Dr hab. inż. Sławomir Winiarski, prof. AWF Wrocław

Zakład Fizjologii i Biomechaniki
Wydział Wychowania Fizycznego i Sportu
Akademia Wychowania Fizycznego im. Polskich Olimpijczyków
Wrocław, Paderewskiego 35

Wrocław, 19.05.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Hanny Zadoń w dyscyplinie inżynieria biomedyczna

pt. *„Model matematyczny prognozowania konsekwencji zdrowotnych w obrębie układu szkieletowo-mięśniowego w wyniku sedentarnego stylu życia"*

1. WPROWADZENIE

Podstawą formalną przygotowania niniejszej recenzji jest Uchwała nr 38/2025 Rady Dyscypliny Inżynierii Biomedycznej Politechniki Śląskiej z dnia 20 marca 2025 r., w sprawie wyznaczenia recenzentów w przewodzie doktorskim mgr inż. Hanny Zadoń, prowadzonego w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Zgodnie z pismem z dnia 28 marca 2025 r. przedstawiona do oceny Rozprawa powstała w celu uzyskania stopnia naukowego doktora i stanowi efekt pracy badawczej mieszczącej się w obszarze inżynierii biomedycznej, gdyż koncentruje się na matematycznym modelowaniu wpływu siedzącego trybu życia na układ mięśniowo-szkieletowy.

Recenzja została przygotowana w oparciu o treść rozprawy, przekazaną dokumentację oraz obowiązujące przepisy, w szczególności Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.).

2. STRUKTURA I UKŁAD PRACY

Rozprawa doktorska mgr inż. Hanny Zadoń została przygotowana w formie monografii i liczy łącznie 201 stron maszynopisu. Składa się z wprowadzenia, sześciu zasadniczych rozdziałów merytorycznych oraz zakończenia, które obejmuje wnioski końcowe, propozycje dalszych badań, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz rozbudowaną bibliografię. Uważam, żeod strony formalnej, praca w pełni spełnia wymogi stawiane eksploracyjno-eksperymentalnym rozprawom doktorskim.

Struktura pracy jest przejrzysta i logiczna. Rozdział pierwszy zawiera rozległy i aktualny przegląd literatury, w którym Autorka przybliża tematykę sedentarnego stylu życia, jego definicji, skalę występowania, skutki zdrowotne oraz trudności związane z jego operacjonalizacją w badaniach naukowych. Uważam, że przegląd ten został przeprowadzony rzetelnie i obejmuje zarówno kontekst teoretyczny, jak i epidemiologiczny, przy czym odnosi

się nie tylko do danych krajowych, ale przede wszystkim opiera na literaturze międzynarodowej.

W opinii recenzenta, w niniejszy wprowadzeniu, wydaje się przenikające, i w ten sposób, mało przejrzyste, rozgraniczenie pomiędzy siedzącym/sedentarnym stylem życia (polegającym na przyjmowaniu w pracy, w domu, czy podczas wypoczynku pozycji siedzącej), a mało aktywnym stylem życia (mierzonym za pomocą kwestionariusza aktywności IPAQ, częstości skurczu serca, czy liczby wykonywanych kroków, itp.). Osoba może być jednocześnie aktywna fizycznie (np. uprawiać sport) i prowadzić siedzący tryb życia, jeśli przez większość dnia siedzi. To rozróżnienie jest o tyle istotne, że oba podejścia mają poważne i często nakładające się implikacje medyczne. Oba te style sprzyjają rozwojowi chorób przewlekłych, w tym chorób układu sercowo-naczyniowego, cukrzycy, otyłości, nadciśnienia, itp. Ponadto zwiększają ryzyko zaburzeń psychicznych (np. depresja i stany lękowe), oraz mogą prowadzić do problemów układu mięśniowo-szkieletowego, zwłaszcza bólów pleców i osłabienia siłymięśni. Negatywne skutki długiego siedzenia mogą występować nawet u osób spełniających minimalne zalecenia aktywności fizycznej, jeśli większość dnia spędzają w bezruchu. Z kolei brak regularnego ruchu powoduje spadek wydolności organizmu, pogorszenie profilu lipidowego, obniżenie wrażliwości na insulinę i przyspieszenie procesów starzenia. Może ten problem pojmowania definicji pojawia się tylko w nomenklaturze polskiej a wynika z tego, że 'sedentary behaviour' powinno się tłumaczyć jako „osiadły" a nie „siedzący" styl/tryb życia? Chętnie poznałbym opinię Doktorantki na ten temat.

