

Kraków, dn. 10.12.2025r.

dr hab. Wiesław Chwała, prof. AWF
Instytut Nauk Biomedycznych,
Zakład Biomechaniki,
AWF w Krakowie

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Rafała Borkowskiego pt: „*Analiza i porównanie reakcji młodych kobiet na perturbacje przednio-tylne występujące w różnych fazach cyklu chodu*”

1. Dane ogólne i znaczenie podjętej problematyki

Recenzowana rozprawa doktorska magistra Rafała Borkowskiego pt. „*Analiza i porównanie reakcji młodych kobiet na perturbacje przednio-tylne występujące w różnych fazach cyklu chodu*” została przygotowana w Akademii Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie, pod opieką naukową profesor doktor habilitowanej Michaliny Błażkiewicz-Janeczko.

Autor podejmuje aktualny i istotny problem naukowy z pogranicza biomechaniki chodu, kontroli równowagi i profilaktyki upadków. Reakcje na perturbacje podczas chodu są kluczowe zarówno z punktu widzenia teorii kontroli posturalnej, jak i praktyki klinicznej (rehabilitacja, prewencja upadków u osób starszych). Umieszczenie pracy w szerszym projekcie uczelnianym dotyczącym kontroli stabilności posturalnej dodatkowo podkreśla jej znaczenie aplikacyjne.

Należy zatem stwierdzić, że temat podjętej rozprawy jest uzasadniony, dobrze wpisuje się w aktualne trendy badań (trening z perturbacjami, analiza reakcji kompensacyjnych), a wykorzystanie zaawansowanych narzędzi (GRAIL, OpenSim, SPM) lokuje pracę w nurcie nowoczesnych eksperymentalnych badań biomechanicznych.

2. Układ rozprawy i przegląd literatury

Rozprawa ma klasyczną, przejrzystą strukturę: wstęp, (może nazbyt rozbudowany przegląd piśmiennictwa w obszarze podejmowanego tematu badań), cele i pytania badawcze, metody i materiał badań, wyniki badań, dyskusję, ograniczenia podjętych badań, wnioski i bibliografię. Spis treści jest logiczny i dobrze odzwierciedla zawartość poszczególnych rozdziałów.

Mocną stroną pracy jest obszerny, uporządkowany przegląd literatury dotyczącej perturbacji chodu – zarówno na ścieżce, jak i na różnych typach bieżni, z uwzględnieniem specyfiki perturbacji (poślizgnięcia, potknięcia, przemieszczenia platformy, pociągnięcia za miednicę, chodu z zadaniem dodatkowym itd.).

Autor systematycznie przedstawia parametry badań (liczebność i charakterystykę grup, rodzaj perturbacji, fazy chodu, w których widoczne są perturbacje, zastosowaną aparaturę badawczą, częstotliwość rejestracji w eksperymencie pomiarowym, zaawansowanego systemu analizy chodu GRAIL z narzędziami Matlab i OpenSim oraz główne wyniki).

Z jednej strony zaletą pracy jest zastosowanie podejścia zbliżonego do przeglądu systematycznego (w innym miejscu rozprawy wprost odwołującego się do własnego przeglądu systematycznego), z wyraźnym porządkowaniem badań według populacji (klasyfikacja: osoby młode/starsze, z chorobami neurologicznymi), rodzajem perturbacji w chodzie i zastosowanych narzędzi badawczych. Taki pogląd można by przyjąć, gdyby wstęp był właśnie ukierunkowany na dokonanie zamierzonego przeglądu systematycznego, a ten z kolei był by jedynym i kompletnym celem podjętego problemu badawczego.

Cel pracy jest jednak znacznie szerszy, dlatego z drugiej strony zdaniem recenzenta, przegląd literatury jest momentami nadmiernie rozbudowany i zawiera nadmiarowy opis szczegółów. Długie tabele i szczegółowe streszczenia poszczególnych badań sprawiają chwilami wrażenie artykułu przeglądowego, którego śledzenie może być dla czytelnika chwilami nużące, a nie wprowadzenia służącego bezpośrednio do zbudowania własnego problemu badawczego. Można odnieść wrażenie, że część opisów (zwłaszcza bardzo technicznych fragmentów dot. aparatury i parametrów treningów) mogłaby zostać skrócona na rzecz wyraźniejszej syntezy – której wyniki są kluczowe dla projektu Autora, ukazując potencjalny obszar badań w którym dysertacja może dostarczyć nowej wiedzy popartej dowodem eksperymentalnym. Alternatywnym rozwiązaniem mogło być zamieszczenie tabel w Aneksie pracy. Jest to jednak częsty mankament prac młodych badaczy, wymagający zachowania dyscypliny narracyjnej i podporządkowania istotnie szerokiej wiedzy konkretnemu celowi redagowanego rozdziału.

