

dr hab. inż. Jacek Jurkojć, prof. Politechniki Śląskiej
Katedra Biomechatroniki
Wydział Inżynierii Biomedycznej
Politechnika Śląska
ul. Roosevelta 40
41-800 Zabrze
E-mail: Jacek.Jurkojc@polsl.pl

Zabrze, 22.01.2026

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Pauliny Zalewskiej

„Biomechaniczna ocena stawu kolanowego po chirurgicznym odtworzeniu więzadła krzyżowego przedniego”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie uchwały nr 71/2024-2028 Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej z dnia 29 października 2025 roku w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr inż. Paulinie Zalewskiej

2. Informacje o kandydatce do stopnia doktora

Kandydatką do stopnia doktora jest pani mgr inż. Paulina Zalewska. Rozprawa została przygotowana na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Pracę naukową realizowano pod kierunkiem promotora dr. hab. inż. Szczepana Piszczatowskiego, prof. PB oraz promotora pomocniczego dr. n. med. Tomasza Guszczyna.

3. Przedmiot i zawartość rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt.: „Biomechaniczna ocena stawu kolanowego po chirurgicznym odtworzeniu więzadła krzyżowego przedniego”. Praca ma charakter eksperymentalno-badawczy.

Całość rozprawy liczy 223 strony. Na jej strukturę składa się wykaz skrótów i oznaczeń, wstęp, siedem rozdziałów merytorycznych, nienumerowane podsumowanie, spis literatury oraz cztery załączniki. Pracę uzupełniają spisy tabel i rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. W tekście zamieszczono liczne ilustracje, w tym schematy anatomiczne, fotografie stanowiska badawczego oraz

wykresy wyników pomiarowych. Bibliografia wykorzystana do napisania rozprawy obejmuje 309 pozycji.

Treść pracy została podzielona w następujący sposób:

- Wstęp – zawierający wprowadzenie w tematykę biomechaniki stawu kolanowego oraz uzasadnienie podjęcia badań nad nowoczesnymi metodami leczenia ACL.
- Rozdział 1 – opisujący anatomię i biomechanikę stawu kolanowego oraz mechanizmy jego stabilizacji.
- Rozdział 2 – poświęcony budowie, właściwościom i leczeniu więzadła krzyżowego przedniego, w tym charakterystyce metody InternalBrace™.
- Rozdział 3 – stanowiący krytyczną analizę literatury światowej w zakresie kinematyki, pracy mięśni i propriocepcji po odtworzeniu ACL.
- Rozdział 4 – w którym sformułowano cel pracy, jej zakres oraz dwie hipotezy badawcze.
- Rozdział 5 – szczegółowo opisujący metodykę badań własnych, w tym charakterystykę trzech grup uczestników: osób po rekonstrukcji (ACLR – 28 osób), po naprawie (IB – 20 osób) oraz grupy kontrolnej (Z – 25 osób).
- Rozdział 6 – prezentujący wyniki badań w zakresie stabilności statycznej, kinematyki, sił reakcji podłoża, momentów sił w stawach oraz aktywności mięśniowej.
- Rozdział 7 – zawierający szczegółową analizę i dyskusję uzyskanych wyników oraz analizę współzależności pomiędzy mierzonymi wielkościami.
- Podsumowanie – stanowiące syntezę pracy wraz z wnioskami końcowymi i weryfikacją postawionych hipotez.
- Wykaz załączników – obejmujący wzory zgód na udział w badaniu oraz kwestionariusze kliniczne KOOS i IKDC oraz zgodę komisji bioetycznej.

4. Ocena merytoryczna pracy

4.1 Tematyka rozprawy

Głównym problemem badawczym podjętym w rozprawie jest biomechaniczna ocena funkcjonowania stawu kolanowego u pacjentów po chirurgicznym leczeniu zerwanego więzadła krzyżowego przedniego (ACL), ze szczególnym uwzględnieniem porównania tradycyjnej rekonstrukcji z wykorzystaniem przeszczepu (ACLR) oraz metody naprawy więzadła techniką InternalBrace™ (IB).