W wieńczącej sekcji rozprawy zgromadzono 308 pozycji litaratury, z czego, należy podkreślić, zdecydowana większość, bo ponad 80%, to publikacje anglojęzyczne, pochodzące z uznanych czasopism naukowych o międzynarodowym zasięgu. Znaczna część źródeł to prace oryginalne i przeglądowe z zakresu biomechaniki, fizjologii, zdrowia publicznego i inżynierii biomedycznej. Około 260 pozycji stanowią artykuły naukowe, a pozostałe to książki, monografie, rozdziały w opracowaniach zbiorowych oraz raporty WHO czy Eurobarometru. Wynika z tego, że Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością literatury światowej i umiejętnie wykorzystała ją do uzasadnienia wyboru problematyki i metod badawczych.

W rozdziale drugim jasno przedstawiono cel pracy oraz pytania badawcze. Co istotne, na stronie 22 zaprezentowano również schematyczny podział pracy na dwa etapy: badania doświadczalne i modelowe, przy czym każdy z tych etapów został dodatkowo rozbity na konkretne zadania cząstkowe (podeksperymenty). Uważam, że taki sposób planowania procesu badawczego jest dużą zaletą pracy, ponieważ pokazuje, że Doktorantka świadomie zarządzała strukturą projektu i potrafiła wyznaczyć kolejne etapy prowadzące do realizacji celu głównego.

W rozdziale trzecim, poświęconym analizie wpływu sedentarnego stylu życia na narząd ruchu, przedstawiono obszerne badania doświadczalne, które w mojej ocenie stanowią solidną podstawę empiryczną pracy. Zrealizowano łącznie osiem odrębnych eksperymentów, dotyczących takich cech jak m.in. aktywności fizycznej, masy ciała, postawy, stabilności,

chodu, gęstości kości, siły mięśniowej oraz morfologii mięśni. Każdy z tych eksperymentów został opisany według przejrzystego schematu: wprowadzenie teoretyczne, metodyka, wyniki, dyskusja i wnioski. Uważam, że taki układ znacząco ułatwia zrozumienie każdego zadania badawczego i pozwala odbiorcy śledzić tok myślenia Autorki bez zbędnych dygresji. Z drugiej jednak strony, podział ten **nie zawsze pozwala uchwycić** powiązania pomiędzy poszczególnymi eksperymentami. **Nie jest całkowicie jasne** (por. wykres. 3.9), czy we wszystkich zadaniach brały udział inne czy te same osoby – tzn. czy próby miały charakter zależny, czy niezależny, a także w jakim stopniu wyniki poszczególnych eksperymentów są ze sobą skorelowane. W mojej ocenie prowadzi to do pewnej niepewności interpretacyjnej – nie wiadomo bowiem, czy część danych mogłaby zostać skonsolidowana lub zredukowana, co mogłoby mieć wpływ zarówno na analizę statystyczną, na zaimplementowany biomechaniczny model, czy ostatecznie na strukturę wniosków końcowych.

