Prof. dr hab. inż. Jolanta Pauk
Politechnika Białostocka
Instytut Inżynierii Biomedycznej

Białystok, 02.04.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Hanny Zadoń
„Model matematyczny prognozowania konsekwencji zdrowotnych w obrębie układu szkieletowo-mięśniowego w wyniku sedentarnego stylu życia"

Recenzję opracowano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna prof. dr. hab. inż. Roberta Michnika z dnia 28.03.2025 r. Praca doktorska została przygotowana pod opieką naukową promotora prof. dr. hab. inż. Roberta Michnika. Promotorem pomocniczym była dr inż. Katarzyna Nowakowska-Lipiec.

1. Ocena układu rozprawy doktorskiej i formalnej strony

Recenzowana praca ma objętość 201 stron i składa się z sześciu rozdziałów, które poprzedza wykaz oznaczeń, a całość wieńczy streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis literatury. Doktorantka przestudiowała i zacytowała odpowiednią liczbę źródeł bibliograficznych - 314 pozycji, w tym publikacje których jest współautorką w liczbie 11. Jest to dowód na odpowiednią wiedzę teoretyczną i dobrą orientację w zakresie zagadnień będących przedmiotem rozprawy doktorskiej.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Temat pracy jest zarówno aktualny, jak i istotny dla rozwoju inżynierii biomedycznej, doskonale wpisując się w priorytetowe kierunki badań tej dyscypliny. Siedzący tryb życia stanowi coraz poważniejsze wyzwanie dla zdrowia publicznego. Systematyczne ograniczanie aktywności fizycznej nie tylko zwiększa ryzyko rozwoju chorób przewlekłych (w tym schorzeń układu sercowo-naczyniowego i otyłości), ale także prowadzi do dysfunkcji układu mięśniowo-szkieletowego, manifestujących się dolegliwościami bólowymi i ograniczeniem sprawności ruchowej. W kontekście postępującej digitalizacji i automatyzacji procesów pracy, które sprzyjają utrwalaniu siedzącego stylu życia, niezbędne staje się wdrożenie kompleksowych strategii profilaktycznych. Innowacyjne rozwiązania technologiczne, w tym inteligentne systemy monitorowania postawy ciała w czasie rzeczywistym, oferują nowe możliwości wczesnego wykrywania nieprawidłowości, prewencji zaburzeń układu ruchu oraz edukacji użytkowników poprzez natychmiastową informację zwrotną o błędach postawy.

Rozdział 1 stanowi przegląd literatury dotyczącej konsekwencji zdrowotnych siedzącego trybu życia. Autorka trafnie identyfikuje kluczowe zależności między sedentarnym stylem życia a zwiększonym ryzykiem rozwoju chorób przewlekłych, w tym schorzeń układu sercowo-naczyniowego, otyłości oraz zaburzeń funkcjonowania układu mięśniowo-szkieletowego.

Przedstawione dane epidemiologiczne przekonująco obrazują skalę problemu we współczesnych społeczeństwach.

Rozdział 2 przedstawia cel i zakres rozprawy. Głównym celem pracy jest prognozowanie konsekwencji zdrowotnych siedzącego trybu życia w obrębie układu mięśniowo-szkieletowego, na podstawie wyników badań modelowych oraz longitudinalnych badań doświadczalnych dotyczących funkcjonowania narządu ruchu.