Pewnym mankamentem jest także fragment *Wstępu*, w którym autor szeroko omawia pojęcie „perturbacji” w różnych dziedzinach (matematyka, astronomia, ekologia, psychologia). Jest to ciekawy fragment popularnonaukowy, ale potwierdza tylko powyższe uwagi recenzenta, że jest to fragment niezbyt konieczny w pracy doktorskiej o wyraźnym przecież profilu biomechanicznym – zwiększając obszerność tekstu, bez proporcjonalnego zysku merytorycznego.

3. Cele, pytania badawcze i hipotezy

Cel główny pracy został sformułowany klarownie i jasno. Była nim identyfikacja parametrów czasowo-przestrzennych, kinematycznych i kinetycznych najbardziej podatnych na perturbacje w fazach Initial Contact (IC) i Pre-Swing (PSw) oraz określenie udziału sił mięśniowych kończyn dolnych w odpowiedzi na te zakłócenia.

Pytania badawcze są klarowne i logicznie, wynikając bezpośrednio z dokonanego przez Autora przeglądu literatury. Dotyczą tego, który rodzaj perturbacji jest najtrudniejszy do skompensowania oraz które mięśnie generują największe siły w odpowiedzi na zakłócenia w różnych fazach cyklu chodu.

Krytycznie należy jednak odnotować brak wyraźnie wyodrębnionych hipotez badawczych. Rozprawa jest zasadniczo badaniem opisowo-porównawczym, ale przy tym poziomie zaawansowania metod oczekiwałbym przynajmniej kilku hipotez kierunkowych, do których daje asumpt wiedza, wynikająca ze znajomości piśmiennictwa tematu. Brak sformułowanych hipotez utrudnia końcową ocenę następczą, co zostało „potwierdzone”, a co jedynie „opisane”.

4. Metodyka badań

4.1. Grupa badana

W badaniu wzięło udział 21 młodych, zdrowych, fizycznie aktywnych kobiet (wiek 21.38 ± 1.32 lat), o zbliżonej masie i wysokości ciała.

Zaletą jest jednorodność grupy, co ogranicza zmienność wewnątrzgrupową, związaną z płcią, wiekiem i stanem zdrowia. Zastosowano też przemyślane kryteria włączenia i wyłączenia. Minusem dokonanej selekcji celowej jest jednak dość wąskie spektrum badanej populacji. Pozytywnie odbieram fakt, że Autor zdaje sobie z tego sprawę i sam uczciwie podkreśla, że wyniki nie mogą być uogólniane na populację mężczyzn czy osoby starsze, co jest jednak kluczowe z punktu widzenia prewencji upadków. Kolejną istotną wadą jest brak grupy kontrolnej, co w znacznym stopniu upodabnia pracę do badań raportu eksperckiego.

Choć autor przeprowadził analizę mocy testu (statistical power), uzyskując wartości powyżej konwencjonalnego progu 0.8, analiza ta została wykorzystana przede wszystkim do oceny adekwatności zastosowanego testu, a nie planowania wielkości próby przed badaniem. W pracy brakuje dyskusji, czy 21 osób nie jest minimalną liczbą zapewniającą „formalną” moc, ale jednocześnie ograniczającą czułość na subtelniejsze efekty (zwłaszcza przy tak rozbudowanej liczbie analizowanych zmiennych). Należy jednak rozróżnić sytuacje, kiedy rekrutacja odbywa się spośród zdrowych osób, od tej, kiedy badacz mierzy się z problemem naboru do badań osób z rzadkimi schorzeniami np. neurologicznymi. W tym pierwszym przypadku zdaniem recenzenta grupy powinny być liczniejsze, umożliwiając wzmocnienie dowodu statystycznego - test będzie miał odpowiednią moc do wykrycia prawdziwych różnic.

Na usprawiedliwienie Autora należy dodać, że grupa badanych osób jest często limitowana w badaniach biomechanicznych czynnikiem pragmatycznym, mianowicie zastosowanie szerokiego spektrum narzędzi badawczych, często istotnie wpływa na czas i pracochłonność planowanego eksperymentu.

4.2. Aparatura i protokół

Bezspornie mocną stroną jest wykorzystanie zaawansowanego systemu GRAIL, który umożliwia jednoczesny pomiar kinematyki 3D, sił reakcji podłoża oraz prezentację środowiska wirtualnego.