Rozdział czwarty zawiera część modelową, opartą na matematycznym modelowaniu układu mięśniowo-szkieletowego z użyciem środowiska AnyBody Modeling System. Wykorzystano tu dane empiryczne uzyskane w badaniach doświadczalnych do budowy indywidualizowanych modeli i przeprowadzono analizy obciążeń układu ruchu w różnych wariantach: zmiana masy ciała, postawy, siły mięśniowej czy poziomu aktywności. W mojej ocenie część ta jest nowoczesna, mocno innowacyjna, merytorycznie silna i dobrze opracowana. Jednocześnie, podobnie jak w przypadku części eksperymentalnej, **zabrakło wyraźnego odniesienia** do tego, na ile wyniki modelowe można bezpośrednio zestawić z wynikami uzyskanymi wcześniej. Nie wiadomo jednoznacznie, czy modelowanie miało charakter powiązanego studium, czy też było uzupełnieniem i ekstrapolacją wzajemnie skorelowanych danych empirycznych. Uważam, że doprecyzowanie tego związku już na etapie opisu metodlogii (rozdział 2: cel i zakres) wzmocniłoby argumentację i pozwoliło lepiej zrozumieć wybraną przez Autorkę strukturę pracy i przebieg badań.

3. OCENA PROBLEMATYKI I CELÓW BADAWCZYCH

Rozprawa podejmuje problematykę niezwykle aktualną i wieloaspektową, jaką jest wpływ sedentarnego stylu życia na funkcjonowanie układu mięśniowo-szkieletowego człowieka. W mojej ocenie dobór tematu jest zasadny zarówno z naukowego, jak i społecznego punktu widzenia, szczególnie w kontekście rosnącej liczby doniesień epidemiologicznych i naukowych wskazujących na szkodliwość długotrwałego siedzenia. Autorka trafnie identyfikuje luki w dotychczasowym stanie wiedzy, szczególnie w zakresie modelowania biomechanicznych skutków braku aktywności fizycznej oraz integrowania danych eksperymentalnych z modelami matematycznymi.

Cel główny pracy, przedstawiony w rozdziale 2, został sformułowany jasno: opracowanie i zastosowanie modelu matematycznego do prognozowania konsekwencji zdrowotnych wynikających z sedentarnego stylu życia w obrębie narządu ruchu. Uważam, że cel ten mieści się w ramach dziedziny inżynierii biomedycznej i odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim pod względem oryginalności i znaczenia naukowego. Cele

szczegółowe, sformułowane jako konkretne pytania badawcze, odnoszą się bezpośrednio do wybranych aspektów stylu życia, takich jak obniżona aktywność ruchowa, zwiększona masa ciała, zmiany w strukturze i funkcji mięśni oraz zachwianie stabilności posturalnej. Pytania te mają charakter interdyscyplinarny i dobrze wpisują się w nowoczesne podejście do analizy zdrowia populacyjnego. W mojej opinii, w pracy znalazło się kilka **luk metodologicznych**, na które chciałbym zwrócić uwagę. W pracy, **zabrakło** pokuszenia się przez Autorkę o pytania uszczegóławiające eksplorowaną tematykę. Idealne byłoby nawet sformułowanie **hipotez badawczych** przy każdym z realizowanych podzadań rozdziału 3 i 4. Choć Autorka wyraźnie określa cel główny oraz cele etapowe, to jednak nie decyduje się na sformułowanie hipotez, które mogłyby ukierunkować interpretację wyników i zwiększyć siłę dowodową uzyskanych danych. W szczególności, przy tak zróżnicowanych eksperymentach – jak pomiar aktywności fizycznej, ocena równowagi posturalnej, analiza składu ciała czy badanie grubości mięśni – naturalne byłoby zadanie pytania badawczego lub sformułowanie hipotezy statystycznej, np.: „Czy osoby prowadzące sedentarny styl życia mają istotnie niższą grubość mięśnia m. rectus femoris niż osoby aktywne?" albo „Czy długość fazy podparcia podczas chodu różni się między grupą SSŻ a ASŻ?". Takie pytania i hipotezy mogłyby nadać badaniom większą strukturę logiczną i klarowniej prowadzić od obserwacji do wniosków.

