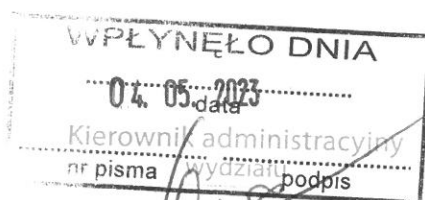


dr hab. inż. Tomasz Klekiel, prof. UZ
Katedra Inżynierii Biomedycznej
Instytut Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Zielonogórski
ul. Licealna 9
65-419 Zielona Góra



mgr Kamila Czerniak

Zielona Góra, 25.04.2023

Recenzja

rozprawy doktorskiej

Pani mgr inż. Martyny Białeckiej

pt. „BIOMECHANICZNA ANALIZA OBCIĄŻEŃ STAWU KOLANOWEGO PODCZAS WYKONYWANIA TESTU IZOKINETYCZNEGO”

Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska mgr inż. Martyny Białeckiej poświęcona jest istotnemu zagadnieniu oceny biomechanicznej stawu kolanowego w tym analizie obciążeń w trakcie badania izokinetycznego z uwzględnieniem sił i momentów sił działających na powierzchnie stawu w trakcie ruchu.

Praca powstała w Zakładzie Mechaniki Technicznej, Instytutu Mechaniki stosowanej, Wydziału Inżynierii Mechanicznej, Politechniki Poznańskiej. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Jacek Buśkiewicz, promotorem pomocniczym jest Pan dr Tomasz Walczak.

Zakres rozprawy

W recenzowanej pracy analizowano obciążenia biomechaniczne w stawie kolanowym podczas testu izokinetycznego. Staw kolanowy, jak wiadomo, jest strukturą złożoną biomechanicznie, a zmienne parametry ruchu wynikające z położenia podudzia względem uda oraz kierunku działania obciążenia, znacznie utrudniają taką analizę. W praktyce klinicznej szeroko stosowane są testy izokinetyczne, dla których stosunkowo łatwo wyznaczyć układ sił działający na staw. Znajomość zmienności sił

i momentów sił w trakcie procesu rehabilitacji były kluczowe dla podjętej w doktoracie tematyki badawczej.

Praca składa się z dwóch części: W pierwszej części rozprawy analizowano momenty sił zginających i prostujących staw kolanowy w czasie ruchu pod obciążeniem na dynamometrze izokinetycznym. W ramach badań opracowano model opisujący przebieg 340 testów izokinetycznych zdrowych stawów, co wykorzystano w dalszej części pracy jako wartości referencyjne względem wyników uzyskanych wśród pacjentów po przebytych urazach w stawie.

Druga część rozprawy dotyczy opracowania i sprawdzenia zindywidualizowanego biomechanicznego modelu stawu służącego do wyznaczenia wartości obciążeń stawu, w tym sił działających na powierzchnie stawowe. Opracowany został model matematyczny stawu kolanowego, wykorzystujący równania kinetostatyki, który posłużył do wyznaczenia poszukiwanych wartości sił występujących w stawie.

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, streszczenia, spisu literatury (104 pozycje), rysunków i tabel.

W rozdziale pierwszym przedstawiono tematykę rozprawy, opisano kluczowe pojęcia i zagadnienia. Wskazano na potrzebę podjęcia przedstawionej tematyki badawczej z perspektywy klinicznej.

W rozdziale drugim opisano aktualny stan wiedzy. Opisano budowę anatomiczną stawu, jego kinematykę oraz zakresy ruchu. Przedstawiono założenia testu izokinetycznego oraz sposób jego przeprowadzania. Przeanalizowano, na podstawie literatury, wartości obciążeń występujących w obrębie stawu kolanowego podczas różnych aktywności ruchowych oraz omówiono typowe modele biomechaniczne opracowane na potrzeby badania obciążeń stawu kolanowego podczas testu izokinetycznego.

W rozdziale trzecim sformułowano cel i zakres pracy.

W rozdziale czwartym dokonano analizy wyników testu izokinetycznego pod kątem wyznaczenia momentów sił mięśniowych działających w stawie. Przedstawiono metodykę badań, Wyniki dla osób bez urazu oraz dla przypadków osób po zabiegu regeneracji łąkotki.

W rozdziale piątym opracowano i oceniono zindywidualizowany osobniczo model biomechaniczny stawu kolanowego. Przedstawiono założenia modelu biomechanicznego, który uwzględnia cechy anatomiczne wynikające z zarysu powierzchni stawowych. Przedstawiono zależności matematyczne służące do wyznaczenia parametrów anatomicznych opracowanego modelu oraz metodykę pomiaru parametrów geometrycznych na podstawie obrazów MRI. Dokonano weryfikacji modelu na bazie modelu Nisella oraz porównano wyniki uzyskane za pomocą autorskiego modelu i modelu Nisella.