Rozdział 3 poświęcony jest szczegółowej analizie wpływu sedentarnego stylu życia na funkcjonowanie narządu ruchu. Na szczególną uwagę zasługuje różnorodność zastosowanych metod badawczych, obejmujących między innymi analizę postawy ciała, badania stabilograficzne, badania chodu, densytometrię, ocenę siły mięśniowej dłoni oraz badania ultrasonograficzne. Tak szeroki zakres pomiarów świadczy o starannie przemyślanej konstrukcji badawczej i dążeniu autorki do pełnego zrozumienia konsekwencji stylu życia z ograniczoną aktywnością fizyczną. Dodatkowym atutem jest uwzględnienie monitorowania dziennej liczby kroków za pomocą smartbandów, co dostarczyło obiektywnych danych dotyczących rzeczywistego poziomu aktywności fizycznej uczestników. Pomiarom towarzyszyła analiza wpływu zmiennych zakłócających, takich jak płeć, wiek, pora roku czy dzień tygodnia, co czyniło analizę bardziej kompletną. Cennym uzupełnieniem były również dane ankietowe, które pozwoliły ocenić wpływ monitorowania na zachowania uczestników oraz ich motywację.

Badanie składu ciała przeprowadzono z wykorzystaniem wagi Mi Body Composition Scale 2. Zaletą tego podejścia była możliwość zdalnego zbierania danych dzięki integracji z aplikacją Mi Fit, umożliwiającej automatyczną synchronizację pomiarów, co ułatwiło regularne i nieselektywne raportowanie wyników. Trafnym rozwiązaniem była również segmentacja badanych według kierunku zmian aktywności i masy ciała (cztery grupy trendów), co umożliwiło uchwycenie subtelnych zależności pomiędzy tymi zmiennymi, często niedostrzegalnych w klasycznych podziałach opartych jedynie na stylu życia. Mimo licznych atutów, badanie to posiada pewne ograniczenia. Po pierwsze, sześciomiesięczny okres obserwacji może być zbyt krótki, by w sposób wiarygodny ocenić zmiany w składzie ciała, zwłaszcza że procesy te są powolne i zależne od wielu czynników. Po drugie, mimo zadbania o standaryzację pomiarów (np. wykonywanie ich o tej samej porze dnia), nie odniesiono się do innych potencjalnych zmiennych zakłócających, takich jak spożycie płynów, cykl hormonalny itp., które w warunkach domowych mogą być obarczone błędem.

Część pracy poświęcona analizie postawy ciała, równowagi oraz parametrów chodu została opracowana w sposób metodycznie przemyślany. Uzupełnienie tej części o analizę posturalną górnych segmentów ciała, w tym odcinka szyjnego kręgosłupa, ustawienia głowy czy napięcia w obrębie barków, mogłoby wzbogacić interpretację danych. Warto rozważyć refleksję na temat ograniczeń metody Zebris, która mimo swojej zaawansowanej technologii, może być podatna na chwilowe zmiany wynikające z napięcia mięśniowego, zmęczenia lub sposobu wykonania instrukcji przez uczestnika. Również badania stabilograficzne wykonane za pomocą platformy Zebris FDM zostały zaprezentowane w sposób kompleksowy. Autorka trafnie podkreśla brak istotnych różnic pomiędzy grupami, wskazując potencjalne przyczyny, takie jak niewystarczające wyzwanie dla układu równowagi czy młody wiek uczestników. Włączenie do analizy zadań dynamicznych lub testów z zakłóconą bazą podparcia pozwoliłoby na pełniejsze uchwycenie zdolności kontroli posturalnej i poszerzyłoby zakres wniosków. W odniesieniu do oceny chodu, analiza została przedstawiona szczegółowo z uwzględnieniem takich parametrów jak długość kroku, tempo chodu, czas fazy podporowej i wymachowej, częstotliwość kroków oraz całkowita prędkość poruszania się. Dzięki temu uzyskano kompleksowy obraz funkcji lokomocyjnych badanych, który spójnie wpisuje się w ogólną koncepcję rozprawy i umożliwia ocenę praktycznych skutków sedentarnego stylu życia.