Z treści rozdziału 3 wynika, że każde z 8. zadań badawczych opiera się na analizie różnic pomiędzy dwiema grupami: osobami prowadzącymi sedentarny styl życia (SSŻ) oraz osobami aktywnymi (ASŻ). W wielu przypadkach wyniki przedstawione są w postaci statystyki opisowej (średnie, odchylenia standardowe) oraz wartości testu istotności statystycznej. Jednakże, w mojej ocenie, **przeprowadzenie analiz statystycznych wymaga większej transparentności**. W szczególności, nie zawsze wiadomo, jaki test został użyty do porównania grup – test t-Studenta / test U Manna–Whitneya. Autorka często podaje jedynie wartość p, nie wspominając o tym, **czy założenia normalności rozkładu i homogeniczności wariancji zostały sprawdzone**, ani w jaki sposób to zrobiono. Brakuje również opisu zastosowanych procedur przy podejmowaniu decyzji o wyborze testu – co znacznie utrudnia ocenę poprawności metodologicznej. Jako przykład można wskazać dane zawarte na Ryc. 3.9, gdzie zaprezentowano liczebność grup SSŻ i ASŻ osobno w każdym z podeksperymentów. Wynika z niej, że badanie objęło 28 osób w grupie SSŻ i 31 w grupie ASŻ. Jednak już w odniesieniu do pozostałych eksperymentów (np. testy siły mięśniowej, analiza postawy czy USG mięśni) nie wiadomo, czy skład grup był ten sam, czy odmienny – a jeśli tak, to w jakim zakresie. Nie do końca także wiadomo, czy **płeć** osób badanych była we wszystkich eksperymentach brana pod uwagę i w jaki sposób wpłynęła na ostateczny wynik prac modelowych. W konsekwencji nie wiadomo, czy dane w kolejnych eksperymentach są zależne, a więc możliwe do ujęcia w analizie powtarzanych pomiarów, czy też mają charakter niezależnych obserwacji, wymagających innych testów i modeli. Zabrakło również informacji o procedurach dotyczących **doboru wielkości próby** dla każdego z podzadań (lub całego eksperymentu łącznie). Uważam, że byłoby uzasadnione, aby Autorka przedstawiła, czy oszacowano moc testów, jakie przyjęto założenia statystyczne i czy próby były wystarczające, by wykryć

zakładany efekt i jaka była siła tego efektu (lub choćby wilekość „minimalnie wykrywalnej zmiany" (MDC) na założonym poziomie ufności). Tego rodzaju szczegóły metodologiczne są istotne nie tylko dla poprawności analiz, ale też dla interpretacji siły i wiarygodności uzyskanych wniosków – a przecież jakość i wiarygodność danych wejściowych ma olbrzymie znaczenie w modelowaniu. Podsumowując ten wątek metodologiczny, w mojej opinii, ze względu na możliwe współzależności między analizowanymi zmiennymi oraz fakt, że niektóre osoby mogły brać udział w więcej niż jednym podeksperymncie, warto byłoby rozważyć, zamiast prostej analizy istotności różnic, użycie bardziej zaawansowanych metod wnioskowania, takich jak analiza wariancji (ANOVA) z powtarzanymi pomiarami, analiza kowariancji (ANCOVA), a w przypadku większej liczby zmiennych – także MANOVA. Przy danych niespełniających założeń parametrów klasycznych, można byłoby również zastosować permutacyjną analizę wariancji (PERMANOVA) lub modele mieszane (LMM), które lepiej uwzględniają złożoność struktury danych. Ze względu na brak jawnego opisu sposobu wyboru testów statystycznych, ich parametrów oraz charakterystyki prób w poszczególnych zadaniach, ocena adekwatności zastosowanej analizy pozostaje dlatego – jedynie SUGESTIĄ recenzenta. Wnioskując bowiem z samej prezentacji wyników, można sądzić, że analizy były poprawnie wykonane, a jedynie ich przejrzystość i weryfikowalność wymagają uzupełnienia.