Protokół badania – chód swobodny i chód z perturbacjami wywoływanymi przyspieszeniem bądź spowolnieniem jednego pasa bieżni w fazach IC i PSw, z

pięcioma powtórzeniami każdego rodzaju perturbacji – jest dobrze opisany oraz spójny z literaturą przedmiotu.

Słabszą stroną metodyki jest brak randomizacji kolejności typów generowanych zakłóceń. Autor sam zauważa, że przyspieszenie pasa bieżni w fazie PSw było badane w pierwszej kolejności, co może sprzyjać powstałym efektom uczenia i oczekiwania badacza. Dodatkowo na ten stan rzeczy może wpływać specyfika tej końcowej fazy dwupodporowej, wynikająca z gwałtownie zmieniającej się wielkości płaszczyzny podparcia podczas przejścia od podporu do wymachu, co stawia specyficzne wymagania w zakresie zachowania równowagi dynamicznej przez układ ruchu. Porównania z pracami innych autorów dodatkowo ujawniają, że w innych badaniach kolejność zakłócanych faz była inna, co utrudnia bezpośrednie porównania wyników.

Kolejne zastrzeżenie dotyczy potencjalnej wymiany informacji między uczestniczkami eksperymentu, które miały miejsce po zakończeniu udziału w badaniu, a tymi, którzy dopiero przystępowali do pomiarów. Autor słusznie wskazuje, że mogło to wpłynąć na zachowania „przed perturbacją”, a więc także na interpretację różnic względem chodu swobodnego. Jest to ważne ograniczenie wewnętrznej trafności eksperymentu.

Mam również pewne wątpliwości dotyczące stałej prędkości taśmy bieżni. Choć grupa badanych była jednorodna pod względem masy i wysokości ciała, to jednak *a priori* powinno się ocenić naturalną prędkość ruchu dla każdej badanej osoby podczas chodu po płaskiej powierzchni. Wynik tego badania powinien determinować indywidualną prędkość bieżni. Powszechnie wiadomo, że każde odstępstwo od prędkości naturalnej chodu jest swego rodzaju zakłóceniem, wymagającym działań adaptacyjnych OUN i układu ruchu.

Opis stosowanych metod oraz używanych modeli, choć czasami sprawia wrażenie nazbyt szczegółowego, to dla biomechanika nie powinien nastroczać trudności w logicznym śledzeniu poszczególnych etapów eksperymentu.

4.3. Analiza danych i statystyka

Proces przygotowania danych – od eksportu z GRAIL do MatLab, poprzez przetwarzanie w OpenSim (skalowanie modelu, kinematyka i kinetyka odwrotna, optymalizacja statyczna sił mięśniowych) aż po analizy SPM – jest opisany szczegółowo i świadczy o bardzo dobrym opanowaniu zaawansowanych narzędzi analitycznych.

Zastosowanie Statistical Parametric Mapping do analizy przebiegów czasowych sił reakcji podłoża, momentów sił mięśniowych i kinematyki stawowej trzeba ocenić bardzo wysoko – jest to metoda w pełni adekwatna do badania złożonych czasowo-serii danych biomechanicznych i pozwala uniknąć arbitralnego wybierania „pojedynczych punktów” w cyklu chodu. Wprowadzenie wskaźnika ORIS (Obszar Różnic Istotnych Statystycznie), który integruje informację o zasięgu czasowym istotnych różnic, jest ciekawym i oryginalnym pomysłem.

Zastrzeżenia budzi jednak kwestia wielokrotności testów. Autor wykonuje bardzo dużą liczbę analiz SPM – dla wielu parametrów, dla obu kończyn, kilku typów zakłóceń i ich kombinacji. Każdy test SPM jest wprowadznie kontrolowany na poziomie alfa 0.05, ale nie ma dyskusji, czy i jak autor kontroluje łączny poziom błędu i jego rodzaj (np. poprzez korekty dla wielu porównań na poziomie grup parametrów). Można to częściowo usprawiedliwić charakterem eksploracyjnym pracy, ale brak refleksji na ten temat jest mankamentem rozdziału metodologicznego.

5. Wyniki, dyskusja i wnioski

Autor przedstawia wyniki w sposób systematyczny: osobno dla kończyny poddawanej zakłóceniom i kontralateralnej, z podziałem na parametry czasowo-przestrzenne, kinematyczne, kinetyczne i siły mięśniowe. To uporządkowanie jest przejrzyste i logiczne.