W rozdziale szóstym dokonano analizy przebiegu siły piszczelowo – udowej u pacjentów po rekonstrukcji łąkotki w wybranych okresach pooperacyjnych. Dokonano wnikliwej analizy wyników, przedstawiając ogólny proces uzdrawiania i powrotu do pełnej sprawności u pacjentów

W rozdziale siódmym dokonano podsumowania osiągnięć uzyskanych w rozprawie.

Główną motywacją do podjęcia tematu była potrzeba uzupełnienia wiedzy z zakresu przebiegu momentu sił podczas testu izokinetycznego stawu kolanowego i zróżnicowania wyników pod kątem właściwości anatomicznych i osobniczych.

W pracy zdefiniowano następujące zadania badawcze:

1. Opracowanie wzorcowego przebiegu momentu sił mięśniowych podczas testu izokinetycznego.
2. Modyfikacja dwuwymiarowego modelu biomechanicznego stawu kolanowego do szacowania siły piszczelowo-udowej podczas wykonywania testu izokinetycznego, aby uwzględnić indywidualną anatomię badanego.
3. Walidacja opracowanego modelu biomechanicznego stawu kolanowego w celu sprawdzenia, czy wykazuje on istotnie różne wartości siły piszczelowo-udowej w porównaniu z modelem prezentowanym w literaturze.
4. Wykonanie pomiarów parametrów geometrycznych stawu kolanowego na podstawie zdjęć rezonansu magnetycznego.
5. Aproksymacja parametrów geometrycznych stawu kolanowego w modelu obciążeniowym w celu uzależnienia ich od kąta zgięcia stawu kolanowego.
6. Analiza przebiegu siły piszczelowo-udowej w całym zakresie kąta zgięcia stawu u pacjentów po rekonstrukcji łąkotki stawu kolanowego z zastosowaniem membrany kolagenowej.
7. Analiza przydatności modelu do oceny postępów leczenia.

oraz sformułowano tezę:

„Opracowanie wzorcowego przebiegu momentu sił mięśniowych i rozwinięcie dwuwymiarowego modelu mechanicznego stawu kolanowego o indywidualne parametry anatomiczne umożliwi poszerzenie wiedzy na temat obciążeń stawu kolanowego w całym zakresie ruchu podczas testu izokinetycznego.”

Głównym osiągnięciem naukowym rozprawy jest zaproponowanie autorskiego modelu stawu kolanowego uwzględniającego cechy anatomiczne kości, miejsc przyczepów ścięgien a przede

wszystkim dokładnego wyznaczenia kierunków działania głównych sił występujących w stawie podczas ruchu. Wykonano szczegółową analizę obciążeń występujących w stawie, wyznaczając momenty sił mięśniowych dla ruchów prostowania i zgięcia. Wykazano rozwój w zakresie wartości sił mięśniowych wykazując, że proponowany test może być przydatny w ocenie postępów procesu leczenia.

Przyjęto założenia do budowy modelu w tym dane parametryczne, dane zebrane na podstawie analizy obrazów MRI stawu kolanowego. Wyprowadzono równania opisujące stan równowagi kinetostaticznej stawu w danym położeniu kończyny, co umożliwiło szacowanie siły piszczelowo-udowej tylko na podstawie danych standardowo gromadzonych podczas procesu leczenia.

Wykazano, że opracowany model wskazuje na nieznane wcześniej informacje istotne z punktu widzenia prowadzenie terapii. Stosowanie zaproponowanego modelu pozwala wykazać większe wartości szczytowe siły piszczelowo-udowej przy mniejszych kątach zgięcia a co za tym idzie stanowi to istotną informację z punktu widzenia doboru odpowiednich wartości obciążeń i zakresów ruchu podczas kinezyterapii stawu.

Podkreślić należy, że przeprowadzone analizy oparte są o wyniki uzyskane na podstawie badań znacznej liczby pacjentów, wyselekcjonowanych pod względem stanu zdrowia co sprawia że wyniki można uznać za wiarygodne i istotne statystycznie.

Jednym z głównych wniosków pracy jest wykazanie, że test izokinetyczny generuje bardzo duże wartości siły piszczelowo-udowej i powinien być stosowany ze szczególną ostrożnością. Wykazano różnicowanie sił stycznych występujące pomiędzy płciami. U kobiet wykazano większe siły styczne piszczelowo-udowe.