Z zaprezentowanej w tym samym rozdziale tabeli planu pracy wynika, że Autorka konsekwentnie rozdzieliła projekt na dwa etapy: badania doświadczalne i badania modelowe. Taki podział jest nie tylko uzasadniony merytorycznie, ale także praktycznie – pozwala bowiem oddzielnie analizować wyniki empiryczne i ich implikacje symulacyjne. Uważam, że zaprezentowany schemat postępowania badawczego świadczy o dużej świadomości metodologicznej Doktorantki.

Realizacja celu głównego oparta została na ośmiu zróżnicowanych zadaniach badawczych opisanych w rozdziale 3. Każde z nich skupia się na innym wymiarze wpływu siedzącego trybu życia – od liczby kroków i pomiarów postawy ciała, przez analizę siły mięśniowej i gęstości mineralnej kości, po badania morfologii mięśni przy pomocy USG. W mojej ocenie tak szeroki zakres analiz pozwala na kompleksowe ujęcie problemu, choć – jak już wcześniej wspomniałem – brakuje wyraźnego powiązania między poszczególnymi zadaniami. Utrudnia to bowiem pełną ocenę statystycznej spójności danych, a tym samym ogranicza możliwość syntetycznej interpretacji wyników empirycznych na poziomie całej populacji badanej.

W rozdziale 4 opisano drugi etap pracy, który polegał na budowie i wykorzystaniu modelu matematycznego do analizy obciążeń w układzie mięśniowo-szkieletowym człowieka. Modele te zostały stworzone w środowisku AnyBody i odwzorowywały różne warunki funkcjonowania – w tym zmienność masy ciała, siły mięśni oraz postawy. Uważam, że integracja danych empirycznych z symulacją komputerową stanowi istotny wkład pracy w rozwój dziedziny, gdyż łączy perspektywę kliniczną i inżynierską w jednym podejściu badawczym.

4. MATERIAŁ I METODY

W mojej ocenie Autorka rozprawy z dużą starannością zaplanowała i przeprowadziła badania, dzieląc je na dwa wyraźnie oddzielone etapy: badania doświadczalne oraz modelowanie matematyczne. Każdy z tych etapów został opisany w sposób szczegółowy, a dobór metod wydaje się w większości przypadków trafny i dostosowany do celów badawczych.

W części doświadczalnej (rozdział 3) zastosowano imponujący szereg nowoczesnych narzędzi i metod pomiarowych, w tym platformy Zebris FDM-S i Zebris Spine, systemy ultrasonograficzne do pomiaru morfologii mięśni, analizator składu ciała InBody 270, densytometr DXA oraz opaski typu smartband do oceny aktywności fizycznej. Autorka uzyskała dostęp do szerokiego zestawu danych fizjologicznych, funkcjonalnych i morfometrycznych. Zastosowano również odpowiednie narzędzia statystyczne, jednak – jak już wcześniej wspomniałem – nie zawsze wiadomo, czy i jak sprawdzono założenia normalności rozkładu i homogeniczności wariancji. Brakuje również informacji o doborze konkretnych testów statystycznych przy analizie każdego z wyników, co utrudnia ocenę rzetelności analiz.

Jak wspomniano wcześniej, z opisu w rozdziale 2 wynika, że w badaniach uczestniczyły osoby w wieku ok. 21–34 lat (Ryc.3.1 lub 3.9), które zostały przyporządkowane do dwóch grup: prowadzącej sedentarny styl życia (SSŻ) i grupy aktywnej (ASŻ). Uważam jednak, że informacje o strukturze prób badawczych w opisanych etapach badawczych są niewystarczające – nie wiadomo, czy w poszczególnych podzadaniach uczestniczyły dokładnie te same osoby, jak wyglądał rozkład płci czy poziom aktywności fizycznej w ujęciu ilościowym. Brakuje także analizy mocy statystycznej oraz uzasadnienia liczebności prób w odniesieniu do projektowanej siły testów.