Na podstawie analizy literatury Autorka wskazała na brak wystarczających doniesień eksperymentalnych potwierdzających skuteczność metody InternalBrace™ w zakresie odtwarzania prawidłowej biomechaniki i propriocepcji stawu. W związku z powyższym sformułowano następujący cel główny rozprawy, jakim jest „Biomechaniczna analiza stawu kolanowego po chirurgicznym odtworzeniu więzadła krzyżowego przedniego”.

Dla realizacji tak postawionego celu określono trzy szczegółowe cele poznawcze, obejmujące:

- ocenę kinematyki i stabilności dynamicznej stawu podczas różnych zadań ruchowych;

- określenie wpływu metody leczenia (rekonstrukcja ACLR vs metoda IB) na parametry biomechaniczne stawu;
- ocenę zmian adaptacyjnych zachodzących w całym narządzie ruchu kończyn dolnych po zabiegu.

Zakres pracy objął analizę teoretyczną zakresu badań, opracowanie autorskiej metodyki eksperymentalnej oraz realizację kompleksowych badań biomechanicznych. Badania te zrealizowano z udziałem 73 uczestników, podzielonych na trzy grupy: pacjentów po rekonstrukcji ACLR (28 osób), pacjentów po naprawie IB (20 osób) oraz zdrową grupę kontrolną Z (25 osób).

Realizacja celów została oparta na rejestracji i analizie następujących danych:

- stabilności statycznej mierzonej przy użyciu rolimetru ręcznego;
- parametrów kinematycznych i kinetycznych (MoCap, siły reakcji podłoża);
- aktywności elektrycznej (EMG) wybranych siedmiu mięśni kończyny dolnej;
- propriocepcji (wykorzystano test czucia pozycji kątowej JPS);
- momentów sił mięśniowych mierzonych w warunkach izokinetycznych przy użyciu dynamometru Biodex.

Pomiary te wykonywano w różnych kombinacjach podczas chodu, zeskoku obunóż z wybiciem, zeskoku ze zmianą kierunku oraz próby równowagi po pokonaniu przeszkody

Zgromadzony materiał badawczy został poddany zaawansowanej obróbce matematycznej w oprogramowaniu Visual3D oraz analizie statystycznej w programie STATISTICA. Całość prac pozwoliła Autorce na kompleksową ocenę poziomu przywrócenia funkcji stawu kolanowego oraz weryfikację postawionych hipotez badawczych dotyczących zmian adaptacyjnych i różnic między metodami operacyjnymi.

4.2 Najważniejsze osiągnięcia pracy

Do najważniejszych osiągnięć badawczych przedstawionej rozprawy doktorskiej należy zaliczyć:

- przeprowadzenie kompleksowej, eksperymentalnej oceny biomechaniki stawu kolanowego u pacjentów leczonych metodą InternalBrace™ w odniesieniu do metody przeszczepu oraz osób zdrowych, co pozwoliło na wypełnienie istotnej luki badawczej w literaturze światowej;
- udowodnienie, że po zabiegu chirurgicznym dochodzi do zmian adaptacyjnych w całym narządzie ruchu, które obejmują nie tylko kończynę operowaną, ale również kończynę nieoperowaną;
- sformułowanie praktycznych wytycznych dla lekarzy ortopedów i fizjoterapeutów, wskazujących na konieczność intensyfikacji treningu siłowego oraz ćwiczeń propriocepcji;
- dostarczenie dowodów naukowych przeciwko traktowaniu kończyny nieoperowanej jako punktu odniesienia przy ocenie postępów leczenia kończyny operowanej, ze względu głęboką adaptację kończyny nieoperowanej do dysfunkcji kończyny kontralateralnej.