Wyniki są bardzo szczegółowe, a analiza z użyciem SPM i ORIS pozwala na precyzyjne wskazanie faz cyklu chodu, w których pojawiają się istotne różnice. Dyskusja łączy uzyskane dane z literaturą przedmiotu, w wielu miejscach pokazując, że niektóre obserwacje (np. zmniejszenie siły odbicia, wydłużenie fazy podporu, zmiany w składowych sił reakcji podłoża GRF) dobrze korespondują z wynikami innych autorów.

Na uwagę zasługuje także rozbudowana dyskusja dotyczącą wyników symulacji sił mięśniowych w OpenSim, z próbą mechanistycznego wyjaśnienia obserwowanych zmian (np. większa siła mięśnia brzuchatego łydki mimo niższego momentu zginającego stawu skokowo-goleniowego, analiza zachowania mięśnia pośladkowego wielkiego i możliwego „efektu crosstalk” sygnałem z mięśnia gruszkowatego). Pokazuje to dobre zrozumienie złożonych zależności między kinematyką, kinetyką i pracą mięśni, oraz ograniczeniami symulacji oprogramowania OpenSim.

Podsumowując dyskusję, należy stwierdzić, że praca dostarcza bardzo szczegółowego, jakościowego i ilościowego opisu zjawisk, w znacznej mierze potwierdzając dotychczasowe spostrzeżenia innych badaczy.

Warto zaznaczyć, że oryginalność rozprawy ma charakter głównie metodyczno-analityczny (zastosowanie GRAIL, OpenSim, SPM, ORIS w jednorodnej grupie młodych kobiet), weryfikujący dotychczasowe doniesienia, a mniej – koncepcyjny.

Wnioski końcowe są poprawne, ale w dużej mierze powtarzają opis wyników. Brakuje krótkiej, syntetycznej części, która wprost odwołuje się do sformułowanych na początku pytań badawczych, a także wyraźnie artykułuje implikacje praktyczne: czy uzyskane wyniki można wykorzystać w sposób praktyczny dla projektowania treningu/reedukacji chodu z zakłóceniami, programów prewencji upadków, czy też propozycji modyfikacji testów klinicznych równowagi dynamicznej.

Z drugiej strony, główny wniosek pracy – że perturbacje w fazie PSw są trudniejsze do skompensowania niż perturbacje w fazie IC, a największym wyzwaniem jest nagłe przyspieszenie pasa bieżni w fazie PSw (poślizgnięcie),

podczas gdy najbardziej wymagający krok odzyskiwania równowagi dynamicznej „recovery step” występuje po spowolnieniu pasa w PSw (potknięcie) – choć podany w sposób precyzyjny ilościowo, to jednak potwierdza aktualny stan wiedzy i wpisuje się w intuicyjną logikę kontroli równowagi dynamicznej oraz wcześniejsze wyniki badania nad poślizgami i potknięciami.

6. Ograniczenia badania

Rozdział poświęcony ograniczeniom jest jednym z najmocniejszych elementów rozprawy. Autor z dużą samoświadomością i krytycyzmem omawia: małą liczebność i jednorodność próby (tylko młode kobiety), potencjalny efekt „przekazywania informacji” między uczestniczkami, ograniczenia związane z zastosowaniem statycznej optymalizacji w OpenSim (brak zależności czasowej, uproszczenia dynamiki mięśniowej), brak danych EMG uniemożliwiający weryfikację wyników symulacji oraz fakt, że porównywano wyłącznie wartości szczytowe sił mięśniowych bez odniesienia do momentu ich wystąpienia w cyklu chodu.

Trzeba podkreślić, że autor nie tylko wylicza ograniczenia, ale także proponuje kierunki dalszych badań (np. porównanie optymalizacji statycznej i dynamicznej, rozszerzenie próby, zapobieganie kontaktowi między badanymi). To zdecydowany pozytywny w całej pracy dobrze rokujący czynnik możliwie szybkiego osiągnięcia dojrzałości badawczej.

Można sobie tylko wyobrazić wzrost poziomu merytorycznego pracy, gdyby Autorowi udało się wdrożyć większość proponowanych rozwiązań na etapie planowania eksperymentu badawczego.

7. Strona formalna i językowa

Rozprawa jest napisana poprawną polszczyzną, styl jest w większości rzeczowy, akademicki. Struktura zdań bywa momentami bardzo złożona, ale jest to w pewnym stopniu nieuniknione przy opisie złożonych zjawisk biomechanicznych.

