpływ ćwiczeń równoważnych na symetryczność funkcjonalną kończyn dolnych u gimnastyczek artystycznych. *Rozprawy Naukowe AWF we Wrocławiu*, 29, 577–582.
- Sobera M., Siedlecka B., Antoniuk K. (2007a) Stability indexes of maintaining body balance during natural stance position in young children. [W:] N. Gantchev (red.) From basic motor control to functional recovery V. Sofia.
- Sobera M., Siedlecka B., Piestrak P., Sojka-Krawiec K., Graczykowska B. (2007b) Utrzymywanie równowagi w ekstremalnych pozycjach równoważnych. *Biology of Sport*, 24, 81–88.
- Steindl R., Kunz K., Schrott-Fischer A., Scholtz A.W. (2006) Effect of age and sex on maturation of sensory systems and balance control. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 48, 477–482.
- Sutherland D. (1997) The development of mature gait. *Gait & Posture*, 6, 163–170.
- Syczewska M., Dembowska-Bagińska B., Perek-Polnik M., Kalinowska M., Perek D. (2008) Postural sway in children and young adults, survivors of CNS tumours. *Advances in Medical Science*, 53, 256–262.
- Trew M., Everett T. (2005) Human Movement. Elsevier Churchill Livingstone, London.
- Vallis L.A., McFadyen B.J. (2005) Children use different anticipatory control strategies than adults to circumvent an obstacle in the travel path. *Experimental Brain Research*, 167, 119–127.

- Waszczak J. (2001) Porównanie procesu utrzymywania równowagi na podłożu twardym i elastycznym. *Człowiek i Ruch/Human Movement*, 2, 94–97.
- Wicart P., Maton B. (2003) Body equilibrium at the end of gait initiation: importance of ankle muscular force as evidenced in clubfoot children. *Neuroscience Letters*, 351, 67–70.
- Winter D.A., Eng P. (1995) Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, 3, 193–214.
- Winter D.A., Palta A.E., Prince F., Ischac M., Gielo-Perczak K. (1998) Stiffness control of balance in quiet standing. *Journal of Neurophysiology*, 80, 1211–1221.
- Wolański N. (1975) Metody kontroli i normy rozwoju dzieci i młodzieży. PZWL, Warszawa.
- Woollacott M.H., Burtner P., Jensen J., Jasiewicz J., Rancesvalles N., Sveistrup H. (1998) Development of postural responses during standing in healthy children and children with spastic diplegia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22, 583–589.
- Zabjek K.F. (2005) Evaluation of segmental postural characteristics during quiet standing in control and idiopathic scoliosis patients. *Clinical Biomechanics*, 20, 483–490.
- Zaino C.A., McCoy S.W. (2008) Reliability and comparison of electromyographic and kinetic measurements during a standing reach task in children with and without cerebral palsy. *Gait & Posture*, 27, 128–137.
- Zatsiorsky V.M. (1999) Chwilowy punkt równowagi i jego przemieszczenia w pozycji stojącej: pełzająca i oscylacyjna składowa stabilogramu. [W:] T. Bober (red.) Postęp technologiczny a sport u progu XXI wieku. AWF, Wrocław, 55–66.