W części modelowej (rozdział 4) Autorka wykorzystała środowisko AnyBody Modeling System, budując serię modeli odwzorowujących funkcjonowanie układu mięśniowo-szkieletowego w różnych scenariuszach posturalnych i funkcjonalnych. Modele zostały oparte na rzeczywistych danych empirycznych i posłużyły do analizy przeciążeń w stawach, aktywacji mięśniowej oraz momentów sił działających w trakcie pozycji statycznych i ruchów funkcjonalnych, takich jak siadanie, wstawanie, stanie i chód. W mojej ocenie jest to silna strona pracy, ukazująca umiejętność łączenia podejścia inżynierskiego z danymi klinicznymi. Zabrakło jednak pełniejszego opisu procesu walidacji modelu, a także szerszego uzasadnienia przyjętych parametrów wejściowych i ograniczeń zastosowanych uproszczeń.

Ostatecznie uważam, że Autorka posługuje się poprawnym i innowacyjnym warsztatem badawczym, adekwatnym do specyfiki inżynierii biomedycznej. Zastosowane narzędzia i techniki są nowoczesne i powszechnie uznawane, jednak warto byłoby rozbudować część metodologiczną o pełniejsze dane dotyczące planu analizy statystycznej, struktury próby oraz modelu eksperymentalnego.

5. WYNIKI I ICH PREZENTACJA

W mojej ocenie wyniki przedstawione w rozprawie zostały zaprezentowane w sposób przejrzysty i spójny z przyjętym planem badawczym. Autorka w obu częściach badania – eksperymentalnej i modelowej – konsekwentnie stosuje podział tematyczny odpowiadający przyjętym wcześniej zadaniom badawczym. W prezentacji wyników dominuje forma opisowa, wsparta tabelami i rycinami, które ilustrują różnice między grupami SSŻ i ASŻ. Dane są zazwyczaj prezentowane jako średnie arytmetyczne wraz z odchyleniem standardowym oraz podawanymi wartościami istotności statystycznej. Warto jednak zaznaczyć, że – jak wspomniano wcześniej – nie podano pełnych informacji o doborze testów statystycznych oraz sposobie sprawdzania ich założeń.

W części eksperymentalnej, zawartej w rozdziale 3, Autorka prezentuje wyniki ośmiu zadań badawczych dotyczących różnych wymiarów wpływu sedentarnego stylu życia na układ ruchu. Przedstawiono m.in. wyniki dotyczące liczby kroków dziennych, składu ciała, stabilności posturalnej, długości faz chodu, siły mięśniowej, grubości mięśni uda czy gęstości mineralnej kości. W mojej ocenie uzyskane wyniki potwierdzają zasadność przyjętej hipotezy ogólnej – osoby prowadzące siedzący tryb życia wykazują wyraźnie gorsze parametry biomechaniczne i funkcjonalne w porównaniu z osobami aktywnymi. Różnice te są statystycznie istotne w wielu przypadkach, np. w zakresie siły chwytu ręki, grubości mięśnia czworogłowego uda czy długości fazy podporowej w chodu. Autorka podjęła próbę interpretacji wyników w odniesieniu do istniejących danych literaturowych i w wielu miejscach odwołuje się do aktualnych badań, co uważam za cenne. Mimo to, uważam, że w niektórych podzadaniach **zabrakło głębszej refleksji nad potencjalnymi czynnikami zakłócającymi** (confounders), takimi jak poziom aktywności/wytrenowania, masa ciała, różnice płciowe, czy styl życia poza aktywnością ruchową (np. dieta i nawyki żywieniowe, sen i regeneracja, poziom stresu i zdrowie psychiczne, używki). Co szczególnie istotne, prezentacja wyników nie zawiera informacji o wielkości efektu (effect sizes) lub MDC, które pozwalałyby lepiej ocenić siłę obserwowanych różnic. Skupienie się wyłącznie na wartościach istotności statystycznej $p < 0,05$, bez osadzenia wyników w kontekście praktycznym lub klinicznym, ogranicza wartość aplikacyjną analizy. Uważam również, że brakuje skonsolidowanych analiz łączących wyniki z różnych zadań – na przykład w formie modeli regresji lub analizy korelacyjnej – co mogłoby pozwolić na wykrycie zależności między zmiennymi, a nie tylko różnic między grupami. Biorąc jednak pod uwagę, że badania eksperymentalne miały stanowić wstępny etap pozyskania danych wejściowych dla stosowanego modelu biomechanicznego, uważam, że nie jest to duży mankament pracy.