5. Uwagi krytyczne i dyskusja materiału naukowego

Uwzględniając znaczny nakład pracy włożonej w realizację rozprawy oraz wysoki poziom merytoryczny przedstawionego opracowania, należy jednocześnie wskazać na kilka kwestii

wymagających doprecyzowania lub uzupełnienia, których wyjaśnienie mogłoby dodatkowo podnieść wartość naukową pracy.

Uwagi zasadnicze

1. Autorka w części metodycznej szczegółowo opisuje sposób rozmieszczenia markerów umożliwiające analizę ruchu całej kończyny dolnej. W części wynikowej nie przedstawiono jednak informacji dotyczących zmian kątowych w pozostałych, poza stawem kolanowym, stawach kończyny dolnej ani zmian ustawienia miednicy. Uzupełnienie tych danych mogłoby pozwolić na pełniejsze zobrazowanie obserwowanych dysfunkcji oraz ewentualnych mechanizmów kompensacyjnych.
2. Warto byłoby rozszerzyć opis metody wyznaczania translacji pomiędzy kością udową a piszczelową lub zweryfikować poprawność zapisu prezentowanych wyników. Wartości zamieszczone w tabeli 7.2 oraz na wykresach zmian wydają się relatywnie wysokie (średnia wartość translacji AP u osób zdrowych wynosi tu niemal 5 cm, a przy uwzględnieniu odchylenia standardowego mogła osiągać około 6 cm). Ponadto użycie określenia „amplituda” (jak w tabeli 7.2) może budzić wątpliwości interpretacyjne, sugerując dwukrotnie większy zakres ruchu.
3. Autorka w analizie wyników uwzględnia istotność statystyczną porównywanych danych. Uzupełnieniem tej analizy mogłoby być odniesienie się do wielkości (siły) efektu, co pozwoliłoby lepiej ocenić znaczenie praktyczne uzyskanych różnic. Wskazanie wielkości efektu dla wyników istotnych statystycznie byłoby w tym kontekście wartościowym dodatkiem.
4. Na stronie 67 przedstawiono wybrane wzory wykorzystywane w obliczeniach. Warto rozważyć ponowne sprawdzenie poprawności zapisu wzoru (5.4).
5. Prosiłbym o szersze uzasadnienie przyjętej metody normalizacji sygnału EMG. Interesujące byłoby odniesienie się do potencjalnego wpływu różnic w technice lądowania, asymetrii ruchowych czy innych czynników na uzyskiwane wyniki, a także wskazanie przykładów zastosowania podobnych metod normalizacji w literaturze naukowej.
6. W metodyce wskazano, że wyniki grupy zdrowej (Z) zostały uśrednione dla obu kończyn. Takie podejście, choć upraszcza analizę statystyczną, uniemożliwia ocenę naturalnej asymetrii występującej u osób zdrowych. Wydaje się też, że warto byłoby rozszerzyć analizy z uwzględnieniem kończyny dominującej i niedominującej zarówno u osób zdrowych, jak i po zabiegu.
7. Autorka wykonuje szereg pomiarów związanych z kinematyką ruchu, reakcjami podłoża czy EMG. Nasuwa się pytanie czemu w analizach wyników dla poszczególnych aktywności ruchowych wybierano tylko część danych pomiarowych. Czemu dla każdej z aktywności nie przeanalizowano wszystkich otrzymanych danych. Na przykład dla zeskoku połączonego z ruchem w bok nie przeprowadzono analizy wyników EMG lub dla obu rodzajów zeskoku nie analizowano reakcji podłoża.

Drobne uwagi merytoryczne i stylistyczne

1. Autorka podczas prowadzenia badań korzystała z zaawansowanych narzędzi (Visual3D, Statistica). W pracy brakuje jednak jasnego wskazania, które skrypty lub modele matematyczne (np. w Visual3D) zostały opracowane osobiście przez Autorkę, a które są standardowymi procedurami dostarczonymi przez producenta oprogramowania.