Zdarzają się drobne potknięcia stylistyczne (powtórzenia, niekonsekwentne stosowanie skrótów, okazjonalne tzw. „literówki”), ale nie wpływają one istotnie na odbiór i poziom całości pracy. W części technicznej (opis OpenSim, SPM) tekst ociera się chwilami o podręcznikową instrukcję obsługi, co z jednej strony świadczy o dobrej znajomości narzędzi, z drugiej – nieco obciąża lekturę pracy doktorskiej i zaciera granicę między tym, co jest wkładem autora, a tym, co jest tylko odtworzeniem dokumentacji oprogramowania. Ponownie pojawia się sugestia zamieszczenia niektórych fragmentów opisu technicznego w Aneksie pracy.

Bibliografia jest obszerna, aktualna i obejmuje liczne prace z ostatnich lat dotyczące zarówno zakłóceń chodu, jak i metod modelowania mięśniowo-szkieletowego.

8. Podsumowanie głównych zalet i mankamentów pracy

Najważniejsze zalety rozprawy:

1. Aktualny, ważny i jasno zdefiniowany problem naukowy z pogranicza biomechaniki chodu, kontroli równowagi i prewencji upadków.
2. Bardzo szeroki, uporządkowany i krytyczny przegląd piśmiennictwa, z wyraźnym osadzeniem własnego badania w kontekście literatury światowej.
3. Zastosowanie zaawansowanych metod pomiarowych i analitycznych (GRAIL, OpenSim, SPM) oraz opracowanie własnych procedur przetwarzania danych w MatLab.
4. Ciekawy i oryginalny pomysł wykorzystania wskaźnika ORIS do ilościowego porównywania zakresu istotnych różnic w przebiegach czasowych.
5. Szczegółowa i rzetelna analiza wyników, dobrze powiązana z literaturą przedmiotu, zarówno na poziomie parametrów czasowo-przestrzennych, jak i kinetyki oraz sił mięśniowych.
6. Bardzo dobrze i krytycznie opisane ograniczenia badania, z jasnymi sugestiami kierunków dalszych prac.

Najważniejsze słabości i zastrzeżenia:

1. Brak wyraźnie sformułowanych hipotez badawczych, mimo jasno przedstawionych pytań i rozbudowanej literatury – praca ma w efekcie bardziej charakter opisowo-eksploracyjny noszący cechy raportu eksperckiego bez grupy kontrolnej, niż hipotezo-weryfikacyjny.
2. Ograniczona liczebność i jednorodność próby (21 młodych, zdrowych kobiet), co mocno zawęża możliwości uogólniania wyników, zwłaszcza w kontekście prewencji upadków u osób starszych czy mężczyzn oraz brak grupy kontrolnej.
3. Brak randomizacji kolejności typów perturbacji oraz możliwość wymiany informacji między uczestniczkami, co obniża wewnętrzną trafność eksperymentu (efekty oczekiwania, adaptacji, antycypacji).
4. Bardzo duża liczba analiz SPM przy braku dyskusji nad kontrolą łącznego poziomu błędu I rodzaju dla wielu testów – ryzyko inflacji fałszywie dodatnich wyników.
5. Analiza sił mięśniowych oparta na statycznej optymalizacji bez weryfikacji EMG, przy jednoczesnym wyciąganiu daleko idących wniosków mechanistycznych – co autor sam uczciwie określa jako ograniczenie.
6. Przewaga opisowości nad syntezą w dyskusji i wnioskach końcowych – relatywnie mało miejsca poświęcono praktycznym implikacjom wyników

(programy treningowe, wnioski dla fizjoterapeutów, trenerów, projektantów testów równowagi).

7. Przegląd literatury chwilami nadmiernie rozbudowany i zbyt szczegółowy, co wydłuża tekst i zaciera ostre zarysowanie własnego wkładu autora.

9. Konkluzja końcowa

Należy zdecydowanie podkreślić, że walory pracy w ogólnym rozrachunku znacznie przewyższają jej mankamenty i stanowią o wysokim poziomie dysertacji doktorskiej.

Pomimo wskazanych zastrzeżeń – głównie natury metodycznej - recenzowana rozprawa doktorska stanowi wartościowe, samodzielne opracowanie naukowe.

Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnych metod badań biomechaniki chodu, umiejętnością ich praktycznego zastosowania oraz zdolnością do krytycznej analizy zarówno cudzych, jak i własnych wyników. Zakres pracy, stopień jej trudności, poziom merytoryczny i nowoczesność zastosowanej aparatury oraz analiz, w mojej ocenie spełniają wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie nauki o kulturze fizycznej.

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty recenzowanej rozprawy stwierdzam, że została ona przygotowana zgodnie z dobrą praktyką pracy naukowej, w sposób sumienny i przejrzysty. Wnoszę do Rady Wydziału, Wychowania Fizycznego, Akademii Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie, o dopuszczenie Pana mgr Rafała Borkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. Wiesław Chwała, prof. AWF