W części modelowej, opisanej w rozdziale 4, przedstawiono wyniki obliczeń wykonanych w środowisku AnyBody Modeling System. Modele obejmowały scenariusze związane ze zmianą masy ciała, postawy ciała, osłabieniem siły mięśniowej oraz modyfikacją poziomu aktywności fizycznej – na podstawie wcześniej pozyskanych danych. Obciążenia stawów, siły reakcji podłoża i aktywacja mięśniowa zostały obliczone dla pozycji siedzącej, stojącej oraz podczas

wykonywania czynności funkcjonalnych życia codziennego. Uważam, że prezentacja wyników modelowania została przeprowadzona rzetelnie, pokazując konkretne mechanizmy przeciążeniowe towarzyszące „sedentarności". Na przykład, wskazano zwiększone momenty sił w stawie biodrowym i kolanowym przy wzroście masy ciała lub spadku siły mięśni.

Mimo to, również tutaj widoczna jest pewna izolacja danych modelowych od danych empirycznych. Nie zostało jednoznacznie pokazane, w jaki sposób wyniki modelowania odnoszą się do konkretnych wartości zaobserwowanych w badaniach eksperymentalnych – czy są zgodne, sprzeczne, czy komplementarne. Uważam, że możliwość porównania wyników symulacji z danymi rzeczywistymi w sposób bardziej ilościowy (np. poprzez walidację modelu) byłaby dużym atutem tej pracy. Brakuje również informacji o dokładności modeli, błędach numerycznych oraz czułości parametrów wejściowych. Myślę, że to elementy, które są istotne dla oceny wiarygodności i użyteczności modelowania w kontekście predykcji aspektów zdrowotnych związanych z sedentarnym stylem życia.

Mimo tych niedociągnięć, uważam, że wyniki prezentowane w rozprawie stanowią wartościowy wkład w analizę skutków sedentarnego stylu życia i wnoszą istotny wkład naukowy do obszaru biomechaniki i inżynierii biomedycznej związanej ze zdrowiem człowieka.

6. DYSKUSJA ORAZ IMPLIKACJE TEORETYCZNE I PRAKTYCZNE

W mojej ocenie dyskusja wyników została przeprowadzona w sposób rzetelny, a jej mocną stroną jest konsekwentne odniesienie wyników badań do literatury przedmiotu. Autorka przywołuje wiele aktualnych i trafnie dobranych źródeł, głównie anglojęzycznych, z renomowanych czasopism naukowych. W wielu fragmentach pracy podjęto próbę nie tylko zestawienia własnych danych z wynikami innych autorów, ale także wyjaśnienia możliwych przyczyn zaobserwowanych różnic, co świadczy o dojrzałości naukowej i dobrej orientacji w temacie. Takie podejście uważam za bardzo wartościowe, szczególnie w pracach interdyscyplinarnych, gdzie dane empiryczne wymagają kontekstu teoretycznego oraz praktycznego.