Wykazano również, że decydujący wpływ na poprawność pomiarów mają pomiary geometrii stawu wykonywane z wykorzystaniem obrazowania medycznego MRI. Analizowano różnice anatomiczne w budowie układu szkieletowo – mięśniowego u kobiet i mężczyzn wyjaśniając jakie cechy anatomiczne mają wpływ na wartości sił występujących pomiędzy powierzchniami stawowymi.

Należy uznać, że wszystkie przyjęte w rozprawie zadania badawcze zostały zrealizowane i należycie opisane. Należy podkreślić również fakt, że tekst pracy został starannie napisany i trudno doszukać się jakichkolwiek błędów językowych, edytorskich czy innych niedociągnięć.

Opiniowana praca dotyczy badań aplikacyjnych zastosowania modelu biomechanicznego kolana do oceny diagnostycznej. Autorka swoją pracą twórczo włączyła się w rozwój obiektywnej oceny postępów leczenia urazów stawu kolanowego. W rozprawie skoncentrowano się na ważnych aspektach naukowych, dotyczących prawidłowego opisu czynników wpływających na rozkład sił i momentów sił w stawie kolanowym.

Do najważniejszych osiągnięć niniejszej rozprawy należy:

- wykonanie analizy wartości momentu sił mięśniowych w stawie kolanowym dla zdrowej grypy podczas badania izokinetycznego,
- opracowanie zindywidualizowanego modelu stawu kolanowego z uwzględnieniem wybranych cech anatomicznych.
- analiza danych przebiegu siły piszczelowo-udowej u pacjentów po rekonstrukcji łąkotki w wybranych okresach pooperacyjnych

Całość podjętej tematyki badań Autorka ujęła na 124 stronach maszynopisu. Recenzowana rozprawa mieści się w szeroko pojętej dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna, a w szczególności można ją zaliczyć do nurtu rozwoju współczesnej biomechaniki.

Ocena merytoryczna

Celem ocenianej niniejszej rozprawy doktorskiej jest „*analiza obciążeń stawu kolanowego podczas badania izokinetycznego, w tym wśród osób po operacji stawu kolanowego, z uwzględnieniem zarówno momentów sił mięśniowych jak i sił działających na powierzchni stawu kolanowego*”. Jak zaznaczyła autorka we wprowadzeniu, istnieje wiele różnych modeli biomechanicznych stawu kolanowego, przy czym z uwagi na złożone funkcje stawu, każdy z modeli tworzony jest na indywidualne potrzeby konkretnej analizy. Tak również jest w przypadku ocenianej dysertacji, gdzie staw kolanowy był obiektem badań nad procesem zdrowienia i za pomocą opracowanego modelu oraz zindywidualizowanych modeli szczegółowych, podjęto próbę wyjaśnienia procesu leczenia i analizy przebiegu zmian w rozkładzie i układzie sił towarzyszących temu procesowi.

W rozdziale 2.4 opisano kilka spośród modeli stawu kolanowego, znanych z literatury. Opracowany w pracy model oparto na modelu Nissella, który z uwagi na przyjęcie charakteru izokinetycznego obciążenia wydaje się być wystarczający.

Modele matematyczne układu mięśniowo-szkieletowego są powszechnie stosowane do wyznaczania wewnętrznych sił stawowych. W takich przypadkach realistyczne odwzorowanie geometrii i kinematyki stawów ma kluczowe znaczenie dla dokładnego określenia obciążenia mięśniowo-szkieletowego. Ważnym parametrem biomechanicznym, który jest określony przez geometrię stawu i wpływa na kinematykę i kinetykę mięśni i stawów, jest moment zależy od długości ramienia działania mięśni. Trudność w pomiarze długości ramienia w danej płaszczyźnie polega na dokładnej identyfikacji punktu początkowego lub punktu odniesienia, wokół którego ma miejsce obrót ruchomego segmentu.

Ostatnie postępy w technologii obrazowania umożliwiły pomiar trójwymiarowej kinematyki stawów, choć większość przypadków modelowania stawu kolanowego i badań dynamiki odwrotnej nadal wykorzystuje uproszczone dwuwymiarowe modele biomechaniczne, ze względu na niską złożoność

ruchu tych stawów. Ustalenie chwilowego środka obrotu w stawie jest powszechnie stosowaną metodą ustalenia równowagi kinetostatycznej układu sił, i powszechnie stosowaną, jako standardowa metoda ustalania trajektorii ruchu analizowanej pary kinematycznej.