Wykaz rycin i tabel

- RYCINA 3.1. Stanowisko badawcze: 2 platformy AccuSway wraz z przetwornikiem analogowo-cyfrowym i komputer przenośny, **28**
- RYCINA 3.2. Schemat działania platformy sił AccuSway, **29**
- RYCINA 3.3. Przebieg punktu COP lewej i prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej w funkcji czasu losowo wybranego 3-letniego dziecka, **30**
- RYCINA 3.4. Zakreślone pole elipsy COP lewej kończyny dolnej 3-letniego dziecka, **32**
- RYCINA 3.5. Przebiegi zarejestrowanego punktu nacisku COP lewej stopy dziecka 5-letniego w płaszczyźnie strzałkowej oraz przebiegi COM i COC, **34**
- RYCINA 3.6. Przebiegi punktu COP prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej w kolejnych trzech próbach stania dziecka 3-letniego, **35**
- RYCINA 3.7. Przebiegi punktu COP prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej w kolejnych trzech próbach stania dziecka 3-letniego, **36**
- RYCINA 4.1. Rozkład wartości średnich zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku, **41**
- RYCINA 4.2. Rozkład wartości średnich wskaźnika zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku, **43**
- RYCINA 4.3. Rozkład średnich wartości pola elipsy oscylacji COP w obu płaszczyznach ruchu lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku, **45**
- RYCINA 4.4. Rozkład średnich wartości prędkości oscylacji COP w obu płaszczyznach ruchu lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku, **46**
- RYCINA 4.5. Rozkład średnich wartości częstotliwości oscylacji COC w płaszczyźnie czołowej ruchu lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku, **48**
- RYCINA 4.6. Rozkład średnich wartości częstotliwości oscylacji COC w płaszczyźnie strzałkowej ruchu lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych kategoriach wieku, **49**
- RYCINA 4.7. Rozkład współczynnika obciążenia lewej i prawej kończyny dolnej w poszczególnych grupach wiekowych, **60**
- RYCINA 4.8. Rozkład wartości przewidywanych, tzn. wieku szacowanego za pomocą modelu względem wieku kalendarzowego, **64**
- RYCINA 4.9. Rozkład reszt – różnic pomiędzy wiekiem przewidywanym (wyliczonym za pomocą modelu) i kalendarzowym, **64**

- TABELA 3.1. Średnie wartości podstawowych wymiarów ciała badanych dzieci w poszczególnych przedziałach wiekowych, **26**
- TABELA 4.1. Wartości współczynnika zgodności wyników lewej i prawej kończyny dolnej w kolejnych trzech próbach stania w poszczególnych grupach wiekowych, **51**
- TABELA 4.2. Średnie wartości wskaźników stabilności ciała dzieci w poszczególnych grupach wiekowych dla lewej i prawej kończyny dolnej, **56**
- TABELA 4.3. Średnie wartości i odchylenia standardowe współczynnika obciążenia lewej i prawej stopy podczas naturalnego stania w poszczególnych grupach wiekowych, **59**
- TABELA 4.4. Ocena wskaźników stabilności wybranych do modelu, **62**
- TABELA 4.5. Statystyki współliniowości (nadmiarowości) dla wskaźników wybranych do modelu, **62**
- TABELA 4.6. Podsumowanie regresji zmiennej zależnej, **63**
- TABELA 4.7. Wyniki weryfikacji modelu szacowania wieku stabilności posturalnej, **65**

Aneks

- TABELA 1. Charakterystyka grup badawczych dzieci, **88**
- TABELA 1a. Wartości średnie wskaźników stabilności ciała w poszczególnych grupach wiekowych, podzielonych według płci, **88**
- TABELA 2. Wyniki testu istotności różnic międzygrupowych Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej lewej kończyny dolnej, **90**
- TABELA 3. Wyniki testu Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej prawej kończyny dolnej, **90**
- TABELA 4. Wyniki testu Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej lewej kończyny dolnej, **90**
- TABELA 5. Wyniki testu Tukeya dla zakresu przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej prawej kończyny dolnej, **91**
- TABELA 6. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej lewej kończyny dolnej, **91**
- TABELA 7. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie czołowej prawej kończyny dolnej, **91**
- TABELA 8. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej lewej kończyny dolnej, **92**
- TABELA 9. Wyniki testu Tukeya dla zmienności przemieszczeń COP w płaszczyźnie strzałkowej prawej kończyny dolnej, **92**