Badania gęstości kości wykazały brak istotnych statystycznych różnic pomiędzy osobami prowadzącymi siedzący tryb życia a osobami aktywnymi fizycznie. Taki wynik sugeruje, że zwiększenie liczby kroków w ciągu dnia, w okresie trwania badania, nie miało istotnego wpływu na gęstość kości. Warto jednak podkreślić, że badanie uwzględniało wyłącznie sumaryczną liczbę kroków w ciągu dnia, co może stanowić jedno z głównych ograniczeń tego badania. Brak uwzględnienia intensywności aktywności fizycznej oraz rodzaju wykonywanego wysiłku może tłumaczyć brak zaobserwowanych różnic. Ponadto, czas trwania badania (rok) mógł być zbyt krótki, by zauważyć jakiekolwiek zmiany w gęstości kości. Istnieje bowiem wiele badań sugerujących, że zmiany w strukturze kości wynikające z regularnej aktywności fizycznej stają się widoczne dopiero po kilku latach, zwłaszcza przy intensywniejszym wysiłku.

Badanie siły ścisku dłoni dostarczyło istotnych wniosków na temat wpływu aktywności fizycznej na siłę mięśniową. Wyniki wskazują na wyraźny wzrost siły ścisku u osób prowadzących aktywny styl życia, z średnim wzrostem o około 10% zarówno dla prawej, jak i lewej dłoni. To sugeruje, że umiarkowana aktywność fizyczna może mieć pozytywny wpływ na siłę mięśniową, co jest istotnym elementem w kontekście profilaktyki osłabienia mięśni związanego z wiekiem. Doktorantka przeanalizowała również wpływ siedzącego trybu życia na morfologię wybranych mięśni szkieletowych oraz grubość tkanki tłuszczowej, wykorzystując ultrasonografię. Procedury pomiarowe zostały odpowiednio wystandaryzowane, zgodnie z dobrymi praktykami diagnostyki obrazowej mięśni.

Rozdział 4 przedstawia analizę funkcjonowania układu mięśniowego podczas wykonywania podstawowych czynności dnia codziennego, przeprowadzoną na podstawie symulacji komputerowych w środowisku AnyBody Modeling System. Przeprowadzone symulacje wykazały znaczne zwiększenie obciążeń kręgosłupa w pozycji siedzącej, co zostało potwierdzone zarówno analizą statystyczną wyników, jak i porównaniem z literaturą przedmiotu. Dodatkowym walorem jest uwzględnienie korelacji pomiędzy parametrami postawy a obciążeniami stawów, co pozwala lepiej zrozumieć mechanizmy powstawania przeciążeń. Warto również zwrócić uwagę na szczegółową analizę aktywności mięśniowej z podziałem na grupy funkcjonalne mięśnia prostownika grzbietu oraz mięśni brzucha. Nie sposób jednak pominąć pewnych ograniczeń. Po pierwsze, przyjęte uproszczenia modelowe, takie jak symetryczność ciała, uproszczony model mięśniowy (AnyMuscleModel) czy modelowanie postawy na podstawie jedynie dwóch kątów, mogą wpłynąć na precyzję wyników. Rzeczywiste obciążenia, zwłaszcza w warunkach dynamicznych, mogą być bardziej złożone.

Badania dotyczące wpływu prognozowanego wzrostu BMI na obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego podczas codziennych czynności (takich jak stanie i siadanie) bazują na solidnej podstawie literaturowej oraz nowoczesnym podejściu modelowym, wykorzystującym dane epidemiologiczne z NCD Risk Factor Collaboration oraz narzędzia symulacyjne AnyBody Modeling System. Jednakże, choć użycie danych kinematycznych zebranych w badaniach doświadczalnych (Nowakowska-Lipiec i in.) jest cennym krokiem, brak dokładniejszego uzasadnienia wyboru tych danych oraz wyjaśnienia, w jaki sposób odnoszą się one do różnych grup demograficznych (np. Polaków, Europejczyków, mężczyzn), ogranicza wiarygodność uzyskanych wyników. Warto byłoby szczegółowo wyjaśnić, dlaczego akurat te dane zostały wybrane do modelowania, co mogłoby wzmocnić transparentność metodologii. Ponadto, symulacje oparte na uśrednionych wartościach dla 30-osobowej grupy badanych mogą nie odzwierciedlać pełnej zmienności populacyjnej, co potencjalnie wpłynęłoby na dokładność prognoz. Prezentacja wyników symulacji (np. zmiany obciążeń w stawach L5-S1, biodrowym, kolanowym) jest obszerną i dobrze opracowaną częścią pracy, jednak sposób ich przedstawienia może wydawać się nieco chaotyczny. Zdecydowanie warto byłoby, aby Doktorantka bardziej szczegółowo omówiła wpływ poszczególnych zmian BMI