W praktyce w stawie kolanowym wyznaczanie sił oddziaływania w stawie wykonuje się albo względem chwilowego środka obrotu podczas wyprostu lub zgięcia kolana, albo na podstawie punktu styku powierzchni stawowej kości piszczelowej i udowej. Położenie tych punktów odniesienia można zlokalizować za pomocą różnych technik obrazowania medycznego. Pod tym względem oceniana praca spełnia wymagania związane z przyjęciem prawidłowej metodologii badawczej, powszechnie uznawanej za prawidłową w środowisku naukowym.

Opracowany przez doktorantkę model stawu kolanowego pod względem merytorycznym jest poprawny. Przyjęcie, jako warunku brzegowego, ćwiczeń izokinetycznych sprawia, że w modelu można było pominąć niektóre siły takie jak siły i momenty bezwładności. Nie ujmuje to istotnie jakości zaproponowanego modelu. Uwzględnienie subtelności anatomicznych w modelu w postaci funkcji wielomianowej drugiego rzędu opisującej relację pomiędzy kątem wyprostu, a kątem nachylenia rzepki do osi długiej piszczeli pozwala w pełni opisać zmiany pod warunkiem, że zaproponowane funkcje 5.2.1 5.2.2 prawidłowo odzwierciedlają zebrane dane pomiarowe.

Badania opisane w rozdziale 4 stanowią bazę do porównania wyników dla grupy osób po urazie. Jest to istotny element pracy, gdyż stanowi podstawę do odpowiednich porównań zarówno w tej pracy, jak i w przyszłych badaniach. Metodyka obróbki danych i prezentacji wyników jest prawidłowa, a wnioski sformułowane w podsumowaniu wykazują wyraźne różnice pomiędzy grupą po urazie a grupą referencyjną.

W podrozdziale 5.6 przedstawiono dokładną metodologię przeprowadzenia walidacji opracowanego modelu. Należy podkreślić, że wyniki zostały ocenione pod kątem statystycznym. Analiza sił dla opracowanego modelu i modelu Nisella przeprowadzona została poprawnie pod względem merytorycznym.

Rozdział 6 stanowi kwintesencję pracy, gdyż wyjaśnia w jakim celu powstały model został opracowany. Badania przeprowadzone na przestrzeni 24 miesięcy wykazały wyraźne zmiany w sile piszczelowo-udowej wskazując, jako szczególnie ważne, zmiany w wartościach siły stycznej.

Zarówno zaplanowanie poszczególnych eksperymentów, przeprowadzone badań, ocena zebranych wyników i wyciągnięte wnioski wskazują na wysokie przygotowanie doktorantki do samodzielnego prowadzenia badań. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy na temat procesu powrotu do pełnej sprawności stawu kolanowego. Rozwinięcie znanego modelu przez doktorantkę pozwoliło wskazać istotne zmiany w wartościach występujących sił.

Uwagi krytyczne

Na podstawie szczegółowej analizy ocenianej rozprawy sformułowano następujące uwagi krytyczne:

1. Opracowany model nie jest uniwersalny. Został opracowany dla wyprostu. Nie ma możliwości analizy ruchu zgięcia, gdyż nie uwzględnia wszystkich ważnych grup mięśniowych występujących w otoczeniu stawu kolannowego.
2. Model nie uwzględnia siły odśrodkowej wynikającej z ruchu obrotowego kończyny.
3. Wyrażenia 5.2.1 i 5.2.2, stanowią istotę dla opracowanego modelu i powstały na bazie danych zgromadzonych źródłach innych autorów. Powstaje wątpliwość czy na podstawie tak uzyskanych danych można było uzyskać dokładny model.
4. Dla wyrażeń 5.2.1, 5.2.2 oraz 5.2.3 nie przeprowadzono analizy błędów. Zatem nie wiadomo czy różnice pomiędzy zaproponowanym modelem a modelem Nisella nie wynika z dokładności pomiaru kątów.
5. Przytaczane w pracy wzory nie posiadają pełnego opisu zastosowanych symboli, i aby zrozumieć dane wyrażenie należy potrzebnych opisów symboli wyszukiwać i wyławiać z tekstu. Praca nie zawiera także spisu symboli, co znacznie utrudnia analizę tych wyrażeń.
6. Tabela 4.3.1 wskazuje na to, że ostatecznie wśród mężczyzn w dniu operacji było 17 pacjentów, po 6 miesiącach było ich 10 a po 24 miesiącach grupa badawcza stanowiła już tylko 6 osób. Dodatkowo zwykle w kolejnych miesiącach w badaniach nie brały udziału te same osoby. Wśród kobiet z 7 osób dla których były badania w dniu operacji, po 24 miesiącach badaniu poddano zaledwie 3. Nigdzie w pracy dostatecznie nie wyjaśniono czy taka grupa badawcza pozwala na wiarygodne wnioski dotyczące postępu procesu leczenia
7. Wiele spośród tabel tj. 4.3.2, 4.3.3 i wykresów tj. 4.3.1 nie zawiera bezpośrednio w tekście żadnego szczegółowego odniesienia. Można by te tabele umieścić w załącznikach.
8. Nie wyjaśniono dlaczego zestawione w tabeli 4.3.5 parametry: niektóre nie różnią się istotnie, a niektóre jak np. kąt theta jest mniejszy o ok. 40% dla przebiegu referencyjnego w stosunku do osób operowanych.
9. Trudno zrozumieć dlaczego w tabeli 4.3.1 jest inna liczba pacjentów niż liczba n w tabeli 4.3.5. dla poszczególnych grup badanych. Zasadniczo nie wyjaśniono nigdzie, co oznacza liczba n a jedynie można próbować się domyślać – być może mylnie.
10. Opisany w rozdziale 5 przebieg pomiarów wykonanych na obrazach MRI jest mało czytelny. Z uwagi na to, że nie sprecyzowano jasno jaki jest cel tych pomiarów, trudno jest ustalić czy postępowanie jest prawidłowe. Brak oznaczeń na rysunkach (np. w kroku 4 t AP) uniemożliwia prawidłowe zrozumienie opisanego postępowania.
11. Brakuje jakiegokolwiek próby oceny błędów zaproponowanej w rozdziale 5.5 metody pomiaru.
12. W tekście pracy nie odniesiono się do wszystkich pozycji tabeli 6.3.1 i nie ma powodu, aby nie umieścić tej tabeli w załączniku dla zwiększenia czytelności pracy.