Dyskusja została poprowadzona odzielnie dla każdego z podzadań i dotyczy konkretnych aspektów funkcjonowania układu ruchu. Na koniec każdego etapu Autorka formułuje cząstkowe wnioski, co pozwala uporządkować tok myślenia i zrozumieć, jakie znaczenie mają poszczególne obserwacje. Uważam, że taka struktura sprzyja przejrzystości, jednak – jak wspomniano wcześniej - pewnym mankamentem pozostaje **brak szczegółowych pytań badawczych lub hipotez**, które można byłoby naukowo zweryfikować. W mojej opinii, sformułowanie hipotez – nawet na poziomie poszczególnych zadań – mogłoby znacząco wzmocnić strukturę logiczną pracy oraz jej wartość naukową. Na uznanie zasługuje natomiast fakt, że Autorka dostrzega praktyczne konsekwencje uzyskanych wyników. Wnioski nie ograniczają się do sformułowań teoretycznych – wskazano także, jak dane zebrane w ramach eksperymentu oraz wyniki modelowania mogą posłużyć w przyszłości w programowaniu interwencji fizjoterapeutycznych, edukacji zdrowotnej czy modelowaniu

ryzyka przeciążeń narządu ruchu. To świadczy o trafnym powiązaniu badań podstawowych z potrzebami praktyki klinicznej, co w obszarze inżynierii biomedycznej ma szczególne znaczenie. W mojej ocenie także wnioski etapowe oraz wnioski końcowe, zamieszczone na końcu rozprawy, stanowią poprawne podsumowanie przeprowadzonych badań i syntetycznie podsumowują uzyskane rezultaty. Są sformułowane w sposób uporządkowany i korespondują z przyjętym na wstępie planem pracy. Jednak, uważam, że w podsumowaniu warto byłoby zwrócić także krytyczną uwagę na ograniczenia wynikające z przyjętej metodologii lub inne czynniki, które wpłynęły na jakość uzyskanych wyników.

Podsumowując, uważam, że dyskusja w rozprawie jest solidna, dobrze udokumentowana literaturowo i odpowiednio prowadzona tematycznie. Największym atutem jest jej PRAKTYCZNY wydźwięk oraz systematyczne odnoszenie się do źródeł naukowych. Mimo drobnych uwag, całość prezentuje wysoki poziom naukowy i stanowi wartościowy punkt wyjścia do dalszych badań stosowanych i eksperymentalnych.

7. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Hanny Zadoń stanowi kompleksowe i interdyscyplinarne opracowanie problematyki wpływu sedentarnego stylu życia na układ mięśniowo-szkieletowy człowieka. W mojej opinii, praca łączy wartościowe dane empiryczne z nowatorskim podejściem inżynierskim, wykorzystującym zaawansowane modelowanie biomechaniczne. Dobór tematyki jest w pełni uzasadniony, a jej znaczenie aplikacyjne dla medycyny ,rehabilitacji, profilaktyki zdrowotnej i inżynierii biomedycznej nie budzi wątpliwości.

Pomimo wskazanych wcześniej ograniczeń – głównie związanych z brakiem hipotez cząstkowych, niepełnym opisem struktury prób oraz niedostatecznie udokumentowaną analizą statystyczną – całość pracy należy ocenić jako wartościową, rzetelną i samodzielnie wykonaną. Autorka wykazała się dobrą znajomością literatury, umiejętnością projektowania i realizacji złożonego procesu badawczego oraz zdolnością wyciągania praktycznych wniosków z przeprowadzonych analiz.

W związku z tym, uważam że przygotowana przez magister Hannę Zadoń rozprawa doktorska **spełnia** warunki określone w art. 187 ustawy z dn. 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Należy podkreślić, że zarówno warsztat naukowy Doktorantki przedstawiony w rozprawie, aktualność problemu jak i prawidłowy dobór narzędzi badawczych pozwalających na jego rozwiązanie pozwala na złożenie wniosku do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynierii Biomedycznej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie, wnioskuję o **wyróżnienie** rozprawy ze względu na jej wysoką wartość naukową, nowoczesność zastosowanych metod oraz potencjał praktyczny, który może mieć realne znaczenie w prewencji skutków sedentarnego stylu życia człowieka.

Sławomir Winiarski