na funkcjonowanie konkretnych elementów układu mięśniowo-szkieletowego, np. jak zmiany w obciążeniach przekładają się na długoterminową wytrzymałość mięśni i stawów.

Do oceny wpływu zmiany masy ciała na zdolność wykonywania podstawowych czynności dnia codziennego (takich jak stanie, siadanie i wstawanie z krzesła, trzymanie 10 kg i 20 kg przedmiotów, podnoszenie 10 kg i 20 kg przedmiotów ze stołu oraz chód) Doktorantka zastosowała dwa uznane modele biomechaniczne (StandingModel oraz GaitFullBodyModel) oraz rzeczywiste dane kinematyczne i dynamiczne zebrane od 30 dorosłych osób. Jednakże przyjęte uproszczenia, zwłaszcza założenie symetryczności ciała oraz niezmienności kinematyki w zależności od masy ciała, znacząco ograniczają trafność i realizm symulacji. W rzeczywistości osoby o różnej masie ciała, szczególnie osoby otyłe, poruszają się w odmienny sposób, często przyjmując kompensacyjne strategie ruchowe. Zignorowanie tych różnic może prowadzić do zaniżenia lub zawyżenia wartości przeciążeń mięśniowych w niektórych warunkach. Kolejnym mankamentem jest ocena czynności na podstawie pojedynczych momentów czasowych, np. ostatnia chwila przed kontaktem z siedziskiem czy moment oderwania ciała. Takie podejście upraszcza biomechaniczne realia i pomija dynamikę całego ruchu, co może prowadzić do mylących wniosków. Ruch jest procesem ciągłym, a nie zbiorem statycznych „klatek", dlatego jego analiza powinna uwzględniać przebieg czasowy i zmiany w czasie, a nie tylko momenty w określonych punktach. Wreszcie, Doktorantka nie uwzględnia różnorodności anatomicznej i fizjologicznej badanych. Wszystkie symulacje oparte są na jednej sylwetce referencyjnej (173 cm, 62 kg), której masa została skalowana. Pominięcie różnic w proporcjach ciała, rozmieszczeniu tkanki tłuszczowej czy indywidualnych cech biomechanicznych ogranicza możliwość uogólnienia wyników do szerszej populacji.

Badanie wpływu zmiany masy ciała oraz zdolności siłowych na możliwość wykonywania podstawowych czynności dnia codziennego stanowi cenny wkład w tematykę. Zastosowany model zmiany siły mięśniowej, oparty na wcześniejszych badaniach Wang i in., stanowi solidną podstawę i wnosi wartościowe podejście. Pokazuje on, jak spadek siły mięśniowej, będący częścią procesu starzenia się oraz wynikiem siedzącego trybu życia, może prowadzić do trudności w wykonywaniu codziennych aktywności, mimo utrzymania prawidłowej masy ciała. Choć model oparty na badaniach Wang i in. jest uznawany za solidny fundament, brak dokładniejszych danych dotyczących rzeczywistego wpływu siedzącego trybu życia na siłę mięśniową może powodować pewny margines błędu w uzyskanych wynikach symulacji.