13. Przebiegi przedstawione na poszczególnych wykresach rys 6.2.2, 6.2.3 6.2.4 nie zostały należycie skomentowane. Nie przeanalizowano powodów, dla których wystąpiły zmiany udziału sił stycznych. Niedostatecznie skomentowano fakt, jak ta zauważona prawidłowość może wpłynąć na przebieg procesu zdrowienia.
14. Przegląd literatury nie zawiera np. opisu modeli przestrzennych. Nie podano nigdzie w pracy, że takie modele istnieją. Być może zastosowanie bardziej zaawansowanych obliczeniowo modeli lepiej mogłoby scharakteryzować opisane w pracy zjawiska.
15. Nie wystarczająco mocno udokumentowano i uargumentowano wyższość opracowanego modelu na modelem Nisella, pod kątem oceny biomechanicznej czy diagnostycznej stawu kolanowego.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pomimo przedstawionych uwag, jest wartościowym i oryginalnym opracowaniem naukowym. Przyjęta metodyka badawcza jak i przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że Doktorantka biegle porusza się w swojej tematyce badawczej. Podjęte zostały właściwe decyzje podczas wyboru planu badawczego czy opracowywania modelu biomechanicznego stawu kolanowego.

Za najważniejsze osiągnięcia Autorki należy uznać:

1. Opracowanie modelu biomechanicznego stawu kolanowego
2. Przeprowadzenie analizy porównawczej opracowanego modelu
3. Przeprowadzenie badań o charakterze diagnostycznym z wykorzystaniem opracowanego modelu

W dorobku publikacyjnym nie odnaleziono istotnych prac, które miałyby bezpośredni związek z ocenianą rozprawą. W dorobku odnaleźć można jedną pozycję w postaci rozdziału monografii pokonferencyjnej konferencji Biomechanics, której głównym autorem jest doktorantka. Na uwagę zasługuje fakt, że jest kilka prac wieloautorskich, w których jako współautor, występuje zarówno doktorantka jak i promotor pomocniczy.

Zgodnie z obowiązującą ustawą o szkolnictwie wyższym, wymogiem formalnym do ubiegania się o tytuł doktora nauk technicznych jest minimum jedna publikacja lub monografia i doktorantka spełnia to kryterium. Podsumowując należy uznać na podstawie oceny rozprawy oraz dotychczasowego dorobku, że doktorantka prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w tym oryginalne

rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej i społecznej.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Martynty Białeckiej pt: „Biomechaniczna analiza obciążeń stawu kolanowego podczas wykonywania testu izokinetycznego” spełnia warunki ujęte w art. 13. Ust I ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. z 2017r poz. 1789) oraz art. 179 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. poz. 1669). Na podstawie dokonanej oceny, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pani Martynty Białeckiej do dalszych etapów postępowania przewidzianych dla przewodów doktorskich oraz dopuszczenia ocenionej pracy do publicznej obrony.

Tomasz Kleklich