2. Autorka słusznie zauważa, że wysokie wartości odchylenia standardowego, szczególnie w grupie IB, mogą wpływać na brak istotności statystycznej niektórych różnic. W pracy zabrakło jednak głębszej analizy, czy wynika to ze zróżnicowania ogólnego poziomu sprawności pacjentów, z różnic w przebiegu procesu rehabilitacji poszczególnych osób lub z innych powodów.
3. Badania przeprowadzono u pacjentów minimum 12 miesięcy po zabiegu. W pracy zabrakło choćby pilotażowej oceny pacjentów we wcześniejszych fazach (np. 6 miesięcy po operacji), co pozwoliłoby na ocenę dynamiki procesu powrotu funkcji kinematycznych, proprioceptywnych i siłowych
4. Str. 53 – warto doprecyzować, według jakich kryteriów wybrano 25 osób zdrowych spośród 53 badanych.
5. Czy procedura rehabilitacyjna była jednakowa dla wszystkich pacjentów?
6. Na rys. 5.5 ustawienie kolan po zeskoku może budzić wątpliwości. Czy kontrolowano poprawność techniczną wykonywanych ćwiczeń u osób zdrowych i u pacjentów?
7. Uzupełnieniem pracy mogłaby być fotografia osoby badanej z rozmieszczonymi markerami oraz zestawienie tabelaryczne wielkości pomiarowych poddawanych analizie z zaznaczeniem które wielkości analizowano w których pomiarach.
8. Str. 63 – sformułowanie „Do utworzenia miednicy...” jest niejednoznaczne i wymaga doprecyzowania.
9. Str. 67 – Autorka odwołuje się do „układu współrzędnych danego segmentu (SCS)”, jednak wcześniejszy opis tych układów (ich lokalizacji, orientacji oraz sposobu definiowania) nie został przedstawiony.
10. Na stronie 68 wspomniano o „normalizacji czasowej każdego przebiegu”, jednak brak jest szczegółowego opisu zastosowanej procedury.
11. Str. 73 – w opisie ruchu biernego wskazano, że był on wykonywany „przy pomocy ruchu ramienia dynamometru albo osoby prowadzącej”. Zapis ten wymaga doprecyzowania.
12. Tabela 6.3 – drobna nieścisłość w opisie parametrów.
13. Rys. 6.34 – oznaczenia A, B, C, D wymagają dodatkowego objaśnienia.

6. Wnioski końcowe

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera cenne aspekty poznawcze w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Prace badawcze opisane w pracy zostały zrealizowane na wysokim poziomie naukowym i eksperymentalnym, przy wykorzystaniu zaawansowanej aparatury pomiarowej. Uzyskane wyniki w istotny sposób uzupełniają dotychczasową wiedzę w zakresie biomechaniki stawu kolanowego po zabiegach chirurgicznych, wypełniając lukę badawczą dotyczącą metody InternalBrace™.

Niewątpliwym osiągnięciem recenzowanej rozprawy jest kompleksowe ujęcie stabilności dynamicznej stawu, obejmujące nie tylko parametry kinematyczne i kinetyczne, ale również szczegółową analizę aktywności mięśniowej i propriocepcji. Autorka w sposób przekonujący udowodniła występowanie głębokich zmian adaptacyjnych w całym układzie ruchu, wykazując, że procesy te obejmują również kończynę nieoperowaną, co wskazuje, że należy ostrożnie dokonywać takich porównań u pacjentów podczas oceny postępów prowadzonej rehabilitacji. Zaproponowana

metodyka badań oraz sformułowane na jej podstawie konkluzje mogą stanowić cenne narzędzie wspomagające proces optymalizacji rehabilitacji pacjentów po odtworzeniu więzadła ACL.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pani mgr inż. Pauliny Zalewskiej została przygotowana na wysokim poziomie redakcyjnym i merytorycznym, i spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki, §179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. (Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) stawiane pracom doktorskim. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej o dopuszczenie pani mgr inż. Pauliny Zalewskiej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.