W odniesieniu do wpływu zmiany postawy ciała na funkcjonowanie układu mięśniowo-szkieletowego wykorzystano dane populacyjne z pracy Hu i in., wprowadzając do symulacji średnie wartości takich parametrów, jak: kąt nachylenia miednicy (PT), strzałkowa oś pionowa (SVA) oraz kąt zgięcia stawu kolanowego (KFlex). Uwzględniono podział na płeć oraz przedziały wiekowe (dekadowe). Szczególnie istotnym elementem była symulacja w czterech wariantach, co pozwoliło na wyodrębnienie wpływu poszczególnych zmiennych na badane parametry biomechaniczne. Uzyskane wyniki mają duże znaczenie nie tylko dla lepszego zrozumienia procesów starzenia się układu ruchu, ale również dla profilaktyki schorzeń wynikających z siedzącego trybu życia oraz projektowania skutecznych strategii rehabilitacyjnych. Niemniej jednak, modelowanie ograniczono wyłącznie do postawy stojącej. Aby uzyskać pełniejsze zrozumienie wpływu siedzącego trybu życia na biomechanikę układu ruchu, należałoby rozszerzyć badania także o pozycję siedzącą, chód oraz przejścia między postawami.

Celem określenia wpływu aktywności fizycznej na funkcjonowanie układu mięśniowo-szkieletowego zastosowano system Qualisys, platformy dynamometryczne Kistler oraz proces symulacji w środowisku AnyBody Modeling System. Istotnym atutem jest uwzględnienie w analizie wielu zmiennych (takich jak wiek, płeć i poziom aktywności fizycznej), co umożliwia wyciąganie bardziej złożonych i wielowymiarowych wniosków. Najistotniejszym niedociągnięciem jest brak odniesienia do analizy statystycznej; nie wiadomo, czy

obserwowane różnice pomiędzy grupami są istotne statystycznie, co podważa wiarygodność wysuwanych wniosków. Ponadto, mimo zastosowania 48 markerów w eksperymencie, do symulacji wykorzystano jedynie 32. Decyzja ta nie została odpowiednio uzasadniona, co może budzić wątpliwości co do pełnego odwzorowania ruchu.

Rozdział 5 zawiera syntetyczne podsumowanie wyników uzyskanych w całej pracy doktorskiej, natomiast kierunki dalszych badań omówiono w rozdziale szóstym.

Poniżej przedstawiam kluczowe zagadnienia, które, zgodnie z przyjętymi standardami akademickimi, powinny stanowić przedmiot merytorycznej dyskusji podczas obrony pracy doktorskiej:

1. Czy 12 miesięcy to wystarczający okres, aby w pełni ocenić długoterminowe konsekwencje siedzącego trybu życia na układ mięśniowo-szkieletowy? Jakie argumenty mogłaby Pani przedstawić, aby uzasadnić wybór tego okresu badawczego?
2. Brak informacji o losowości doboru próby – nie jest jasne, czy rekrutacja miała charakter przypadkowy. Jak dobór próby wpływa na uogólnienie wyników? Wydaje się, że grupa została dobrana metodą convenience sampling, co warto byłoby wyraźnie zaznaczyć.
3. Brakuje informacji na temat konstrukcji i walidacji ankiet. Jakie kroki podjęto, by zapewnić wiarygodność danych uzyskanych z kwestionariuszy?
4. Wyniki wskazują, że osoby powyżej 40. roku życia miały wyższy poziom aktywności fizycznej. Czy można rozwinąć interpretację tego zjawiska, np. w kontekście większej świadomości zdrowotnej czy zmiany stylu życia w tej grupie wiekowej?
5. Czy przeprowadzono walidację danych z opasek (np. porównanie wyników z innymi narzędziami, np. krokomierzem medycznym), by sprawdzić ich dokładność?
6. W pracy nie podano konkretnych wartości zmiany kąta kifozy ani nachylenia miednicy (np. przed i po roku). Czy można podać dokładniejsze informacje na temat skali tych zmian, zamiast tylko odnosić się do tabel?
7. Badania uwzględniają jedynie sumaryczną liczbę kroków, co jest zbyt ogólnym parametrem. Dlaczego nie uwzględniono intensywności ani rodzaju aktywności fizycznej? Czy takie dane mogłyby uzupełnić obraz wpływu aktywności na gęstość kości?
8. Czy w ramach pracy uwzględniono wpływ długotrwałego siedzenia lub stania na zmiany obciążeń biomechanicznych, szczególnie w kontekście powszechnego stylu życia o charakterze sedentarnym?
9. Modelowanie zmiany BMI na podstawie danych z lat 1975–2015 w celu prognozowania na lata 2020–2050 może być uznane za ograniczone. Jakie czynniki zewnętrzne (np. zmiany w diecie, stylu życia) powinny być uwzględnione w prognozach zmiany BMI na przyszłość?
10. Jakie praktyczne implikacje mają wyniki przeprowadzonych badań, szczególnie w kontekście osób o niskiej aktywności fizycznej? Jakie zalecenia mogłyby zostać wprowadzone do społeczeństwa?
11. Choć aktywność badanych ograniczała się do chodzenia, pominięcie innych form aktywności (np. jazda na rowerze, ćwiczenia siłowe) może wpłynąć na niepełność oceny stylu życia. Czy rozważała Pani uwzględnienie innych aktywności fizycznych w badaniach?