- TABELA 10. Wyniki testu Tukeya dla pola elipsy oscylacji COP lewej kończyny dolnej, **92**
- TABELA 11. Wyniki testu Tukeya dla pola elipsy oscylacji COP prawej kończyny dolnej, **93**
- TABELA 12. Wyniki testu Tukeya dla prędkości oscylacji COP lewej kończyny dolnej, **93**
- TABELA 13. Wyniki testu Tukeya dla prędkości oscylacji COP prawej kończyny dolnej, **93**
- TABELA 14. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC lewej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej, **94**
- TABELA 15. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie czołowej, **94**
- TABELA 16. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC lewej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej, **94**
- TABELA 17. Wyniki testu Tukeya dla częstotliwości oscylacji COC prawej kończyny dolnej w płaszczyźnie strzałkowej, **95**
- TABELA 18. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 2-latków, **95**
- TABELA 19. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 3-latków, **96**
- TABELA 20. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 4-latków, **96**
- TABELA 21. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 5-latków, **97**
- TABELA 22. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 6-latków, **97**
- TABELA 23. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej i prawej kończyny dolnej w grupie 7-latków, **98**
- TABELA 24. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników lewej kończyny dolnej z wiekiem i podstawowymi wymiarami ciała dzieci, **98**
- TABELA 25. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników prawej kończyny dolnej z wiekiem i podstawowymi wymiarami ciała dzieci, **99**
- TABELA 26. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 2-latków, **99**
- TABELA 27. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 2-latków, **100**
- TABELA 28. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 3-latków, **100**

- TABELA 29. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 3-latków, **101**
- TABELA 30. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 4-latków, **101**
- TABELA 31. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 4-latków, **102**
- TABELA 32. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 5-latków, **102**
- TABELA 33. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 5-latków, **103**
- TABELA 34. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 6-latków, **103**
- TABELA 35. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 6-latków, **104**
- TABELA 36. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności lewej kończyny dolnej w grupie 7-latków, **104**
- TABELA 37. Współczynniki korelacji wzajemnej wskaźników stabilności prawej kończyny dolnej w grupie 7-latków, **105**

Summary

Characteristics of a standing postural control process in children aged 2–7

Introduction. The emergence of motor skills in children requires development of postural control which begins in the first weeks of life, but since 11th–12th month of life a child is able to stand independently and start to learn locomotion in standing position. A child usually reaches the skill of independent bipedal gait at the end of the 1st to the beginning of the 2nd year of life and the 4-year-old's gait draws an analogy to adult's gait in step factor (Sutherland, 1997). Preschool age (from the 4th to 6th–7th year of life) is characterized by a dynamic development of motor and coordination skills, particularly those related to locomotion in vertical body position (Przewęda, 1981; Prętkiewicz-Abacjew, 2002; Malinowski, 2004). At the end of the 6th and the beginning of the 7th year of life the natural curvatures of spine stabilize and the individual habitual posture is created (Prętkiewicz-Abacjew, 2002).

The period of childhood at the age of 2–7 is characterized by intensive changes in the organism. The skeletal system is constantly under 'reconstruction' resulting in intensive changes in the body proportions which influence the conditions of body equilibrium (Iwanowski, 1982; Kasperczyk, 2004). The anticipatory postural adjustments develop and contribute to stabilization of the vertical body position.

From the point of view of human movement biomechanics, the ability of postural control consists in minimizing body sway in such a way so that the centre of mass (COM) does not move outside the limits of stability established by the area of feet base (Błaszczyk, 1993; Golema, 2002; Kuczyński, 2003). Such a body sway demands constant activity of the movement system, the variability in posture muscle tension. Calf muscles, which enable movements in the ankle joint and feet pressure on the support surface in the direction and the strength adequate to the needs, take a special part in this task. In adults the body sway is almost unnoticeable during a quiet bipedal stance but in small children the effects of stabilizing muscle activity on the body posture are clearly visible. A progressive improvement of the body stability in a natural stance position occurring with age of children reflects their intensive development of general motor fitness. Defining of the body stabilization development in a stance position in healthy children can be a basis for assessment of the postural control in unhealthy children with different dysfunctions of the nervous and muscular systems.