W pracy zauważono liczne uchybienia edytorskie. Poniżej przedstawiono wybrane z nich:

- Czasem styl przypomina mowę potoczną (np. „czyli granicy wskazującej na…”). W pracach naukowych warto postawić na bardziej formalny język: „co odpowiada wartości granicznej…”.
- "Sedentarny" to zapożyczenie, lepiej: "siedzący tryb życia".
- "longituidalnych" – literówka, powinno być "longitudinalnych".
- "siedzący tryb życia uznano za czwartą przyczynę śmiertelności" - to czynnik ryzyka, nie bezpośrednia przyczyna.
- „zatrważające statystyki" – lepiej: "niepokojące dane statystyczne".
- "dietę mięsożerną", lepiej: "dietę tradycyjną (zawierającą mięso)".
- "Xiaomi Mi Band 5" - brak informacji o dokładności urządzenia.
- „w ciągu roku istotnie statystycznych zmian” , powinno być „w ciągu roku istotnych statystycznie zmian”.
- "Siłę chwytu można określić ilościowo" – bardziej naturalne brzmiałoby "Siłę chwytu można zmierzyć" lub "można określić jej wartość".
- „sedentarny styl życia” i „mało aktywny lub aktywny styl życia” – warto bardziej szczegółowo wyjaśnić różnice między tymi grupami. Przykładowo, można by doprecyzować, co dokładnie oznacza „mało aktywny” styl życia w odniesieniu do liczby kroków.
- Zamiast „różni się istotnie” warto pisać „różnica była statystycznie istotna ($p< 0,05$)”.
- „Odchylenie standardowe” często występuje przy liczbach, ale nie zawsze jest jasno oznaczone – dobrze byłoby ujednolicić sposób zapisu np. M ± SD.
- „lewy oraz prawy kąt górny grzebienia łopatki”, powinno być: *kąt górny łopatki (angulus superior scapulae).*
- „angelus interior spina scapular” – prawdopodobnie miało być *angulus superior scapulae.*
- Zamiast „punkt przejścia kręgosłupa piersiowego w lędźwiowy” powinno być połączenie Th12–L1.
- „...średnie wartości analizowanych parametrów w oby dwóch próbach...”, poprawnie: "obu próbach".
- „W przypadku pozostały parametrów...” – powinno być: „pozostałych parametrów”.
- „Wpływ upływu roku...” – niezgrabne stylistycznie, powinno być: „Wpływ upływu czasu” lub „Wpływ roku obserwacji”.
- Niekonsekwencja w zapisie znaków plus/minus, np. raz pojawia się zapis „+”, a raz „±” – tylko „±” jest poprawny w kontekście odchylenia standardowego.
- Brak jednostek lub ich niejednolity zapis, np. czasem jest „mm/sec”, a czasem „mm/s” – najlepiej trzymać się jednej wersji.
- Niekonsekwencje w liczbach dziesiętnych. Użyto zarówno kropki („3.60”) jak i przecinka („3,52”) – zaleca się konsekwentne użycie przecinka, zgodnie z polską normą.
- Błąd w zapisie jednostek miar: „2km/h” – powinno być zapisane z odstępem, czyli „2 km/h” (w języku polskim jednostki miar oddziela się spacją).
- Brak zgodności w zapisie procentów: „...faza rozpoczyna się w chwili kontaktu pięty z podłożem, a kończy, gdy palce topy odrywają się od podłoża, - 73 ”, lepszy zapis to: „faza rozpoczyna się w chwili kontaktu pięty z podłożem, a kończy, gdy

palce stopy odrywają się od podłoża – 73%.”. Przecinek w zdaniu jest zbędny, a „topy” to literówka, powinno być „stopy”.
- „pod katem 90°”. Poprawna forma to „kątem”.
- "mięsień był widoczny jako struktura hipoechogeniczne". Powinno być "struktura hipoechogeniczna".
- W kilku miejscach występuje niekonsekwencja w zapisie, np. raz skrót angielski w nawiasie (LAM), innym razem łaciński (TrA). Najlepiej ujednolicić styl zapisu.
- Na str. 92 znajduje się analiza wyników uzyskanych z pomiaru siły ścisku, a pojawiają się konkluzje dotyczące chodu.

3. Podsumowanie

Praca doktorska mgr inż. Hanny Zadoń, oparta na zaawansowanej analizie biomechanicznej i symulacjach komputerowych, stanowi cenny wkład w zrozumienie konsekwencji zdrowotnych w obrębie układu mięśniowo-szkieletowego w wyniku sedentarnego stylu życia. Należy jednak zauważyć, że pomimo starannie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, praca nie przekłada się w wystarczającym stopniu na konkretne rozwiązania praktyczne. Nie dostarcza nowych, praktycznych narzędzi, które mogłyby zostać wdrożone w codzienne życie w celu złagodzenia skutków siedzącego trybu życia. W przyszłości warto byłoby rozważyć wprowadzenie nowych form terapii, technologii wspomagających mobilność, a także interaktywnego podejścia do monitorowania postawy ciała w codziennym życiu. Zastosowanie nowych algorytmów predykcyjnych, opartych na danych z monitorowania ciała, które przewidywałyby ryzyko kontuzji lub degeneracji stawów na podstawie danych zbieranych w codziennym życiu, byłoby bardzo pożądane.

Chociaż całość pracy opiera się na dobrze znanych zagadnieniach, można wskazać oryginalny aspekt badawczy, który wyróżnia tę rozprawę. Jednym z bardziej nowatorskich elementów pracy jest zastosowanie badania longitudinalnego przez okres 12 miesięcy, co pozwoliło na uzyskanie długofalowych danych dotyczących skutków siedzącego trybu życia na układ mięśniowo-szkieletowy.

Podsumowując, praca stanowi solidne studium teoretyczno-metodologiczne, które wymaga jednak dalszych badań aplikacyjnych, by w pełni wykorzystać jej potencjał praktyczny. Doktorantka wykazała się znaczącymi kompetencjami badawczymi, które mogą stanowić podstawę do dalszych prac w kierunku wdrożeń klinicznych.

4. Wnioski końcowe

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Hanny Zadoń pt. "*Model matematyczny prognozowania konsekwencji zdrowotnych w obrębie układu szkieletowo-mięśniowego w wyniku sedentarnego stylu życia*" spełnia zarówno formalne, jak i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskimi zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. W związku z tym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Doktorantki do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.