The aim of study. Hypotheses. The aim of the study was to define the norms characterizing the process of postural control in healthy children at the age

of 2–7, taking into consideration the left and right lower limbs and examining the reliability of parameters, describing the process of postural control with reference to children's real age.

In this study the following hypotheses were put forward:

1. The body sway decreases (stability improves) with age.
2. The repeatability of measures characterizing postural balance in children aged 2–7 improves with age.
3. The asymmetry in weight distribution and stabilizing activity between the left and right lower extremity may indicate the dominant role of the left leg in postural control.

Additionally, the study aimed at formulating a multiple regression model for estimating the age of posture stability from the results of stabilographic tests.

Materials and methods. The subjects of research were healthy children of both sexes aged 2–7 in total number of 272 (the differences in girls and boys body stability are minimal, especially in children at that age group), from two kindergartens in Wrocław and two day nurseries. The subjects were divided into 6 age groups: 2-, 3-, 4-, 5-, 6- and 7-year-olds. Their postural stability was assessed during unconstrained still standing, without shoes on two force platforms (AccuSway, AMTI); under each foot there was a separate platform. The feet were positioned parallel, at hip width, and the upper limbs were hanging freely along the body. The test was repeated three times – one by one without changing the feet position. Each trial lasted 20 seconds with the sampling rate of 100 Hz. The center of pressure (COP) of each foot on the support surface was registered in two movement planes: frontal and sagittal. Based on the COP time series the following measures of postural stability were calculated: range, variability, area and velocity of COP, and the frequency of corrective torques for the left and right lower limbs. Lower values of these measures are generally associated with better postural stability. Statistical analysis was performed using a between (age groups) within (repeated trials) analysis of variance. The concordance correlation coefficient (CCC) of the dependent variables was also calculated in the three consecutive trials to identify possible changes in the reliability of postural stability measures with age. The asymmetry of lower limb support function was analyzed as well, taking into consideration the weight distribution and the asymmetry of stabilizing activity of lower limbs. Finally, all stability measures were inputted into a multiple regression model to identify the best predictors of the real age of the examined children.

Results. All measures of stability showed a clear tendency to decrease their values with the subjects age. The groups of 2- and 3-year-olds did not show any significant differences in postural stability, except the frequency of corrective torques which were higher in 2-year-olds than in older children. The fastest decrease in postural stability measures was observed in 4- and 5-year-olds. Children

of 6–7 did not show significant differences between each other and their stability remained at similar level. Children 7 years old revealed values of stability measures close to the level of adults.

A model for assessing the age of postural stability (APS) in children was formulated based on 3 stability measures of the left lower limb: the variability of COP in sagittal plane (m_1), the ellipsis area (m_2) and the velocity of oscillation of COP (m_3) and 2 stability measures of the right lower limb: the range in the frontal plane (m_4) and the velocity of COP (m_5). Thus the APS assessment for a child can be calculated according to the following formula:

$$\text{APS} = 9.90299 - 1.07718 m_1 - 0.29382 m_2 - 0.13543 m_3 - 0.69252 m_4 - 0.15467 m_5 \pm 9 \text{ months}$$

$$(0.423) \quad (0.084) \quad (0.015) \quad (0.177) \quad (0.014)$$

Standard errors of parameter estimate are given in brackets.

The accuracy of estimated age according to the above model equals 77%, which is a satisfactory result in the case of human biological system. The model was verified and it was stated that in healthy children the age of postural stability agrees with the real age with the tolerance of ± 9 months, and in children with nervous system dysfunction (the Down and Asperger syndrome and autism) the age of postural stability is about 2 years lower than the real age.

Conclusion. The development of postural control in a standing position in healthy children aged 2–7 consists in successive decrease of body sway along with the increase of real age. The model of assessing the age of postural stability may help in evaluating the difference in postural stability development with reference to healthy children.